UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica

Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa

Orientador: Prof. Dr. João Antônio de Vasconcelos (DEE/UFMG)

Área de Concentração: Sistemas de Computação e Telecomunicações
Linha de Pesquisa: Otimização

Belo Horizonte – MG

18 de dezembro de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica

Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa

Tese submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção de título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Prof. Dr. João Antônio de Vasconcelos (Orientador) – DEE/UFMG
Prof. Dr. Leandro Ramos de Araújo – DEE/UFJF
Prof. Dr. Nelson Kagan – PEA/USP
Profa. Dra. Wadaed Uturbey da Costa – DEE/UFMG
Dr. Adriano Chaves Lisboa – PPGEE/UFMG

Barbosa, Carlos Henrique Nogueira de Resende.
B238r Reconfiguração e restauração ótima de sistemas de distribuição primária de energia elétrica [manuscrito] / Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa. – 2012.
xvii, 133 f., enc. : il.

Orientador: João Antônio de Vasconcelos.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f.124-133.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Confiabilidade (Engenharia) – Teses. 3. Energia elétrica - Distribuição – teses. I. Vasconcelos, João Antônio de. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado força, perseverança, tranquilidade e confiança necessárias à realização desse trabalho.

Ao meu orientador Professor João Antônio, pelo incansável acompanhamento dos trabalhos, pelos conselhos, pela cobrança e pelas intervenções em boa hora.

Aos membros da banca examinadora que tão gentil e prontamente aceitaram o convite.

Aos meus companheiros de Doutorado que estiveram comigo desde o início dessa jornada, Marcus Henrique Mendes e João Batista Mendes.

Aos meus parceiros de trabalho, Marcus e Rafael. Agradeço a valiosa colaboração.

A todos os meus companheiros do Laboratório de Computação Evolucionária, pela colaboração e dedicação, fundamentais para o sucesso dos trabalhos. Especial agradecimento aos alunos Tiago Silveira, Ricardo Ribeiro, Mateus Antunes, Bernardo Silva, Gabriel Salgado, Alysson Guimarães e Bruno Aquino.

À minha esposa Luciana Ribeiro, pela convivência, cumplicidade, compreensão, apoio e carinho.

À minha mãe, pelos ensinamentos e valores, pelo amor e pelas orações.

Ao grande amigo Glauco Ferreira Yared, pelo companheirismo, pelas longas conversas e incansável otimismo.

Aos professores Dr. João Luiz Martins e Dr. Marcone Jamilson Freitas Souza, pela confiança depositada em mim e pelo apoio concedido em momento ímpar, sem o qual teria sido muito mais difícil a realização desse trabalho.

Aos colegas do Instituto de Ciências Exatas e Aplicada (ICEA/UFOP) pelo suporte técnico e administrativo.

À Universidade Federal de Ouro Preto que me acolheu tão bem como profissional dessa instituição secular.

À CAPES, pela concessão de uma bolsa de estudo com duração de 24 meses.

Aos demais órgãos de fomento FAPEMIG e CNPq, pelo apoio financeiro complementar.

A todas as pessoas que de um modo ou de outro estiveram envolvidas nesta jornada, meu muito obrigado.

Agradecimento Especial

À CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. e ANEEL pelo apoio técnico e financeiro durante o desenvolvimento desse trabalho, o qual esteve vinculado ao P&D D 317 “Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Auto-Reconfiguráveis: Contingenciamento e Otimização”.

...O mestre disse a um dos seus alunos: Tu, queres saber em que consiste o conhecimento?
Consiste em ter consciência tanto de conhecer uma coisa quanto de não a conhecer.

Este é o conhecimento...

(Confúcio)

Resumo

A alteração inteligente da configuração de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica tem exercido um papel fundamental diante das exigências cada vez maiores impostas pela agência reguladora do setor e governo, pela concorrência e pelos próprios consumidores às concessionárias de energia. Nesse contexto, as empresas do setor elétrico buscam aliar os fatores técnicos e econômicos, a qualidade de serviço, a segurança, dentre outros aspectos. O problema combinatorial de identificação de configurações de rede ótimas tem sido um tema de pesquisa investigado há pelo menos cinquenta anos, mas oportunidades de melhoria ainda podem ser vislumbradas. Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia de abordagem para os problemas de reconfiguração e restauração que soluciona tanto os alimentadores da literatura quanto os mais complexos (reais), radiais trifásicos e desequilibrados, com abordagem multiobjetivo e com requisitos de tempo real. As soluções obtidas garantem condições ótimas ou quase ótimas de operação do sistema elétrico avaliado. Na reconfiguração, a solução maximiza o compromisso entre a energia disponível e a demanda no sistema considerando as perdas técnicas, uniformiza a distribuição do carregamento, minimiza o desvio de tensão nas barras, dentre outros objetivos e, em consequência, promove melhores condições operativas da rede. Na restauração, prioriza-se a configuração de rede que possa ser realizada no menor tempo possível, com reenergização do maior número de cargas sem sobrecargas, similar à configuração pré-falta e orientada à disponibilidade de estruturas de redundância. De maneira complementar, as especificações técnico-operacionais não podem ser violadas nos problemas de reconfiguração e restauração. Buscou-se aprimorar tanto a técnica de sondagem do espaço de busca do problema quanto o procedimento de avaliação da configuração por cálculo do fluxo de potência. Uma lógica de sequenciamento de manobras foi usada para assegurar minimamente a viabilidade da solução encontrada, assim como um processo de tomada de decisão foi usado para classificar as soluções eficientes de acordo com as preferências do usuário. Os resultados dos experimentos para cinco sistemas de teste constataram que as contribuições são promissoras na identificação dos ótimos associados a sistemas de pequeno e médio porte, dotados de um ou mais alimentadores. Comparações com resultados disponíveis na literatura validaram as simulações. Em alguns casos, como o do alimentador de 70 barras, foi possível encontrar uma solução ótima superior àquela até então publicada em artigos.

Palavras-chave: Sistemas de Distribuição, Reconfiguração, Restauração, Otimização Multiobjetivo, Confiabilidade.

Abstract

Smart reconfiguration on Electric Power Primary Distribution Systems has been playing a key role in enabling power utilities to comply with the ever increasing requirements imposed by the regulatory agency and government, the deregulated market, and consumers. By these circumstances, power utilities must search for a tradeoff among technical and economic factors, quality of service, security, to name a few aspects. The combinatorial problem of identifying optimal network configurations has been investigated for fifty years at least, but opportunities for improvements can still be envisioned. Particularly in this work, a methodology to tackle reconfiguration and restoration problems for three-phase unbalanced radial feeders using a multiobjective approach with real-time requirements was developed. Achieved solutions ensure the optimal or near-optimal operating conditions to the electrical system evaluated. On the reconfiguration problem, the solution is aimed at the best compromise between available energy and demand plus power losses, the best loading distribution, the flattest voltage profile, among other criteria, as well as it prioritizes safer configurations in terms of operating conditions. On restoration, priority is given to the network configuration able to be carried out in the shortest time, reenergyzing the maximum number of loads without causing overloads, being much similar to the pre-fault configuration and oriented to service availability and redundant equipment. Complementarily, technical or operational constraints may not be violated. Both the sharp searching process for feasible space and the network configuration assessment by means of power flow calculation were addressed. A reasoning scheme for maneuvering sequence was devised to minimally ensure safety and feasibility of the solution and a decision-making procedure was used to classify efficient solutions according to user preferences. Results from computational experiments found for five systems showed that the proposed improvements are effective as well as promising in identifying the optimal configurations in small and medium size, single or many-feeder systems. Comparisons made to other published simulation results were carried out. In some cases, as the 70-bus test system, a better solution than the previous known in the literature was found.

Keywords: Power Distribution Systems, Reconfiguration, Restoration, Multi-objective Optimization, Reliability.

Contribuições

Publicações

BARBOSA, C. H. N. R.; CAMINHAS, W. M.; VASCONCELOS, J. A. Adaptive Technique to Solve Multi-objective Feeder Reconfiguration Problem in Real Time Context. LNCS Evolutionary Multi-Criterion Optimization 2011. Ouro Preto: Lecture Notes in Computer Science. v. 6576, p. 418-432, 2011.

BARBOSA, C. H. N. R.; RIBEIRO, R. S.; VASCONCELOS, J. E. O.; SILVA, M. G.; SILVEIRA, T. A. G.; CUNHA, T. B. ; PEREIRA, E. C.; VASCONCELOS, J. A.. Reconfiguração Autônoma de Sistemas Primários de Distribuição de Energia Elétrica. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012, Goiânia. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Goiânia: UFG, 2012. v. 4. p. 1-6.

REIS, B. F. S.; SALGADO, G. C.; LEITE, M. A. O.; BARBOSA, C. H. N. R.; PEREIRA, E. C.; VASCONCELOS, J. A.. Representação Eficiente de Soluções Para o Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Primária. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. XIX Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande: UFCG, 2012. p. 1-8.

RIBEIRO, R. S.; COELHO, J. N.; BARBOSA, C. H. N. R.; PEREIRA, E. C.; VASCONCELOS, J. A.. Avaliação de Técnicas de Análise de Reguladores de Tensão para Métodos Iterativos de Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição Primária. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. XIX Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande: UFCG, 2012. p. 1-7.

SILVEIRA, T. A. G.; LEITE, M. A. O.; BARBOSA, C. H. N. R.; PEREIRA, E. C.; VASCONCELOS, J. A.. Estudo do Tratamento de Restrições Críticas e Não-Críticas no Problema de Reconfiguração em Sistemas de Distribuição Primária. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. XIX Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande: UFCG, 2012. p. 1-8.

BARBOSA, C. H. N. R.; ALEXANDRE, R. F.; VASCONCELOS, J. A. A Practical Codification and Its Analysis for the Generalized Reconfiguration Problem. Electric Power Systems Research (97), 2013: 19-33. (submetido em maio/2012).

Algoritmos

- ARC (Algoritmo Rotulador Construtivo), detalhado no Capítulo 3.
- EA-DFR (Evolutionary Algorithm for Distribution Feeder Reconfiguration), detalhado no Capítulo 3.
- MMOPBIL (Multilevel Multiobjective Population Based Incremental Learning), detalhado no Capítulo 3.
- SIN-TBA (Sistema de Inferência Nebulosa para Tensão em Barras de Alimentadores), detalhado no Capítulo 4.
- IMOEA-DFR (Interval Multiobjective Evolutionary Algorithm for Distribution Feeder Reconfiguration), detalhado no Capítulo 5.

Outras Contribuições

O trabalho descrito é pioneiro, no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, ao lidar com o problema de otimização da configuração de sistemas de distribuição aliada à operação dos mesmos.

Lista de Abreviaturas

AE – Algoritmo Evolutivo

AG – Algoritmo Genético

AHP – Processo Hierárquico Analítico

AI – Análise Intervalar, Aritmética Intervalar

ANFIS – Sistema de Inferência Neuro-Nebuloso Artificial

ARC – Algoritmo Rotulador Construtivo

BD – Banco de Dados

BFS – Busca em Largura (*Breadth-First Search*)

CCOD - Centro de Controle e Operação da Distribuição

CORP – Condições Operacionais para Regime Permanente

DC – Diagrama de Ciclos

DFS – Busca em Profundidade (*Depth-Node Search*)

EDA – Algoritmo de Estimativa de Distribuição

EENS – Energia Elétrica não Suprida

EN – Estimativa Nebulosa

EQM – Erro Quadrático Médio

FMCE – Avaliação Multiobjetivo Nebulosa

FPO – Fronteira Pareto-ótima

GES – Grafo Equivalente do SDPEE

GRA – Análise Relacional de Grey

HCF – Heurística de Detecção de Ciclos Fundamentais

MC – Matriz de Comparações

MFP – Método de Fluxo de Potência

MOEA – Algoritmo Evolucionário Multi-Objetivo

MVRD – Método de Varredura Reversa/Direta

NA – Chave Normalmente Aberta

NF – Chave Normalmente Fechada

NFN – Rede *Neo-Fuzzy Neuron*

NPP – Nó Provedor de Potência

PMR – Plano de Manobras Realizável

PMX – Partially Matched Crossover

POMR – Problema de Otimização Multiobjetivo Robusto

PSOM – Problema do Sequenciamento Ótimo de Manobras

RCP – Repositório de Configurações Promissoras

SE – Subestação

SDPEE – Sistema de Distribuição Primária de Energia Elétrica

ToD – Tomada de Decisão

Nomenclatura

$\boldsymbol{\Gamma}$	Conjunto de todas as configurações de rede realizáveis em um SDPEE.	$\boldsymbol{\Psi}$	Conjunto das linhas de distribuição sem chaves ou com chaves fechadas inoperantes.
$\boldsymbol{R}$	Conjunto dos NPPs do sistema.	$\boldsymbol{\Omega}$	Conjunto das linhas de distribuição que tem chaves operacionais.
$\boldsymbol{B}$	Conjunto das barras do SDPEE, incluindo-se os NPPs ($\boldsymbol{R} \subset \boldsymbol{B}$).	$\boldsymbol{\tau}^c$	Conjunto das linhas energizadas para uma dada configuração c.
$\boldsymbol{L}$	Conjunto das linhas de distribuição no SDPEE.	$\bar{\boldsymbol{\tau}}^c$	Conjunto das linhas desenergizadas para uma dada configuração c.
$\boldsymbol{W}$	Conjunto dos dispositivos chaveáveis e operacionais no SDPEE.	$\boldsymbol{Z}$	Conjunto dos transformadores do SDPEE.
$\boldsymbol{\omega}^c$	Vetor de índices referentes às chaves fechadas para uma dada configuração.	$\bar{\boldsymbol{\omega}}^c$	Vetor de índices referentes às chaves abertas para uma dada configuração.
$\boldsymbol{M_a}$	Conjunto das chaves telecomandadas ou automáticas a serem manobradas em um PMR ($\boldsymbol{M_a} \subseteq \boldsymbol{M}^c$).	$\boldsymbol{K}^c$	Conjunto de todos os PMRs referentes à configuração final c, obtidos após resolver o PSOM.
$\boldsymbol{M}^c$	Conjunto das chaves a serem manobradas na execução de um PMR para obter c.	$\boldsymbol{M_m}$	Conjunto das chaves manuais a serem manobradas em um PMR ($\boldsymbol{M_m} \subseteq \boldsymbol{M}^c$).
$\boldsymbol{\Delta}_r^c$	Conjunto das barras energizadas pelo NPP r na configuração de rede c.	$\boldsymbol{\Gamma}^{int}$	Espaço viável para o contexto intervalar.
$\boldsymbol{\nabla}_i^c$	Conjunto das linhas à jusante da linha i na configuração de rede c.	$\boldsymbol{\mathcal{F}}^{\#1}$	Conjunto das soluções da Fronteira Pareto.
$\boldsymbol{\Upsilon}(t)$	Conjunto das barras energizadas no SDPEE no instante de tempo t.	$\mathbf{X}$	Conjunto das variáveis de otimização.
$\mathcal{F}_c$	A c-ésima configuração do conjunto $\boldsymbol{\Gamma}$.	$\mathbf{V}$	Universo do discurso.
N_C	Quantidade de configurações realizáveis.	$\mathbf{P}$	Conjunto das incertezas.
N_R	Quantidade de NPPs no sistema.	$\mathbb{R}$	Conjunto dos números reais.
N_B	Tamanho do conjunto $\boldsymbol{B}$.	$\Im$	Conjunto dos números imaginários.
N_L	Quantidade de linhas de distribuição do SDPEE.	$\mathbb{IR}$	Conjunto dos intervalos reais.
N_W	Quantidade de dispositivos chaveáveis operacionais no SDPEE.	V_k	Módulo da tensão na k-ésima barra.
N_T	Quantidade de transformadores no SDPEE.	θ_k	Ângulo da tensão na k-ésima barra.

N_O	Número de ciclos fundamentais em um SDPEE.
N_A	Quantidade total de árvores válidas (igual ao número de NPPs).
N_{PM}	Quantidade admissível de PMRs.
N_p	Quantidade de parâmetros de incerteza.
n_{obj}	Número de objetivos da função a ser otimizada.
$\boldsymbol{L}_K$	Matriz Laplaciana.
sw_q^c	Estado do q-ésimo dispositivo chaveável na configuração c: aberto (0) ou fechado (1).
sw_q^0	Estado do q-ésimo dispositivo chaveável na configuração inicial.
c	Iterador de configurações de rede viáveis.
k	Iterador de barras que indexa um elemento do conjunto $\boldsymbol{B}$.
i, l	Iterador de linhas que indexa um elemento do conjunto $\boldsymbol{L}$.
q	Iterador de dispositivos chaveáveis que indexa um elemento do conjunto $\boldsymbol{W}$ ou M^c.
z	Iterador de transformadores que indexa um elemento do conjunto $\boldsymbol{Z}$.
m	Índice que se refere a uma das manobras de $\boldsymbol{M}^c$.
h	Refere-se a um PMR do conjunto $\boldsymbol{K}^c$.
it	Iterador de gerações.
n_{eval}	Quantidade de avaliações realizadas em uma execução do AE.
$nger_{max}$	Número máximo de gerações para a execução do AE.
$Npop$	Tamanho da população adotado pelo AE.
cr	Valor da taxa de cruzamento no AE.
mr	Valor da taxa de mutação no AE.
T_q^{prox}	Identificação da equipe de campo mais próxima da manobra $q \in \boldsymbol{M_m}$ que esteja disponível para a operação.
$[\mathrm{a}]$	Número intervalar.
$[\mathbf{a}]$	Vetor intervalar.
$\mathbf{a}^+$	Limite superior do vetor intervalar.
$\mathbf{a}^-$	Limite inferior do vetor intervalar.
$\boldsymbol{p}$	Vetor dos parâmetros de incertezas.

V_k^{nom}	Valor nominal da tensão na k-ésima barra.
V_k^{min}	Módulo mínimo da tensão admissível na k-ésima barra.
V_k^{max}	Módulo máximo da tensão admissível na k-ésima barra.
I_i	Fluxo de corrente na i-ésima linha.
I_i^{max}	Fluxo de corrente admissível na i-ésima linha.
Q_r^{min}	Valor mínimo admitido de potência reativa na r-ésima barra.
Q_r^{max}	Valor máximo admitido de potência reativa na r-ésima barra.
S_r^{max}	Potência total disponível no r-ésimo NPP.
P_k	Parcela real da potência demandada na k-ésima barra.
Q_k	Parcela reativa da potência demandada na k-ésima barra.
S_k	Potência aparente (complexa) injetada ou absorvida na k-ésima barra.
P_k^{jus}	Potência ativa acumulada para as barras à jusante.
Q_k^{jus}	Potência reativa acumulada para as barras à jusante.
P_{k_1,k_2}	Fluxo de potência real entre as barras k_1 e k_2.
Q_{k_1,k_2}	Fluxo de potência reativa entre as barras k_1 e k_2.
Z_i	Impedância longitudinal (série) da i-ésima linha.
g_i	Condutância longitudinal (série) da i-ésima linha de distribuição.
b_i	Susceptância longitudinal da i-ésima linha de distribuição.
b_i^{sh}	Susceptância paralela da i-ésima linha de distribuição.
PL	Perda de potência ativa total da linha.
QL	Potência reativa total da linha.
O_k	Prioridade da k-ésima barra.
C_m, C_a	Pesos que indicam custos para manobra manual e telecomandada.
α, β, γ	Fatores de ponderação definidos para o intervalo $[0,1]$.
$\boldsymbol{f}$	Vetor de funções objetivo.
$\boldsymbol{g}$	Vetor das restrições de desigualdade.
$\boldsymbol{h}$	Vetor das restrições de igualdade.

Designadores, Operadores e Funções Matemáticas

$\{\cdot\}$	Designador de conjunto.
$[\cdot]$	Designador de intervalo.
j	Designador de número imaginário.
$p.u.$	Designador de por unidade.
$Re(v)$	Componente real do complexo v.
$Im(v)$	Componente imaginário do complexo v.
$\|v\|$	Módulo de v.
$(v)^*$	Conjugado de v.
$(v)^T$	Transposto de um vetor ou matriz v.
$\|\boldsymbol{v}\|, \|\bar{v}\|$	Cardinalidade de um conjunto $\boldsymbol{v}$ ou comprimento de um vetor $\bar{v}$.
$v!$	Operador para o fatorial de v.
$\lfloor v \rfloor$	Função piso para o argumento v.
$\lceil v \rceil$	Função teto para o argumento v.
$max(\boldsymbol{v})$	Função que retorna o valor máximo de um conjunto de valores $\boldsymbol{v}$.
$\vartheta(k, \boldsymbol{sw}^c)$	Função booleana que indica se a barra k encontra-se energizada ($\vartheta = 1$) ou não ($\vartheta = 0$), conforme os estados das N_W chaves na configuração c.
$\eta(k, r, \boldsymbol{sw}^c)$	Função booleana que indica se a barra k é energizada pelo NPP r ($\eta = 1$) ou não ($\eta = 0$), conforme os estados das N_W chaves na configuração c.
$pos(v)$	Função que retorna as coordenadas espaciais do elemento v.
$grc(n, G)$	Função que identifica o grau de conexão de um dado nó n de um grafo G.
$pred(v)$	Função que designa a barra predecessora de v.
$suc(v)$	Função que designa o conjunto de barras sucessoras de v.
$ard(v)$	Função que arrendonda o argumento v para o valor inteiro mais próximo.

Conceitos, Definições e Termos

Algoritmo Evolutivo (AE): classe de técnicas estocásticas que, baseada nos fundamentos da teoria da seleção natural proposta pelo naturalista britânico Charles Robert Darwin, busca resolver problemas de otimização mono e multiobjetivo.

Multi-Objective Evolutionary Algorithm (MOEA): subclasse dos algoritmos AEs e, portanto, bioinspirados, cuja competência é resolver problemas multiobjetivo.

Cromossomo: termo metafórico para se referir à estrutura de dados que contém as variáveis de otimização do problema. Cada cromossomo representa uma possível solução do problema a ser avaliada e modificada (evoluída) pelo AE. No texto, os termos indivíduo e cromossomo são utilizados de maneira indistinta.

Barra: estrutura física comum que corresponde ao ponto elétrico de conexão das cargas consumidoras ou a uma derivação.

Carga: elemento que drena energia e conecta-se a uma barra diretamente ou por intermédio de um transformador.

Valor de mérito ou aptidão: mais conhecido como *fitness*, esse valor indica o quão adequada é uma configuração de rede em relação aos objetivos do problema de otimização para a restauração ou para a reconfiguração.

Sistema de Distribuição Primária de Energia Elétrica (SDPEE): termo usado para se referir ao conjunto dos alimentadores e demais estruturas que fazem parte da etapa de distribuição de um SEP no nível de tensão entre 4 kV e 35 kV.

Topologia: padrão que descreve o modo de arranjo das interconexões físicas entre as barras. Alguns exemplos de topologia são: árvore ou radial, estrela (caso particular da topologia radial), circular ou anel, linear, reticulada ou malhada, etc.

Configuração: um dos possíveis arranjos de interconexão entre as barras de um sistema que exibe um padrão topológico específico. Portanto, um SDPEE de topologia radial, pode operar com uma das várias configurações possíveis.

Ciclo: é um trajeto em um grafo que passa necessariamente por arestas distintas cujos nós inicial e final são coincidentes.

Ciclo Fundamental: faz parte de um conjunto mínimo de ciclos únicos identificados em um Grafo Equivalente do SDPEE. Todo e qualquer trecho do grafo original que pertence a um ciclo identificável deve estar contemplado obrigatoriamente em pelo menos um desses ciclos fundamentais.

Floresta: termo que se refere a um conjunto de árvores. No contexto do trabalho, uma árvore equivale topologicamente a um alimentador.

Matriz de Incidência: matriz bidimensional que representa numericamente as interconexões em um Grafo Equivalente do SDPEE.

Alimentador: estrutura ramificada composta por linhas de distribuição e pontos de conexão de cargas ou derivação (barras), responsável pelo encaminhamento da energia aos consumidores primários e transformadores de distribuição em um perímetro urbano ou rural. No meio técnico, há divergências em relação à delimitação das estruturas que compõem um alimentador. Uma definição considera apenas o tronco principal no qual flui grande parte da corrente. Outra definição acrescenta ainda as ramificações primárias derivadas desse tronco.

Nó: é um elemento de representação para grafos que equivale à barra no sistema de distribuição.

Nó Provedor de Potência (NPP): refere-se à barra com tensão controlada, vinculado diretamente à subestação e, portanto, localizado na "cabeça" do alimentador de onde provém a maior parcela da potência injetada no sistema. Assim sendo, cada alimentador está associado a um NPP.

Chave NA: equivale ao dispositivo de chaveamento que opera em situações de transferência de carga ou em casos de anomalias (sobrecargas, interrupções, etc.). Também referenciada na literatura por chave de interconexão, chave de socorro ou *tie switch*. Na prática, um alimentador é projetado para operar em condições normais em uma configuração na qual as chaves do tipo NA permanecem abertas.

Chave NF: equivale ao dispositivo de chaveamento que se encontra normalmente ao longo do caminho preferencial da energia. Na prática, um alimentador é projetado para operar em condições normais em uma configuração na qual as chaves do tipo NF permanecem fechadas. Também referenciada na literatura por chave seccionadora ou *sectionalizing switch*.

Disjuntor: dispositivo de proteção (*breaker*) que serve primariamente para isolar um trecho ou todo o alimentador na ocorrência de uma sobrecarga. Diferentemente dos religadores, os disjuntores não possuem circuitos de controle.

Religador: dispositivo de proteção (*recloser*) que pode ser usado, alternativamente, para fins de manobra. A sua instalação em postes ao longo das redes de distribuição aéreas tem sido crescente.

Contingência: eventualidade ou fato possível, mas incerto, ou seja, que pode ou não suceder.

Blecaute: interrupção do suprimento de energia elétrica em uma determinada área do sistema de distribuição.

SDPEE de pequeno porte: sistema que possui um número de barras não superior a uma dezena.

SDPEE de médio porte: sistema que possui de algumas dezenas de barras a uma centena delas.

SDPEE de grande porte: sistema com cem barras ou mais.

Sumário

1 - Apresentação, Descrição e Contextualização do Problema 1

1.1 Introdução 1

1.2 Principais Componentes de um Sistema de Distribuição Primária 2

1.3 Importância de se estudar o problema 2

1.4 Contribuições do trabalho 3

1.5 Organização da Tese 4

2 - Formulação Matemática dos Problemas de Reconfiguração e Restauração 5

2.1 Introdução 5

2.2 Abordagem do Problema de Reconfiguração (PRec-SDPEE) 6

2.2.1 Definição de Reconfiguração de SDPEE 6

2.2.2 Formulação Matemática para o PRec-SDPEE Multiobjetivo Restrito 6

2.2.3 Objetivos 6

2.2.4 Restrições de Igualdade e Desigualdade 8

2.3 Abordagem do Problema de Restauração (PRes-SDPEE) 10

2.3.1 Definição de Restauração de SDPEE 10

2.3.2 Formulação Matemática para o PRes-SDPEE Multiobjetivo Restrito 10

2.3.3 Objetivos 11

2.3.4 Restrições de Igualdade e Desigualdade 14

2.4 Radialização em Sistemas de Distribuição Primária 15

2.5 Propriedades do Espaço de Busca 15

2.5.1 Teorema da Matriz-Árvore de Kirchhoff 17

2.6 Simplificações dos Problemas Abordados: PRec e PRes 19

2.7 Conclusões 20

3 - Otimização Multiobjetivo 21

3.1 Introdução 21

3.2 Otimização da Configuração em SDPEEs – Revisão da Literatura 21

3.3 Algoritmos Evolucionários 24

3.4 Representação Eficiente de Soluções em AEs 25

3.4.1 Critérios para Avaliação da Codificação 26

3.5 Esquemas de Codificação – Estado da Arte 27

3.6 Codificação Proposta para Cromossomos 32

3.6.1 Algoritmo Rotulador Construtivo 34

3.7 Simplificação do Sistema de Distribuição 37

3.7.1 Procedimentos para Redução do Sistema de Distribuição 38

3.8 Heurísticas de Radialização 39

3.8.1 Detecção de Ciclos 40

3.8.2 Diagrama de Ciclos 41

3.9 Operadores Genéticos Orientados à Factibilidade das Soluções 42
3.9.1 Cruzamento 42
3.9.2 Mutação 43
3.9.3 Seleção 44
3.9.4 Elitismo 45
3.10 Algoritmos Evolucionários Implementados 45
3.10.1 NSGA-II 45
3.10.2 SPEA2 46
3.10.3 PAES 46
3.10.4 PBIL 47
3.10.5 cGA 49
3.11 Tratamento de Restrições 49
3.11.1 Penalização de objetivos 49
3.11.2 Acréscimo de Objetivos 50
3.11.3 Dominância por Factibilidade 50
3.11.4 Restrições críticas versus não-críticas 51
3.12 Melhorias Aplicáveis ao Processo de Otimização dos Problemas Combinatoriais PRes/PRec-SDPEE 51
3.12.1 Inicialização da População com Soluções Viáveis 51
3.12.2 Eliminação de Reavaliações por Tabela de Dispersão 51
3.12.3 Redução do Espaço de Busca 52
3.12.4 Repositório de Configurações Promissoras 52
3.12.5 Condição de Parada por Métricas 53
3.12.6 Filtragem das Soluções 54
3.13 Conclusões 55
4 - Avaliação da Configuração e Modelos de Componentes de Rede 56
4.1 Introdução 56
4.2 Fluxo de Potência – Métodos mais Adequados aos SDPEEs 56
4.2.1 Revisão da Literatura 57
4.2.2 Especificidades dos Sistemas Radiais 58
4.2.3 Equações Básicas de Fluxo de Potência 59
4.2.4 Métodos de Varredura 60
4.2.5 Outros Algoritmos de Fluxo de Potência 65
4.2.6 Considerações Gerais para os Métodos de Varredura 65
4.3 Modelagem dos Componentes 66
4.3.1 Linhas de Distribuição 67
4.3.2 Cargas 67
4.3.3 Banco de Capacitores 70
4.3.4 Religadores 71
4.3.5 Chaves Seccionadoras e de Interconexão 71
4.3.6 Reguladores de Tensão 72

4.3.7 Transformadores de Distribuição ... 74
4.4 Sistemas Nebulosos Aplicados ao SDPEE ... 77
4.4.1 Demandas das Cargas – Variação Sazonal ... 77
4.4.2 Predição do Comportamento de Cargas via Inferência Nebulosa ... 78
4.4.3 Estimativa Nebulosa das Tensões de Barra ... 79
4.5 Conclusões ... 85
5 - Tratamento de Incertezas na Demanda das Cargas ... 86
5.1 Introdução ... 86
5.2 Análise Intervalar ... 87
5.3 Análise da não-dominância entre Soluções no Contexto Intervalar ... 88
5.4 A Formulação Robusta ... 89
5.5 Conclusões ... 90
6 - Análise de Sequenciamento de Manobras e Tomada de Decisão ... 91
6.1 Introdução ... 91
6.2 Sequenciamento Ótimo das Manobras de Chaveamento ... 91
6.2.1 Revisão da Literatura - Trabalhos Relevantes ... 91
6.2.2 Políticas de Ordenamentos das Manobras ... 92
6.3 Tomada de Decisão ... 96
6.3.1 Processo Hierárquico Analítico (AHP) ... 97
6.3.2 Avaliação Multiobjetivo Nebulosa (FMCE) ... 98
6.3.3 Análise Relacional de Grey (GRA) ... 99
6.4 Métodos de Transferência de Cargas ... 100
6.4.1 Robustez e Prontidão ... 100
6.5 Conclusões ... 101
7 - Validação e Resultados Experimentais ... 102
7.1 Introdução ... 102
7.2 Sistemas de Teste ... 102
7.3 Problema de Reconfiguração ... 104
7.3.1 Testes Preliminares do EA-DFR para Formulação Mono-objetivo (PRec-SDPEE) ... 104
7.3.2 Testes do EA-DFR para Formulação Multiobjetivo (PRec-SDPEE) ... 105
7.3.3 Tratamento de Incertezas na Demanda (PRec-SDPEE) ... 110
7.3.4 Estimativa das Tensões de Barra (PRec-SDPEE) ... 114
7.4 Testes Computacionais para o Problema de Restauração ... 117
7.4.1 Ocorrência de Faltas Não-Superpostas (PRes-SDPEE) ... 117
7.5 Aplicação de Tomada de Decisão ... 119
7.6 Conclusões ... 120
8 - Considerações Finais e Trabalhos Futuros ... 121
8.1 Conclusões ... 121
8.2 Sugestão para Trabalhos Futuros ... 123
Referências Bibliográficas ... 124

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Principais componentes em um sistema de distribuição primária. 2
Figura 2.1 - Sistema de teste com 16 barras (ZHU, 2002; GOMES, 2005). 17
Figura 2.2 - Aspecto do espaço de busca para o sistema de teste #1 (ZHU, 2002) que possui três ciclos fundamentais identificados. 17
Figura 2.3 – Exemplo de um grafo *G* equivalente a um SDPEE com 4 fontes e 13 barras de carga: (a) Esquema do sistema, (b) grafo equivalente *G'* com fusão dos NPPs. 19
Figura 3.1 – Um grafo equivalente ao SDPEE com três NPPs. 33
Figura 3.2 – Esquema de interpretação do cromossomo. 33
Figura 3.3 – Obtenção de $\boldsymbol{NR}$ árvores a partir do grafo $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{B},\boldsymbol{L})$ por meio do algoritmo ARC para a sequência de arestas {4,14,8,12,2,16,10,9,11,6,5,3,13,1,17,15,7}. 37
Figura 3.4 – Níveis de abstração criados para representar um SDPEE. 38
Figura 3.5 – (a) Exemplo de um GES que pode ser reduzido a um (b) supergrafo. 39
Figura 3.6 – Casos em que ciclos do supergrafo apresentam (a) único máximo ou (b) vários máximos. 41
Figura 3.7 – (a) Diagrama de ciclos. (b) Exemplo de configuração factível derivada do DC cujos genes são [a,cd,i]. (c) Exemplo de configuração infactível derivada do DC cujos genes são [cd,e,i] 42
Figura 3.8 – Esquema do cruzamento do tipo PMX. 43
Figura 3.9 – (a) Tipos básicos de mutação e (b) Tipos avançados de mutação. 44
Figura 3.10 – Um modelo probabilístico é atualizado a partir das duas melhores soluções. 48
Figura 3.11 – Grupo de modelos probabilísticos ativos para uma dada iteração do MMOPBIL. 48
Figura 3.12 – Esquema do MMOPBIL. 49
Figura 3.13 – Esquema de uso do repositório. 53
Figura 3.14 – Procedimento de verificação da condição de parada para o algoritmo do MOEA-DFR. 54
Figura 4.1 – Fluxos de potência admitidos no método da varredura reversa/direta (MVRD). .. 62
Figura 4.2 - Procedimentos para o somatório de correntes: (a) varredura reversa com superposição de correntes, (b) varredura reversa com agregação de correntes e (c) varredura com recursividade para agregação de correntes. 63
Figura 4.3 – Representação de elemento (a) série e (b) paralelo. 66
Figura 4.4 – Representação do trecho de linha que contém carga distribuída. 70
Figura 4.5 – Modelo adotado para reguladores de tensão. 73
Figura 4.6 – Execução de n-1 reconfigurações para n intervalos sazonais de variação das cargas. 77
Figura 4.7 – Funções de pertinência triangulares sobrepostas e o significado dos parâmetros NFN. 81
Figura 4.8 – Esquema para o uso da rede NFN no processo de otimização da configuração feita pelo AE. 82
Figura 4.9 – Atualização da base de dados. 82
Figura 4.10 – Passos gerais do processo de otimização. 83
Figura 4.11 – Estimativa sequencial das tensões em um alimentador com 4 barras. 84
Figura 5.1 – Cálculo do pior caso para algumas soluções no espaço das variáveis de otimização – um exemplo em 2D. 89

Figura 6.1 – Configurações intermediárias geradas durante o ajuste da configuração do sistema de distribuição. 93
Figura 6.2 – Possíveis situações para a execução de um chaveamento. 95
Figura 6.3 – Agregação de nós para facilitar a análise do sequenciamento ótimo de manobras. 95
Figura 6.4 – Áreas de atendimento de equipes para a realização de manobras manuais. 97
Figura 7.1 – Sistema #1 de 33 barras (ZHU, 2002). 102
Figura 7.2 – Sistema #2 de 70 barras (BARAN e WU, 1989). 102
Figura 7.3 - Sistema #3 de 16 barras (ZHU, 2002). 103
Figura 7.4 – Sistema #4 de 94 barras (SU e LEE, 2003). 103
Figura 7.5 – Sistema brasileiro #5 de 136 barras (CARRENO et al., 2008). 103
Figura 7.6 – Distribuição das soluções eficientes no espaço dos objetivos para o Sistema #1. 107
Figura 7.7 – Distribuição das soluções eficientes no espaço dos objetivos ICC vs. PPA. 107
Figura 7.8 – Faixas de variação consideradas para as demandas real e reativa nas barras do sistema #2 (Caso I). 110
Figura 7.9 – Faixas de variação consideradas para as demandas real e reativa nas barras do sistema #2 (Caso II). 110
Figura 7.10 – Faixas de variação consideradas para as demandas real e reativa nas barras do sistema #2 (Caso III). 111
Figura 7.11 – Perdas de potência ativa para as três configurações: original, a de Huang e a indicada pelo MOEA intervalar. 113
Figura 7.12 – Variação diária do carregamento no sistema #1 para 20 simulações de valores nas cargas em torno de 20% do especificado. 115
Figura 7.13 – Taxas de convergência para os 3 sistemas avaliados que se referem a oito dias de simulação. 117
Figura 7.14 – Ocorrência de falta (a) na interconexão 7_8 do sistema #1 e (b) no alimentador 2 do sistema #3. 117
Figura 7.15 – Sistema brasileiro #5 de 136 barras (CARRENO et al., 2008). 119

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Detalhes de topologia, especificações elétricas e do espaço de busca relativos a cinco dos sistemas testados. 16
Tabela 6.1 – Valores do índice randômico ($\boldsymbol{RI}$) para diferentes ordens n da matriz de consistência. 98
Tabela 7.1 – Soluções ótimas do sistema #1 para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE usando MVRD-AP-DP e MVRD-AP-CP. 104
Tabela 7.2 – Soluções ótimas do sistema #2 para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE resolvida pelo AG acoplado ao MVRD-AP-CP 105
Tabela 7.3 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #1 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando o MVRD-AP-DP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (ZHU, 2002) para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro. 106
Tabela 7.4 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #1 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando o MVRD-AP-CP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (ZHU, 2002) para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro. 106
Tabela 7.5 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #2 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando o MVRD-AP-DP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (HUANG, 2002) para a versão "multiobjetivo" do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro. 106
Tabela 7.6 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #2 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando o MVRD-AP-CP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (HUANG, 2002) para a versão "multiobjetivo" do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro. 108
Tabela 7.7 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #3 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando MVRD-AP-DP e MVRD-AP-CP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (ZHU, 2002) para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro. 108
Tabela 7.8 – Comparação dos desempenhos alcançados pelo AE para diferentes esquemas de codificação ao otimizar os Sistemas #1 e #2. 109
Tabela 7.9 – Comparação dos desempenhos alcançados pelo AE para diferentes esquemas de codificação ao otimizar os Sistemas #3 e #4. 109
Tabela 7.10 – Soluções ótimas para o sistema #2. As duas últimas colunas referem-se à consideração de 8% de incerteza para todas as cargas. 111
Tabela 7.11 – A melhor fronteira encontrada pelo MOEA e pelo MOEA intervalar nos três cenários: cenário original descrito em (HUANG, 2002), cenário perturbado e cenário intervalar. 112
Tabela 7.12 – Comparação de desempenho entre a configuração encontrada por Huang e a configuração identificada pelo MOEA intervalar. Os melhores valores de objetivo estão destacados na cor cinza. 113
Tabela 7.13 – Detalhamento do desempenho obtido pelas três configurações (O: configuração original, H: configuração de Huang, I: configuração identificada pelo MOEA intervalar) nos sete momentos do dia em termos dos critérios PPA, IDT, ICC e Mínima Tensão de Barra (MTB). .. 114

Tabela 7.14 – Comparação entre as diferentes combinações dos métodos de fluxo de potência (MVRD) e estimativa nebulosa (EN) para realizar a avaliação das configurações durante o processo evolutivo do AE. 115
Tabela 7.15 – Soluções ótimas do sistema #1 identificadas para os dois instantes de reconfiguração por meio da execução do AG acoplado ao MVRD. 116
Tabela 7.16 – Desempenho da Estimativa Nebulosa (EN) para o sistema #1 (30 tentativas admitindo as variações diárias nas cargas e os três mapeamentos sugeridos). 116
Tabela 7.17 – Comparação de desempenho da estimativa nebulosa (EN) para 3 sistemas dentro de um intervalo de 24-horas. 116
Tabela 7.18 – Configurações para a restauração do sistema #3 após a ocorrência de uma falta simples no alimentador #2. 118
Tabela 7.19 – Configurações ótimas identificadas pela otimização para o sistema #5 que sofreu duas faltas. 119
Tabela 7.20 – Comparação entre os planos de manobra elegidos pelos métodos de tomada de decisão. 120

Lista de Quadros

Quadro 3.1 – Trabalhos destacados sobre reconfiguração e restauração de SDPEEs. 23
Quadro 3.2 – Termos de equivalência entre um grafo e um SDPEE. 35
Quadro 4.1 – Trabalhos relevantes que tratam do cálculo do fluxo de potência para sistemas elétricos de potência. 57
Quadro 4.2 - Tipos de barras e respectivas grandezas especificadas (E) e calculadas (C). 60
Quadro 4.3 - Constantes matriciais para as conexões mais comuns em transformadores trifásicos. 76
Quadro 7.1 – Relação de chaves telecomandadas para o sistema #5. 118

Lista de Algoritmos

Algoritmo 3.1 – Pseudocódigo do algoritmo ARC. 36
Algoritmo 4.1 - Método da Varredura Reversa/Direta (MVRD). 61
Algoritmo 4.2 – Implementação do somatório das correntes. 63

1 - Apresentação, Descrição e Contextualização do Problema

1.1 Introdução

Estima-se que a maior proporção das perdas de potência mensuráveis em todo o sistema elétrico para provimento de energia elétrica se concentre no estágio da distribuição. Em um país em desenvolvimento, as perdas de potência ativa nas redes de distribuição podem alcançar patamares não negligenciáveis (SARFI *et al.*, 1994). De acordo com a entidade representante do setor – ABRADEE – as perdas técnicas no sistema brasileiro (alta, média e baixa tensão) atingiram aproximadamente 8% (ABRADEE, 2007), em 2011, em relação à energia injetada no sistema global pelas 64 distribuidoras brasileiras. Pelo menos 2% da energia elétrica são perdidos nas etapas de média tensão. Mais de 80% de todas as interrupções no fornecimento de energia que afetam diretamente os consumidores deve-se a falhas no sistema de distribuição (CHOWDHURY e KOVAL, 2009).

Muitos fatores contribuem para justificar a importância de se estudar o tema da reconfiguração e restauração em sistema de distribuição primária. Alguns deles podem ser citados:

i) crescimento contínuo da demanda por energia no mundo, mas, principalmente, nos países com cenário econômico favorável (ex. Brasil, Índia, China...);
ii) complexidade crescente dos sistemas elétricos de distribuição fomentada pela automação e informatização dos mecanismos de monitoramento e controle;
iii) necessidade de atendimento aos índices de qualidade do serviço;
iv) liberalização do mercado de energia, tratada como *commodity*, favorecida pela Medida Provisória nº 579, de 11 de setembro de 2012;
v) oportunidade clara de conhecimento e recursos aptos a promover uma operação mais eficiente do sistema elétrico com o principal objetivo de reduzir os custos de operação;
vi) mudanças nas características das cargas (ex. cargas eletrônicas) que se tornaram mais sensíveis e complexas de se modelar;
vii) possibilidade de postergação de novos investimentos e a capacidade de tornar o sistema menos vulnerável aos agentes causadores de incidentes ou que perturbam seu funcionamento normal (tempestades, falhas em equipamentos, indisponibilidade de potência etc.).

A modificação da configuração em sistemas de distribuição primária não apenas pode otimizar suas condições de operação como também possibilita o uso mais apropriado da infraestrutura disponível (PEPONIS e PAPADOPOULOS, 1995), além de possibilitar uma resposta mais rápida da concessionária aos eventos de contingência. Nesse sentido, o procedimento em questão apresenta-se como um recurso técnico indispensável à garantia da operação eficiente com

vistas à economia racional da energia produzida disponível. Ele permite, em última instância, ganhos financeiros para as concessionárias que operam os sistemas de distribuição primária de energia elétrica, doravante referenciado pelo acrônimo SDPEE.

1.2 Principais Componentes de um Sistema de Distribuição Primária

Um sistema de distribuição primária é composto basicamente por barras de carga e linhas de distribuição. Como mostra a Figura 1.1, uma subestação pode ter vários alimentadores. As chaves NA e NF existem no sistema para permitir a transferência de trechos de um alimentador para outro adjacente sendo, portanto, uma alternativa para o balanceamento de carga ou para viabilizar uma contramedida na ocorrência de uma falta com desligamentos.

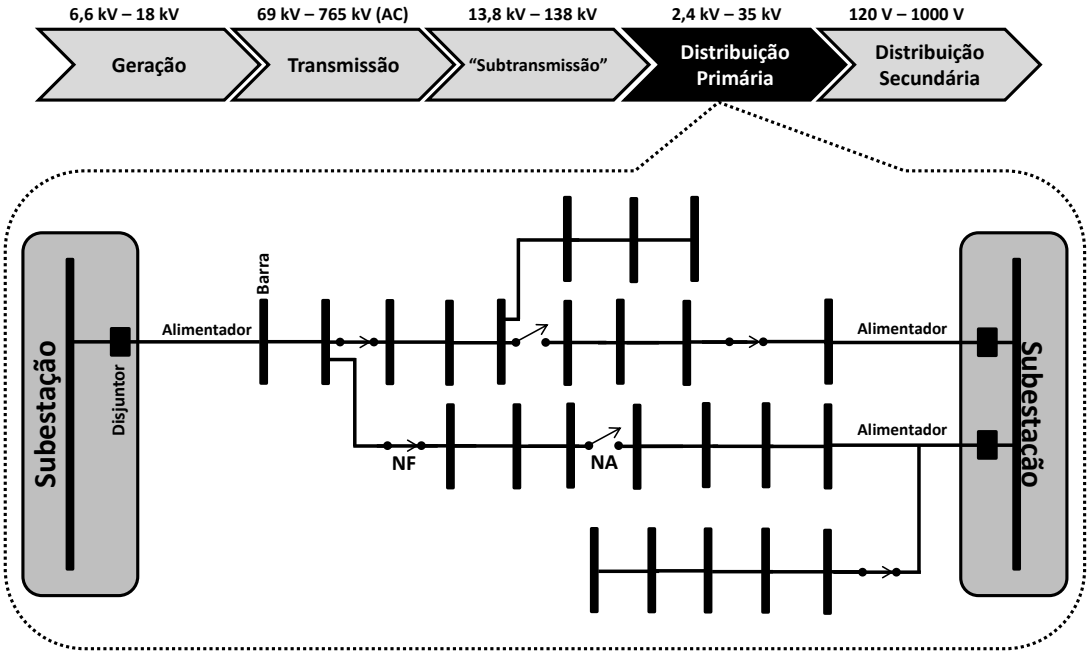

Figura 1.1 - Principais componentes em um sistema de distribuição primária.

1.3 Importância de se estudar o problema

Com o crescimento da demanda por potência em regiões de grande densidade de cargas, a exemplo das áreas urbanas, a operação dos sistemas de distribuição tem se tornado cada vez mais complexa. A expansão de um sistema de distribuição por meio de ampliação da capacidade das subestações e da quantidade de alimentadores com o intuito de atender a demandas extras de carga pode não ser realizável devido a limitações econômicas e ambientais. Visto que investimentos na infraestrutura do sistema são para o longo prazo, medidas para reduzir as perdas de energia (e seu custo associado) ou balancear cargas entre os alimentadores são bastante adequadas no curto e médio prazo. Eventualmente, tais medidas podem até ampliar a capacidade residual de atendimento a consumidores emergenciais, sem, no entanto, causar a violação das condições operacionais ou o comprometimento da demanda variável das cargas.

Nesse sentido, a operação inteligente de chaves de interconexão (NA) e chaves seccionadoras (NF) é um recurso viável para se alterar o fluxo de potência ao longo do sistema de distribuição

(LEE *et al.*, 1994) com o propósito de melhor redistribuí-lo e, assim, melhorar critérios previamente definidos que representam adequadamente as propriedades elétricas e gerenciais de interesse.

A sequência de manobras pode ocorrer em dois contextos distintos, conhecidos pela literatura como reconfiguração e restauração. A reconfiguração caracteriza-se pela alteração das interconexões entre as barras em um sistema que opera em condições normais, porém não ótimas de acordo com critérios preestabelecidos. Já a restauração é um procedimento de execução emergencial de manobras de chaveamento, necessárias quando o sistema é prejudicado por alguma falta capaz de impedir o fornecimento regular de energia às cargas (blecaute total) ou a algumas delas (blecaute parcial).

A reconfiguração apresenta caráter preventivo motivado por interrupções programadas para transferir cargas entre alimentadores, efetuar ajustes operacionais ou adequar melhor o sistema às contingências potencialmente danosas. A restauração é uma ação reativa que tem como principal limitante o tempo de reestabelecimento operacional do sistema. Os fatores contingentes para a restauração estão geralmente associados a acidentes que provocam curto-circuitos ou interrupções não previstas, intempéries ou incidência de descargas atmosféricas, sobrecargas e falhas em equipamentos de controle ou transformação da energia, eventos similares etc. Tanto a restauração quanto a reconfiguração são procedimentos que buscam maior resiliência e imunidade do sistema de distribuição, o que conduz naturalmente à maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica aos diversos consumidores.

A consideração de um conjunto distinto de funções objetivo implica em formulações de reconfiguração distintas, sendo o de minimização de perdas de potência ativa o mais comumente tratado na literatura. Não era incomum que as estimativas das perdas fossem levadas em conta apenas durante a fase de planejamento do sistema de distribuição, uma vez que se considerava apenas uma configuração preferencial de operação no projeto de um alimentador.

Com a modificação gradual dos sistemas existentes para suportarem a tecnologia de redes inteligentes (*smart grid*), essas perdas e outros objetivos similares passam também a ser considerados durante a fase de operação de um sistema de distribuição. Apesar de não assegurarem a convergência para as soluções ótimas globais, os algoritmos heurísticos constituem uma abordagem interessante para a reconfiguração em tempo real de grandes sistemas, especialmente aqueles que possuem numerosas chaves de interconexão (BOUHOURAS e LABRIDIS, 2012). Recentemente, a combinação entre algoritmos evolucionários e heurísticos tem sido uma estratégia mais bem sucedida recomendada graças ao seu potencial de escalabilidade.

1.4 Contribuições do trabalho

Dentre as contribuições do trabalho ao tema investigado, destacam-se:

- formulação matemática unificada que contempla os problemas de reconfiguração e restauração aliada à ótica prática;

- proposição de operadores genéticos especializados e não dependentes de técnica evolucionária;
- desenvolvimento de um algoritmo de estimativa de distribuição multiobjetivo adaptado aos problemas tratados nessa tese;
- representação genérica de configurações radiais para sistemas com múltiplas fontes, além dos procedimentos de codificação e interpretação;
- sugestões de implementação computacional para os procedimentos de varredura nos métodos de fluxo de potência que os utilizam;
- procedimentos de incorporação de ajuste de taps de reguladores de tensão aos métodos de varredura;
- heurística para detecção de ciclos fundamentais;
- aceleração da avaliação de configurações por estimativa das tensões das barras;
- análise mais extensa dos problemas de reconfiguração e restauração com a inclusão da etapa de análise da sequência de manobras e a tomada de decisão.

1.5 Organização da Tese

O presente texto está dividido em oito capítulos. Os capítulos foram delineados com base em tópicos tidos como as principais contribuições do trabalho de doutorado que levou à redação desse texto.

No primeiro capítulo em questão, uma breve introdução ao tema da tese é dada para contextualização, motivação e justificativas. No segundo capítulo, o escopo do trabalho, as considerações e simplificações para a construção do modelo matemático são descritas juntamente com a formulação matemática e as características do espaço de busca criado. Em seguida, uma breve caracterização da classe dos algoritmos empregados para resolver o problema unificado de reconfiguração e restauração é dada. Aspectos relevantes como a representação (codificação) de uma configuração bem como as estratégias para se explorar o espaço das soluções são detalhadas ao longo desse mesmo capítulo.

A avaliação de uma configuração de rede é tratada no Capítulo 4, uma vez que envolve os métodos de cálculo de fluxo de potência, a modelagem dos componentes elétricos e as variações na demanda de potência consideradas para a elaboração da solução computacional proposta. As incertezas sobre a demanda das cargas são consideradas na análise de um cenário mais realista para uma reconfiguração de rede, assunto esse abordado no quinto capítulo. Tópicos complementares e não menos relevantes como a análise da sequência de manobras e o processo de tomada de decisão são discutidos no sexto capítulo. A teoria, até então apresentada, é aplicada aos sistemas conhecidos da literatura especializada de pequeno, médio e grande porte. Os resultados obtidos pelas simulações estão contidos no Capítulo 7. E as considerações finais são relacionadas no oitavo capítulo.

2 - Formulação Matemática dos Problemas de Reconfiguração e Restauração

2.1 Introdução

A formulação matemática aqui apresentada pretende contemplar as situações de reconfiguração e restauração experimentadas por um SDPEE. Primeiramente, serão apresentados os critérios e as restrições relativas à situação de reconfiguração. Em seguida, os critérios referentes ao problema de restauração, diferentes dos anteriores, serão descritos juntamente com as restrições afins a esse contexto.

O problema de reconfiguração/restauração de alimentadores de SDPEE está fortemente vinculado ao padrão de interconexão entre as barras e, portanto, às variáveis de otimização devem estar relacionadas de alguma forma aos estados assumidos pelas chaves que modificam a configuração do sistema. Comumente, qualquer configuração c pode ser descrita pelos estados (ligado/desligado) das N_W chaves de um SDPEE. Seja então o conjunto de soluções viáveis topologicamente

$$\boldsymbol{\Gamma} = \{\boldsymbol{sw}^c,\ \forall c = 1,2,\dots,N_C\}$$

em que cada configuração é descrita pelas variáveis de otimização do problema que, juntas, compõem um vetor de estados $\boldsymbol{sw}^c$ referente à configuração de rede c, no qual cada elemento $sw_{q,i}^c$ denota o estado de um dispositivo chaveável q instalado em uma linha i. Portanto,

$$\boldsymbol{sw}^c = \left[sw_{1,i_1}\ \ sw_{2,i_2}\ \ sw_{3,i_3}\ \dots\ sw_{N_W,i_m}\right]^c \quad \textit{para um dado instante t}$$

em que todos os índices $i_1, i_2, .., i_m$ referem-se às linhas energizáveis pelas respectivas chaves.

Um vetor binário $\boldsymbol{sw}^c$ é uma estrutura capaz de representar qualquer configuração de rede. O estado de cada chave é representado por um bit que indica se ela está aberta ($sw_{q,i}^c = 0$) ou fechada ($sw_{q,i}^c = 1$), seja em questão uma chave NA (interconexão) ou NF (seccionadora). Outra possibilidade de representação adota os números inteiros para indicar apenas as chaves abertas supondo que cada chave no sistema possa ser inequivocamente identificada[1].

O desenvolvimento da formulação matemática que descreve os problemas de reconfiguração e restauração foi feito com base em um vetor usado para representar, por meio de bits, os estados das chaves dos sistemas. No entanto, ressalta-se que a codificação empregada na implementação computacional não precisa ser necessariamente binária.

[1] Os efeitos das representações binária e inteira para o desempenho de um mesmo algoritmo evolucionário (NSGA-II) na busca pelos ótimos globais de um problema de otimização multiobjetivo, formulado para a reconfiguração de alimentadores foi verificado em (REIS *et al.*, 2012).

2.2 Abordagem do Problema de Reconfiguração (PRec-SDPEE)

2.2.1 Definição de Reconfiguração de SDPEE

A reconfiguração refere-se ao procedimento de execução orientada de manobras em dispositivos chaveáveis (NA e NF, telecomandados ou manuais), supervisionado ou realizado parcial ou integralmente pelo centro de controle e operação da distribuição de uma concessionária de energia, com vistas ao aumento da eficiência de operação do SDPEE. Embora seja uma prática pouco comum em grande parte das concessionárias, a reconfiguração tem potencial de aplicação em um SDPEE suficientemente automatizado, uma vez que se apresente como alternativa segura e atrativa do ponto de vista financeiro para essas empresas. A reconfiguração caracteriza-se pela execução de um plano de manobras realizável tecnicamente, estando a rede operando em condições normais subótimas de acordo com os critérios técnicos definidos.

2.2.2 Formulação Matemática para o PRec-SDPEE Multiobjetivo Restrito

As funções objetivo para o problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas elétricos (PRec-SDPEE) são não-lineares, não-contínuas e apresentam vários ótimos locais (DELBEM *et al.*, 2005). Alguns trabalhos publicados (HUANG, 2002; BRAZ e SOUZA, 2011) trataram a formulação multi-objetivo para PRec-SDPEE como uma combinação das funções em uma soma ponderada, o que resultou em um problema mono-objetivo equivalente com única solução ao invés de uma fronteira Pareto. Serão descritos a seguir os objetivos admitidos para o modelo do PRec-SDPEE.

2.2.3 Objetivos

Na formulação multiobjetivo proposta, os quatro objetivos para o caso da reconfiguração são a minimização das perdas de potência ativa (PPA), a minimização do desvio das tensões de barra (IDT) com vistas à obtenção de um perfil mais plano, a minimização do carregamento de corrente (ICC) para balanceamento das cargas e a minimização da quantidade de manobras (NM), reunidos em um vetor $\boldsymbol{F}_{rc}$ que é função do conjunto de chaves operacionais na configuração c e do conjunto de barras energizadas $\boldsymbol{\Delta}_r^c$ pelo nó provedor de potência r:

$$\begin{gathered}\boldsymbol{F}_{rc}(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{\Delta}_r^c) = [PPA(\boldsymbol{sw}^c)\ \ IDT_{rc}(\boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{\Delta}_r^c)\ \ ICC(\boldsymbol{sw}^c)\ \ NM(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c)]^{\boldsymbol{T}} \\ \boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c \in \{\mathbf{0}, \mathbf{1}\}^{N_W}\end{gathered} \tag{2.1}$$

As perdas de potência ativa (PPA) são representadas pela equação seguinte para cada uma das fases:

$$PPA(\boldsymbol{sw}^c) = \sum_{i \in \boldsymbol{\Omega}} sw_{q,i}^c \cdot Re(Z_i) \cdot |I_i|^2 + \sum_{i \in \boldsymbol{\Psi}} Re(Z_i) \cdot |I_i|^2 \tag{2.2}$$

em que $sw_{q,i}^c$ denota o estado da chave manobrável q na i-ésima linha, o qual pertence ao conjunto $\boldsymbol{\omega}^c$, isto é, $sw_{q,i}^c \in \boldsymbol{\omega}^c$. Considera-se ainda $Re(Z_i)$ e I_i a componente real da impedância longitudinal da i-ésima linha e a corrente que flui nessa mesma linha, respectivamente. Algumas propriedades referentes aos conjuntos vistos na Equação (2.2) e ao conjunto $\boldsymbol{\omega}$ são apresentadas a seguir:

$$\boldsymbol{L} \equiv \boldsymbol{\Psi} \cup \boldsymbol{\Omega} \quad \therefore \begin{cases} \boldsymbol{\Omega} \subseteq \boldsymbol{L} \\ \boldsymbol{\Psi} \subseteq \boldsymbol{L} \end{cases} \tag{2.3a}$$

$$\boldsymbol{\omega}^c := \left\{ q \mid sw_q^c = 1, \forall q = 1, \dots, N_W \right\} \tag{2.3b}$$

$$\bar{\boldsymbol{\omega}}^c := \left\{ q \mid sw_q^c = 0, \forall q = 1, \dots, N_W \right\} \tag{2.3c}$$

$$\boldsymbol{W} \equiv \boldsymbol{\omega}^c \cup \bar{\boldsymbol{\omega}}^c \tag{2.3d}$$

Para sistemas de distribuição com múltiplos nós provedores de potência (NPPs), as perdas totais de potência ativa são obtidas pela soma das parcelas referentes a cada alimentador que compõe o SDPEE avaliado, assim como foi feito em (SU e LEE, 2003).

$$PPA_{total} = \sum_{r=1}^{N_R} PPA(\boldsymbol{sw}^c) \tag{2.4}$$

O índice de desvio de tensão para reconfiguração (IDT_{rc}) é um indicador importante usado para manter o perfil de tensão das barras (V_k) ao longo de um alimentador o mais próximo possível dos valores nominais (V_k^{nom}), dentro de valores aceitáveis delimitados pelas tensões mínima e máxima (HUANG, 2002):

$$IDT_{rc}(\boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{\Delta}_r^c) = \frac{1}{\|\boldsymbol{\Delta}_r^c\|} \cdot \sum_{k \in \boldsymbol{\Delta}_r^c} (V_k - V_k^{nom})^2 \qquad \forall r = 1, \dots, N_R \tag{2.5}$$

E $\boldsymbol{\Delta}_r^c$ é definido matematicamente como:

$$\boldsymbol{\Delta}_r^c = \{ k \mid \eta(k, r, \boldsymbol{sw}^c) = 1 \} \qquad \forall r = 1, \dots, N_R \tag{2.6}$$

sendo $\eta(k, r, \boldsymbol{sw}^c)$ a função booleana que indica se a barra k é energizada pelo NPP r.

Ao tratar sistemas de múltiplos NPPs, um $\overline{IDT_{rc}}$ médio é calculado:

$$\overline{IDT_{rc}} = \frac{1}{N_R} \cdot \sum_{r=1}^{N_R} IDT_{rc}(\boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{\Delta}_r^c) \tag{2.7}$$

O próximo critério é o índice de carregamento de corrente (ICC) usado para determinar o grau de equalização do carregamento das linhas do sistema elétrico. Por meio dele, busca-se dar maior importância à configuração que atinja maior capacidade residual de corrente nas linhas. De acordo com Huang (2002):

$$ICC(\boldsymbol{sw}^c) = \max \left(\max_{i \in \boldsymbol{\Omega}} \left(sw_{q,i}^c \cdot {I_i}/{I_i^{max}} \right), \max_{i \in \boldsymbol{\Psi}} \left({I_i}/{I_i^{max}} \right) \right) \tag{2.8}$$

sendo I_i^{max} a capacidade admissiva da i-ésima linha. Portanto, as configurações de rede cujo ICC aproxima-se da unidade não são desejáveis. Valores de ICC próximos da unidade podem indicar grandes desbalanceamentos ou um sistema de distribuição próximo de sua capacidade de carregamento máxima. O ICC aplicável ao SDPEE com múltiplas fontes é obtido ao considerar todas as linhas do sistema e não apenas as linhas energizadas de um alimentador específico.

Do ponto de vista operacional, é importante mensurar a complexidade da migração da configuração de rede atual para a configuração correspondente a uma das soluções ótimas do

problema. Assim, a "distância equivalente" entre as configurações é um critério satisfatório para estimar o custo de execução das manobras que deve ser reduzido:

$$NM(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c) = \boldsymbol{sw}^c - \boldsymbol{sw}^0 = \sum_{q \in \boldsymbol{W}} \left| sw_{q,i}^c - sw_{q,i}^0 \right| \tag{2.9}$$

em que $\boldsymbol{sw}^c$ e $\boldsymbol{sw}^0$ denotam os vetores de estado das chaves correspondentes à solução avaliada e à referência (vigente), respectivamente. Esse critério pode ser estendido a mais de um alimentador de modo direto. Apesar de diversos trabalhos indicarem que o conjunto ótimo de soluções deve ser independente da configuração inicial da rede (MCDERMOTT *et al.*, 1999; CIVANLAR *et al.*, 1988; GOSWAMI e BASU, 1992), uma vez que algumas propostas falhavam nesse ponto, as soluções finais serão afetadas pelo critério NM, uma vez que ele é relativo e tem o propósito de restringir chaveamentos.

2.2.4 Restrições de Igualdade e Desigualdade

Para uma abordagem mais realista do PRec-SDPEE, várias restrições são consideradas na formulação. Algumas delas não podem ser incorporadas à estrutura de dados que codifica as soluções do problema e, portanto, a violação das mesmas deve ser avaliada quando o valor de mérito da solução é calculado. Outras, no entanto, podem ser incorporadas diretamente à estrutura do cromossomo, dependendo da codificação adotada. Para garantir a restrição topológica, detalhada na Seção 2.4, a condição de caminho exclusivo exige que cada barra k ($k \in \boldsymbol{B}$) no SDPEE seja energizada por um e somente um NPP:

$$\sum_{r=1}^{N_R} \eta(k, r, \boldsymbol{sw^c}) = 1, \quad \forall k = 1, \ldots, N_B \tag{2.10}$$

O estado da chave sw_q^c que energiza a linha imediatamente precedente à k-ésima barra afeta também o provimento de potência à barra sucessora $k+1$, se houver. Esta chave restringe o estado da chave adjacente à jusante (mais afastada do NPP) sw_{q+1}^c para a obtenção de uma topologia radial:

$$\begin{gathered} \eta(k, r', \boldsymbol{sw^c}) \geq \eta(k+1, r', \boldsymbol{sw^c}) \Leftrightarrow \eta(\{k, k+1\}, r'', \boldsymbol{sw^c}) = 0 \quad \forall r'' \neq r' \\ k, k+1 \in \boldsymbol{B} \quad , \quad r', r'' = 1, \ldots, N_R \end{gathered} \tag{2.11}$$

em que a barra k é admitida como sendo aquela mais próxima ao NPP r do que a barra $k+1$. A Equação (2.11) prevê três situações: (i) energização de ambas as barras, (ii) energização apenas da barra k e (iii) desenergização das barras k e $k+1$. As situações (ii) e (iii) são passíveis de ocorrer no contexto da restauração. As Equações (2.10 - 2.11) são válidas para qualquer floresta obtida com o vetor $\boldsymbol{sw}^c$ que represente uma configuração viável do SDPEE ($\boldsymbol{sw}^c \in \boldsymbol{\Gamma}$).

As tensões nas barras devem sofrer o mínimo afundamento. Entretanto, a existência de cargas no sistema de distribuição causa flutuações indesejáveis dessas tensões. Nestes casos, os limites inferior e superior para a tensão na barra k devem ser atendidos:

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad , \quad \forall k = 1, \ldots, N_B \tag{2.12}$$

Um perfil de tensão ao longo do alimentador mais comportado atenua as variações abruptas que podem comprometer as especificações de provimento de energia às cargas. Nas simulações, os limites mínimo e máximo são assumidos tipicamente como sendo 0,95 p.u. e 1,05 p.u., de acordo com o especificado em (BARAN e WU, 1989; SU e LEE, 2003), caso não estejam claramente definidos nos dados sobre o sistema avaliado. Outros valores para esses mesmos limites são definidos pela ANEEL no documento PRODIST – módulo 8.

Também conhecido por capacidade admissiva, a ampacidade das linhas deve ser observada:

$$|I_i| \leq I_i^{max} \quad , \quad \forall i \in \boldsymbol{L} \tag{2.13}$$

As restrições definidas nas Eqs. (2.12-2.13) totalizam $N_L + 2N_B$, uma vez que a Eq. (2.12) origina dois subconjuntos de desigualdades. O problema de otimização da configuração está sujeito também às restrições de desigualdade relativas à potência reativa nas barras de tensão controlada:

$$Q_r^{min} \leq Q_r \leq Q_r^{max} \quad , \quad \forall r = 1, \dots, N_R \tag{2.14}$$

E também à potência real nas barras de carga:

$$P_k \leq P_k^{max} \quad , \quad \forall k \in \boldsymbol{\Delta}_r^c \quad r = 1, \dots, N_R \tag{2.15}$$

Nenhum NPP pode estar sobrecarregado, ou seja, a agregação de cargas a cada um deles não pode ultrapassar suas respectivas capacidades. A demanda de potência do conjunto de barras de carga acrescida dos termos referentes às perdas não pode ir além da disponibilidade de potência S_r^{max} de cada NPP, identificada pela potência nominal do transformador da subestação a partir do qual derivam os alimentadores:

$$\sum_{k \in \boldsymbol{\Delta}_r^c} P_k + PL(\boldsymbol{sw}^c) < P_r^{max} \ , \quad \forall r = 1, \dots, N_R \tag{2.16a}$$

$$\sum_{k \in \boldsymbol{\Delta}_r^c} Q_k + QL(\boldsymbol{sw}^c) < Q_r^{max} \ , \quad \forall r = 1, \dots, N_R \tag{2.16b}$$

$$PL(\boldsymbol{sw}^c) = \sum_{i \in \boldsymbol{\Omega}} sw_{q,i}^c \cdot Re(Z_i) \cdot |I_i|^2 + \sum_{i \in \boldsymbol{\Psi}} Re(Z_i) \cdot |I_i|^2 \tag{2.16c}$$

$$QL(\boldsymbol{sw}^c) = \sum_{i \in \boldsymbol{\Omega}} sw_{q,i}^c \cdot Im(Z_i) \cdot |I_i|^2 + \sum_{i \in \boldsymbol{\Psi}} Im(Z_i) \cdot |I_i|^2 \tag{2.16d}$$

$$S_r^{max} = \sqrt{(P_r^{max})^2 + (Q_r^{max})^2} \tag{2.16e}$$

A Equação (2.16e) representa a máxima potência provida pelo NPP r em função das componentes real e reativa empregadas nas Eqs. (2.16a – 2.16d).

A restrição topológica é representada genericamente por:

$$\Phi(\boldsymbol{sw}^c) = 0 \tag{2.17}$$

e detalhada na Seção “Radialização em Sistemas de Distribuição Primária”.

As restrições de igualdade relacionadas às leis de Kirchhoff da Tensão (2.18a) e da Corrente (2.18b) usadas durante o cálculo que emprega as equações de fluxo de potência são representadas pelas seguintes expressões, conforme (RADHA *et al.*, 2003):

$$\Phi_{\mathrm{V}}(\boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{V}) = 0 \tag{2.18a}$$

$$\Phi_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{I}) = 0 \tag{2.18b}$$

em que $\boldsymbol{V}$ designa um vetor de tensão para todas as barras e $\boldsymbol{I}$ designa o vetor de correntes que flui em cada uma das linhas do sistema de distribuição.

2.3 Abordagem do Problema de Restauração (PRes-SDPEE)

2.3.1 Definição de Restauração de SDPEE

A restauração pode ser definida como o procedimento orientado de manobras em dispositivos chaveáveis (NA e NF, telecomandados ou manuais), executado em caráter de emergência, para resolver situações de faltas que tenham resultado em desligamentos de cargas ou áreas de maior abrangência (blecautes). O plano de contingência deve ser elaborado e executado em prazo dependente dos índices de continuidade (DEC, FEC, DIC, FIC) para que a situação do SDPEE não se agrave, para impedir a ampliação de danos ou acidentes, ou até mesmo evitar prejuízos financeiros desastrosos. Assim como o procedimento de reconfiguração, a restauração pode ocorrer de modo supervisionado parcial ou integral, a partir de um centro de controle e operação da distribuição (CCOD) de uma concessionária de energia. Ao contrário da reconfiguração, a restauração deve ser realizada necessariamente após a ocorrência de uma falta que tenha provocado anomalias na operação do sistema. Nestes casos, a escolha do plano de contingência não deve violar restrições técnicas, ainda que temporariamente, se o SDPEE não for capaz de tolerá-las.

2.3.2 Formulação Matemática para o PRes-SDPEE Multiobjetivo Restrito

No problema de restauração, a otimização determina o plano de contingência para a reparação do sistema, após a ocorrência de uma falta. Assume-se também que a falta tenha sido isolada. Portanto, a solução obtida para o problema de restauração deve ser aplicada imediatamente, visto que a duração da interrupção é um fator decisivo para a qualidade do serviço prestado pela concessionária de energia. Nesse sentido, os índices de continuidade (DEC, DIC, FEC, FIC etc), descritos nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), elaborados pela ANEEL, devem estar de algum modo contemplados, ainda que indiretamente, nos objetivos da formulação.

O balanceamento de carga entre alimentadores nem sempre elimina todas as sobrecargas depois da ocorrência de uma falta mais severa no sistema, especialmente se não houver opções de chaveamento que tornem a divisão de carga entre eles equitativa. Ademais, a quantidade de operações e o número de chaves funcionais podem restringir essas

possibilidades. Um dos principais objetivos da restauração é a reenergização da maior quantidade de cargas afetadas pelo blecaute, no menor tempo praticável, transferindo-as do ramal alimentador afetado para outros alimentadores de distribuição que possam suportar a carga adicional sem que haja violação das restrições técnico-operacionais ou o agravamento das violações inevitáveis.

A restauração de alimentadores é um problema NP-completo (MIU *et al.*, 1998) que lida com variáveis discretas correspondentes aos estados das chaves do SDPEE. O problema é formulado como multiobjetivo, não-diferenciável e restrito. Na restauração, é fundamental que as seguintes condições sejam observadas ao buscar os melhores PMRs: (i) o reestabelecimento deve alcançar o maior número de cargas afetadas; (ii) um consumidor de maior prioridade não pode ser preterido em favor de outro menos prioritário se ambos estiverem desenergizados diante da disponibilidade insuficiente de potência para ambos; (iii) o reestabelecimento de um alimentador deve se dar no menor tempo possível e a quantidade de manobras deve ser mínima para evitar modificações proeminentes no carregamento geral do SDPEE; (iv) o sequenciamento de chaves deve ser tecnicamente viável e não-redundante; (v) a radialidade da rede deve ser obedecida; e (vi) as cargas que permaneceram energizadas após a ocorrência da falta não devem ser afetadas pelo plano de restauração proposto, exceto nas situações em que não existe alternativas para se reenergizar as cargas críticas.

A seguir, os objetivos (critérios) e restrições pertinentes ao problema da restauração serão abordados. Todos os critérios considerados no problema de otimização foram propostos de modo a serem minimizados.

2.3.3 Objetivos

Como critérios na modelagem do problema de restauração serão considerados os que direcionam o pronto-reestabelecimento dos alimentadores afetados. Assim, a função geral de otimização da restauração $\boldsymbol{F}_{rt}$ é referida a estes alimentadores. Na formulação multiobjetivo proposta, a $\boldsymbol{F}_{rt}$ é composta por critérios que devem ser minimizados concomitantemente. São eles: a proporção de cargas desenergizadas (PCD), o índice de desvio de tensão da restauração (IDT_{rt}), o índice de custo das manobras de contingência ($ICMC$), os índices de sobrecargas nas linhas de distribuição (ISL) e nos transformadores (IST) e o índice de priorização das cargas (IPC):

$$\boldsymbol{F}_{rt}\left(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{\Delta'}_r^c, \boldsymbol{\Delta}_r^c\right) = \begin{bmatrix} PCD\left(\boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{\Delta'}_r^c, \boldsymbol{\Delta}_r^c\right) & IDT_{rt}(\boldsymbol{sw}^c) & ICMC(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c) & \dots \\ ISL(\boldsymbol{sw}^c) & IST(\boldsymbol{sw}^c) & IPC(\boldsymbol{sw}^c) & \end{bmatrix}^{\boldsymbol{T}} \quad (2.19)$$

$$\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c \in \{\boldsymbol{0}, \boldsymbol{1}\}^{Nw}$$

O critério PCD indica a proporção da demanda real não atendida por estarem algumas das cargas vinculadas a barras desenergizadas:

$$PCD(\boldsymbol{sw}^c, \boldsymbol{\Delta'}_r^c, \boldsymbol{\Delta}_r^c) = \sum_{r=1}^{N_R} \left[\sum_{k \in \boldsymbol{\Delta'}_r^c} \eta(k, r, \boldsymbol{sw}^c) \cdot {P_k}/{\sum_{k=1}^{N_B} P_k} - \sum_{k \in \boldsymbol{\Delta}_r^c} \eta(k, r, \boldsymbol{sw}^c) \cdot {P_k}/{\sum_{k=1}^{N_B} P_k} \right] \quad (2.20)$$

sendo que $\boldsymbol{\Delta'}_r^c$ é dado pela definição vista na Equação (2.6), porém aplicada ao instante imediatamente anterior à falta. Um critério alternativo menos detalhado pode ser usado em lugar do PCD. É o percentual de barras desenergizadas:

$$PBD(\boldsymbol{sw}^c) = \frac{100}{N_B} \cdot \sum_{k=1}^{N_B} 1 - \vartheta(k, \boldsymbol{sw}^c) \tag{2.21}$$

em que $\vartheta(k, \boldsymbol{sw}^c)$ denota uma função booleana que indica simplesmente se a barra k está energizada. Ao contrário do PCD, esse critério favorece a energização do maior número de barras do SDPEE por meio dos NPPs disponíveis, independentemente da quantidade de cargas acumuladas em cada um das barras.

O índice de desvio de tensão para o caso de restauração IDT_{rc} assemelha-se ao conceito de variância:

$$IDT_{rt}(\boldsymbol{sw}^c) = \frac{1}{\|\boldsymbol{\Upsilon}(t)\|} \cdot \sum_{k \in \boldsymbol{\Upsilon}} (V_k - V_k^{nom})^2 \tag{2.22a}$$

$$\boldsymbol{\Upsilon}(t) = \{k \mid k \in \boldsymbol{B}, \vartheta(k, \boldsymbol{sw}^c) = 1\} \tag{2.22b}$$

Admite-se que o instante de tempo considerado para se computar IDT_{rt} seja aquele posterior ao isolamento da falta detectada que motivou a reconfiguração emergencial. Esse critério é descrito em função das variáveis de decisão $sw_{q,i}^c$ para não se omitir seu vínculo com a configuração vigente.

O tempo da restauração depende da sequência de chaveamentos que pode ser estimado com base no tipo e localização das chaves (LI *et al.*, 2004). O critério que reflete o custo dos chaveamentos $ICMC$ necessários para se migrar da configuração atual da rede para aquela proposta deve considerar a complexidade da operação. Admitido como critério gerencial, esse índice é definido como:

$$\begin{aligned} ICMC(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c) = {} & \alpha . \frac{NM(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c)}{N_W} + \beta . \frac{C_m}{C_a} . \frac{\|\boldsymbol{M_m}\|}{NM(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c)} \\ & + \frac{\gamma}{\bar{v}} . \sum_{q_x \in \boldsymbol{M_m}} \sum_{\substack{q_y \in \boldsymbol{M_m} \\ q_y > q_x}} D_{ch}\big(pos(q_1), pos(q_2)\big) \end{aligned} \tag{2.23a}$$

$$NM(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c) = \|\boldsymbol{M_m}\| + \|\boldsymbol{M_a}\| \qquad \boldsymbol{M_m}, \boldsymbol{M_a} \subset \boldsymbol{W} \tag{2.23b}$$

em que $NM(\boldsymbol{sw}^0, \boldsymbol{sw}^c)$ foi definido pela Eq. (2.9). Os fatores multiplicativos α, β e γ determinam a influência da quantidade total de manobras, da proporção de manobras manuais e da distância euclidiana para os locais das chaves manuais a serem manobradas. Portanto, para os casos de reconfiguração, bastaria que $\alpha = 1$ e $\beta = \gamma = 0$. É pertinente para os casos de restauração priorizar os chaveamentos telecomandados, pois o fornecimento de energia às cargas afetadas precisa ser prontamente reestabelecido. Os tipos das chaves devem ser considerados na modelagem, uma vez que os SDPEEs passam por um processo de automação gradativa que ainda perdurará por pelo menos dez anos (KUMAR *et al.*, 2008; KIM *et al.*, 2013). Para maior detalhamento da função de custo dos chaveamentos $ICMC$, o

segundo termo descrito na Eq. (2.23b) pode incluir uma razão que reflete os tempos estimados para cada tipo de manobra - manual e telecomandada (MILANI e HAGHIFAM, 2011). O fator C_m (C_a) representa o custo operacional da manobra manual (telecomandada). Nas simulações realizadas, adotou-se $C_m = 5$ e $C_a = 0{,}1$. A relação entre esses custos (C_m e C_a) foi definida com base no trabalho de Zidan (ZIDAN e EL-SAADANY, 2012). De acordo com a necessidade, os valores de C_m e C_a ainda podem ser individualizados para cada chave. Eles podem retratar os aspectos financeiros, temporais, mecânicos (desgaste, expectativa de vida), dificuldades de acesso, etc. A velocidade média do veículo de manutenção $\bar{v}$ confere à terceira parcela um significado temporal. Segundo Lin (LIN e HONG, 1998), é importante considerar a proximidade entre os chaveamentos manuais nas soluções encontradas para um problema de restauração. Assim, o terceiro termo é calculado pela soma das distâncias euclidianas entre as localizações geográficas dos chaveamentos manuais, tomados par a par:

$$D_{ch}\big(pos(q_1), pos(q_2)\big) = \sqrt{\left(x_{q_1} - x_{q_2}\right)^2 + \left(y_{q_1} - y_{q_2}\right)^2} \tag{2.24}$$

em que as chaves q_1 e q_2 localizam-se em posições (x, y) dadas em um plano que contém o SDPEE. Para o cômputo das equipes de campo, a equação anterior pode ser modificada:

$$D_{ch}\left(pos(q_1), pos\left(T_q^{prox}\right)\right) = \sqrt{\left(x_{q_1} - x_{Tprox}\right)^2 + \left(y_{q_1} - y_{Tprox}\right)^2} \tag{2.25}$$

A equação anterior toma em consideração o posicionamento da equipe que provavelmente realizará a manobra. A primeira forma dada pela Eq. (2.24) favorece a proximidade (localidade) entre as chaves manuais que devem ser manobradas, podendo reduzir o tempo de realização do PMR. A segunda forma (Eq. 2.25) busca aliar a otimização da configuração com o despacho das equipes de manutenção. Uma terceira forma ainda pode ser vislumbrada ao se definir um ponto de referência (x^*, y^*) em relação ao qual a distância a cada ponto de manobra manual será considerada. Desse modo, a concessionária pode priorizar uma solução viável para o problema que se restrinja a uma área desejada do SDPEE.

O conceito do $ICMC$ é extensível às redes com múltiplas fontes sem maiores adaptações. Apesar de vários trabalhos ressaltarem a importância da independência da solução final encontrada pelo método de otimização em relação à configuração inicial ou de referência (MCDERMOTT *et al.*, 1999; CIVANLAR *et al.*, 1988; GOSWAMI e BASU, 1992), essa consideração é afetada pela inclusão de $ICMC$ à modelagem do problema, visto que as prováveis soluções eficientes ficam restritas pela quantidade e custo dos chaveamentos em relação à configuração vigente.

Os limiares de sobrecarga de equipamentos como transformadores e linhas podem ser alcançados em condições circunstanciais visando ao atendimento emergencial às cargas ante uma situação temporária de risco controlado para o alimentador que não ocasione danos. Desse modo, por meio da minimização dos índices ISL e IST, assegura-se que todas as soluções finais dão ao alimentador condições de operação mais distantes dos limiares de sobrecarga. O ISL é definido como:

$$ISL(\boldsymbol{sw}^c) = \max\left(\max\left(sw_{q,i}^c \cdot \frac{|I_i|}{I_i^{max}}\right), \max\left(\frac{|I_l|}{I_l^{max}}\right)\right) \quad \forall i \in \boldsymbol{\Omega}, \forall l \in \boldsymbol{\Psi}, \forall q \in \boldsymbol{\omega}^c \tag{2.26}$$

O IST indica a sobrecarga nos transformadores do SDPEE:

$$IST(\boldsymbol{sw}^c) = \max \left(sw_{q,i}^c \cdot {}^{TF_z}/_{TF_z^{max}} \right) \quad , \quad z = 1..N_T \ , \ \forall q \in \boldsymbol{\omega}^c \tag{2.27}$$

Como sugerido por Miu (MIU *et al.*, 1998), a modelagem do problema de restauração deve incluir o tratamento diferenciado das cargas, atribuindo-se a elas uma prioridade proporcional ao nível das criticidades. Nos SDPEEs, há normalmente os consumidores (cargas) mais sensíveis às interrupções no fornecimento de energia, a exemplo dos hospitais, serviços básicos e estratégicos. Se tiverem sido afetados pela falta, esses consumidores tidos como especiais devem ser imediatamente reenergizados. Os demais são considerados cargas comuns. Portanto, o índice de priorização das cargas (IPC) admite dois tipos de prioridade:

$$IPC(\boldsymbol{sw}^c) = \sum_{k=1}^{N_B} O_k - \sum_{k' \in \boldsymbol{\Upsilon}(t)} O_{k'} \tag{2.28}$$

em que O_k denota o valor de prioridade para a k-ésima barra energizada. O primeiro termo da Equação (2.28) corresponde à soma das prioridades de todas as barras energizadas no período pré-falta. O segundo termo dessa mesma equação é igual ao somatório das prioridades das barras mantidas energizadas e reenergizadas. O índice k' refere-se às barras energizadas para a configuração de restauração sugerida após o isolamento da(s) falta(s).

2.3.4 Restrições de Igualdade e Desigualdade

Na restauração, as mesmas restrições vistas para o caso da reconfiguração são aplicadas. Além delas, outras específicas são definidas. Com base no critério da concessionária de energia, as cargas que permaneceram energizadas após a ocorrência da falta não devem ser afetadas pelo PMR:

$$\sum_{k \in \boldsymbol{B}} \vartheta(k, \boldsymbol{sw}^0) - \sum_{k \in \boldsymbol{B}} \vartheta(k, \boldsymbol{sw}^c) \leq 0 \tag{2.29}$$

Por outro lado, o critério anterior pode ser preterido em favor de um esquema de prioridades afim ao critério IPC. Com ele, um consumidor de maior prioridade (especial) não pode ser preterido em favor de outro menos prioritário (comum) diante da indisponibilidade de potência suficiente para ambos:

$$\begin{aligned} &\vartheta(k2, \boldsymbol{sw}^c) - \vartheta(k1, \boldsymbol{sw}^c) \leq 0 \qquad k1, k2 \in \boldsymbol{B} \quad se \quad O_{k1} > O_{k2} \quad e \\ &|P_{k1} + jQ_{k1}| + |P_{k2} + jQ_{k2}| > S_r^{max} - \sum_{\substack{k \in \boldsymbol{\Delta}_r^c \\ k \neq k1,k2}} |P_k + jQ_k| \end{aligned} \tag{2.30}$$

Para qualquer PMR, nenhuma chave deve ser manobrada mais de uma vez, restrição já atendida pela escolha de $\boldsymbol{sw}^c$ como variável de otimização:

$$\nexists q_i, q_j \in \boldsymbol{M}^c \ \mid \ i = j \quad \forall i, j = 1, \dots, \|\boldsymbol{M}^c\| \tag{2.31}$$

Define-se matematicamente o conjunto $\boldsymbol{M}^c$:

$$\boldsymbol{M}^c := \{ q \mid \left| sw_q^c - sw_q^0 \right| = 1 \ \forall q \in \boldsymbol{W} \} \tag{2.32}$$

Na restauração, a radialidade deve ser mantida como restrição para as cargas passíveis de energização. Embora os PMRs que viabilizam a reenergização de todas as cargas sejam desejáveis, a existência deles está condicionada ao estado operativo do SDPEE.

2.4 Radialização em Sistemas de Distribuição Primária

Os alimentadores com topologia em árvore (radial) que integram os SDPEEs são os mais comuns, visto que o investimento requerido para a construção dos mesmos é menor do que o necessário se outras topologias (ex. reticulado) fossem usadas. Além da economia estrutural, a topologia radial reduz a complexidade do sistema de proteção contra faltas que causam as sobrecorrentes. No entanto, a radialidade deixa as cargas do SDPEE mais vulneráveis às desenergizações, justamente pelas poucas alternativas de conexão às subestações que as alimentam.

A radialidade é condição primordial para a factibilidade da solução encontrada pelo algoritmo de otimização. Em ambos os contextos, de reconfiguração e de restauração, a restrição topológica não deve ser violada e, portanto, ela é uma restrição crítica. Em uma solução dita topologicamente factível não deve haver ciclos nem barras isoladas. Na reconfiguração, a radialidade e a conectividade de todos os nós de carga são restrições necessárias. Na restauração, a conectividade de todas as barras é uma condição desejada e complementar, muitas vezes, não atendida.

De acordo com Lopez (LOPEZ *et al.*, 2004) e Mendoza (MENDOZA *et al.*, 2006), a radialidade da configuração é assegurada se a igualdade a seguir é atendida:

$$N_B - N_R = \|\boldsymbol{\tau}\| + \|\boldsymbol{\Psi}\| \tag{2.33}$$

em que $\boldsymbol{\tau} = \{\, i \mid sw_{q,i}^{c} = 1\}$ é o conjunto de todas as linhas cujas chaves se encontram fechadas. Embora necessária, a Eq. (2.33) não é suficientemente genérica para atender às situações com múltiplas fontes ($N_R > 1$). Duas condições matemáticas são então propostas para caracterizar a radialidade:

$$\|\boldsymbol{\tau}\| + \|\boldsymbol{\Psi}\| = N_L - \|\bar{\boldsymbol{\tau}}\| = N_B - N_R \tag{2.34a}$$

$$\|\bar{\boldsymbol{\tau}}\| = N_O = N_L - N_B + N_R \tag{2.34b}$$

em que $\bar{\boldsymbol{\tau}} = \{\, i \mid sw_{q,i}^{c} = 0\}$ representa o conjunto de linhas com chaves abertas de uma configuração factível. No entanto, as igualdades anteriores determinam apenas o número de linhas que devem se manter energizadas, não correspondendo necessariamente à factibilidade. Para tal, é necessário verificar as condições dadas pelas Equações (2.10) e (2.11) para cada barra e chave, respectivamente.

2.5 Propriedades do Espaço de Busca

Os problemas de reconfiguração e restauração apresentam um espaço de busca irregular, com distribuição desordenada das soluções (SCHMIDT *et al.*, 2005). Esse espaço é tão amplo quanto o número de chaves (2^{N_W}), uma vez que tanto o PRec-SDPEE quanto o PRes-SDPEE são combinatoriais. No entanto, as 2^{N_W} possibilidades de configuração radial dependem estritamente de:

a) quantidade de NPPs;
b) quantidade de ciclos;

c) quantidade de linhas chaveáveis que pertençam aos ciclos;
d) localização dessas linhas chaveáveis com sobreposição de trechos entre ciclos adjacentes.

No espaço de busca discreto, determinado pela escolha das variáveis de decisão discretas, o número de soluções topologicamente viáveis é bastante reduzido. Para exemplificar, cinco SDPEEs de teste são detalhados na Tabela 2.1, juntamente com as características do espaço viável (última coluna).

Tabela 2.1 – Detalhes de topologia, especificações elétricas e do espaço de busca relativos a cinco dos sistemas testados.

Sistemas de Teste	Referências	N_R	N_B	N_L	N_W	N_O	S_{base} (MVA)	V_{base} (kV)	Número de Possibilidades	Combinação $\binom{N_W}{N_O}$	N_C
1	(ZHU, 2002) (BARAN e WU, 1989)	1	33	37	37	5	10	12,66	2^{37}	376.992	50.751 †††
2	(RAMOS *et al.*, 2005) (HUANG, 2002) (SWARNKAR *et al.*, 2011)	1	70	74	74	5	10	12,66	2^{74} ††	15.020.334	376.028
3	(ZHU, 2002) (HONG e HO, 2005) (LIN *et al.*, 2000) (CIVANLAR *et al.*, 1988) (GOSWAMI e BASU, 1992) (GOMES *et al.*, 2005)	3	16	16	16	3	100 †	12,66	2^{16}	560	190
4	(SU e LEE, 2003)	11	94	96	96	13	100	11,4	2^{96}	$4{,}036 \times 10^{15}$	$3{,}5196 \times 10^{11}$
5	(CARRENO *et al.*, 2008)	1	136	156	156	21	100	13,8	2^{156}	$5{,}435 \times 10^{25}$	$2{,}2686 \times 10^{18}$

† Esse valor não consta no trabalho de Zhu (ZHU, 2002).
†† Pressupõe-se que todas as linhas de distribuição sejam chaveáveis assim como em (HUANG, 2002).
††† Conforme visto em (MORTON e MAREELS, 2000).

O sistema de distribuição mais simples avaliado nesse trabalho contém três alimentadores e treze barras de carga. A Figura 2.1 ilustra esse sistema que segue o mesmo padrão de identificação dos componentes visto em (GOMES *et al.*, 2005). Nota-se a existência de três ciclos fundamentais descritos pela sequência de barras: s16-s17-s21-s24-s22 (ciclo 1), s12-s13-s14-s15-s17-s18-s19-s21-s23-s24-s25-s 26 (ciclo 2) e s11-s12-s15-s19-s18-s16 (ciclo 3). O padrão de distribuição das soluções de acordo com o modelo matemático pode não ser compatível com os princípios norteadores nos quais um algoritmo de otimização se baseia. Na Figura 2.2, as soluções viáveis do sistema da Figura 2.1 têm um padrão de dispersão pelo espaço de busca dado pelo critério de perdas reais. O critério de perdas de potência ativa é representado por meio de cores cujos valores estão normalizados e mapeados de acordo com a barra de cores à direita do gráfico. O valor unitário (nulo) nesse critério equivale à máxima (mínima) perda.

Obter um "retrato" do espaço de busca resultante de um problema equivalente de menor complexidade para determinar o tipo de algoritmo mais adequado pode ser uma boa prática. Além disso, a reordenação das soluções no espaço de busca pode ser uma estratégia interessante para melhor distribuir as soluções nesse espaço, o que pode evitar vazios muito extensos e aglomerar as soluções promissoras de forma suave e gradual. Para tal, a representação (codificação) das soluções e o esquema de rotulação dos dispositivos chaveáveis no sistema de distribuição primária que fazem parte de ciclos devem ser cuidadosamente planejados. Normalmente, a eficiência da resolução de problemas combinatoriais é sensível à representação da solução.

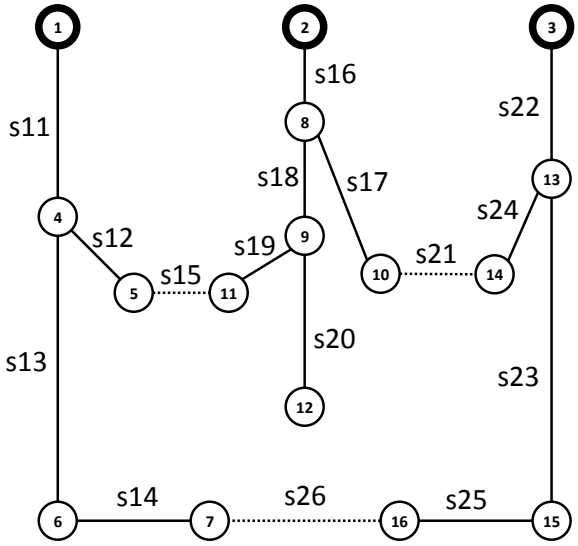

Figura 2.1 - Sistema de teste com 16 barras (ZHU, 2002; GOMES, 2005).

Além da radialidade, as restrições técnico-operacionais reduzem ainda mais a quantidade de soluções viáveis.

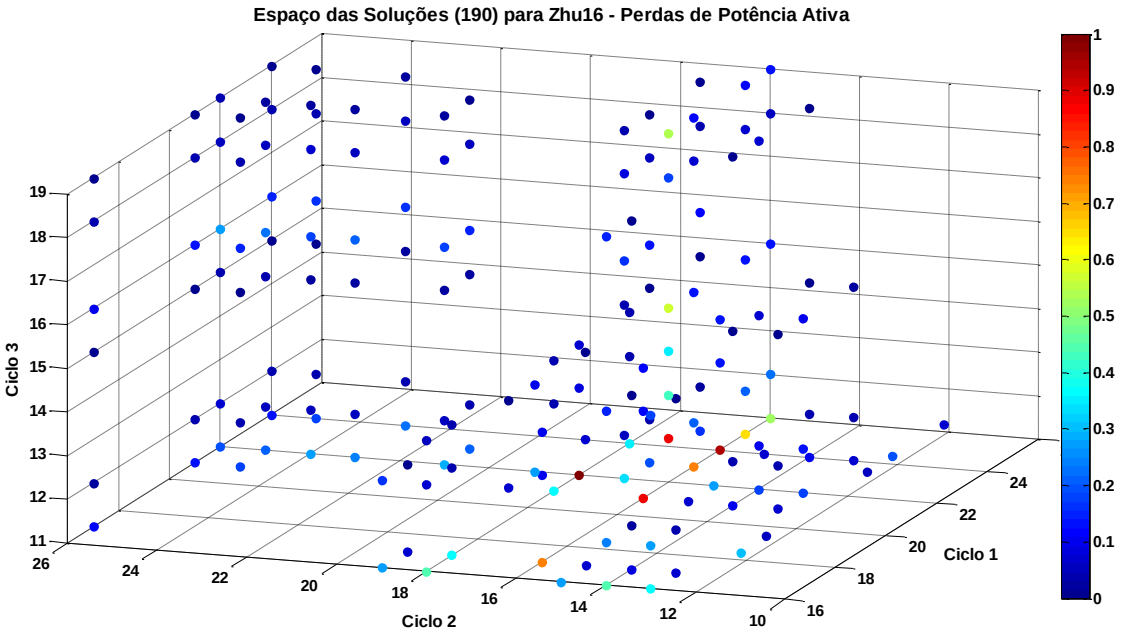

Figura 2.2 - Aspecto do espaço de busca para o sistema de teste #1 (ZHU, 2002) que possui três ciclos fundamentais identificados.

A enumeração de soluções por busca exaustiva é inviável para SDPEEs de médio e grande portes. Em seu trabalho, Miu (1998) sugeriu uma equação para definir a quantidade máxima de configurações radiais a partir do número de chaves NA e NF presentes em um SDPEE. Entretanto, tal equação não obtinha um valor exato de configurações radiais. No presente trabalho, o Teorema de Kirchhoff é usado para esse fim.

2.5.1 Teorema da Matriz-Árvore de Kirchhoff

O Teorema de Kirchhoff (MAURER, 1976; TUTTE, 2001) ou Teorema da Matriz-Árvore de Kirchhoff é muito útil para se determinar com exatidão o número de árvores de escoamento (*spanning tree*) resultantes de um grafo $G(\boldsymbol{N}, \boldsymbol{A})$ com $\boldsymbol{N}$ nós e $\boldsymbol{A}$ arestas arbitrárias.

Teorema. A quantidade de árvores geradoras de G, denotada por $\|\boldsymbol{\Gamma}(G)\|$, é dada por qualquer cofator da matriz Laplaciana de G.

De fato, esse teorema é uma generalização da fórmula de Cayley (CAYLEY, 1889), a qual determina o número de árvores para um grafo completo. O teorema em questão baseia-se na construção da matriz Laplaciana $\boldsymbol{L}_K$ de ordem $N_B \times N_B$ que representa diretamente o grafo G:

$$\boldsymbol{L}_K = \begin{bmatrix} grc(n_1, G) & -1 & \dots & 0 \\ -1 & grc(n_2, G) & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & -1 & \cdots & grc(n_{N_B}, G) \end{bmatrix} \tag{2.35a}$$

$$l_{ij} = \begin{cases} grc(n_k, G)\,, & se\ \ i = j \\ -1\,, & se\ \ i \neq j \quad e \quad n_i\ \text{é}\ adjacente\ a\ \ n_j \\ 0\,, & se\ \ i \neq j \quad e \quad n_i\ \text{não é}\ adjacente\ a\ \ n_j \end{cases} \tag{2.35b}$$

em que a função $grc(n_k, G)$ indica o número de arestas incidentes ao nó k no grafo G.

A matriz Laplaciana é composta de elementos da diagonal (e, e) que correspondem ao grau de conexão de cada nó do grafo e elementos fora da diagonal (e, f) que podem ser iguais a -1 para indicar a conexão entre os nós e e f, ou iguais a 0 para indicar ausência de conexão entre os nós e e f. Os elementos fora da diagonal são obtidos de modo similar à construção de uma matriz de incidência. Por se tratar de um procedimento relativamente simples, o tempo de cálculo é polinomial. Como exemplo, a matriz Laplaciana 16×16 a seguir é obtida para o sistema ilustrado na Figura 2.1:

$$\boldsymbol{L}_K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 3 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 3 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

A extensão do teorema para SDPEEs com múltiplos NPPs é imediata. Basta empregar a "fusão" dos NPPs em um único NPP virtual para obter G'. A partir daí, o procedimento de análise de G' se dará da forma anteriormente descrita. A Figura 2.3(a) apresenta um exemplo de SDPEE com quatro NPPs e a Figura 2.3(b) mostra o grafo G'.

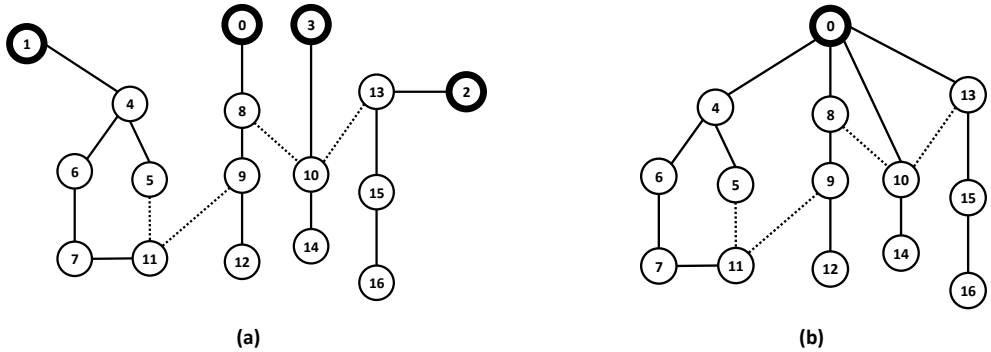

Figura 2.3 – Exemplo de um grafo *G* equivalente a um SDPEE com 4 fontes e 13 barras de carga: (a) Esquema do sistema, (b) grafo equivalente *G'* com fusão dos NPPs.

2.6 Simplificações dos Problemas Abordados: PRec e PRes

Os problemas PRec e PRes são abordados nesse estudo com detalhamento dos componentes do SDPEE e da análise relacionada aos procedimentos de operação considerados suficientes à identificação de uma configuração de rede segura, estável e compatível com os critérios definidos no modelo matemático. No entanto, alguns aspectos estão sendo desconsiderados, ora por seus efeitos não serem o foco dessa investigação científica, ora pela complexidade da modelagem matemática envolvida mostrar-se desnecessária. Dentre as principais simplificações, estão:

- os efeitos de transitórios incluindo-se aqueles causados pelas manobras de chaveamento;
- a interferência da atuação de dispositivos de proteção;
- a presença de geração distribuída;
- e a interação com outros estágios do SEP (sistema de distribuição secundária, geração, transmissão).

Além disso, funcionalidades associadas aos problemas de otimização da configuração de SDPEE não foram abordadas:

- metodologia para localização de faltas (para o caso da restauração);
- estudo das operações/manobras para isolamento dos componentes afetados por faltas;
- modelagem de agentes externos ao SDPEE e fenômenos causadores das faltas (ex. descargas atmosféricas);
- e análise de curto-circuitos.

É importante mencionar que outros tópicos afins ao problema de operação segura e eficiente de SDPEEs não foram tratados nesse estudo apesar de serem importantes. Para citar alguns: compensação de reativos, alocação ótima de chaves e alocação de reguladores de tensão. Tais assuntos, mesmo que entendidos classicamente como problemas de planejamento de alimentadores, podem ser reformulados para o contexto operacional.

2.7 Conclusões

Nesse capítulo, a reconfiguração e a restauração foram definidas. O modelo matemático foi detalhado para a otimização multiobjetivo aplicável aos casos de reconfiguração e restauração. O grupo de critérios (objetivos), as variáveis de otimização associadas à definição do modelo e as restrições físicas, técnicas e gerenciais foram devidamente apresentados. A radialidade foi formalmente descrita para ser incorporada à análise das soluções a ser feita pelo algoritmo de otimização. Algumas características determinantes do espaço de busca do problema combinatorial foram ressaltadas. Ainda nesse capítulo, o teorema da Matriz-Árvore foi brevemente explicado por se tratar de conhecimento essencial à realização dos algoritmos pretendidos. Finalmente, as hipóteses simplificadoras para a abordagem escolhida foram enumeradas.

A simplificação do objetivo relacionado ao número de chaveamentos não traz alterações significativas no modelo matemático. Ao contrário, o maior detalhamento do custo das manobras reduz a cardinalidade do conjunto de soluções eficientes o que, de certo modo, limita a análise posterior das soluções em relação ao sequenciamento das manobras, a ser visto no Capítulo 6. Por se tratar de um aspecto gerencial e não técnico, o custo das manobras pode ser um critério de tomada de decisão composto de maneiras distintas pelas variáveis relacionadas ao tipo da chave, tipo da manobra (com tensão ou sem tensão), localização e impacto da manobra sem, no entanto, requisitar uma nova otimização. Portanto, incluir termos associados à complexidade de realização das manobras não apresenta tantas vantagens quanto considerá-los em um processo de tomada de decisão a posteriori. Ademais, há possibilidade de soluções eficientes serem eliminadas ao se verificar sua realização em termos do sequenciamento das manobras.

3 - Otimização Multiobjetivo

3.1 Introdução

A otimização da configuração de sistemas de distribuição pertence à classe dos problemas combinatoriais complexos balizados por múltiplas restrições. A restrição topológica para sistemas radiais aliada à natureza discreta das variáveis de decisão escolhidas para representar os estados das chaves impede a adoção de técnicas clássicas. Portanto, grande parte dos algoritmos sugeridos na literatura é baseada em técnicas heurísticas de busca e meta-heurísticas. Mas as soluções identificadas por técnicas heurísticas de busca normalmente são ótimos locais (KING *et al.*, 2003).

3.2 Otimização da Configuração em SDPEEs – Revisão da Literatura

Os primeiros trabalhos relacionados à identificação da configuração ótima em SDPEEs datam do final das décadas de 70 e 80 (MERLIN e BACK, 1975) (CASTRO *et al.*, 1980) (AOKI *et al.*, 1987) (AOKI *et al.*, 1988) (AOKI *et al.*, 1988) (CIVANLAR *et al.*, 1988) (AOKI *et al.*, 1989) (LIU *et al.*, 1989) (SHIRMOHAMMADI e HONG, 1989). Em seu trabalho pioneiro, Merlin desenvolveu uma heurística destrutiva com abertura sequencial de chaves (MERLIN e BACK, 1975). E Shirmohammadi, usando estratégia similar, procurou resolver as redes radiais equilibradas com consideração de ampacidade nas linhas e queda de tensão máxima (SHIRMOHAMMADI e HONG, 1989). Outro trabalho que investiu em uma heurística destrutiva foi o de Gomes (GOMES *et al.*, 2005).

Civanlar (CIVANLAR *et al.*, 1988) propôs um método para determinar a configuração de alimentadores em um SDPEE genérico que não dependia do porte do sistema e buscava a redução das perdas reais. Este foi o primeiro trabalho a propor a aplicação de um algoritmo heurístico puro, baseado na permuta de ramos (*branch exchange*), capaz de avaliar o acréscimo nas perdas relacionado a cada manobra executada. A estimativa na distribuição de potência entre as cargas afetadas pela atuação de um par de manobras evitava o cálculo do fluxo de potência para a nova configuração. Similarmente, Aoki (AOKI *et al.*, 1988) desenvolveu outra heurística para realizar a permuta de ramos em sistemas radiais.

Com o intuito de compensar o esforço computacional despendido pela heurística sugerida, Baran e Wu (1989), assim como em (CIVANLAR *et al.*, 1988), empregaram uma estimativa para o fluxo de potência em lugar do método convencional de modo a reduzir o custo computacional da implementação. No entanto, os autores provaram a eficácia do método proposto apenas para as redes radiais de pequeno e médio porte. Em 1990, Glamocanin (GLAMOCANIN, 1990), Nahman (NAHMAN e STRBAC, 1994) e McDermott (MCDERMOTT *et al.*, 1999) propuseram heurísticas construtivas para o PRec-SDPEE. Ao contrário do algoritmo visto em (MERLIN e BACK, 1975) e similares, o sistema tinha suas chaves inicialmente desconectadas. A adição de cargas via manobras de fechamento de chaves era analisada uma a uma comutando-se os ramos sob a subárvore atual.

Os trabalhos de Liu (LIU *et al.*, 1988) e Hsu (HSU *et al.*, 1992) propuseram sistemas especialistas que utilizavam bases de conhecimento construídas a partir da experiência de operadores para resolver o PRes-SDPEE. Com uma metodologia similar, Morelato empregou uma heurística baseada em regras práticas (MORELATO e MONTICELLI, 1989). Em 1995, Nagata (NAGATA *et al.*, 1995) combinou a programação matemática com sistemas especialistas admitindo um custo para cada operação de chaveamento. A proposta em questão mostrou-se viável apenas para sistemas radiais de pequeno porte.

O potencial de aplicação dos métodos estocásticos em problemas de operação e planejamento de sistemas de potência mal-condicionados é grande. A reconfiguração de sistemas de distribuição para a redução de perdas de potência ativa foi proposta originalmente por Merlin e Back (MERLIN e BACK, 1975).

Por se tratar de um método com baixa demanda computacional, o recozimento simulado foi usado em (CHIANG e BARAN, 1990) para resolver esse mesmo problema. O recozimento simulado obteve êxito ao identificar soluções de qualidade razoável (proximidade do ótimo global) em redes de distribuição de pequeno porte. Posteriormente, Jeon e outros desenvolveram, em 2002, um mesmo tipo de algoritmo para lidar com sistema de distribuição de maior porte (JEON *et al.*, 2002). As redes neurais também mostraram sua viabilidade para redes de pequeno e médio portes (KIM *et al.*, 1993) (HSU e HUANG, 1995) (KASHEM *et al.*, 1998).

Algoritmos meta-heurísticos modernos têm sido experimentados em problemas de otimização combinatorial, incluindo-se o PRes-SDPEE. Versões hibridizadas de algoritmos até então existentes também foram experimentadas. Algoritmos genéticos paralelizados (FUKUYAMA *et al.*, 1996), recozimento simulado paralelizado (MORI e TAKEDA, 1994), busca tabu (MORI e OGITA, 2002) e busca tabu reativa (TOUNE *et al.*, 1998) (FUDO *et al.*, 2000) são alguns exemplos. Além desses, as meta-heurísticas modernas, a exemplo da colônia de formigas (SU *et al.*, 2005) e abelhas (NIKNAM, 2009), têm sido empregadas para resolver o problema de reconfiguração em SDPEEs.

Teorias aliadas à inteligência computacional têm sido aplicadas a exemplo da lógica nebulosa. Nessa direção, Prasad determinou a reconfiguração ótima de um SDPEE radial de pequeno porte a partir de um algoritmo genético com processo de mutação controlado por lógica nebulosa (PRASAD *et al.*, 2005). Para tal, ele aplicou os princípios da lógica nebulosa de maneira a regular a mutação do algoritmo genético e, assim, direcionar a obtenção das soluções mais adequadas.

Outros trabalhos como os de Song (SONG *et al.*, 1997), Huang (2002) e Hong (2005) acoplaram a lógica nebulosa aos algoritmos genéticos para resolver SDPEEs radiais de pequeno porte. No Quadro 3.1, são apresentadas as abordagens mais relevantes sobre a restauração e a reconfiguração.

Quadro 3.1 – Trabalhos destacados sobre reconfiguração e restauração de SDPEEs.

Publicação	Relevância'		Função Objetivo	Restrições Admitidas	Método de Otimização	Características do SDPEE
	Total [2] Citações	Média[3] Anual				
Baran e Wu (1989)	618	25,75	Minimizar perdas e equilibrar cargas	Conservação de energia	Permutação de ramos e estimativa do fluxo de potência	Radial, pequeno e médio porte
Civanlar et al. (1988)	444	17,76	Minimizar perdas	Topologia, desvio de tensão	Aproximações sucessivas	Radial, qualquer porte
Nara et al. (1992)	269	12,81	Minimizar perdas	Ampacidade das linhas, capacidade de trafos	Algoritmos Genéticos (Programação Inteira Mista)	Radial, pequeno e médio porte
Goswami e Basu (1992)	243	11,57	Minimizar perdas	Não mencionado	Programação matemática	Radial, médio e grande porte
Shirmohammadi et al. (1989)	220	9,17	Minimizar perdas resistivas em condições normais	Queda de tensão e ampacidade das linhas	Programação matemática	Radial, médio e grande porte
Chiang e Jumeau (1990)	159	6,91	Minimizar perdas e balancear cargas	Operacionais, cargas e chaveamentos	Recozimento Simulado modificado	Distribuição, pequeno porte
Liu et al. (1988)	156	6,24	Restaurar e minimizar perdas	Confiabilidade do sistema	Sistema Especialista (base de conhecimento)	Radial, pequeno e médio porte
Taylor e Lubkeman (1991)	126	5,73	Restaurar e minimizar perdas	Capacidade de trafos e alimentadores	Árvore de decisão	Radial, pequeno e médio porte
Kim et al. (1993)	121	6,05	Minimizar perdas de acordo com variação da carga	Ampacidade e limite de queda de tensão	Redes Neurais Artificiais	Distribuição, pequeno e médio porte
McDermott et al. (1999)	120	8,57	Razão entre perdas e carga atendida	Limites de tensão e corrente	Heurística construtiva	Radial, médio e grande porte
Zhu (2002)	93	8,45	Minimizar perdas	Radialidade, limites de tensão e corrente	Algoritmos Genéticos	Distribuição, pequeno porte
Jeon et al. (2002)	91	8,27	Minimizar perdas totais	Ampacidade de linha e queda de tensão	Recozimento Simulado	Distribuição, grande porte
Nagata et al. (1995)	84	4,67	Restaurar o maior número de cargas no menor tempo	Custos para operações de chaveamento	Sistema Especialista + Programação Matemática	Sistemas de pequeno porte
Morelato e Monticelli (1989)	84	3,50	Restaurar	Limites operacionais e da carga	Heurística com regras práticas	Distribuição, pequeno porte
Hong e Ho (2005)	77	9,63	Minimizar perdas	Radialidade, queda de tensão, limite de corrente	Algoritmos Genéticos com decisão nebulosa	Distribuição, radial, pequeno porte
Hsiao e Chien (2000)	75	5,77	Minimizar área afetada, carga no trafo e chaveamentos	Limites de tensão e corrente	Algoritmos Genéticos + Lógica Nebulosa	Distribuição, médio porte
Lin et al. (2000)	70	5,38	Minimizar perdas	Limites de tensão e corrente	Algoritmos Genéticos com lista tabu	Distribuição, pequeno porte
Su et al. (2005)	66	8,25	Minimizar perdas	Limites de tensão e corrente	Colônia de formigas	Distribuição, pequeno porte
Hsu et al. (1992)	66	3,14	Restaurar	Tempo mínimo de chaveamento, radialidade	Regras heurísticas baseadas na experiência do operador	Distribuição, médio porte
Morton e Mareels (2000)	64	4,92	Minimizar perdas	Topologia	Busca Exaustiva (força bruta) + teoria de grafos	Distribuição, pequeno porte
Hsiao (2004)	60	6,67	Minimizar perdas, reduzir variação da tensão	Limites de tensão e chaveamentos	Programação Evolucionária + Lógica Nebulosa	Distribuição, médio porte
Huang (2002)	60	5,45	Minimizar perdas	Topologia, limites de tensão, corrente e chaveamento	Lógica Nebulosa + Algoritmos Genéticos	Distribuição, radial
Song et al. (1997)	57	3,56	Minimizar perdas	Limite térmico, queda de tensão,	Programação Evolucionária controlada	Distribuição, radial, pequeno

[2] Total de citações feitas ao artigo por periódicos indexados até março de 2013.

[3] Média anual de citações = Total de citações / idade do artigo.

				potência máxima	por Lógica Nebulosa	porte
Kuo e Hsu (1993)	54	1,88	Restaurar com estimação de carga	Capacidade dos trafos e linhas	Conjuntos nebulosos + heurística	Distribuição, radial, médio porte
Borozan et al. (1995)	52	2,07	Minimizar perdas	Potência disponível	Heurística com reordenação de ramos	Distribuição, radial, médio porte
Aoki et al. (1988)	51	1,57	Balancear cargas	Capacidade de trafos e linhas	Permuta de ramos	Distribuição, radial, grande porte
Prasad et al. (2005)	47	2,50	Minimizar perdas resistivas	Radialidade, desvio de tensão	Algoritmos Genéticos com mutação nebulosa	Distribuição, radial, pequeno porte
Sarfi et al. (1996)	44	1,69	Minimizar perdas	Custo do chaveamento	Teoria de particionamento de rede	Distribuição, não há limite para tamanho da rede
Aoki et al. (1987)	43	1,18	Minimizar perdas	Queda de tensão, capacidade das linhas e subestações	Programação não-linear quase quadrática	Malha, grande porte
Roytelman et al. (1996)	43	1,92	Minimizar perdas, balancear cargas, confiabilidade	Radialidade, queda de tensão, capacidade dos trafos	Permuta de ramos	Distribuição, radial, pequeno porte
Glamocanin (1990)	41	1,58	Minimizar perdas	Ampacidade das linhas e potência das subestações	Linearização das perdas (simplex)	Radial
Peponis e Papadopoulos (1995)	31	1,57	Minimizar perdas e balancear cargas	Radialidade e ampacidade	Heurística baseada na troca sequencial de chaves	Distribuição, radial, grande porte
Das (2006)	29	7,00	Minimizar perdas	Radialidade, desvio de tensão, corrente	Regras Heurísticas + Lógica Nebulosa	Distribuição, radial, médio porte
Hsu e Huang (1995)	29	1,07	Restaurar em tempo mínimo	Radialidade, chaveamento mínimo com ausência de sobrecarga	Redes neurais artificiais + reconhecimento de padrões	Distribuição, médio porte
Jeon e Kim (2004)	28	2,20	Minimizar perdas	Pré e pós-restrições (restrições usuais)	Recozimento Simulado + Busca Tabu	Distribuição, médio porte
Kashem et al. (1998)	27	1,27	Minimizar perdas de potência real	Não mencionado	Redes Neurais Artificiais	Distribuição, pequeno porte

3.3 Algoritmos Evolucionários

Diversas abordagens que variam desde as heurísticas puras (MERLIN e BACK, 1975; CIVANLAR *et al.*, 1988; BARAN e WU, 1989; MCDERMOTT *et al.*, 1999) aos métodos mistos (SHIRMOHAMMADI e HONG, 1989) (CHIANG e JUMEAU, 1990) (GOSWAMI e BASU, 1992) foram amplamente usadas no passado para resolver os problemas PRec-SDPEE e PRes-SDPEE. Porém esses métodos são fortemente atrapalhados pela existência de mínimos locais e outras armadilhas características do espaço de soluções sondado. Para contornar essas limitações, os algoritmos evolucionários que representam uma classe de técnicas estocásticas podem ser usados.

Os algoritmos evolucionários são estratégias de busca estocástica eficientes que emulam o paradigma da evolução natural em que os indivíduos mais bem adaptados ao meio têm maiores chances de sobrevivência. Desde as primeiras propostas, essa classe de técnicas tem sido usada em uma ampla variedade de problemas de otimização. Os algoritmos genéticos formam um conjunto de técnicas que fazem uso de operadores e processos básicos similares àqueles existentes na dinâmica biológica dos seres vivos. Esses operadores têm a principal função de alterar o genótipo dos indivíduos de maneira a tornar seus descendentes mais adaptados ao meio. Partindo de um conjunto de soluções iniciais, os operadores estocásticos são sistematicamente usados com o propósito de aprimorar as melhores soluções até então

encontradas. No processo de busca realizado por uma técnica AG, todas as regiões do espaço de busca do problema têm a mesma probabilidade de serem sondadas. Porém, por meio dos operadores genéticos (e.g. seleção, cruzamento e mutação), as áreas que se mostram mais promissoras durante o processo de busca acabam sendo explotadas mais intensamente. Como uma ferramenta de otimização extremamente flexível, os AGs têm mostrado sua eficácia na resolução de problemas lineares e não-lineares de grande escala, encontrando soluções ótimas ou quase ótimas (WONG *et al.*, 1999; KUBBA e MOKHLIS, 2012).

Já foram propostas na literatura especializada diversas heurísticas e sistemas especialistas para resolver os problemas de PRec-SDPEE e PRes-SDPEE. Por que então utilizar algoritmos evolucionários populacionais (AE) e similares (híbridos) para resolver o problema em questão? Algumas das justificativas são:

- a escalabilidade para o problema com grandes dimensões tornam as meta-heurísticas bioinspiradas mais atrativas do que os métodos puramente heurísticos, os sistemas especialistas e similares;
- as características do espaço de busca (*landscape*) viabilizam o uso desses algoritmos;
- os AEs sondam várias soluções em única execução;
- facilidade de incorporar e tratar múltiplos objetivos e restrições, o que pode não ser trivial de se formular com outros métodos clássicos;
- os AEs têm capacidade de busca com maior chance de identificação de soluções ótimas globais e maior potencial de escape das regiões que contêm ótimos locais.

Diferentemente das heurísticas puras ou das meta-heurísticas não-evolucionárias, esses algoritmos possuem mecanismos eficazes que permitem o processo de busca escapar de bacias criadas por ótimos locais e, assim, eles garantem uma exploração satisfatória do espaço de busca. Nesse trabalho, a otimização da configuração é realizada por implementações de alguns algoritmos evolucionários bem conhecidos pela comunidade científica. Dentre eles, o NSGA-II (DEB *et al.*, 2002) e o SPEA2 (ZIZTLER *et al.*, 2001). É importante mencionar que adaptações foram realizadas nas versões originalmente descritas dos algoritmos para aumentar a capacidade de busca dos mesmos no espaço viável com características próprias dos problemas aqui tratados (veja a Seção 2.5). Maiores detalhes sobre as adaptações dos AEs empregados com vistas à maior adaptabilidade ao PRes-SDPEE e ao PRec-SDPEE são dados na Seção 3.6.

3.4 Representação Eficiente de Soluções em AEs

O esquema de representação da solução contribui para o perfil de convergência do AE. Se a codificação for inadequada, o processo de busca realizado pelo AE pode até esboçar comportamento aleatório (ROTHLAUF, 2009). Foi discutida em (ROTHLAUF, 2009) a importância e a influência do esquema de codificação do indivíduo no desempenho de um algoritmo evolucionário ao resolver um problema específico como são a reconfiguração e a restauração de sistemas de distribuição primária. Dessa forma, o esquema de codificação das soluções foi um dos aspectos abordados nesta tese. O esquema de codificação ideal seria aquele no qual apenas as soluções topologicamente viáveis do problema são representadas. Ou seja, toda e qualquer combinação entre soluções resulta em outra solução igualmente

viável e, portanto, mecanismos de reparação para se obter a factibilidade não são necessários. Pode-se definir um valor de ganho para cada esquema de representação *e* tendo-se a extensão do espaço viável como referência. Dado um grafo, o tamanho do espaço viável $\boldsymbol{\Gamma}$ é conhecido por meio do teorema da Matriz-árvore, visto na Seção 2.5.1. Quanto maior for o valor desse ganho, melhor será a codificação:

$$Gn(e) = \frac{\|\boldsymbol{\Gamma}\|}{NP} \tag{3.1}$$

em que NP denota o número de possibilidades obtidas com o esquema de representação avaliado. O ganho $Gn(e)$ é uma medida da eficiência da codificação desenvolvida e o esquema de codificação ideal terá um valor unitário. Por exemplo, a codificação binária clássica (1 bit/chave) é uma das menos eficientes em termos de representação do espaço viável. Com ela, todas as combinações de estados das chaves podem ser obtidas ($NP = 2^{N_W}$):

Um esquema de representação eficiente reduz sensivelmente o tempo de busca pela solução ótima (formulação mono-objetivo) ou soluções eficientes (formulação multiobjetivo), uma vez que o espaço de busca acessível pelo algoritmo através da codificação pode ser bem menor. Nota-se pela Tabela 2.1, por exemplo, que para o sistema #5 há uma diferença da ordem de 10^{131} entre os tamanhos dos espaços de possibilidades e de busca, e outra diferença da ordem de 10^{7} entre os tamanhos do espaço de busca e espaço viável. Para o sistema de teste #1, o espaço de busca representa menos de 3×10^{-4} % do espaço de possibilidades e as configurações viáveis totalizam em torno de $3{,}7 \times 10^{-5}$ % do conjunto de soluções presentes nesse mesmo espaço.

3.4.1 Critérios para Avaliação da Codificação

Um esquema de codificação da solução pode ser avaliado por meio de oito critérios, a saber: **prolixia**, **complexidade**, **factibilidade**, **cobertura**, **tendência**, **localidade**, **herdabilidade/ hereditariedade** e **coerência evolucional**.

A **prolixia** indica o quão extensa é a sequência de símbolos usada para codificar uma dada configuração de rede. Esse critério está relacionado diretamente com o armazenamento em memória da estrutura de dados equivalente e, portanto, é desejável que ele seja o menor possível. A **complexidade** da codificação afeta os tempos de processamento necessários à interpretação e à construção de uma solução. Também deve ser mínima.

Já a **factibilidade** está relacionada com a correspondência entre as possibilidades permitidas pela codificação e as configurações de rede viáveis. Se ela for máxima (100%), então nenhum mecanismo de reparação de soluções será necessário. Juntos, os três primeiros critérios definem primariamente a eficiência computacional da representação. Os critérios seguintes afetam a convergência do algoritmo para as soluções ótimas do problema de otimização.

A **cobertura** mensura a proporção do espaço viável com possibilidade de ser alcançada pela codificação. Nesse caso, a capacidade de representação de soluções inviáveis não contribui positivamente para o critério. Portanto, o número de soluções inviáveis codificadas é indiferente a esse critério. Idealmente, a codificação deve ser capaz de gerar toda e qualquer solução pertencente ao espaço viável $\boldsymbol{\Gamma}$ do problema e ser incapaz de gerar soluções inviáveis.

O critério denominado **tendência** é fundamental para evitar a busca cíclica ou a busca polarizada. Se a tendência existir, certas soluções serão preteridas em relação às demais, o que pode prejudicar definitivamente a convergência do algoritmo de otimização se as primeiras não forem as soluções ótimas do problema. É importante que todas as soluções representáveis pelo esquema de codificação tenham a mesma probabilidade de serem obtidas. Um caso particular da tendência é a redundância (ROTHLAUF, 2009) caracterizada pela existência de mais de um código (sequência genética) traduzido para a mesma configuração de rede. Se o esquema de representação for comprometido, cromossomos similares podem corresponder a uma mesma solução e prejudicar assim o procedimento de busca local ou explotação.

A **localidade** é um critério que relaciona a intensidade das mudanças sofridas pelo indivíduo com a significância da alteração da configuração que ele representa. Em outras palavras, pequenas perturbações nos valores dos genes de uma dada solução devem corresponder à obtenção de configurações adjacentes à original. Desse modo, esquemas de representação com alta localidade são desejados. Se ela for muito baixa, a busca feita pelo AE pode se tornar aleatória.

O próximo critério é representado por um par de atributos interrelacionados. A **herdabilidade** expressa o nível de correspondência entre o fenótipo (características observáveis) e o conteúdo genético de um dado indivíduo e determina, de certo modo, a influência da geração atual sobre a próxima geração de indivíduos. E a **hereditariedade** representa o grau de similaridade genética entre os indivíduos pais e seus filhos em termos de genes. Nesse sentido, o último critério – **coerência evolucional** – complementa a indicação da compatibilidade da representação da solução com os paradigmas da seleção natural que orientam a dinâmica de um algoritmo evolucionário. Assim sendo, a codificação não deve distorcer ou prejudicar a função dos operadores estocásticos e o principal fundamento das técnicas evolucionárias que é a perpetuação dos genes mais bem adaptados ao meio (problema de otimização).

Portanto, pode-se perceber que uma representação ideal deve ser concisa, de fácil interpretação, imune às infactibilidades topológicas e compatível com os operadores estocásticos. De maneira geral, o atendimento às propriedades citadas por Raidl e Julstrom (RAIDL e JULSTROM, 2003) tem sido a maior prioridade das codificações mais recentemente apresentadas em publicações.

3.5 Esquemas de Codificação – Estado da Arte

Nas últimas três décadas, a codificação do indivíduo foi abordada de modo recorrente (MORELATO e MONTICELLI, 1989; DELBEM *et al.*, 2005; MENDOZA *et al.*, 2006; CARRENO *et al.*, 2008; BRAZ e SOUZA, 2011) com o propósito de aprimorar um ou mais dentre os seguintes aspectos: eficiência computacional para lidar com sistemas de grande porte, robustez na busca por ótimos globais, mapeamento das soluções sem ambiguidades, codificação capaz de criar e delimitar um espaço de busca "comportado" e livre de soluções inviáveis, adequabilidade aos processos de exploração e explotação (busca local) do espaço de busca efetuados por meio de operadores genéticos implementados em um algoritmo evolucionário.

O desempenho na busca pelas soluções eficientes de um problema multiobjetivo é severamente afetado pela representação do indivíduo (HSIAO e CHIEN, 2000; ROTHLAUF, 2009). Nesse sentido, muitos trabalhos científicos investigaram esse aspecto e vários esquemas de codificação têm sido sugeridos para lidar principalmente com a questão da radialidade (SWARNKAR *et al.*, 2011) e com a varredura eficaz do espaço viável do problema. Esses diversos esquemas têm representado as configurações de rede por meio de sequência de bits ou inteiros que devem conter informações sobre os estados das chaves NA e NF (NARA *et al.*, 1992). Essa breve revisão bibliográfica destaca as contribuições mais relevantes, presentes na literatura especializada, para os problemas PRes-SDPEE e PRec-SDPEE, em termos da codificação do indivíduo aplicada às meta-heurísticas.

Várias codificações propostas em trabalhos publicados visaram contornar a verificação da radialidade ou mesmo a reparação dos indivíduos infactíveis, que representam uma barreira computacional considerável para o desempenho do algoritmo. Tecnicamente, os esquemas de codificação têm sido categorizados em dois tipos de acordo com a estratégia que empregam: codificação por nós e codificação por arestas. Naturalmente, há estratégias de codificação secundárias que podem combinar as duas anteriores a exemplo do caminho-para-nó (RAMOS *et al.*, 2005), teoria de matróides (ENACHEANU *et al.*, 2008) e chaves aleatórias de rede (QUEIROZ e LYRA, 2009).

Grande parte das codificações propostas disponíveis na literatura representam configurações de rede por sequência de bits ou por números inteiros. As primeiras codificações empregavam a codificação binária para indicar os estados das chaves associados a uma dada configuração do SDPEE. Por convenção, o bit 0 (1) poderia denotar uma chave aberta (fechada). Uma sequência de bits (1 bit/chave) empregada para mapear os estados de todas as chaves de um sistema de distribuição de energia elétrica foi a primeira proposta elaborada tanto por Morelato (MORELATO e MONTICELLI, 1989) quanto por Nara (NARA *et al.*, 1992) – Codificação Binária Direta Clássica. Mesmo que fosse simples de ser implementado, esse esquema ampliava desnecessariamente o espaço de busca do problema. De maneira similar, Hsiao (2000), Shin (2004) e Huang (2002) utilizaram sequências binárias, também conhecidas como vetores característicos, de comprimento proporcional ao tamanho do sistema elétrico.

Embora ainda usasse a codificação binária, Sahoo (2006) e (2007) já propunha um indivíduo mais conciso com N_O substrings que correspondiam ao número de ciclos ou chaves de interconexão no sistema. Com isso, a representação da rede utilizava sequências menores e de tamanho fixo. Ainda era uma representação pouco eficiente. Em 2002, Zhu propôs codificar apenas as chaves que estivessem abertas na rede (ZHU, 2002) e superou em eficiência a codificação de Nara (NARA *et al.*, 1992), pois simplificava enormemente a sondagem do *landscape* e a implementação do algoritmo genético usado na resolução do problema.

Algumas representações por nós mais simples adotaram a codificação inteira priorizando o formato do conteúdo de indivíduos em lugar da compatibilidade com os operadores estocásticos e os paradigmas da evolução natural. Dentre elas, podem ser citados os esquemas de nó predecessor (FUKUYAMA *et al.*, 1996) e nó predecessor com alfabeto restrito (MIRANDA *et al.*, 1994). Com essas estratégias, a interpretação do indivíduo é imediata, porém a avaliação da factibilidade exige maior esforço computacional.

Há ainda as codificações cifradas que visam eficiência na representação do espaço de busca e a manutenção da factibilidade dos indivíduos criados e alterados pelos operadores estocásticos. Os números Prufer (HONG e HO, 2005), as chaves de rede aleatórias (QUEIROZ e LYRA, 2009) e as cadeias principais (DELBEM *et al.*, 2005) são exemplos de codificações cifradas. Embora elas consigam reduzir o tamanho do indivíduo representativo de uma configuração de rede se comparadas às abordagens convencionais, os custos da codificação e da decodificação devem ser contabilizados. Por exemplo, os números Prufer não garantem imunidade da codificação diante da aplicação de operadores genéticos a um dado indivíduo e, portanto, a verificação de radialidade não pode ser desconsiderada. Além disso, a correspondência entre o grafo representativo da rede e a sequência codificada pode falhar para alguns casos como os descritos em (ROTHLAUF, 2009). Nesse sentido, a representação por chaves abertas ainda pode ser mais vantajosa por não requerer um procedimento de interpretação complexo.

Prasad (PRASAD *et al.*, 2005) desenvolveu um esquema de codificação não muito eficiente que criava sequências numéricas mais extensas. O comprimento dessas sequências era obtido pela expressão $tl \cdot (1 + \log_2(N_W))$ em que tl denotava a quantidade de chaves de interconexão presentes na rede elétrica. Cada uma das tl subsequências indicavam as chaves que faziam parte de um dos ciclos existentes no grafo que representava a rede elétrica. Nesse esquema, a decodificação não assegurava a radialidade que deveria ser verificada por meio de um procedimento de detecção de ciclo a ser incorporado ao algoritmo evolucionário, mas não detalhado por Prasad. Os operadores de recombinação dependiam da identificação prévia dos ciclos do grafo e confiavam em uma indexação de chaves abertas vulnerável a erros.

Diferentemente das estratégias de codificação por nós e codificações cifradas, Ramos (RAMOS *et al.*, 2005) propôs um esquema compacto o qual ele denominou de caminho-para-nó (*path-to-node*). Esse método determinava os caminhos alternativos que levavam cada uma das barras de carga ao NPP que fornecia a potência ao alimentador. A identificação preliminar dos diferentes caminhos razoáveis tornava possível a composição da população inicial necessária para um AE. Apesar de se diferenciar em relação a outras representações mais comuns, a codificação proposta por Ramos não era imune à infactibilidade, principalmente quando indivíduos eram gerados de forma aleatória, visto que a condição de caminho singular não era garantida para todos os nós do grafo. No exemplo contido em seu artigo, é possível obter uma configuração não radial descrita pela sequência $W_1^A, W_1^B, W_4^C = 1$, quando todos os caminhos são listados. Portanto, a radialidade precisava ser checada constantemente por um processo de análise de grafos aplicado a todo indivíduo criado, o que representava um custo computacional significativo. A abordagem baseada em caminhos não assegura a acessibilidade de todo o espaço viável do problema, visto que ela não cria todas as possibilidades de configuração.

As cadeias principais (*main chains*) foram uma nova forma de representação para as florestas sugerida por Delbem e outros (DELBEM *et al.*, 2003; DELBEM *et al.*, 2005). Essa abordagem foi considerada uma versão aprimorada do esquema caminho-para-nó que adotava dois operadores inspirados na programação genética – a poda e a transferência de subárvores.

Usando um vetor diferencial de comprimento variável, Lin codificou somente as chaves cujos estados eram modificados (LIN *et al.*, 2000). Para conservar a radialidade de um grafo, apenas

uma das chaves associadas a um ciclo poderia ser aberta. Ele também sugeriu que uma parcela da população inicial fosse composta de indivíduos não-aleatórios e que, durante a evolução da população, um balanço entre as operações de exploração e explotação fosse realizado através do compartilhamento da taxa de probabilidade. Esse balanço seria controlado por uma espécie de retroalimentação que indicasse o desempenho do algoritmo durante a busca. Uma lista tabu ainda evitaria a sondagem de soluções inviáveis já avaliadas. Lin ainda fez uso do elitismo, ao considerar os b melhores indivíduos, e do método da roleta aplicado às populações de pais e filhos. Por um lado, esses recursos reduziram drasticamente o espaço de busca. Por outro lado, indivíduos inviáveis tinham maior probabilidade de serem obtidos, especialmente quando redes de distribuição de grande porte eram tratadas.

Posteriormente, Mendoza (MENDOZA *et al.*, 2006) também empregou a codificação inteira para descrever apenas as chaves (arestas) abertas em uma rede (grafo). Seu trabalho foi baseado essencialmente na análise topológica ou de grafos em que ciclos fundamentais deveriam ser identificados. Apesar de operadores genéticos especializados terem sido propostos por Mendoza para lidar de maneira eficiente com a reconfiguração, eles não garantiam a factibilidade sob qualquer circunstância. O cruzamento acentuado e a mutação direcionada foram apresentados, porém a eficácia desses operadores era seriamente afetada ao tratarem grafos com arestas compartilhadas por dois ou mais ciclos fundamentais. Infelizmente, nenhuma descrição foi dada em seu trabalho sobre a reparação ou a recuperação de indivíduos infactíveis criados. Também é provável que a obtenção de indivíduos fosse baseada na tentativa e erro. Embora a detecção de ciclos fundamentais fosse o cerne do trabalho de Mendoza, ele não sugeriu um procedimento ou algoritmo para a detecção dos ciclos em um grafo genérico. De fato, a importância desse trabalho e outros similares (SIVANGARAJU *et al.*, 2006; CARRENO *et al.*, 2008; SWARNKAR *et al.*, 2011) para a elaboração de codificações mais eficientes é clara. Em tais algoritmos, o cômputo dos ciclos fundamentais é feito uma única vez para todo o grafo representativo da rede de distribuição. A partir daí, o processo de otimização pode ocorrer tantas vezes quanto for necessário sem o suporte de uma heurística complexa de detecção da radialidade, o que elimina um tempo de processamento não desprezível. É digno de nota que o pré-processamento empregado na identificação dos ciclos fundamentais aumenta para sistemas de grande porte que sejam muito reticulados.

No trabalho publicado por Swarnkar (SWARNKAR *et al.*, 2011), uma codificação de indivíduos orientada por regras e definições extraídas da teoria de grafos foi descrita. Seu esquema era sensível à restrição topológica de radialidade. Entretanto, um mecanismo de reparação dos indivíduos infactíveis ainda era necessário durante as etapas intermediárias do algoritmo evolucionário utilizado. Na proposta de Swarnkar, a otimização era iniciada com uma população de indivíduos obtidos a partir de uma heurística de permuta de ramos (AOKI *et al.*, 1988; CIVANLAR *et al.*, 1988; BARAN e WU, 1989). Juntamente com operadores genéticos modificados para o problema da reconfiguração de alimentadores, um elitismo local foi desenvolvido para atuar durante as operações de cruzamento entre indivíduos. O elitismo assegurava a continuidade dos indivíduos mais adaptados dentre os pais selecionados e seus indivíduos filhos. Sendo assim, as comparações locais (relativas) frequentes poderiam levar à perda de bons indivíduos se fossem comparados ao restante da população. De acordo com Enacheanu (ENACHEANU *et al.*, 2008), a taxa de sucesso de cruzamentos entre soluções para

as codificações baseadas em ciclos fundamentais decai com o aumento do número de ciclos no sistema analisado. Entretanto, tal observação ainda precisa ser complementada. Os ciclos fundamentais precisam ser superpostos. Essa taxa de sucesso também é influenciada pela extensão dos trechos coincidentes entre esses ciclos, o que implica em maiores possibilidades de isolamento de nós.

Garcia (GARCIA e FRANÇA, 2008) empregou uma estrutura de dados para representar as configurações radiais de um sistema composta por quatro listas: nós raízes, nós predecessores, alocação da árvore e profundidade dos nós. Uma heurística construtiva baseada no tão conhecido algoritmo de Prim (PRIM, 1957; AHUJA *et al.*, 1993) foi idealizada juntamente com uma busca local multiobjetivo. A interação entre a heurística e o algoritmo de busca local durante a seleção dos nós raízes procurou aprimorar a exploração do espaço de busca. Porém, não havia garantia de que a fronteira Pareto real fosse obtida, especialmente para sistemas maiores.

Baseando-se em teoria de conjuntos, Enacheanu (ENACHEANU *et al.*, 2008) sugeriu uma representação por co-árvore (chaves abertas) como a estratégia de codificação. Aliada à teoria de matróides, a proposta dava suporte aos operadores genéticos e não dependia da planaridade do grafo analisado. Entretanto, ela dependia da identificação de ciclos para emular o cruzamento com a troca de arestas entre duas árvores quaisquer. Tais trocas poderiam corresponder a transferências de cargas entre dois alimentadores ou dois caminhos para o mesmo NPP. Embora a verificação de ciclos não fosse necessária, a obtenção de novas configurações de rede podia ser custosa, visto que as arestas integrantes de um ciclo recém-formado deveriam ser encontradas durante o processo de formação do novo indivíduo.

Outra abordagem baseada em codificação por arestas foi descrita por Carreno (CARRENO *et al.*, 2008) e priorizou a adequação de operadores estocásticos ao problema de reconfiguração de alimentadores. O vetor representativo de comprimento igual a N_L continha as linhas ativas e inativas do sistema elétrico agrupadas em duas partes. Carreno utilizou uma busca local computacionalmente exigente para realizar melhorias nos indivíduos mais adaptados até então encontrados pela etapa exploratória do algoritmo. Essa busca local atuava como um método de força bruta limitado pelo ciclo investigado, em que todas as combinações possíveis de arestas eram avaliadas a partir de uma configuração-base. O conhecimento sobre a constituição dos ciclos e os possíveis caminhos para a subestação deveriam ser obtidos previamente. O autor ainda sugeriu a adoção de recurso de inteligência computacional ao procedimento de busca local para atenuar o esforço computacional. Entretanto, a estratégia de Carreno pode ser prejudicada por soluções ótimas locais e pela falta de diversidade de soluções. Ambas as questões podem levar à convergência prematura do processo de otimização.

Matrizes de incidência de barras foram adotadas por Abdelaziz em seu trabalho (ABDELAZIZ *et al.*, 2009) com o intuito de diferenciar as soluções viáveis das inviáveis, do ponto de vista topológico. O procedimento de reparação era computacionalmente caro e limitado de algum modo pelo tipo de infactibilidade presente no indivíduo a ser recuperado. Para aprimorar a abordagem por matrizes de incidência, Braz descreveu em seu artigo (BRAZ e SOUZA, 2011) duas codificações sequenciais (aditiva e subtrativa) que faziam uso do conceito de ciclo

fundamental. Ele empregava também um vetor de números reais que deveria ser interpretado (decodificado). Ainda discutiu as várias propostas de codificação inteira aliada à detecção de ciclos. De modo similar às heurísticas construtivas e destrutivas, as codificações aditivas e subtrativas armazenam a sequência das identificações das chaves e fazem uso de uma matriz de incidência que, de certo modo, monitora as expansões e contrações dos ciclos provocadas pela abertura ou fechamento das chaves.

3.6 Codificação Proposta para Cromossomos

Ao tratar de algoritmos evolucionários aplicados à resolução de problemas combinatoriais, o esquema de codificação do cromossomo é uma questão fundamental para o êxito do processo de otimização. A codificação pode contribuir positivamente para o perfil de convergência do algoritmo empregado desde que ela possua as propriedades desejáveis já descritas na Seção 3.4. Embora técnicas de busca evolucionárias não assegurem a convergência para os ótimos globais do problema de reconfiguração/restauração de alimentadores de distribuição de maneira robusta, elas estão dentre as mais adequadas para solucionar esses problemas combinatoriais cujas características foram descritas no Capítulo 2.

Muitos esquemas de codificação, descritos em trabalhos apresentados na seção anterior, necessitam de procedimentos específicos para validar as configurações radiais encontradas durante o processo de otimização. Supondo-se ainda que o algoritmo de busca populacional iniciasse a primeira iteração com um conjunto de soluções factíveis, operadores genéticos não especializados poderiam produzir soluções infactíveis a partir do referido conjunto inicial de indivíduos. Em casos de inviabilidade topológica, seria necessário optar pela (i) reparação do indivíduo, (ii) repetição da operação genética ou (iii) descarte da solução produzida. Qualquer uma dessas opções implicaria em processamento computacional prescindível e que, de certo modo, prejudicaria o paradigma da evolução natural (QUEIROZ e LYRA, 2009).

Se as operações realizadas no algoritmo de busca garantem a viabilidade de cada solução em relação ao problema em questão, então o tempo de execução requerido para a abordagem baseada na evolução das soluções será o estritamente necessário e dependente da capacidade de exploração do algoritmo. Portanto, é desejável que a representação de uma configuração de rede seja feita por um esquema de codificação de cromossomo que dependa de um mapeamento o mais direto possível entre a sequência de genes e a configuração que ela representa. Desse modo, a construção de um indivíduo não terá custo computacional significativo em relação às demais etapas do AE.

A decodificação ou tradução de um indivíduo para a configuração de rede representada por ele também deve ser um processo simples, capaz de afetar pouco o desempenho do AE. Uma codificação eficiente assegura a cobertura completa do espaço de soluções, com ausência de tendência, exige adaptações menos complexas nos operadores de busca local e global do algoritmo evolucionário empregado e não prejudica a diversidade de indivíduos (CARRENO *et al.*, 2008). O processamento computacional para validar e/ou reparar indivíduos deve ser evitado. Na codificação aqui proposta, qualquer configuração de rede, a exemplo daquela mostrada na Figura 3.1, pode ser representada por um vetor ordenado de inteiros conforme a Figura 3.2.

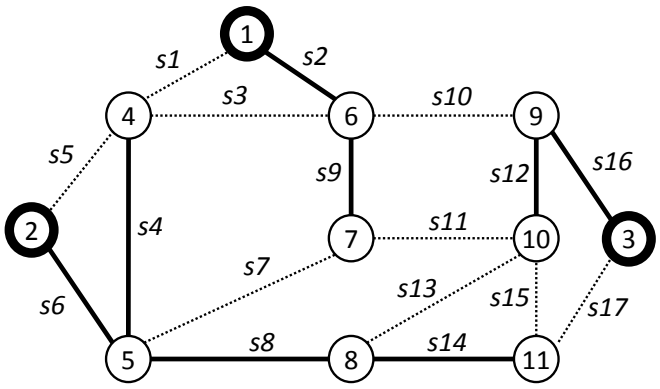

Figura 3.1 – Um grafo equivalente ao SDPEE com três NPPs.

Admitindo que cada interconexão chaveável entre duas barras, pertencente ao conjunto $\boldsymbol{\Omega}$, seja identificada inequivocamente por um único inteiro, cada gene poderá conter um dentre todos os valores do referido conjunto. Na Figura 3.2, os genes da cor preta estão associados ao conjunto $\bar{\boldsymbol{\tau}}^c$ que representa todas as linhas desenergizadas para a configuração ilustrada (Figura 3.1). Os genes de cor cinza claro correspondem às linhas energizadas associadas ao conjunto $\boldsymbol{\tau}^c$. Os detalhes do esquema de representação proposto será tratado adiante na Seção 3.6.1.

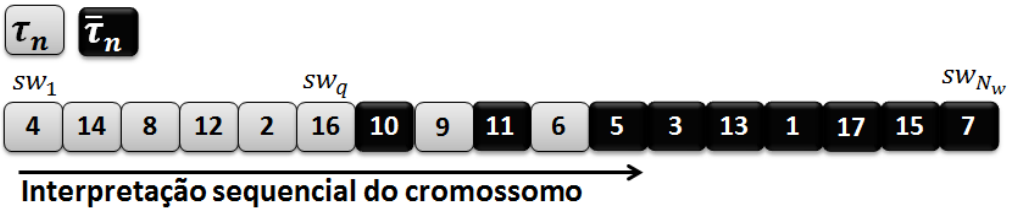

Figura 3.2 – Esquema de interpretação do cromossomo.

Com o esquema de codificação e o processo de tradução propostos, não existe a necessidade de verificação de radialidade dos indivíduos em nenhuma etapa do algoritmo evolucionário. A configuração $\mathcal{F}_c$ representada pelo cromossomo é recuperada por uma varredura dos genes unidirecional em um sentindo definido por convenção (e.g. da esquerda para a direita como mostra a Figura 3.2). Portanto, a interpretação de um cromossomo inicia-se em uma das extremidades do vetor, prossegue de modo sequencial para todos os genes adjacentes e finaliza quando o gene da outra extremidade é alcançado. Durante a interpretação, um mecanismo de rotulação auxiliar para os nós é usado para orientar a inclusão de cada interconexão dotada de chave ($sw_q \in \boldsymbol{\Omega}$) no grafo equivalente. O mecanismo de construção do cromossomo é explicado na Seção 3.6.1.

Ao final do processo, uma configuração radial sempre será obtida. A interpretação é sequencial, mas não demanda um pré-processamento assim como é requerido por outras abordagens similares (LIN *et al.*, 2000; MENDOZA *et al.*, 2006; BRAZ e SOUZA, 2011). Os dois conjuntos $\boldsymbol{\tau}$ e $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ são naturalmente formados quando um cromossomo é interpretado e ainda podem ser úteis na aplicação de operadores de mutação especializados, descritos na Seção 3.9. A correspondência direta entre o grafo equivalente e a sequência de genes simplifica bastante o procedimento de decodificação. Embora o comprimento do cromossomo dependa do número de interconexões chaveáveis, a eficiência computacional alcançada é superior a outras implementações similares como a de Carreno (CARRENO *et al.*, 2008).

Como as cardinalidades dos conjuntos $\boldsymbol{\tau}$ e $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ podem ser conhecidas antecipadamente por meio das Equações 2.34(a-b) e permanecem fixas em um contexto de reconfiguração, varrer todos os genes do cromossomo nem sempre é preciso. A interpretação de qualquer cromossomo pode ser concluída assim que a quantidade de chaves a serem mantidas abertas ($\|\bar{\boldsymbol{\tau}}\|$) ou fechadas ($\|\boldsymbol{\tau}\|$) tenha sido atingida. Essas antecipações aceleram o processo de tradução dos indivíduos. Portanto, o tempo de interpretação (decodificação) é diferente para cada cromossomo. Em média, pode-se afirmar que $\|\boldsymbol{\tau}\| + \|\bar{\boldsymbol{\tau}}\|/2$ genes serão interpretados por solução, dado que o conjunto dos vãos energizados $\boldsymbol{\tau}$ é tipicamente superior ao dos vãos desenergizados $\bar{\boldsymbol{\tau}}$.

É importante mencionar que o procedimento de reparação, que compromete as propriedades de localidade e herdabilidade mencionadas na Seção 3.4.1, é desnecessário para a abordagem proposta. Isso porque as soluções inviáveis são facilmente contornadas pelo processo de decodificação dos cromossomos. O procedimento de detecção de ciclos também não é necessário. O esquema proposto faz uso de uma estrutura complementar de dados composta de um inteiro sinalizador (*flag*), o que não requer espaço em memória notável assim como outras propostas, a exemplo da sugerida por Garcia (GARCIA e FRANÇA, 2008).

Por ser apropriada tanto para grafos completos quanto para grafos esparsos, a codificação desenvolvida não impinge restrição aos alelos dos genes que representam uma dada configuração radial de rede. Qualquer sequência arbitrária de valores em um cromossomo pode ser mapeada em uma configuração viável. Distintamente de Carreno (CARRENO *et al.*, 2008), os operadores genéticos usados não são susceptíveis ao posicionamento relativo dos genes e a prole derivada de quaisquer pares de cromossomos corresponderá a soluções igualmente factíveis que poderão ser avaliadas.

Esse esquema também não utiliza matrizes como fez Braz em (BRAZ e SOUZA, 2011) e as operações são realizadas diretamente no grafo representativo da rede. Por outro lado, a propriedade de correspondência (RAIDL e JULSTROM, 2003; ROTHLAUF, 2009), desejável em uma representação que emprega mapeamento, não é respeitada pela proposta detalhada nesse texto. Uma mesma configuração de rede pode ser descrita por dois ou mais vetores diferentes. Entretanto, a mesma limitação ocorreu para outras representações: cadeias principais (DELBEM *et al.*, 2005), conjunto de arestas (RAIDL e JULSTROM, 2003) e matróides (ENACHEANU *et al.*, 2008). Pelos resultados experimentais apresentados no Capítulo 7 demonstra-se que a limitação mencionada é inofensiva para o processo de otimização desenvolvido.

3.6.1 Algoritmo Rotulador Construtivo

O Algoritmo Rotulador Construtivo (ARC) baseia-se em uma estratégia de codificação por ramo do tipo construtiva que é orientada por uma análise de grafo para criar qualquer configuração derivada da estrutura primária representativa do SDPEE real. O algoritmo desenvolvido é simples e direto, capaz de construir árvores a partir de um grafo genérico $G(\boldsymbol{B}, \boldsymbol{L})$ que representa o sistema real. Em caso de múltiplos nós provedores de potência ($N_R > 1$), N_R árvores viáveis devem ser obtidas de G para compor uma floresta denotada por $\mathcal{F}(G; N_B)$ sem ciclos. Então, o SDPEE operará como um conjunto de N_R alimentadores radiais para energizar

N_B barras (ZHU, 2002). Desse modo, cada configuração viável $\mathcal{F}_c$, que contenha N_R árvores, será um elemento do conjunto de soluções viáveis $\boldsymbol{\Gamma}$.

A terminologia de equivalência entre grafos e SDPEEs é apresentada no Quadro 3.2. A atribuição e o controle dos rótulos dos nós de G é o principal mecanismo do algoritmo ARC. Esses rótulos podem assumir um valor positivo, negativo ou zero. Todos os nós de carga recebem um rótulo inicial igual a zero. Um valor positivo identifica a origem da potência recebida pelo nó, ou seja, ele está sendo energizado por um dos N_R NPPs, aos quais são atribuídos inteiros positivos exclusivos. Um valor negativo indica que o nó (barra) já foi considerado para a constituição de alguma sub-árvore, mas ainda não está energizado. Os nós rotulados com zero ainda não foram associados a qualquer aresta. As arestas, por sua vez, são identificadas por inteiros positivos. No esquema proposto, não há necessidade de se conhecer os ciclos fundamentais de G, tampouco as arestas constituintes de cada ciclo. Algoritmos clássicos como o de Kruskal (KRUSKAL, 1956) e o de Prim (PRIM, 1957; AHUJA *et al.*, 1993) dependem também de algum procedimento de rotulação para orientar o pertencimento do nó situado na outra extremidade da aresta em verificação e, com isso, identificar se um ciclo está ou não sendo formado. Apesar de serem algoritmos gulosos usados na identificação de árvores de expansão mínima (*minimum spanning trees*) em grafos não-direcionados com arestas ponderadas, os passos básicos podem ser extraídos para a obtenção de árvores genéricas, bastando para isso alterar o critério de escolha das arestas.

A particularidade desses algoritmos reside justamente na escolha gradual de arestas não disjuntas que garantem obrigatoriamente, a cada iteração do algoritmo, a expansão imediata da árvore ou da floresta que está sendo construída. Além de poder afetar a propriedade de tendência (ou polarização) da representação (RAIDL e JULSTROM, 2003), essa condição básica requer a constante identificação do subconjunto das arestas adjacentes aos nós já incluídos na árvore em crescimento. As repetidas verificações nesse processo de inclusão de arestas tornam esses algoritmos ineficientes para realizar uma etapa tão importante no contexto dos problemas de reconfiguração e restauração de SDPEEs. O processo de formação de árvores via Prim ou Kruskal torna-se ainda mais lento quando mais de uma árvore compartilha um mesmo grafo, ou seja, elas integram uma mesma floresta. Nesse sentido, o ARC pode ser entendido como uma generalização do algoritmo de Kruskal (KRUSKAL, 1956), pois trata a construção de estruturas radiais sem a necessidade de ordenação das arestas. Assim, resolve especialmente bem os problemas de grafo com floresta que, nesse caso, correspondem aos SDPEEs formados por vários alimentadores.

Quadro 3.2 – Termos de equivalência entre um grafo e um SDPEE.

SDPEE	Grafo
barra	nó
barra da subestação	nó provedor de potência
linha	aresta
trafo	aresta
alimentador	árvore
sistema de distribuição	floresta

O procedimento do ARC gera florestas facilmente e é genérico o bastante para lidar com grafos em qualquer nível de detalhamento. Ele mostrou-se apropriado às redes com número arbitrário de NPPs. No Algoritmo 3.1, os principais passos do ARC são detalhados. Sua

implementação é direta e exige poucas modificações nos operadores genéticos associados como pode ser visto na Seção 3.9.

Algoritmo 3.1 – Pseudocódigo do algoritmo ARC.

```
1:  funcao [F] = ARC (B, Ψ, Ω, N_R, N_B, N_L)
2:    Para cada k = 1: N_B          // Todo nó recebe um rótulo inicializado com valor zero.
3:      lab_k = 0
4:    Fim Para cada
5:    Para cada k = 1: N_R          // Nós provedores de potência (npps) são identificados por rótulos inteiros positivos exclusivos.
6:      lab_k = k
7:    fim Para cada
8:    F ← Ψ                         // A estrutura trivial é construída: npps e arestas compulsórias são adicionados.
9:    atualiza_rotulos(F)           // Maiores detalhes sobre essa função são dados no texto.
10:   Enquanto lab_k ≤ 0 ∀k ∈ B     // Condição de parada.
11:     e ← escolhe(Ω)              // A função escolhe() seleciona aleatoriamente um elemento do conjunto Ω.
12:     [canadd] = avalia(e, F)     //Análise de inclusão de aresta que retorna um booleano. Maiores detalhes são dados no texto.
13:     remove(e, Ω)                // A aresta escolhida é removida do conjunto Ω.
14:     Se canadd == false  entao   // Outra aresta deve ser escolhida.
15:       vá para a linha 10
16:     Senao
17:       F ← F ∪ e                 // A aresta escolhida é incluída na configuração.
18:       atualiza_rotulos(F)
19:     fim Se
20:   fim Enquanto
21: fim funcao
```

Na função **avalia**(), invocada na linha 12 do Algoritmo 3.1, a análise de inclusão de aresta à configuração de rede final $\mathcal{F}$ é feita com base nas seguintes regras:

i) uma aresta e não pode ser adicionada a $\mathcal{F}$ se os rótulos de seus dois nós são ambos positivos ou são negativos e iguais;

ii) uma aresta e pode ser incluída em $\mathcal{F}$ se pelo menos um de seus nós ainda tem rótulo igual a zero, ambos têm rótulos negativos com diferentes valores ou se apenas um dos nós tem rótulo positivo.

Finalmente, a função **atualiza_rotulos**() que modifica os rótulos dos nós da aresta recém-adicionada a $\mathcal{F}$, chamada nas linhas 9 e 18 do Algoritmo 3.1, obedece aos seguintes preceitos:

i) se os rótulos atuais dos nós forem iguais a zero, o próximo valor inteiro negativo disponível[4] será atribuído a ambos;

ii) se um dos nós tiver rótulo zero, ele será modificado para o valor do rótulo referente ao nó da outra extremidade da aresta em questão;

iii) se ambos os nós da aresta adicionada estiverem rotulados com valores negativos distintos, o menor deles será copiado para o outro e disseminado aos demais nós que se conectam a esse último para substituição dos valores de seus rótulos.

Para entender melhor o processo de rotulação, um exemplo da construção gradual de uma rede radial é apresentado na Figura 3.3(a-i). A legenda disponibilizada no topo da referida figura torna claro o significado dos símbolos gráficos usados. Para esse exemplo, é suposto que as arestas são escolhidas aleatoriamente resultando na sequência já mostrada na Figura 3.2.

[4] Entende-se aqui por valor disponível aquele que não implique em duplicidade ou ambiguidade.

Há três nós provedores de potência (NPPs), oito nós de carga e dezessete linhas no sistema mostrado na Figura 3.1. Supondo que cada linha do SDPEE seja chaveável, então $\|\boldsymbol{\tau}\| = 8$ e $\|\bar{\boldsymbol{\tau}}\| = 9$, de acordo com as Equações 2.34(a-b), válidas para qualquer configuração radial obtida do sistema. Nota-se que os processos de decodificação e edição de cromossomos seguem passos similares.

Essa proposta viabilizou a elaboração do artigo intitulado "*A Practical Codification and its Analysis for the Generalized Reconfiguration Problem*".

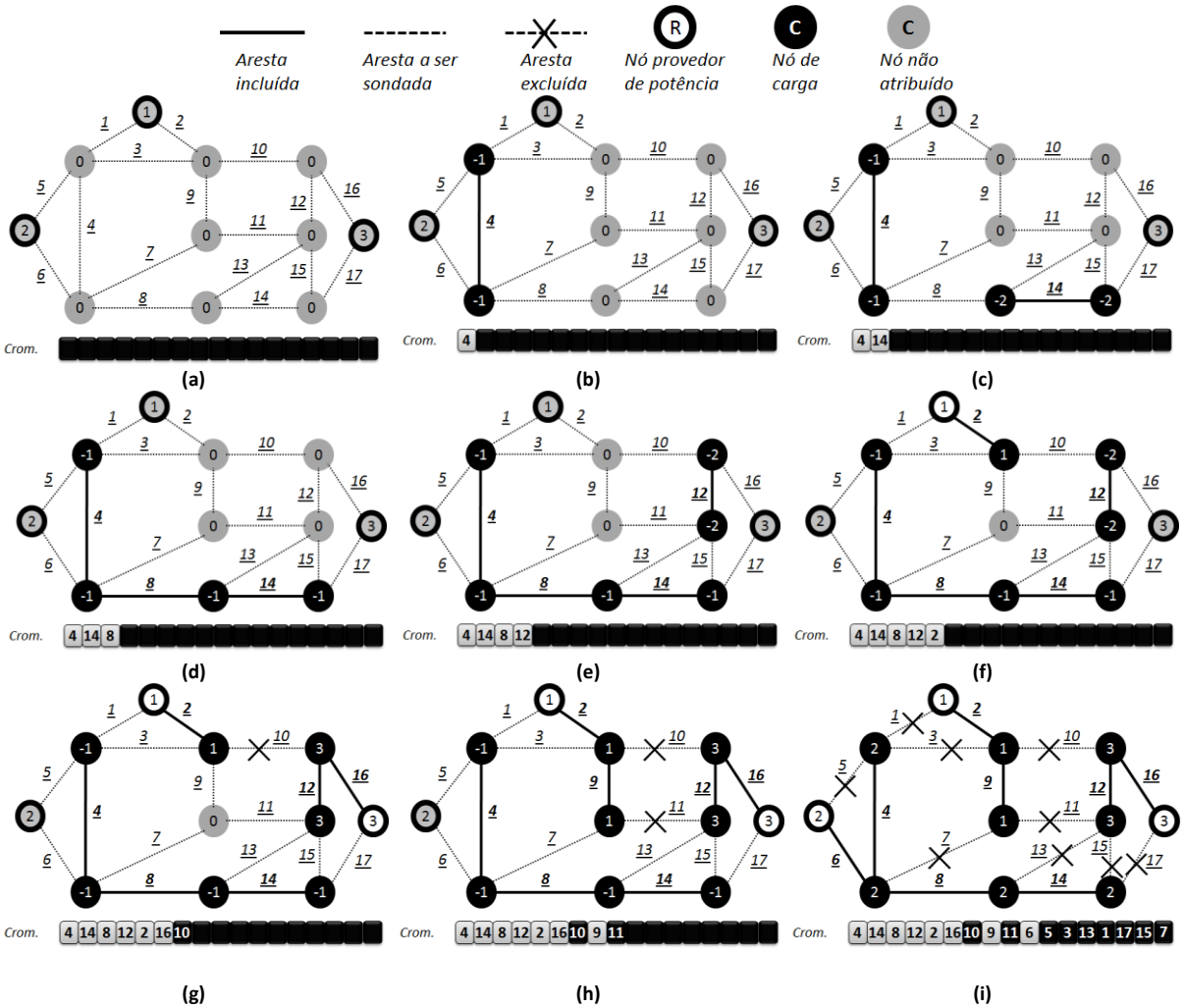

Figura 3.3 – Obtenção de N_R árvores a partir do grafo $G(B, L)$ por meio do algoritmo ARC para a sequência de arestas {4,14,8,12,2,16,10,9,11,6,5,3,13,1,17,15,7}.

3.7 Simplificação do Sistema de Distribuição

A simplificação do grafo equivalente ao SDPEE (GES) tem como principal propósito reduzir a complexidade da análise envolvida sem, no entanto, modificar as características fundamentais próprias do sistema real a ponto de distorcê-lo topologicamente ou alterar as propriedades elétricas de trechos ou componentes (vide Figura 3.4).

Com a simplificação do GES, o custo computacional para a aplicação de heurísticas, varreduras ou da função de avaliação poderá ser consideravelmente menor, ainda mais em se tratando de um SDPEE de grande porte ($N_B > 1000$).

Diferentemente dos problemas de projeto de redes que usam grafos completos, os problemas de operação de SDPEEs levam à representação de grafos esparsos. Especificamente, os problemas de otimização PRec-SDPEE e PRes-SDPEE resumem-se à identificação de uma árvore geradora de custo mínimo para cada alimentador existente no sistema de distribuição.

Seja $G(\boldsymbol{N}, \boldsymbol{A})$ um grafo conectado e não-direcionado em que $\boldsymbol{N} = \{1,2, \dots, N_B\}$ é um conjunto de nós e $\boldsymbol{A}$ representa as arestas, em quantidade finita, existentes no sistema de distribuição. Melhor dito, o conjunto dos pares não-ordenados $e = \{k_1, k_2\} \in \boldsymbol{N^2}\ \forall e \in \boldsymbol{A}$ denota todas as interconexões entre nós distintos ($k_1 \neq k_2$), arranjados dois a dois.

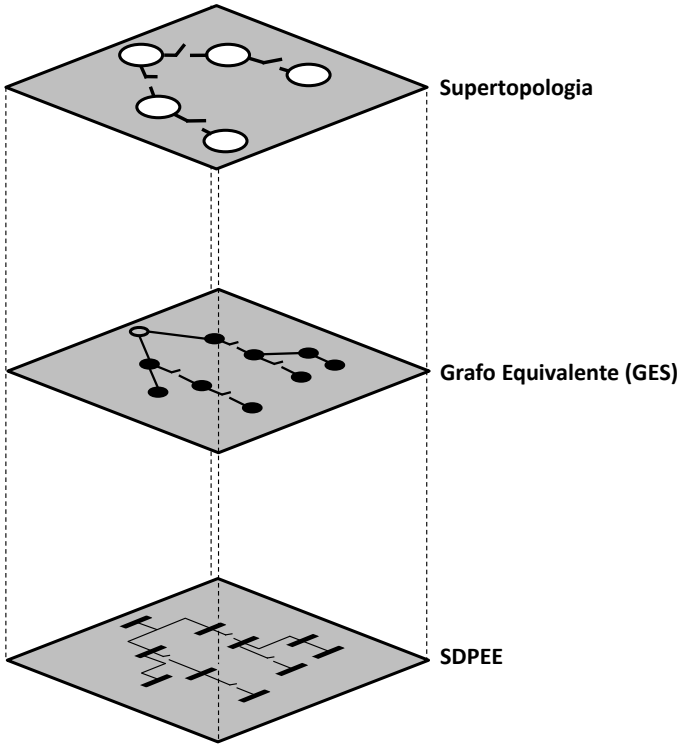

Figura 3.4 – Níveis de abstração criados para representar um SDPEE.

3.7.1 Procedimentos para Redução do Sistema de Distribuição

Para avaliar um Grafo Equivalente do SDPEE (GES) de modo mais eficiente, o procedimento de compressão similar ao apresentado em (BRAZ e SOUZA, 2011) simplificou a análise de ciclos fundamentais, a ser descrita nas Seções 3.8.1 e 3.8.2. É importante frisar que esse processo de compressão aplica-se somente à análise grafológica do SDPEE e não ao cálculo do fluxo de potência. Embora os computadores atuais tenham altíssimo poder computacional (acima de teraflops), a redução do grafo equivalente a um sistema real, composto de milhares ou até milhões de barras, pode trazer ganhos de tempo consideráveis, notoriamente diferenciados se for considerada a série de análises feitas para as possibilidades de configuração.

A compreensão dessa análise é facilitada com a introdução dos conceitos de **ciclo fundamental**, **supergrafo**, **supernó** e **superaresta**. O **ciclo fundamental** é entendido como um dos caminhos identificáveis no GES onde é possível percorrer uma sequência de nós interconectados adjacentes e retornar ao nó inicial sem que nenhum deles tenha sido visitado

mais de uma vez. Esse ciclo faz parte de um conjunto mínimo não sobreposto de ciclos que identifica todo e qualquer trajeto recorrente, conforme detalhado em (MENDOZA *et al.*, 2006).

Denomina-se **supergrafo** a versão reduzida do GES obtida pela aplicação das regras de redução a serem detalhadas a seguir. A representação por supergrafo emprega os conceitos de **supernó** e **superaresta**, que são extensões análogas aos nós e arestas do GES, respectivamente. Os nós do GES, interconectados por arestas não-chaveáveis, são agrupados em **supernós**. Na Figura 3.5(a), os nós que estão envolvidos pelo contorno cinza são agrupados em supernós. Por exemplo, os nós 6, 7, 8 e 9 compõem o supernó 3'.

Eventualmente, um par de supernós pode ser interconectado por mais de uma aresta simples, a exemplo dos supernós 1' e 4', ligados pelas arestas c e d (confira na Figura 3.5(a)). Essas arestas são agrupadas em uma **superaresta**, destacada com o contorno cinza na Figura 3.5(b). Ao ser reduzido, o GES dá origem ao supergrafo mostrado da Figura 3.5(b). É importante observar que a redução do GES irá afetar a dimensão do espaço de busca (BRAZ e SOUZA, 2011). Pode haver chaves operacionais que ao serem abertas isolam trechos ou cargas e, portanto, não podem ser analisadas como possibilidades na reconfiguração. A redução do GES visa incluir na análise de possibilidades que compõem o novo espaço de busca apenas as chaves que permitem configurações topologicamente viáveis. A análise das melhores soluções na supertopologia é sucedida pela sondagem de todas as opções derivadas das primeiras por meio da combinação simples entre as superarestas que devem se manter ativas no supergrafo. Por exemplo, para o sistema da Figura 3.5(b), se a melhor solução radial correspondesse à abertura das arestas a, h e i no supergrafo, uma sondagem das quatro soluções derivadas dessa configuração ainda precisaria ser feita. Nesse sentido, as configurações derivadas em nível do GES (representadas pela sequência de arestas fechadas) seriam: c-e-g, c-e-j, d-e-g e d-e-j. O método de fluxo de potência deve ser executado para cada uma dessas soluções para se determinar a melhor solução.

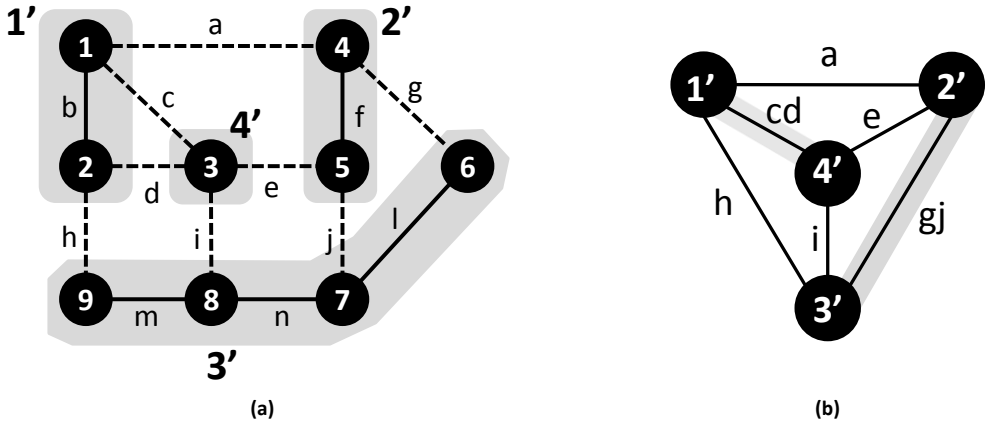

Figura 3.5 – (a) Exemplo de um GES que pode ser reduzido a um (b) supergrafo.

3.8 Heurísticas de Radialização

Algoritmos clássicos para identificação de árvore geradora de custo mínimo, a exemplo de Prim (PRIM, 1957) e Kruskal (KRUSKAL, 1956), já foram bastante empregados na resolução de diversos problemas relacionados às redes. Entretanto, o comportamento desses algoritmos para problemas mais complexos e redes de grande escala pode ocasionar buscas tendenciosas

que priorizam as configurações menos ramificadas/dispersas/esparsas/disseminadas e, portanto, com ramais mais longos. É importante comentar que as configurações com ramais muito longos podem ser tecnicamente inviáveis ou mesmo mais vulneráveis às prováveis faltas, ampliando inclusive os efeitos de uma falta para uma área mais abrangente o que afetaria maior número de cargas.

3.8.1 Detecção de Ciclos

A detecção dos ciclos fundamentais (MENDOZA *et al.*, 2006; BRAZ e SOUZA, 2011; SWARNKAR *et al.*, 2011) faz parte de um pré-processamento que leva à simplificação tanto da codificação das soluções quanto à redução da complexidade dos operadores genéticos projetados para o AE. Apesar de mais complexa do que o esquema de representação binária convencional, a detecção de ciclos quando obtém êxito supera em desempenho outros esquemas aplicados ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição radiais. A heurística de detecção de ciclos fundamentais é explicada a seguir em cinco passos (REIS *et al.*, 2012), sendo estes repetidos até que todos os supernós tenham sido sondados:

1) Cômputo das distâncias de cada supernó ao supernó da subestação (NPP) que corresponderá à raiz da árvore. Os supernós vizinhos imediatos do NPP recebem um valor de distância igual a 1. Os supernós vizinhos aos vizinhos do NPP têm distância igual a 2 e, assim por diante, em um procedimento de sondagem que segue o padrão da busca em largura (BFS).

2) Determinação do(s) máximo(s) absoluto(s). Se existir um supernó com conectividade igual ou maior do que 2, e sua distância for maior do que a de todos os seus vizinhos que já tenham suas respectivas distâncias definidas, então esse supernó é um máximo absoluto. Essa verificação é feita de forma concomitante à atribuição das distâncias aos supernós do grafo. Nesta etapa, duas situações podem ocorrer (Figura 3.6): um supernó ter a maior distância dentre todos os vizinhos ou um grupo de supernós ter distâncias idênticas, sendo esta a maior distância em relação aos demais vizinhos. Um ou dois máximos formarão o que se denomina a base de um ciclo.

3) Realização do percurso reverso a partir do(s) máximo(s) encontrado(s) no passo anterior. Cada ciclo a ser detectado deve obrigatoriamente conter a base do ciclo. Durante esse procedimento, as distâncias relativas dos supernós em relação a esse(s) máximo(s) são calculadas de forma similar àquela realizada no Passo 1. Ao menos dois caminhos são sondados simultaneamente e cada um deles é identificado por um rótulo exclusivo.

4) Identificação do ciclo formado. Ao percorrer os dois caminhos descritos no Passo 4 na direção do NPP (direção reversa), estes se encontrarão em algum supernó comum situado mais próximo do NPP. É possível ainda que haja pequenos ciclos ao longo de uma das duas sondagens reversas. Neste caso, o supernó associado à conjunção será ignorado, uma vez que tenha sido alcançado por sondagens de mesmo rótulo. A sondagem deverá então prosseguir para o próximo supernó ascendente. A partir da detecção do ciclo, o histórico de superarestas visitadas é recuperado para ambos os caminhos.

5) Reinicialização das distâncias relativas.

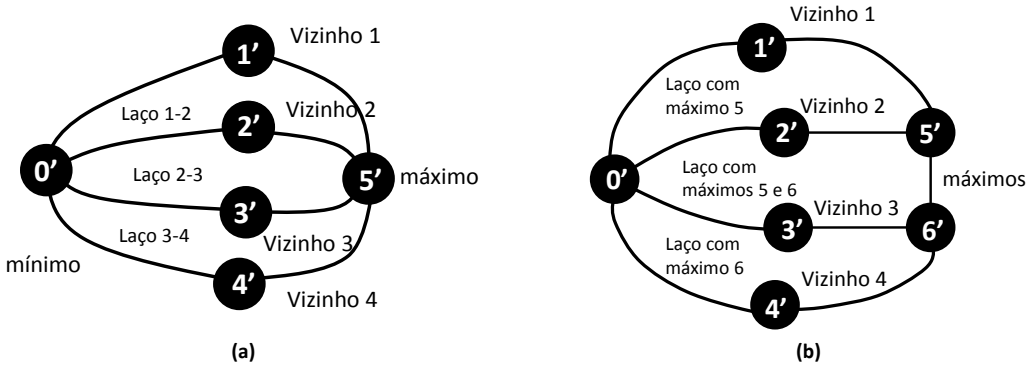

Figura 3.6 – Casos em que ciclos do supergrafo apresentam (a) único máximo ou (b) vários máximos.

Nas duas situações mencionadas no Passo 2, percebe-se que a presença de n vizinhos em torno de um máximo indica que este é base para $n-1$ ciclos. Se há dois máximos, dois caminhos podem ser obtidos a partir de cada máximo percorrendo-se os supernós nas direções em que as distâncias absolutas decrescem monotonicamente. No procedimento de detecção dos ciclos, podem ser necessárias sondagens complementares para se identificar todos os ciclos fundamentais, visto que o procedimento descrito acima pode falhar para algumas estruturas de grafos mais complexas. Enquanto houver problemas na detecção de todos os ciclos, novas tentativas são realizadas com relaxação de restrições grafológicas. As restrições admitidas durante as sondagens são: (i) qualquer superaresta do grafo deve pertencer a não mais do que dois ciclos; (ii) ao se percorrer o caminho reverso, supernós vizinhos com distância absoluta igual ou superior à do máximo são desconsiderados; (iii) o próximo supernó adjacente a ser visitado durante a realização do percurso descrito no Passo 3 deve ter distância absoluta sempre menor do que o supernó atual.

Considerando o supergrafo mostrado na Figura 3.5(b), é possível identificar os seguintes ciclos fundamentais: (I) superarestas {a,cd, e}, (II) superarestas {h, cd, i} e (III) superarestas {e, gj, i}. São necessariamente três ciclos fundamentais, porém a sequência das superarestas para cada um deles pode variar. Assim, não há um conjunto único de ciclos fundamentais associados a um sistema. Na Figura 3.5(b), nota-se que há superarestas comuns entre dois ciclos adjacentes como, por exemplo, a superaresta cd, presente nos ciclos I e II. Para a configuração radial final representada pelo GES, cada superaresta admitida como fechada deverá ter somente uma aresta de seu conjunto incluída no GES.

3.8.2 Diagrama de Ciclos

O Diagrama de Ciclos (DC) é um modo de representação conciso, similar a um grafo, que retrata a interdependência entre os ciclos fundamentais detectados previamente. Nele, cada nó corresponde a um dos ciclos identificados pela Heurística de Detecção de Ciclos Fundamentais (HCF), e cada aresta entre pares de nós representa superarestas do supergrafo que são compartilhadas entre dois ciclos. Com o DC, a eliminação dos ciclos detectados e a análise de configurações radiais tornam-se procedimentos computacionais bastante simplificados. A Figura 3.7(a) exibe o DC equivalente ao supergrafo mostrado na Figura 3.5(a), onde a existência do compartilhamento da superaresta cd pelos ciclos I e II é notada. Verifica-se também no DC, entre os ciclos I e III, o compartilhamento da aresta e, e entre os ciclos II e III, que a aresta i é compartilhada. O DC completo é representado pelo grafo não-direcionado (Figura 3.7(a)) e ele reúne todas as possibilidades para o supergrafo equivalente. Se uma

configuração radial particular é representada, o DC torna-se um grafo direcionado que pode corresponder a uma configuração radial (Figura 3.7(b)) ou não radial (Figura 3.7(c)).

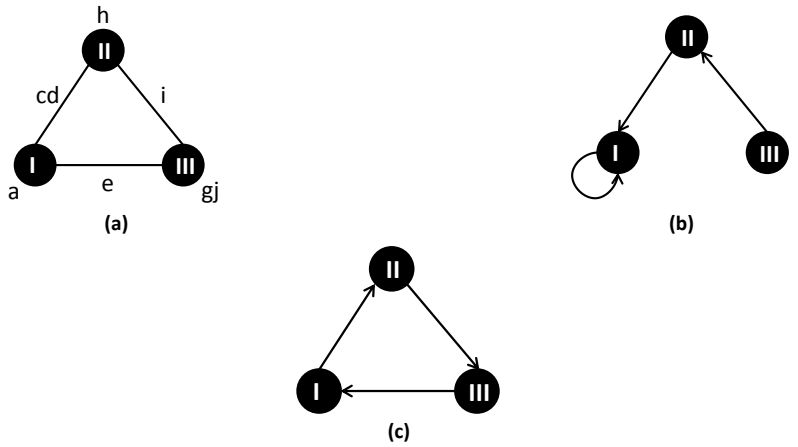

Figura 3.7 – (a) Diagrama de ciclos. (b) Exemplo de configuração factível derivada do DC cujos genes são [a,cd,i]. (c) Exemplo de configuração infactível derivada do DC cujos genes são [cd,e,i].

A auto-referência mostrada na Figura 3.7(b) indica que uma superaresta não-compartilhada entre ciclos, ou dita exclusiva, foi uma dentre as escolhidas. Neste caso, a superaresta a. Portanto, para se criar uma configuração, uma superaresta em cada ciclo deve ser escolhida, seja ela exclusiva ou compartilhada. Se uma superaresta compartilhada é escolhida, então será definida no DC uma aresta orientada entre os ciclos envolvidos cujo sentido reflete a dependência entre os mesmos. Após N_O arestas e superarestas terem sido escolhidas, a configuração resultante será radial caso não se tenha gerado um ciclo de dependências no DC. Já as auto-referências, simbolizadas por laços, podem existir e não significam necessariamente uma infactibilidade topológica. Nesse sentido, a Figura 3.7(b) retrata uma configuração radial, uma vez que não foi formado ciclo. Em termos computacionais, a detecção é facilitada pelo direcionamento existente no grafo. Por outro lado, uma configuração não radial é ilustrada na Figura 3.7(c), onde se percebe a existência de um ciclo definido pelo sentido das setas.

3.9 Operadores Genéticos Orientados à Factibilidade das Soluções

Se o esquema de codificação proposto for adotado, é possível utilizar os operadores estocásticos como eles foram originalmente concebidos (GOLDBERG, 1989). Apesar disso, operadores foram adaptados para potencializar o mecanismo de busca do AE de acordo com a natureza dos problemas combinatoriais tratados aqui. A definição de operadores especializados para o problema de reconfiguração (e restauração) busca aumentar a eficiência do AE usado na busca pelos ótimos. A seguir, serão detalhadas as adaptações realizadas nos operadores para torná-los mais adequados ao *landscape* gerado.

3.9.1 Cruzamento

Para a operação de cruzamento, empregou-se o padrão PMX (CARRENO *et al.*, 2008), por ser conhecido da literatura em situações de aplicação similares. A codificação torna os cromossomos estruturas ordenadas e o operador PMX é um dos mais adequados para tratar essa limitação. Não pode haver duplicação ou falta de elementos do conjunto $\boldsymbol{\Omega}$ no cromossomo. Esse operador efetua a recombinação entre dois cromossomos constituídos de

alelos que juntos formam uma sequência de valores necessariamente presentes na prole resultante. Como mostra a Figura 3.8, a operação realizada pelo PMX demanda dois cromossomos para criar outros dois denominados de cromossomos-filhos. Dois pontos de corte são determinados para definir três segmentos a serem recombinados. Na Figura 3.8, as cores de fundo auxiliam na identificação das partes dos cromossomos-pais presentes em cada cromossomo gerado. Os genes destacados por uma moldura da cor branca ou preta foram realocados (trocados) em um procedimento previsto no operador PMX para evitar a repetição ou falta de valores de Ω. Para maiores detalhes sobre o PMX, o leitor pode consultar (KELLEGÖZ *et al.*, 2008).

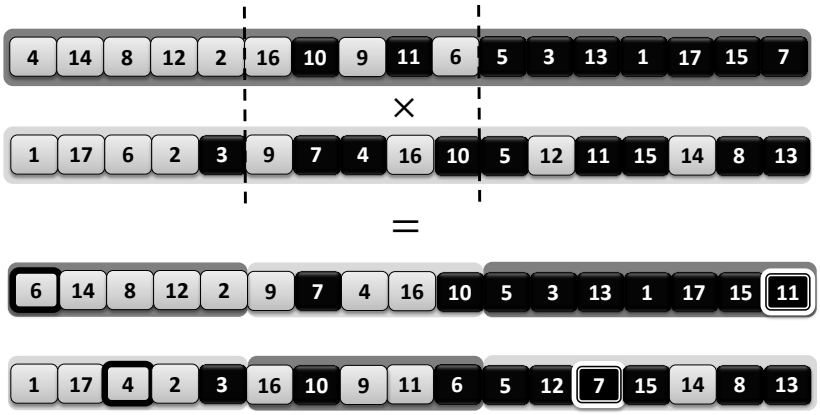

Figura 3.8 – Esquema do cruzamento do tipo PMX.

3.9.2 Mutação

Geralmente, a mutação é responsável pela alteração ocasional e aleatória de alelos. Nos problemas PRes/PRec-SDPEE, ela equivale à realização de um par de manobras (fecha, abre) em chaves para que a radialidade e a conectividade dos nós sejam mantidas. O parâmetro mr controla a taxa na qual novas soluções são exploradas no *landscape*. Se a taxa é alta, a prole perde sua semelhança com os indivíduos que a geraram, e o algoritmo tem dificuldades em aprender com a experiência adquirida em sondagens (iterações) anteriores, exibindo um comportamento errático. É esperado que a mutação consiga promover mudanças positivas nos indivíduos levando a busca a vizinhanças promissoras. Uma solução vizinha é admitida nesse trabalho como aquela configuração topologicamente viável que difere por um par de manobras (fecha, abre).

Considerando os efeitos da mutação sobre os cromossomos (indivíduos), são propostos oito padrões de modificação com capacidade de causar pequenas alterações na disposição topológica dos alimentadores. Esses padrões têm o propósito de preservar a similaridade entre o cromossomo mutado e o original.

Na Figura 3.9(a), três tipos básicos são mostrados. O cromossomo original é aquele da Figura 3.2 que também é referência para os demais tipos de mutação mostrados na Figura 3.9(b). Os tipos básicos de mutação envolvem apenas a troca de posição entre dois genes quaisquer do cromossomo. Na mutação do tipo 1 (MT1), qualquer par de genes pode ser trocado sem restrição e sem prévia análise fenotípica. Apesar da simplicidade da operação, existe uma probabilidade do GES representado pelo conteúdo modificado do cromossomo permanecer inalterado. Portanto, a MT1 ilustrada na Figura 3.9(a) é simples, mas pouco eficaz. Na MT2, um

gene localizado nas primeiras $\|\boldsymbol{\tau}\|$ posições do cromossomo é escolhido para ser trocado com outro localizado nas últimas $\|\overline{\boldsymbol{\tau}}\|$ posições. Esse tipo de mutação aumenta a eficácia do operador tornando maiores as chances de obter um GES diferente do original (veja Figura 3.9(a)).

A mutação do tipo 3 precisa da prévia interpretação do cromossomo para identificar os membros do conjunto $\overline{\boldsymbol{\tau}}$. Em seguida, um elemento x_1 desse conjunto é escolhido para trocar de posição com outro elemento x_2 pertencente ao conjunto complementar $\boldsymbol{\tau}$, situado preferencialmente à esquerda de x_1 (supondo que a decodificação ocorra da esquerda para a direita). Para entendimento de MT3, veja as Figuras 3.2 e 3.9(a). Os tipos MT4, MT5 e MT6 causam uma perturbação mais intensa no cromossomo. Para MT4 e MT5, o parâmetro δ define percentualmente um subconjunto de $\overline{\boldsymbol{\tau}}$ a ser modificado. Esses tipos empregam as funções de densidade de probabilidades uniforme e Gaussiana, respectivamente. As PDFs é que determinam quantos pares de genes serão trocados quando uma nova mutação ocorrer. Desenhos esquemáticos mostram na Figura 3.9(b) como operam a MT4 e a MT5. A MT6 é bastante parecida com a MT4, diferenciando-se apenas no percentual que é tomado em relação ao cromossomo inteiro e não somente o conjunto $\overline{\boldsymbol{\tau}}$. Na MT7 e MT8, a interpretação do cromossomo também é necessária. No primeiro tipo, um elemento do conjunto $\overline{\boldsymbol{\tau}}$ é deslocado para a última posição a ser interpretada. E no segundo tipo, um elemento de $\boldsymbol{\tau}$ é deslocado para a primeira posição de interpretação. Para clareza do modo de atuação de MT7 e MT8, veja a Figura 3.9(b). Em ambos os tipos, os demais genes devem ser deslocados para o lado oposto.

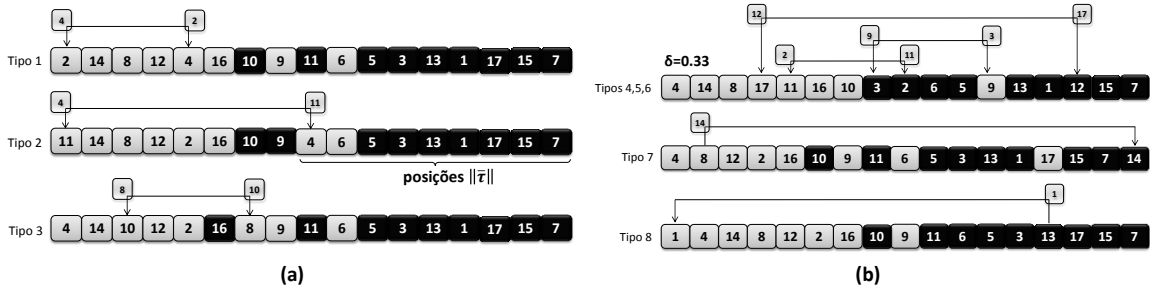

Figura 3.9 – (a) Tipos básicos de mutação e (b) Tipos avançados de mutação.

3.9.3 Seleção

O método de seleção afeta o direcionamento do processo de busca. Se não for adequado, o algoritmo pode convergir prematuramente para um conjunto de soluções não-ótimas. A operação de seleção aliada aos operadores estocásticos permitem ao AE escapar de ótimos locais e, desse modo, a otimização tem maiores chances de se aproximar ou alcançar a fronteira Pareto real do problema. Diferentemente, as soluções identificadas por técnicas heurísticas de busca normalmente são ótimos locais (KING *et al.*, 2003).

Foi implementado o método de seleção por torneio. A quantidade predefinida de indivíduos que disputam o torneio afeta o comportamento do AE (COELLO e LAMONT, 2004). Nas implementações desenvolvidas por esse trabalho, esse número foi mantido em cinco por estar associado ao perfil de convergência aceitável. Para os problemas em suas formas multiobjetivo, optou-se por utilizar o critério de dominância para realizar a comparação de aptidão entre indivíduos. Os cinco indivíduos são aleatoriamente selecionados da população

corrente, ordenados de acordo com o critério de dominância e, finalmente, os dois melhores são selecionados para formarem um par de indivíduos pais.

3.9.4 Elitismo

O elitismo é um recurso empregado em AEs para assegurar a sobrevivência das soluções mais bem adaptadas ao problema de otimização durante o processo evolutivo criado. Juntamente com o método de seleção, ele molda as características de convergência do algoritmo evolucionário. Para os algoritmos implementados, o elitismo foi assegurado por um procedimento local e por outro global. O elitismo local demandou uma comparação entre os indivíduos pais e os indivíduos filhos, obtidos a partir do cruzamento ou da mutação, para, em seguida, proceder à eliminação dos dominados. No entanto, para se evitar a degradação da diversidade na população corrente, o elitismo local foi usado com parcimônia, sendo mais frequente nas últimas gerações do MOEA. O procedimento global foi feito de duas formas: (1) pelo esquema $\mu + \lambda$ (DEB, 2001) e (2) pelo uso de uma memória externa (repositório de configurações) com possibilidade de compartilhamento entre algoritmos executados paralelamente.

3.10 Algoritmos Evolucionários Implementados

Os AEs implementados incluíram alguns MOEAs para resolverem as versões multiobjetivo dos problemas de reconfiguração e restauração e um AG adaptado para tratar as respectivas versões mono-objetivo. O AG foi utilizado inclusive para validar os operadores genéticos e o acoplamento entre o MVRD e suas variantes, visto que a quase totalidade dos experimentos com SDPEEs disponíveis na literatura especializada relaciona-se à resolução do problema de otimização mono-objetivo para a reconfiguração ou a restauração. É importante mencionar que a relação de dominância de Pareto pode ser empregada de formas distintas: ordenação por dominância como visto no algoritmo NPGA (HORN *et al.*, 1994), contagem de dominantes e dominados usada pelo NSGA-II (DEB *et al.*, 2002) e grau de dominância presente no SPEA-2 (ZIZTLER *et al.*, 2001). Algumas questões são comuns a todos os MOEAs: (a) como orientar a população corrente na direção da Fronteira Pareto real? (b) como evitar a perda de soluções não-dominadas durante o processo de busca? (c) como manter a diversidade de soluções na fronteira aproximada à medida que o processo de busca evolui na direção da fronteira Pareto real? Vários deles já resolvem essas três questões de modo satisfatório para problemas de teste (*benchmarking*). Portanto, os algoritmos propostos nesse trabalho baseiam-se no NSGA-II e no PBIL. Os outros algoritmos são utilizados para fins de comparação.

A seguir, serão brevemente descritos os algoritmos de otimização utilizados nesse trabalho.

3.10.1 NSGA-II

O algoritmo NSGA-II descrito em (DEB *et al.*, 2002) foi adaptado neste trabalho aos problemas PRes-SDPEE e PRec-SDPEE e denominado de MOEA-DFR. Algumas características da concepção original do algoritmo foram mantidas como o tamanho fixo ($Npop$) da população, a composição da população da próxima geração ($\mu + \lambda$), a separação em fronteiras com critério de dominância e o cálculo da distância de multidão. Os indivíduos são separados em fronteiras

de não-dominância com um método denominado por Deb (2002) de *fast non-dominated sort* com complexidade computacional $O(M(2N)^2)$. O método de comparação do NSGA-II baseia-se no princípio básico da transitividade (Se A domina B e B domina C, então A domina C.), o que confere ao processo uma propriedade de verificação absoluta para a análise e inclusão posteriores de novas soluções ao conjunto atual.

3.10.2 SPEA2

O algoritmo SPEA2 (ZIZTLER *et al.*, 2001) utiliza um procedimento de comparação entre as soluções com base no grau de dominância das mesmas. Além disso, ele faz uso de um arquivo externo, semelhante ao conceito de memória externa usado por outros AEs como, por exemplo, o PAES (KNOWLES e CORNE, 1999). Durante as iterações desse algoritmo, os indivíduos não-dominados são copiados para o arquivo externo que tem tamanho máximo. Caso o arquivo não comporte todos os indivíduos, alguns deles são eliminados pelo operador de truncamento apresentado em (ZIZTLER *et al.*, 2001). Se o arquivo não é totalmente preenchido pelas soluções não-dominadas, soluções dominadas completam o espaço remanescente. O valor de mérito de cada solução baseia-se na avaliação da mesma (funções objetivo) e na força de cada uma delas representada pelo número de soluções que ela domina. A aptidão bruta de um indivíduo ($R(i)$) equivale à soma dos valores de força dos indivíduos que são seus dominadores. Uma desvantagem clara desse processo é que ele precisa ser completamente refeito a cada iteração. A inclusão de uma nova solução ao conjunto é suficiente para que os cálculos da dominância tenham que ser efetuados novamente.

Utilizando apenas a aptidão bruta, o SPEA2 tende a falhar quando poucas soluções são não-dominadas. Assim, o SPEA2 apresenta outro conceito para agregar informação à aptidão bruta: a estimativa de densidade ($D(i)$). A estimativa de densidade é calculada com as distâncias no espaço de objetivos entre os indivíduos da população corrente e do arquivo:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2}$$

em que σ_i^k é a distância do k-ésimo elemento ao indivíduo i. Essas distâncias são usadas para ordenar em lista decrescente as soluções. Assim, tem-se que a função avaliação do algoritmo SPEA2 do indivíduo i é dada:

$$F(i) = R(i) + D(i)$$

De acordo com Ziztler (2001), a complexidade da avaliação depende essencialmente da estimativa de densidade que é $O(M^2 \log_{10} M)$, sendo M a soma dos tamanhos da população e do arquivo externo. O operador de truncamento do algoritmo SPEA2 também tem ordem de complexidade $O(M^3)$ para o pior caso, mas Ziztler garantiu que a complexidade média do algoritmo seria menor do que $O(M^2 \log_{10} M)$. Desse modo, fica clara a complexidade computacional superior do algoritmo SPEA2 em relação ao algoritmo NSGA-II.

3.10.3 PAES

O algoritmo PAES (KNOWLES e CORNE, 1999) foi adaptado aos problemas combinatoriais em questão por enfatizar o processo de busca local em esquema (1+1). Ele mantém um arquivo de soluções não-dominadas a partir das quais partem os movimentos de explotação. No PAES,

uma solução pai p_1 gera outra q_1 por meio da mutação. A nova solução q_1 é então comparada com a original p_1 em termos de dominância. Se p_1 domina q_1, então outra solução deve ser gerada a partir de p_1. Se q_1 domina p_1, a primeira é então definida como a nova solução pai. Se nenhuma delas domina a outra, então um conjunto de soluções não-dominadas previamente escolhidas é usado na comparação. Para manter a diversidade das soluções armazenadas no arquivo, todas as novas soluções geradas e aceitas são comparadas com aquelas mantidas nesse arquivo. Todas as soluções do arquivo dominadas pela nova solução q_1 são removidas. Se nenhuma solução do arquivo é eliminada, a densidade da região a qual pertence essa nova solução é comparada com a densidade da região ocupada pela solução pai. Essa comparação procura garantir que a solução q_1 ocupará uma região menos densa, o que favorece à melhor distribuição do conjunto de soluções mantido pelo arquivo.

3.10.4 PBIL

Informações norteadoras a respeito das soluções promissoras em um problema de otimização podem ser utilizadas para estimar um esquema composto de blocos construtivos (*schemata*). Tal esquema não corresponde a uma solução propriamente dita, mas representa um grupo de soluções com segmentos de genes idênticos. Os algoritmos estocásticos que operam baseados na identificação desses modelos probabilísticos que levam à melhor compreensão do domínio do problema e, consequentemente, à identificação dos esquemas, são genericamente chamados de Algoritmos de Estimativa de Distribuição (EDA) (LARRANAGA e LOZANO, 2002). Por serem bastante apropriados à codificação binária, os algoritmos do tipo EDA são facilmente adaptáveis ao problema da identificação da configuração ótima de redes.

O Algoritmo de Aprendizagem Incremental Baseado em Populações (PBIL) é o tipo mais simples de EDA que depende da análise das melhores e piores soluções avaliadas para o problema de otimização em questão. Ele não faz uso de operadores genéticos e as soluções são tratadas como amostras do espaço a serem analisadas para a determinação do padrão de ocorrência e frequência de cada valor. No entanto, sua proposição inicial foi voltada à resolução de problemas exclusivamente mono-objetivos. Neste trabalho, foi proposto um novo algoritmo baseado no PBIL para otimização multiobjetivo. A este algoritmo proposto foi dado o nome de MMOPBIL. A Figura 3.10 apresenta o esquema geral de atualização do modelo de probabilidades $Q(\bar{x})$ a partir do vetor $B(\bar{x})$ que reúne o padrão de ocorrências das melhores soluções da iteração atual.

No MMOPBIL, a estrutura básica do PBIL clássico (BALUJA, 1994) foi estendida para tratar vários modelos probabilísticos simultaneamente e, com isso, ser capaz de identificar mais de uma solução eficiente para um dado problema multiobjetivo.

Para ser capaz de resolver problemas multiobjetivos, o MMOPBIL evolui um grupo de vetores de probabilidade conhecidos por instâncias de modelo de rede. Esses modelos coexistem durante certo número de iterações do algoritmo, convergindo para soluções eficientes ou sendo descartados devido à baixa afinidade com o problema. A Figura 3.11 ilustra a situação de um grupo de modelos probabilísticos para uma dada iteração do MMOPBIL. A cada iteração do algoritmo, os modelos que geram soluções não-dominadas recebem pontos e aqueles que não geram boas soluções tem a sua idade incrementada. Ao atingir a idade máxima, o modelo é descartado e substituído por outro, a exemplo do segundo modelo mostrado na Figura 3.11.

O modelo que alcança o nível máximo convergiu para uma solução eficiente. O quinto modelo mostrado na referida figura, por exemplo, convergiu e será armazenado em uma memória externa.

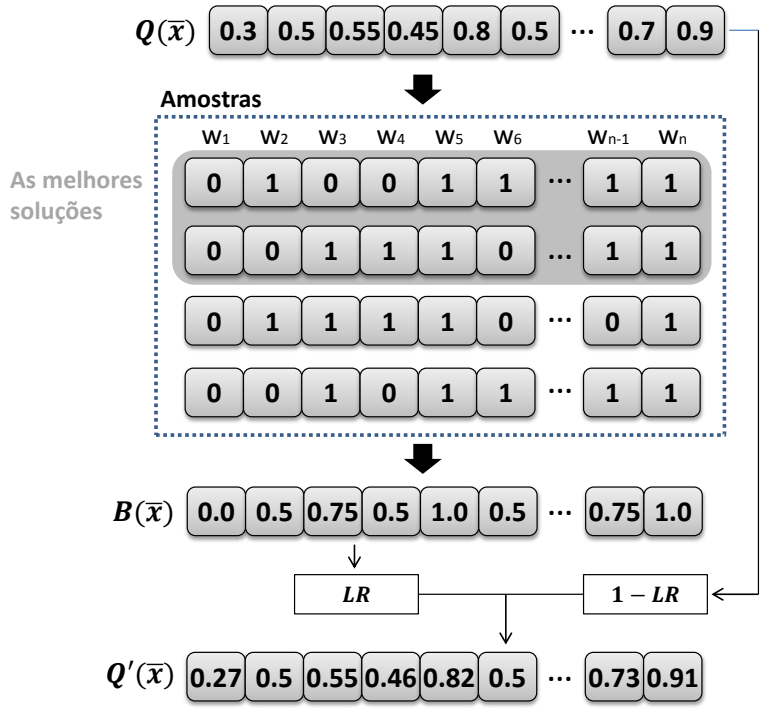

Figura 3.10 – Um modelo probabilístico é atualizado a partir das duas melhores soluções.

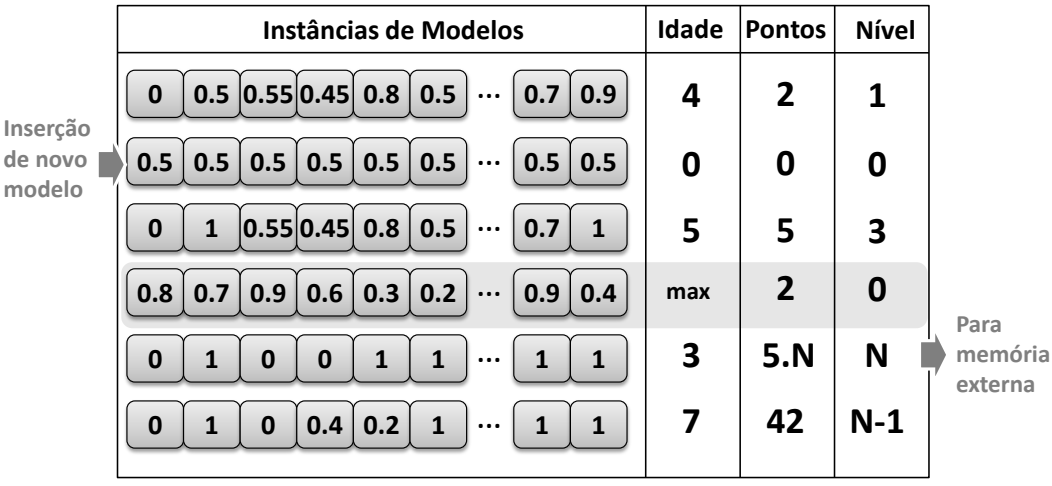

Figura 3.11 – Grupo de modelos probabilísticos ativos para uma dada iteração do MMOPBIL.

A Figura 3.12 apresenta o esquema geral do algoritmo MMOPBIL.

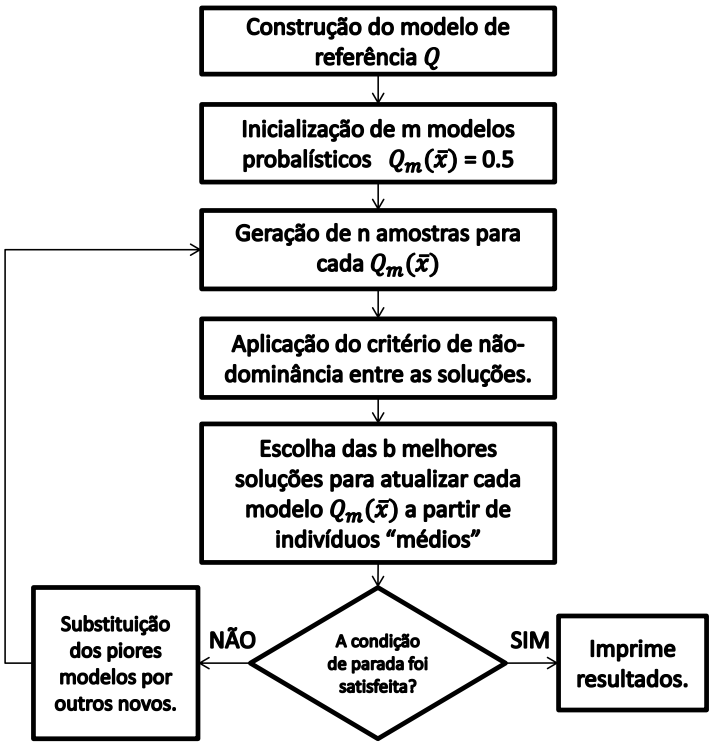

Figura 3.12 – Esquema do MMOPBIL.

O algoritmo MMOPBIL foi descrito em detalhes no trabalho intitulado *Multilevel Population-Based Incremental Learning: a novel implementation to solve Distribution Feeder Reconfiguration Problem*.

3.10.5 cGA

Muito similar ao PBIL, o Algoritmo Genético Compacto (HARIK *et al.*, 1999) requer menos espaço em memória, o que é uma vantagem em problemas de grande escala como são o PRes-SDPEE e o PRec-SDPEE (SASTRY *et al.*, 2007).

3.11 Tratamento de Restrições

As restrições de igualdade e desigualdade fazem parte da descrição matemática dos problemas típicos do mundo real (VENKATRAMAN e YEN, 2005). Uma solução é dita viável se ela não viola nenhuma restrição. A incorporação e tratamento eficientes das restrições técnico-operacionais referentes ao problema de otimização da configuração de SDPEEs é fundamental para a aplicação em casos reais. Nesse sentido, há diversas técnicas descritas na literatura (MICHALEWICZ, 1995) que incorporam o tratamento das restrições ao processo de busca feito pelo AE. Três delas foram usadas no presente trabalho para tratar o PRes-SDPEE e o PRec-SDPEE: penalização de objetivos, inclusão de objetivos e dominância por factibilidade.

3.11.1 Penalização de objetivos

A penalização dos objetivos é a mais antiga abordagem (MEZURA-MONTES e COELLO, 2011) que se baseia na ponderação e somatório de termos que resulta em uma função mono-

objetivo equivalente. Em geral, a penalização é proporcional ao grau da violação ocorrida e ao peso escolhido para cada restrição. Apesar da sua simplicidade, a escolha dos valores para os pesos não é trivial e influencia tanto o conjunto das soluções finais obtidas quanto o comportamento do AE. A técnica de penalização soma a parcela de violação das restrições a cada um dos objetivos. As múltiplas violações são contabilizadas em um somatório. Assim, a escolha dos fatores multiplicativos (ou pesos) associados a cada violação é fator decisivo na convergência do algoritmo para as soluções eficientes. Pesos com valor alto comprometem o processo de busca por regiões de factibilidade que estejam cercadas por regiões de infactibilidade (MICHALEWICZ, 1995). Ao se penalizar muito os indivíduos infactíveis, a capacidade de o AE alcançar regiões factíveis isoladas é reduzida (MICHALEWICZ, 1995; MEZURA-MONTES e COELLO, 2011). Se aos pesos são atribuídos valores muito pequenos, as soluções infactíveis podem ser consideradas melhores do que as factíveis.

3.11.2 Acréscimo de Objetivos

Nesta abordagem, dois objetivos são incorporados ao problema original, descrito em (VIEIRA *et al.*, 2004), tornando-o tratável pelo algoritmo evolucionário assim como foi feito para o problema irrestrito equivalente. Um objetivo $viol$ acumula os termos de penalização associados às restrições violadas por uma solução particular. Já o outro objetivo $qviol$ contém a quantidade de restrições violadas. Portanto, o vetor de funções $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x})$ que agregava n_{obj} objetivos passa a ter tamanho $n_{obj} + 2$:

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}) = \left[o_1 \;\; o_2 \;\; \ldots \; o_{n_{obj}} \;\; viol \;\; qviol\right]^{\boldsymbol{T}} \tag{3.2}$$

Assim, quaisquer restrições adicionais são incluídas de modo transparente e o conjunto de soluções eficientes deve ser composto por elementos cujos valores nos dois últimos objetivos sejam nulos:

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}^*) = \left[o_1 \;\; o_2 \;\; \ldots \; o_{nobj} \;\; 0 \;\; 0\right]^{\boldsymbol{T}} \tag{3.3}$$

Essa abordagem, descrita em (MEZURA-MONTES e COELLO, 2011), aumenta a complexidade do problema multiobjetivo o que pode degradar o desempenho do algoritmo de otimização já empregado na versão irrestrita do problema.

3.11.3 Dominância por Factibilidade

Enquanto os métodos de penalidade somam aos objetivos termos que se referem às restrições, a dominância por factibilidade separa os objetivos das restrições. A ideia é criar um conjunto de regras para se efetuar a busca de modo diferente entre indivíduos factíveis e não-factíveis. Proposta em (DEB, 2000; DEB *et al.*, 2002), a dominância por factibilidade baseia-se na natureza das soluções comparadas. Portanto, as soluções infactíveis não são eliminadas sumariamente. Supondo a existência de soluções factíveis e infactíveis no processo de busca, três tipos de comparação podem ocorrer: (a) entre duas soluções factíveis; (b) entre solução factível e infactível; e (c) entre duas soluções infactíveis. O conceito de dominância Pareto é aplicado no primeiro caso. Na segunda situação, a solução factível domina a inviável. No terceiro e último caso, a solução com menor margem de violação domina a outra. É importante mencionar que este método pode apresentar convergência prematura.

A investigação das técnicas de tratamento de restrições no PRec-SDPEE mencionadas acima foi feita em (SILVEIRA *et al.*, 2012). Pelas simulações realizadas, concluiu-se que nenhuma técnica avaliada demonstrou desempenho significativamente superior em todos os tipos de problema verificados. Problemas que se referiam a sistemas de distribuição com carregamento próximo à capacidade máxima eram tratados com técnicas que não penalizavam demasiadamente as soluções infactíveis. Assim, a varredura no espaço de busca para as regiões de factibilidade não era tão prejudicada. A técnica de penalização apresentou comportamento sensível ao peso escolhido e a determinação do peso, por não ser uma tarefa trivial, torna tal técnica menos atrativa para casos gerais. A técnica de dominância por factibilidade, apesar de não precisar do ajuste de parâmetros externos, é sujeita à convergência prematura em problemas com poucas soluções factíveis. Por outro lado, a técnica de acréscimo de objetivos obteve desempenho satisfatório para populações maiores, embora tornasse o problema mais complexo pelo aumento de sua dimensão.

3.11.4 Restrições críticas versus não-críticas

As restrições são classificadas como críticas e não-críticas. Admite-se que as restrições críticas devam ser atendidas necessariamente, visto que alguma violação das mesmas pode incorrer em riscos para a integridade do SDPEE. Porém, é desejável que as restrições não-críticas sejam atendidas apesar da violação das mesmas não impossibilitar a realização da solução. Obviamente, uma solução que atende às restrições críticas, mas viola restrições não-críticas, é preterida por outra que satisfaça ambos os tipos de restrição.

3.12 Melhorias Aplicáveis ao Processo de Otimização dos Problemas Combinatoriais PRes/PRec-SDPEE

Algumas melhorias foram idealizadas para simplificar ou acelerar o processo de avaliação das configurações de rede. O próprio mecanismo de busca do AE é beneficiado por algumas das iniciativas descritas a seguir.

3.12.1 Inicialização da População com Soluções Viáveis

O preenchimento da população inicial com indivíduos topologicamente viáveis, facilitado pela adoção da codificação aqui proposta, evita a verificação da condição de radialidade e conectividade das barras. Como visto na Seção 3.6, a implementação sugerida procurou mitigar a carga computacional relacionada com o processamento de heurísticas de sondagem e reparação, bem como das possíveis infactibilidades criadas pelos operadores genéticos do MOEA. A abordagem por ciclos fundamentais possui a vantagem de ser executada apenas uma vez para um dado SDPEE, mas a dificuldade de determinação desses ciclos depende da complexidade dos grafos que os contém, principalmente se eles forem adjacentes e houver sobreposições entre os mesmos.

3.12.2 Eliminação de Reavaliações por Tabela de Dispersão

Nos problemas de otimização em que a avaliação de soluções utiliza-se de uma função computacionalmente custosa, a tabela de dispersão (*hash*) (CORMEN *et al.*, 1990) desempenha um papel fundamental para a eficiência do processo visto que evita re-avaliações

das soluções recorrentes, muito comum durante os processos de explotação de uma dada região do espaço de busca. Assim, a tabela de dispersão foi empregada para garantir que a inserção, a remoção e a recuperação de soluções acompanhadas de suas respectivas avaliações ocorressem com complexidade computacional constante igual a $O(N_B)$.

3.12.3 Redução do Espaço de Busca

Ao tratar problemas de otimização de grande escala, alguns recursos, não comumente usados em testes comparativos (*benchmarks*), podem ser aplicados a exemplo da redução do espaço de busca (VASCONCELOS *et al.*, 2001). Ela pode ser bastante útil na varredura do espaço de busca referente aos problemas combinatoriais, uma vez que determinados esquemas de solução tenham se mostrado infrutíferos. O principal cuidado que se deve ter no uso dessa estratégia para resolver tanto o PRec-SDPEE quanto o PRes-SDPEE é o controle da taxa de redução e sua frequência para não provocar convergências prematuras.

Durante a execução do AE, a cada ciclo de it gerações, as variáveis de otimização com valores coincidentes dentre as melhores soluções (configurações) até então obtidas devem ser identificadas. A partir daí, um percentual dessas variáveis é aleatoriamente escolhido para manter seus valores fixados até o final da execução do algoritmo. Com isso, evita-se a convergência prematura e a perda de regiões do espaço ainda não sondadas. Para uma codificação binária, por exemplo, a fixação de um bit corresponde à redução pela metade do espaço de possibilidades.

Essa proposta viabilizou a submissão de um artigo intitulado "*Multilevel Population-Based Incremental Learning: a novel implementation to solve Distribution Feeder Reconfiguration Problem*" a periódico.

3.12.4 Repositório de Configurações Promissoras

O carregamento imposto pelas cargas de um sistema de distribuição é variável ao longo do tempo. Uma configuração de rede avaliada como ótima para um dado período de operação pode levar a perdas exageradas e a desbalanceamentos de cargas em outro período. Devido à sazonalidade na demanda das cargas caracterizada para um dado intervalo de tempo (dia, mês ou ano), uma configuração outrora ótima pode se tornar ótima novamente em um período posterior (BARBOSA *et al.*, 2012). Esse comportamento cíclico pode reduzir consideravelmente o conjunto das configurações ótimas para um SDPEE de acordo com a definição do problema. Melhor dito, é esperado que os ótimos do problema de otimização pouco variem, se não se mantiverem os mesmos, em um futuro período cíclico similar quando pequenas variações percentuais do carregamento ocorrem.

Um repositório de configurações com função similar a de uma memória externa pode acelerar a busca pelo conjunto das soluções ótimas identificadas para a operação de um dado SDPEE sujeito a um carregamento bem caracterizado. A geração inicial do algoritmo evolucionário pode receber soluções candidatas historicamente ótimas ou quase ótimas que já foram obtidas em outras execuções do algoritmo feitas para uma mesma rede.

Portanto, o trabalho realizado pela otimização pode ser poupado por um repositório que armazene as melhores configurações e seja indexado em uma tabela de dispersão por

intervalos de tempo predefinidos (com frequência diária, semanal ou outra mais esporádica), por exemplo. A Figura 3.13 apresenta um esquema para esse repositório.

O Repositório de Configurações Promissoras (RCP) possui dupla utilidade: (i) preencher a população inicial do AE com soluções viáveis e (ii) acelerar a convergência do processo de otimização fazendo-o partir de soluções provavelmente próximas dos ótimos atuais. Os ganhos com o uso do RCP foram comprovados em (BARBOSA *et al.*, 2012).

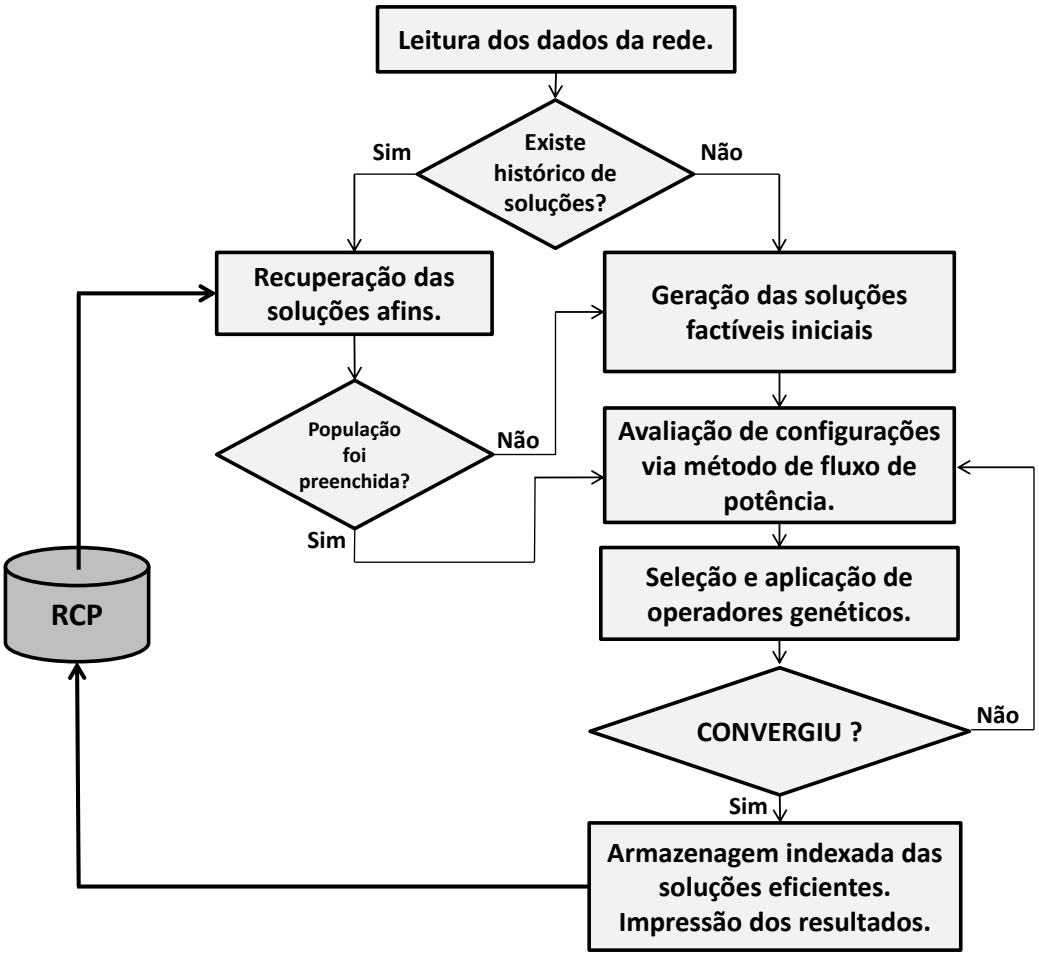

Figura 3.13 – Esquema de uso do repositório.

3.12.5 Condição de Parada por Métricas

A condição de parada estática por número máximo de gerações é comumente empregada na maioria das implementações dos algoritmos estocásticos. Além dela, uma condição dinâmica que faz uso de algumas métricas como a cardinalidade e a cobertura foi criada para reduzir o número de gerações executadas pelo algoritmo sem provocar, no entanto, a interrupção prematura do processo de convergência (veja a Figura 3.14).

O intuito desse mecanismo foi detectar possíveis indícios da estagnação do algoritmo estocástico. Embora a cardinalidade da primeira fronteira possa se manter fixa ao longo de gerações subsequentes, novas soluções podem substituir outras, uma vez que um critério de desempate como a distância de multidão do algoritmo NSGA-II seja usado.

Nesse caso, a métrica espalhamento pode ser utilizada para mensurar a melhoria no conjunto de soluções obtidas até então. Todavia, isso não quer dizer que o algoritmo tenha convergido para a fronteira Pareto-ótima.

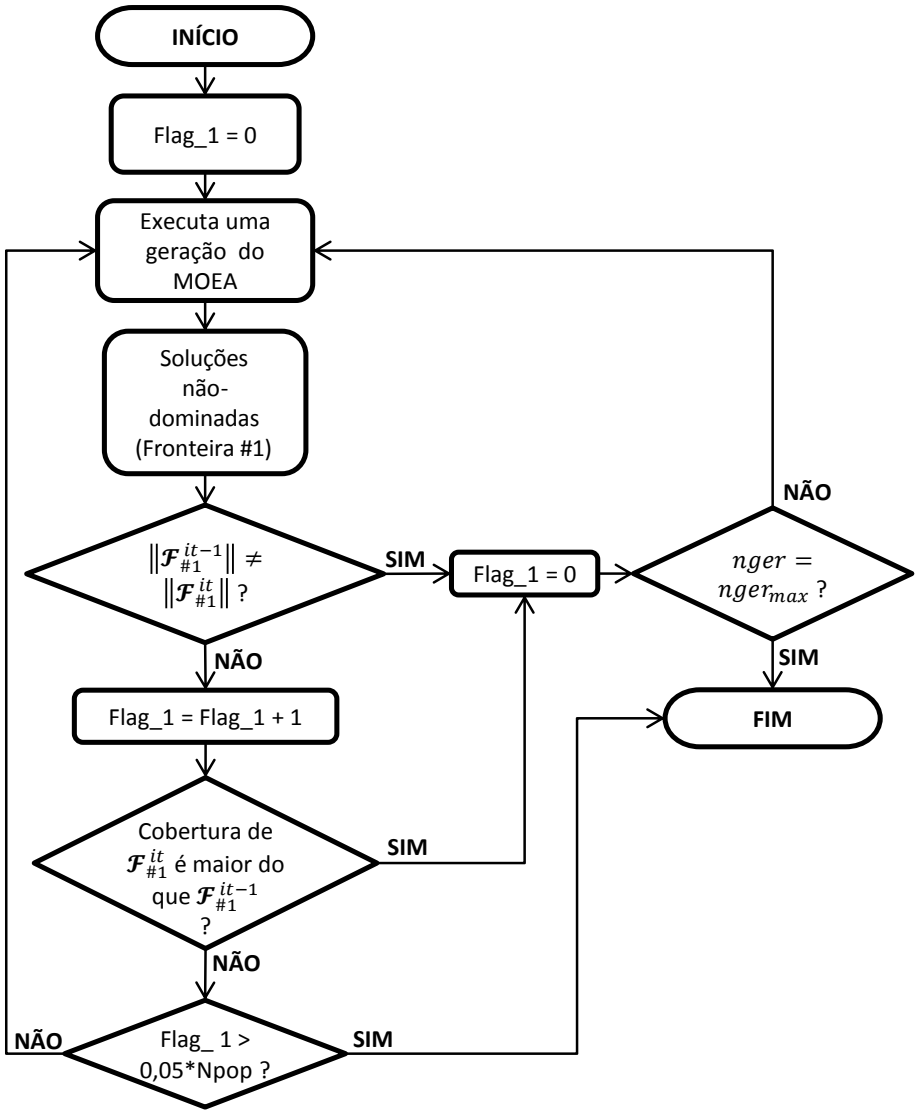

Figura 3.14 – Procedimento de verificação da condição de parada para o algoritmo do MOEA-DFR.

3.12.6 Filtragem das Soluções

Na concepção original de um MOEA baseado em AG, os indivíduos idênticos no espaço dos objetivos são considerados cópias e, portanto, podem ser eliminados durante o processo de seleção dos mais aptos, ainda que tenham valores diferentes no espaço das variáveis. Como não há distinção associada com o espaço de decisão entre eles, os indivíduos bem avaliados podem ser intercambiados indistintamente e, assim, o processo de otimização é prejudicado em termos da diversidade de soluções do ponto de vista do espaço das variáveis.

De acordo com as características dos problemas PRec-SDPEE e PRes-SDPEE, múltiplas soluções diferentes no espaço das variáveis podem resultar em um mapeamento para os mesmos valores no espaço dos objetivos. A permanência dessas soluções ao longo da execução do AE é

essencial para que haja diversidade de opções apresentadas ao decisor no final do processo de otimização. Nesse sentido, Deb sugeriu em (DEB, 2008) algumas modificações na estrutura original de um MOEA para que os indivíduos distintos com mesmos valores de objetivos sejam mantidos. Além da classificação das soluções de uma mesma fronteira por meio da distância de multidão (*crowding distance*), que favorece à melhor distribuição das soluções no espaço dos objetivos e, em última análise, a diversidade das mesmas, empregou-se uma verificação para garantir aos indivíduos a sobrevivência quando estes forem diferentes no espaço das variáveis. O algoritmo dá prioridade à diversidade no espaço dos objetivos, mas não descarta a diversidade existente no espaço das variáveis.

3.13 Conclusões

Nesse capítulo, a modelagem matemática apresentada no capítulo anterior foi incorporada aos algoritmos evolucionários descritos. Foram detalhadas as estratégias desenvolvidas para tratar os problemas de otimização. Questões fundamentais como a codificação do indivíduo para os algoritmos evolucionários, os operadores genéticos e as heurísticas auxiliares para construção de soluções radiais foram abordadas. Os trabalhos científicos mais relevantes que trataram da otimização da configuração foram relacionados. Uma vasta revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento de esquemas de representação de soluções para os problemas combinatoriais PRec-SDPEE e PRes-SDPEE também foi feita. Foram destacadas a importância do esquema de codificação em relação à viabilidade das soluções encontradas e as propriedades desejáveis para um esquema ideal. O algoritmo ARC elaborado para a construção de soluções de rede radiais foi apresentado e suas vantagens e desvantagens foram ressaltadas. Exemplos de uso do ARC foram dados. A simplificação do SDPEE para um grafo equivalente menor é uma etapa importante para a redução da complexidade no tratamento pelos AEs, seja para o problema de reconfiguração ou para a restauração. Esses procedimentos também foram discutidos nesse capítulo. Os operadores genéticos de cruzamento e mutação discutidos nesse capítulo foram adaptados aos problemas combinatoriais abordados de modo a atenderem a factibilidade topológica das soluções geradas. O algoritmo evolucionário para o problema da reconfiguração (EA-DFR), que se baseia no NSGA-II, foi descrito. Um algoritmo de estimativa de distribuição multiobjetivo, desenvolvido a partir do modelo de algoritmo de estimativa mais simples (PBIL), foi apresentado – o MMOPBIL. Outros algoritmos evolucionários bastante conhecidos como o SPEA2 e o PAES também foram adaptados aos problemas de configuração de rede. Por serem o PRec-SDPEE e o PRes-SDPEE problemas restritos, três estratégias de tratamento de restrições nos algoritmos evolucionários foram analisadas. Finalmente, foram descritos um conjunto de mecanismos computacionais que trouxeram melhorias perceptíveis aos AEs utilizados em termos de eficiência na resolução dos problemas tratados. Dentre eles, destacaram-se a inicialização da população com indivíduos válidos, o emprego do repositório de soluções e o uso da tabela de dispersão.

4 - Avaliação da Configuração e Modelos de Componentes de Rede

4.1 Introdução

O fluxo de potência em um SDPEE pode ser redirecionado graças à realização de manobras de chaveamento com o intuito de atender às mudanças das demandas de carga, redistribuir a corrente ao longo das linhas para prevenção de sobrecargas, atenuar os riscos de faltas, reduzir perdas, melhorar o perfil de tensão ou mesmo aumentar a confiabilidade do sistema. Para aplicação de tempo real, a identificação de configurações ótimas em SDPEEs requer um método de cálculo de fluxo de potência eficiente e robusto (CHENG e SHIRMOHAMMADI, 1995). Ao tratar sistemas de grande porte, o método deve apresentar ainda as seguintes propriedades (STOTT, 1974): rapidez, ocupação mínima de espaço em memória, robustez para problemas não-simétricos ou desequilibrados, versatilidade e flexibilidade.

As variáveis de otimização descritas no Capítulo 2 definem as interconexões entre as barras e, portanto, determinam o aspecto topológico do SDPEE. Mas são os objetivos que indicam a adequabilidade de uma dada configuração ao modelo matemático em questão que, por sua vez, representa os aspectos elétricos da rede mais significativos que orientam uma operação ótima do SDPEE. Nesse sentido, a avaliação de uma configuração de rede é fundamental para resolver os problemas PRec-SDPEE e PRes-SDPEE.

A eficiência da identificação da configuração ótima depende tanto da eficiência da técnica de estimativa das perdas quanto da abordagem de reconfiguração propriamente dita (ABABEI e KAVASSERI, 2011). Neste capítulo, serão discutidos os métodos e modelos empregados na determinação do fluxo de potência em SDPEEs.

4.2 Fluxo de Potência – Métodos mais Adequados aos SDPEEs

O problema do fluxo de potência clássico resume-se à determinação dos módulos e ângulos das tensões em cada barra de carga do sistema, bem como as correntes, perdas e, consequentemente, a potência que flui nas linhas energizadas. A solução encontrada é para regime permanente, condição identificada no presente texto pela abreviatura CORP[5], fundamental para se determinar o quão eficiente é uma dada configuração do ponto de vista elétrico. Encontrar o estado do SDPEE em regime permanente implica em se resolver um conjunto de equações algébricas não-lineares. Há diversos métodos numéricos disponíveis para encontrar uma solução que atenda a essas equações. Um deles tem sido bastante referenciado na literatura ao tratar de redes de distribuição radiais – o método de varredura.

[5] Condições Operacionais para Regime Permanente

4.2.1 Revisão da Literatura

Os algoritmos de cálculo e análise do fluxo de potência em SEPs existem desde a década de 70 (TINNEY e HART, 1967; STOTT e ALSAÇ, 1974). Durante vinte anos ou mais, os métodos derivados de Newton-Raphson resolveram de modo satisfatório os sistemas elétricos bem comportados, isto é, sistemas cuja matriz Jacobiana fosse positiva definida ou semidefinida. Os casos mal-condicionados criavam dificuldades para a convergência dos métodos matriciais e ainda criam para os métodos similares disponíveis. Muitos desses problemas foram resolvidos pelo uso da dupla precisão nos computadores.

O aprimoramento dos métodos e técnicas de cálculo do fluxo de potência buscou a eficiência computacional (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988; CÉSPEDES, 1990; DAS *et al.*, 1995; ZHANG e CHENG, 1997). Algumas propostas como a redução do número de equações a serem resolvidas, a simplificação de expressões analíticas, as linearizações e as aproximações da matriz Jacobiana foram desenvolvidas com esse intuito. Entretanto, há outras técnicas que priorizam outros aspectos, visto que os sistemas computacionais atuais suportam bem a resolução de problemas antes considerados inviáveis. A escalabilidade e a robustez da metodologia em resolver, com precisão mínima aceitável, arranjos diferentes de SEPs, bem ou mal-condicionados, são pontos igualmente importantes.

De acordo com Zimmerman (1995), os algoritmos de cálculo de fluxo de potência poderiam ser categorizados segundo três abordagens: método de redução da rede, varredura reversa/direta e método desacoplado rápido. A última classe não funciona bem em redes cuja razão entre a resistência e a reatância lineares seja muito alta; caso das redes de distribuição. O Quadro 4.1 resume as abordagens propostas mais relevantes, em ordem decrescente, de acordo com a quantidade de citações feitas por trabalhos publicados em periódicos indexados. Nela, ficam evidentes as três abordagens identificadas em (ZIMMERMAN, 1995).

Quadro 4.1 – Trabalhos relevantes que tratam do cálculo do fluxo de potência para sistemas elétricos de potência.

Publicação	Relevância		Método de Cálculo do Fluxo de Potência	Características do SEP
	Total [6] Citações	Média[7] Anual		
Stott e Alsaç (1974)	326	8,36	Baseado no método desacoplado de convergência mais rápida do que o NR	Não há restrições para tamanho do sistema elétrico
Shirmohammadi et al. (1988)	323	12,92	Aplica as leis de Kirchhoff da tensão e da corrente, varreduras reversa/direta com compensação por injeção de correntes	Transmissão e distribuição, fracamente reticulados, monofásicos balanceados
Cheng e Shirmohammadi (1995)	272	15,11	Extensão do método de compensação proposto em (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988) com suporte à geração distribuída	Distribuição primária, trifásicos de grande porte (para análise em tempo real)
Luo e Semlyen (1990)	154	6,70	Varredura reversa para cálculo das potências e direta para cálculo das tensões	Transmissão e distribuição, fracamente reticulados, de qualquer porte
Ghosh e Das (1999)	113	8,07	Expressão algébrica das tensões nos nós receptores	Distribuição, radiais
Teng (2003)	104	10,40	Método direto com injeção de correntes equivalentes, matrizes de injeção nodal para corrente em ramos (BIBC) e de corrente em ramos para tensão nodal (BCBV)	Distribuição trifásico, desbalanceado e mal-condicionado, pequeno porte

[6] Total de citações feitas ao artigo por periódicos indexados até março de 2013.
[7] Média anual de citações = Total de citações / idade do artigo.

Goswami e Basu (1991)	95	4,32	Formação da matriz Z para fatoração triangular superior com numeração dos ramos	Distribuição, reticulados e radiais, balanceados e desbalanceados
Céspedes (1990)	93	4,04	Equivalente elétrico com desconsideração dos ângulos de fase	Sistemas trifásicos radiais balanceados operando em condições normais
Garcia et al. (2000)	92	7,08	NR com formulação esparsa, injeção de corrente	Sistemas trifásicos balanceados e desbalanceados
Zimmerman e Chiang (1995)	81	4,50	Baseado no método de Newton com aproximações da matriz Jacobiana (desacoplamento)	Distribuição, radiais, trifásicos, desbalanceados de médio porte
Zhang e Cheng (1997)	73	4,56	Representação do Jacobiano pelo produto UDU^t (U é matriz triangular superior) atualizado a cada iteração	Distribuição, radiais de grande porte e ampla faixa de variação da razão R/X
Wang et al. (1996)	61	3,59	Baseado em varreduras reversa/direta com formulação em função dos estados das chaves	Distribuição de grande porte, desbalanceados (para análise em tempo real)
Rajicic e Bose (1988)	46	1,84	Desacoplado rápido com técnica similar às compensações série e paralelo	Sistemas elétricos com razão R/X alta
Expósito e Ramos (1999)	45	3,21	Método derivado de NR com 2N equações lineares e N equações quadráticas	Redes radiais de pequeno porte
Nguyen (1997)	24	1,50	Newton-Raphson (NR) com Jacobiano na forma complexa	Transmissão e distribuição, trifásicos, pequeno e médio portes com assimetrias
Kersting e Mendive (1976)	>10	>0,27	Método escalonado que utiliza o princípio de varredura	Distribuição, topologia radial, com razão R/X > 1
Berg Jr et al. (1967)	>10	>0,22	Varredura reversa para determinar impedâncias de operação e direta para calcular tensões nas barras	Sistemas radiais trifásicos balanceados

Em um sistema de distribuição radial comum, poucas barras realizam o controle de tensão, a exemplo daquela correspondente à subestação e das barras que possuem reguladores de tensão. Nestes casos, há inclusive algoritmos de fluxo de potência que empregam formulações aproximadas e simplificações para a resolução de redes com apenas barras de carga (ex. fluxo de carga linearizado). Ao longo dos anos, métodos denominados Métodos de Fluxo de Potência de Sistemas de Distribuição (Distribution System Load Flow - DSLF) foram sugeridos na literatura (BROADWATER *et al.*, 1988) (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988) (BARAN e WU, 1989) (DAS *et al.*, 1995) (MOON *et al.*, 1999) (AFSARI *et al.*, 2002).

Diante das propriedades topológicas próprias dos sistemas de distribuição típicos, métodos mais recentes buscaram suplantar as dificuldades advindas da natureza mal-condicionada desses sistemas quando se trata dos métodos matriciais. Os primeiros algoritmos de varredura foram empregados no cálculo de fluxo de potência para resolver os sistemas de distribuição radiais monofásicos (CÉSPEDES, 1990) (CHENG e SHIRMOHAMMADI, 1995). Embora fossem eficientes e apresentassem perfis de convergência satisfatórios, não eram suficientemente genéricos para qualquer sistema, seja com topologia levemente reticulada ou mesmo radial, seja pela presença de equipamentos ajustáveis como os reguladores de tensão. Métodos adequados à solução do problema de fluxo de potência em redes de distribuição radiais são discutidos por (SRINIVAS, 2000).

4.2.2 Especificidades dos Sistemas Radiais

Os sistemas de distribuição apresentam características peculiares que os tornam distintos dos sistemas de transmissão. Além de possuírem topologia diferenciada, os sistemas de distribuição geralmente apresentam um desbalanceamento entre suas fases em condições

normais de operação. As cargas alimentadas normalmente são desbalanceadas e distribuídas, o que geralmente provoca o aumento das perdas totais do sistema e a redução da capacidade de entrega de potência real (WANG *et al.*, 1996). Esses sistemas são compostos de linhas curtas cuja razão entre a resistência e reatância lineares (R/X) é tipicamente alta. Normalmente, as linhas de distribuição apresentam valores de resistência pelo menos comparáveis à reatância e a prática da transposição de cabos é incomum nestas linhas, visto que os comprimentos usuais são inferiores a 50 km. Exceções existem para linhas rurais.

Nos sistemas de distribuição, quando a razão R/X é muito alta, dado que as bitolas dos condutores estão entre as menores do sistema elétrico, a matriz Jacobiana não pode ser simplificada. Sob tais condições, métodos como as variantes de Newton-Raphson (*P-Q* desacoplado, desacoplado rápido) podem convergir com elevado número de iterações ou até mesmo divergir (LUO e SEMLYEN, 1990) (DAS *et al.*, 1994) (VIEIRA JR. *et al.*, 2004) (PERALTA *et al.*, 2008). Portanto, o esforço computacional empregado na fatoração das matrizes e na solução do sistema de equações é alto para os sistemas fracamente reticulados ou radiais.

4.2.3 Equações Básicas de Fluxo de Potência

A resolução das equações de fluxo de potência compreende essencialmente o cálculo das tensões e ângulos de cada barra do sistema para um dado conjunto de condições de despacho de energia e carga, em regime permanente senoidal. As grandezas elétricas de interesse são os fasores de tensão nas barras da rede, os fluxos de potência ativa e reativa em todas as linhas e as perdas nas linhas e nos transformadores, visando identificar tensões fora do limite operacional, sobrecargas e perdas excessivas. O cálculo das demais grandezas elétricas, como a corrente, pode ser então realizado a partir do conhecimento dos valores das grandezas anteriores.

De forma geral, o problema do fluxo de potência é descrito como se segue. Seja um sistema elétrico de potência com N_{PQ} barras *PQ,* e N_{PV} barras *PV*, sendo tantas delas definidas como referência angular $V\theta$ conforme o número de subestações considerado. A resolução do problema do fluxo de potência associado a esse sistema com N_B ($N_B = N_{PQ} + N_{PV}$) barras consiste em se determinar o conjunto de ângulos de fase θ_k ($k = 1, 2, \dots, N_{PQ} + N_{PV} - N_{V\theta}$) e o conjunto de valores de tensão V_k ($k = 1, 2, \dots, N_{PQ}$), a partir de $2 \cdot N_{PQ} + N_{PV} - N_{V\theta}$ equações não-lineares, deduzidas das equações básicas do fluxo de potência apresentadas a seguir:

$$P_k^{esp} = V_k \sum_{m=1}^{N_B} V_m \cdot (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \sin\theta_{km}) + PL \qquad k = 1,2,..,N_{PQ} + N_{PV} \quad (4.1a)$$

$$Q_k^{esp} = V_k \sum_{m=1}^{N_B} V_m \cdot (G_{km} \sin\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}) + QL \qquad k = 1,2,..,N_{PQ} \quad (4.1b)$$

em que P_k^{esp} e Q_k^{esp} são, respectivamente, as potências ativa e reativa especificadas, V_k e V_m correspondem às respectivas magnitudes da tensão nas barras k e m. As grandezas G_{km} e B_{km} representam a condutância e a susceptância do trecho **k-m** equivalente à admitância série. O ângulo θ_{km} representa a diferença (abertura) angular $\theta_k - \theta_m$. O índice m refere-se à barra pertencente ao conjunto de barras vizinhas à barra k, incluindo-se o próprio. Os termos PL e

QL denotam as parcelas referentes às perdas de potência real e reativa nas linhas do sistema e foram definidos pelas Equações 2.16(c) e (d).

4.2.4 Métodos de Varredura

O Método da Varredura Reversa/Direta (MVRD) é uma técnica iterativa escalonada que se baseia nas equações de fluxo vistas na seção anterior (Eqs. 4.1a-b). Essas equações são formas matemáticas derivadas das equações de fluxo de potência básicas, porém adaptadas às características dos sistemas radiais, discutidas na Seção 4.2.2. Nesse sentido, o trabalho de Berg (BERG JR. *et al.*, 1967) pode ser considerado pioneiro. O algoritmo apresentado por ele continha os seguintes passos:

1. Inicialização das barras do sistema com valor de tensão igual a 1 p.u. e ângulo de fase nulo. Este procedimento é mais conhecido por *flat start*;
2. Determinação da impedância equivalente vista de cada barra do sistema, com cálculo do ponto de operação de cada impedância, partindo-se das barras das extremidades em direção à barra da subestação (NPP);
3. Cálculo das tensões e correntes com uso dos pontos de operação das impedâncias determinados na etapa anterior, partindo-se da barra da subestação para as barras de carga extremas;
4. Verificação do critério de convergência. Se for atendido, o algoritmo deve terminar. Caso contrário, a execução do algoritmo deve ser retomada a partir da etapa 2.

No procedimento de varredura dos métodos do tipo MVRD, o sistema é representado como uma árvore, onde o NPP corresponde à subestação da qual partem derivações que entregam potência ao SDPEE. Existe apenas um caminho entre qualquer barra e a fonte do sistema.

O cálculo do fluxo de potência elementar faz uso de pelo menos três tipos básicos de barra. As variáveis especificadas para a barra determinam seu tipo. Uma barra k, de carga ou do tipo PQ, é aquela em que potências, ativa e reativa, demandadas são especificadas e se busca determinar as grandezas incógnitas que são a tensão V_k e o ângulo de fase θ_k. Uma barra de geração, tensão controlada ou do tipo PV mantém a magnitude de tensão V_k e a potência ativa demandada em valores conhecidos e especificados. Neste tipo de barra, resta ainda determinar a potência reativa Q_k e o ângulo de fase θ_k.

A barra de referência angular $V\theta$ (tipicamente $\theta_k^{ref} = 0^o$), conhecida também como *slack* ou *swing*, tem duas funções no cálculo do fluxo: atuar como referência angular para o sistema e fechar o balanço de potência levando-se em conta as perdas. Mas as perdas no sistema não são conhecidas, a priori, e devem ser supridas pelas unidades provedoras de potência. Uma das barras PV assume o papel de prover a potência necessária à compensação de tais perdas. O Quadro 4.2 apresenta os tipos básicos de barras.

Quadro 4.2 - Tipos de barras e respectivas grandezas especificadas (E) e calculadas (C).

Tipo	V_k	θ_k	P_k	Q_k
PV	E	C	E	C
PQ	C	C	E	E
Vθ	E	E	C	C

Se não houver geração distribuída, regularores ou outros dispositivos de controle no SDPEE, todas as demais barras são do tipo PQ. Admitindo inicialmente que todas as barras do sistema tenham módulo da tensão igual ao valor da barra provedora de potência (NPP), é possível determinar a corrente ou o fluxo de potência mais próximos dos prováveis valores em cada linha desse sistema.

A cada iteração, uma varredura direta é precedida por uma varredura reversa. A varredura inicial das barras terminais para a barra provedora de potência (sentido reverso) serve para agregar alguma grandeza associada às barras e linhas à jusante (ex. corrente, potência, impedância). Em seguida, uma varredura no sentido direto (da barra provedora de potência para as barras terminais) é realizada para que os valores de tensões de barra sejam atualizados a partir dos valores da grandeza acumulada na etapa anterior.

Ao final da varredura direta, a convergência é verificada. Se a condição de parada do algoritmo não é satisfeita, uma nova varredura reversa é iniciada. O Algoritmo 4.1 descreve as etapas do método de varredura por agregação de correntes. A Figura 4.1 identifica os fluxos de potência ou corrente tomados em consideração pelo MVRD.

Algoritmo 4.1 - Método da Varredura Reversa/Direta (MVRD).

RESULTADO: Retorna o estado do sistema elétrico radial.

ENTRADA: $\boldsymbol{N_B}$, $\boldsymbol{N_L}$, $\boldsymbol{|V_0|}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{P_k}$, $\boldsymbol{Q_k}$, $\boldsymbol{\xi}$

SAÍDA: $\overline{\boldsymbol{V}}$, $\boldsymbol{P_{perdas}}$, $\boldsymbol{Q_{perdas}}$

INICIALIZAÇÃO:
$\boldsymbol{Perdas^n = 0}$;
Para $\boldsymbol{k = 1}$ **até** $\boldsymbol{N_B}$ **faça**
    $\boldsymbol{|V_k| = |V_0|}$;
fim

Para $\boldsymbol{k = N_B}$ **até** $\boldsymbol{0}$ **faça**
    Cálculo das correntes de carga ($\boldsymbol{i_k}$) **e de linha** ($\boldsymbol{I_i}$) **pela expressão:**

$$\boldsymbol{I_k = \left(\frac{S_k}{V_k}\right)^*} \quad , \quad \boldsymbol{I_i = i_k + \sum_{l \in \nabla_i} I_l}$$

  ($\boldsymbol{\nabla_i}$ **representa o conjunto das linhas à jusante da linha** $\boldsymbol{i}$)
fim
$\boldsymbol{P_{perdas} = \sum_{(i \in L)} r_i \cdot I_i^2}$;
$\boldsymbol{Q_{perdas} = \sum_{(i \in L)} x_i \cdot I_i^2}$;
$\boldsymbol{Perdas^{n+1} = P_{perdas}}$;

Se $\boldsymbol{(\Delta Perdas = |Perdas^n - Perdas^{n+1}| \leq \xi)}$, **então**
    retorna ($\boldsymbol{\overline{V}}$, $\boldsymbol{P_{perdas}}$, $\boldsymbol{Q_{perdas}}$)
Senão
    $\boldsymbol{Perdas^n = Perdas^{n+1}}$;
fim

Para $\boldsymbol{k = 0}$ **até** $\boldsymbol{N_B - 1}$ **faça**
    Para $\boldsymbol{i \in \nabla_i}$ **faça**
        $\boldsymbol{V_{k+1(\Re)} = V_{k(\Re)} - r_i \cdot I_{i(\Re)} + x_i \cdot I_{i(\Im)}}$;
        $\boldsymbol{V_{k+1(\Im)} = V_{k(\Im)} - r_i \cdot I_{i(\Im)} - x_i \cdot I_{i(\Re)}}$;
    fim
fim

As variantes do MVRD diferenciam-se na etapa reversa das varreduras, onde realizam o somatório de correntes, potências ou impedâncias. Por exemplo, a formulação proposta por

Shirmohammadi (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988) baseia-se no cálculo de correntes, enquanto a formulação de Broadwater (BROADWATER *et al.*, 1988) se apóia no somatório de potências.

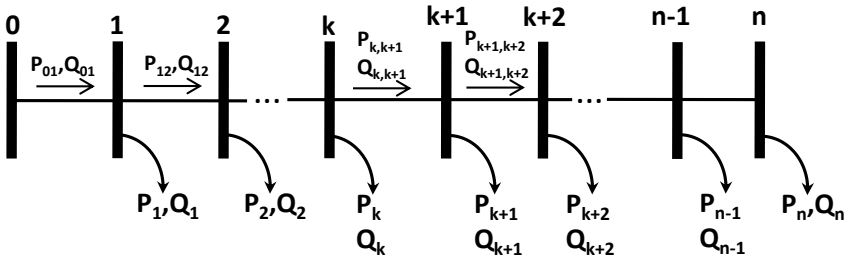

Figura 4.1 – Fluxos de potência admitidos no método da varredura reversa/direta (MVRD).

4.2.4.1 Método de Varredura com Agregação de Corrente (MVRD-AC)

O método MVRD implementado por somatório de correntes é um procedimento no qual há agregação de correntes naquelas barras que possuem derivações de ramal durante a etapa reversa. Há uma associação de valor líquido de corrente I_k em cada barra devido a cargas, bancos de capacitores e outros equipamentos. A corrente acumulada $Iacum_k$ refere-se ao valor total demandado por todas as barras à jusante da barra k, incluindo-se a própria. No método de soma de correntes, as cargas (resistivas, capacitivas e indutivas) são modeladas como fontes equivalentes de injeção de corrente.

A seguir, serão discutidas três estratégias possíveis para se implementar o somatório das correntes em um SDPEE radial.

4.2.4.1.1 Superposição das Correntes de Ramo

A superposição das correntes de ramo pode ser realizada se há no sistema apenas cargas elementares com demanda fixa de corrente (modelo I). O processo consiste primeiramente em se identificar todas as barras terminais (nós-folha da árvore equivalente). A partir daí, pela identificação sucessiva das barras predecessoras, as correntes de carga são atribuídas cumulativamente aos ramos que se encontram ao longo do percurso formado entre a barra terminal e o NPP.

Ao alcançar o NPP, outra barra terminal deve ser escolhida para se iniciar uma nova varredura reversa simples. A corrente acumulada $Iacum_k$ da barra k terá um acréscimo ΔI (vide Algoritmo 4.2) se ele pertencer a um trecho comum já percorrido. Do contrário, a soma integral da corrente acumulada na barra sucessora $Iacum_{suc(k)}$ com o valor já existente na barra k implicará em erro.

A presença de transformadores e reguladores de tensão afeta os valores das correntes nos ramos e barras situados à jusante de tais equipamentos. Portanto, a relação de corrente atribuída à presença desses equipamentos de transformação deve ser propagada como um fator de correção para o conjunto de barras e ramos sucessores. O Algoritmo 4.2 descreve o procedimento que foi adotado devido à sua simplicidade de implementação. A Figura 4.2(a) mostra esquematicamente a aplicação do procedimento em um alimentador do SDPEE.

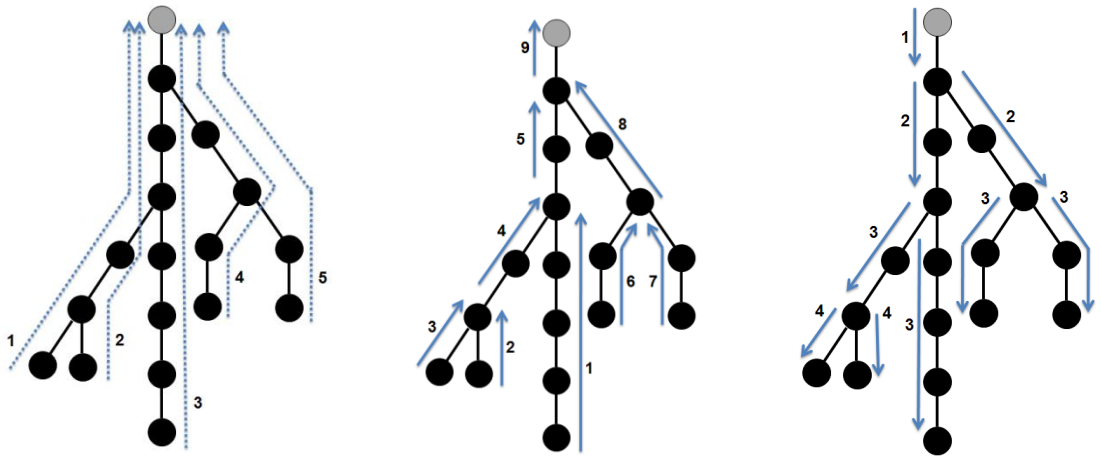

Figura 4.2 - Procedimentos para o somatório de correntes: (a) varredura reversa com superposição de correntes, (b) varredura reversa com agregação de correntes e (c) varredura com recursividade para agregação de correntes.

Algoritmo 4.2 – Implementação do somatório das correntes.

```
1  PARA terminal = 1:NOS_TERMINAIS
2      ΔI=0;
3      NO = terminal;
4      ENQUANTO NO ≠ NO_RAIZ
5          SE (suc(pred(NO)) == 1)
6              Iacum_pred(NO) = I_pred(NO) + Iacum_NO ;
7          SENÃO
8              SE (Iacum_pred(NO) =< erro)
9                 Iacum_pred(NO) = I_pred(NO) + Iacum_NO ;
10                SENAO
11                   SE (ΔI=< erro)
12                      ΔI= Iacum_NO ;
13                   FIM-SE
14                   Iacum_pred(NO) = Iacum_pred(NO) + ΔI;
15               FIM-SE
16         FIM-SE
17         NO = pred(NO);
18     FIM-ENQUANTO
19 FIM-PARA
```

4.2.4.1.2 Agregação de Correntes - Direção Reversa

Nesta implementação, a direção da varredura para se determinar as correntes nos ramos mantêm-se reversa, ou seja, das barras terminais para o NPP. Entretanto, varreduras localizadas são executadas toda vez que uma barra com derivação é alcançada. Quando a derivação é identificada pela função $suc()$, as barras terminais relacionadas são enumeradas e novas varreduras partem dessas em direção à barra onde a última derivação foi identificada para se calcular a corrente acumulada. O procedimento é repetido seguidamente até que a corrente acumulada no NPP seja calculada. Do ponto de vista da implementação, esta estratégia é a mais trabalhosa, uma vez que exige o uso contínuo das funções $pred()$ e $suc()$. A Figura 4.2(b) mostra a sequência das varreduras localizadas efetuadas, conforme descrito anteriormente.

4.2.4.1.3 Recursão - Direção Direta

Nesta abordagem, a recursividade é utilizada para se determinar a corrente acumulada em cada trecho de linha. A função que calcula a corrente acumulada é novamente chamada quando uma derivação é identificada. As barras sucessoras são passadas como parâmetro para a função que calculará a corrente acumulada por tais barras. A sobreposição de chamadas à mesma função se repetirá até que todas as barras terminais do sistema sejam alcançadas. A partir daí, a última instância da função retornará o valor acumulado da corrente à penúltima instância, e assim por diante. A Figura 4.2(c) mostra como o alimentador é percorrido de acordo com o procedimento recursivo.

4.2.4.2 Método de Varredura com Agregação de Potência (MVRD-AP)

O algoritmo MVRD pode ser aplicado com adaptações às redes de distribuição fracamente malhadas (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988). Há variações do método que utilizam a soma de potências ao invés de correntes durante a varredura reversa (BARAN e WU, 1989) (CÉSPEDES, 1990) (HAQUE, 1996). Ao propor o método aproximado de soma de potências que calcula apenas o módulo das tensões, Céspedes (1990) buscou simplificar o procedimento iterativo e reduzir o custo computacional em relação àquele demandado pelo método de soma de correntes. Foram usadas duas versões do método com agregação de potência que são descritos nas próximas subseções. É importante mencionar que essas versões foram implementadas para fins de comparação com resultados de simulações publicados na literatura.

4.2.4.2.1 MVRD-AP-CP: Formulação com Admissão de Perdas

O método de varredura com agregação de potências e admissão de perdas (MVRD-AP-CP) recalcula o termo relativo às perdas reais e reativas das linhas (termos de segundo grau) a cada iteração do algoritmo. As equações adotadas por esse método na etapa reversa são:

$$P_{k,k+1} = P_{k-1,k} - P_{k+1} - R_i \cdot \left[\frac{P_{k-1,k}^2 + Q_{k-1,k}^2}{V_k^2}\right] \tag{4.2a}$$

$$Q_{k,k+1} = Q_{k-1,k} - Q_{k+1} - X_i \cdot \left[\frac{P_{k-1,k}^2 + Q_{k-1,k}^2}{V_k^2}\right] \tag{4.2b}$$

em que o índice $k+1$ refere-se à barra imediatamente à jusante da barra k. A linha indexada por i é aquela cuja barra emissora é k e a barra receptora é a $k+1$.

Na etapa direta, quando as tensões das barras de carga são atualizadas, a equação a seguir é usada:

$$V_{k+1} = \sqrt{V_k^2 - 2 \cdot \left(R_i P_{k-1,k} + X_i Q_{k-1,k}\right) + \left(R_i^2 + X_i^2\right) \cdot \left[\frac{P_{k-1,k}^2 + Q_{k-1,k}^2}{V_k^2}\right]} \tag{4.3}$$

Para o cômputo das perdas na i-ésima linha, tem-se:

$$PL_{k,k+1} = R_i \cdot \left[\frac{P_{k-1,k}^2 + Q_{k-1,k}^2}{V_k^2}\right] \tag{4.4}$$

As perdas para o alimentador r são calculadas pela equação:

$$PL^r = \sum_{k,k+1 \in \Delta_r^c} PL_{k,k+1} \tag{4.5}$$

Desse modo, a perda ativa total de um SDPEE equivale à soma das perdas de todos os alimentadores do sistema.

4.2.4.2.2 MVRD-AP-DP: Formulação com Desconsideração de Perdas

A versão da varredura com perdas negligenciadas origina-se de uma simplificação das equações de fluxo. As perdas nas linhas são consideradas muito menores do que os termos relativos às potências acumuladas que fluem por elas. Portanto, o termo de segundo grau em (4.2a-b) é eliminado:

$$P_{k,k+1} = P_{k-1,k} - P_{k+1} = P_{k+2}^{jus} \tag{4.6a}$$

$$Q_{k,k+1} = Q_{k-1,k} - Q_{k+1} = Q_{k+2}^{jus} \tag{4.6b}$$

De modo similar, a tensão na barra à jusante pode ser calculada pela equação:

$$V_{k+1} = \sqrt{V_k^2 - 2 \cdot \left(R_i P_{k-1,k} + X_i Q_{k-1,k}\right)} \tag{4.7}$$

As perdas ativas em um alimentador r são obtidas por:

$$PL^r = \sum_{k,k+1 \in \Delta_r^c} \frac{R_i \cdot (P_{k,k+1}^2 + Q_{k,k+1}^2)}{V_k^2} \tag{4.8}$$

em que i corresponde ao índice da linha que interconecta as barras k e $k+1$.

4.2.5 Outros Algoritmos de Fluxo de Potência

Há disponíveis na literatura outros métodos para o cálculo de fluxo de potência em sistemas elétricos. O método descrito por Teng (TENG e CHANG, 2002) emprega matrizes e cálculo da Jacobiana, assim como o método de Newton-Raphson e variantes. Ele demanda esforço computacional para a fatoração de matrizes, é vulnerável ao mau condicionamento numérico e sua convergência é dependente da solução inicial. Outros métodos similares também fazem uso de matrizes similares à Jacobiana (VIEIRA JR. *et al.*, 2004; BIJWE e RAJU, 2006). A abordagem direta (TENG, 2003) que faz uso das matrizes BIBC (*bus-injection to branch-current*) e BCBV (*branch-current to bus-voltage*), dependentes do arranjo topológico do sistema, é uma opção que requer um armazenamento imediato proporcional ao tamanho da rede analisada. O método de injeção de correntes (GARCIA *et al.*, 2000; ARAÚJO *et al.*, 2010) é robusto e aplicável tanto aos sistemas reticulados quanto aos radiais. No entanto, o método de varredura foi usado no presente trabalho por ser de implementação simples, ter bom desempenho para sistemas exclusivamente radiais (SDPEEs) e apresentar resultados satisfatórios para SDPEEs com até alguns poucos milhares de barras.

4.2.6 Considerações Gerais para os Métodos de Varredura

A versão trifásica do método de varredura depende dos modelos dos componentes principais tipicamente encontrados em um alimentador que apresentam desbalanceamentos e produzem deslocamentos na fase: transformador abaixador ou elevador, regulador de tensão,

linhas de distribuição a três ou quatro condutores, banco de capacitores e cargas concentradas e distribuídas.

Para uniformizar o procedimento de cálculo computacional, todo trecho entre duas barras quaisquer é tratado como um elemento série de interconexão (Figura 4.3(a)), representado pelas matrizes constantes $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$, $\boldsymbol{d}$, $\boldsymbol{A}$ e $\boldsymbol{B}$ que interrelacionam as tensões de barra e as correntes nos ramos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \bar{V}_e &= \boldsymbol{a} \cdot \bar{V}_r + \boldsymbol{b} \cdot \bar{I}_r \\ \bar{I}_e &= \boldsymbol{c} \cdot \bar{V}_r + \boldsymbol{d} \cdot \bar{I}_r \\ \bar{V}_r &= \boldsymbol{A} \cdot \bar{V}_e - \boldsymbol{B} \cdot \bar{I}_r \end{aligned} \tag{4.9}$$

em que o subscrito e identifica a barra emissora e o subscrito r identifica a barra receptora. O alimentador pode ser visto como um conjunto de barras ao qual componentes de interconexão e componentes *shunt* são conectados. Segmentos de linha aérea ou subterrânea, cargas distribuídas, transformadores, reguladores de tensão e chaves são alguns exemplos de componentes de interconexão ou elementos-série (Figura 4.3 (a)).

Elementos conectados a uma única barra são componentes *shunt* (Figura 4.3 (b)). Os elementos *shunt* são basicamente as admitâncias transversais equivalente das linhas, os bancos de capacitores e as cargas concentradas.

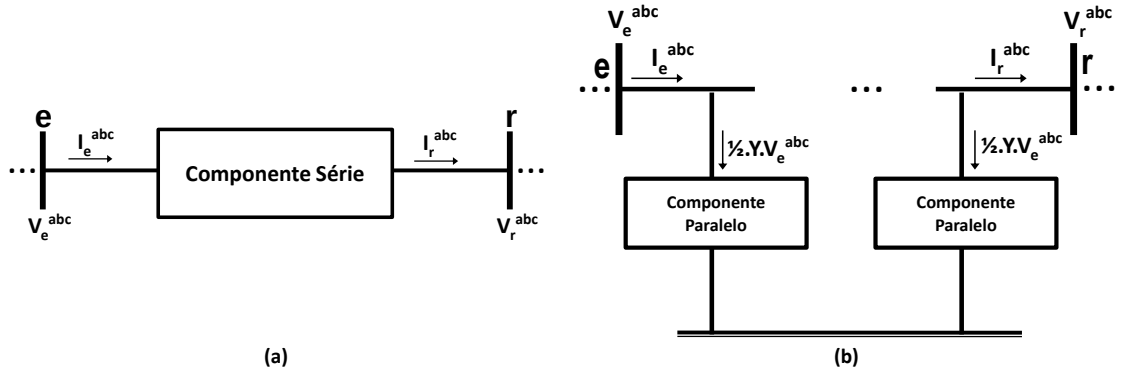

Figura 4.3 – Representação de elemento (a) série e (b) paralelo.

4.3 Modelagem dos Componentes

A convergência do algoritmo para cálculo de fluxo de potência está intrinsecamente associada aos modelos dos componentes de rede. Uma análise mais criteriosa do SDPEE exige uma modelagem adequada dos componentes tipicamente presentes em um SDPEE trifásico desbalanceado (KUO e HSU, 1993). Nas subseções seguintes, serão descritos os modelos matemáticos adotados para os componentes do sistema. Os principais componentes do sistema de distribuição que foram modelados são:

- linha de distribuição;
- carga;
- banco de capacitores;
- chaves de interconexão e interrupção;
- transformador (média/baixa tensão);
- regulador de tensão automático;
- religador automático.

4.3.1 Linhas de Distribuição

Os segmentos de linha aéreos e subterrâneos são inicialmente modelados a três condutores equivalentes, admitindo que o solo se comporte como um condutor perfeito. A transposição de linhas não é tratada, uma vez que os comprimentos desses segmentos em um sistema de distribuição típico não atingem mais do que algumas dezenas de quilômetros.

O modelo detalhado de um trecho de linha monofásica, bifásica ou trifásica deve levar em consideração a impedância equivalente longitudinal (Z_s) e a admitância transversal (Y_{sh}). Esta última apresenta valor geralmente muito pequeno em sistemas de distribuição urbanos. No caso trifásico, uma matriz de impedância série e uma matriz de admitância paralela (de derivação ou *shunt*), ambas de dimensões 3×3, compõem o modelo matemático equivalente. A ausência de fase na linha é modelada pela nulidade dos elementos correspondentes nas matrizes de impedância e admitância.

A equação que relaciona as correntes e tensões na barra emissora (nó e) com as tensões e correntes na barra receptora (nó r), de acordo com a Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC), é dada a seguir (KERSTING, 2002):

$$\begin{bmatrix} I^a_{linha} \\ I^b_{linha} \\ I^c_{linha} \end{bmatrix}_E = \begin{bmatrix} I^a \\ I^b \\ I^c \end{bmatrix}_R + \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ac} \\ Y^{ba} & Y^{bb} & Y^{bc} \\ Y^{ca} & Y^{cb} & Y^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V^{ag} \\ V^{bg} \\ V^{cg} \end{bmatrix}_R \tag{4.10}$$

E pela Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT), tem-se:

$$\begin{bmatrix} V^{ag} \\ V^{bg} \\ V^{cg} \end{bmatrix}_E = \begin{bmatrix} V^{ag} \\ V^{bg} \\ V^{cg} \end{bmatrix}_R + \begin{bmatrix} Z^{aa} & Z^{ab} & Z^{ac} \\ Z^{ba} & Z^{bb} & Z^{bc} \\ Z^{ca} & Z^{cb} & Z^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^a_{linha} \\ I^b_{linha} \\ I^c_{linha} \end{bmatrix}_R \tag{4.11}$$

Ao realizar a substituição na Equação (4.11) das correntes de linha dadas pela Equação (4.10), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V^{ag} \\ V^{bg} \\ V^{cg} \end{bmatrix}_E = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} Z^{aa} & Z^{ab} & Z^{ac} \\ Z^{ba} & Z^{bb} & Z^{bc} \\ Z^{ca} & Z^{cb} & Z^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ac} \\ Y^{ba} & Y^{bb} & Y^{bc} \\ Y^{ca} & Y^{cb} & Y^{cc} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} V^{ag} \\ V^{bg} \\ V^{cg} \end{bmatrix}_R + \begin{bmatrix} Z^{aa} & Z^{ab} & Z^{ac} \\ Z^{ba} & Z^{bb} & Z^{bc} \\ Z^{ca} & Z^{cb} & Z^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^a \\ I^b \\ I^c \end{bmatrix}_R \tag{4.12}$$

Um modelo mais completo de linha de distribuição deve levar em consideração as impedâncias mútuas existentes entre os condutores das fases, entre os condutores das fases e o condutor neutro, e entre estes e o condutor de aterramento. Uma matriz de impedâncias 5×5 pode representar uma linha entre as barras E e R:

$$Z_{LD} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} & Z_{ag} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} & Z_{bg} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} & Z_{cg} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} & Z_{ng} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gn} & Z_{gg} \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

A inexistência de um ou mais condutores também pode ser representada pela anulação dos elementos da linha e coluna correspondentes.

4.3.2 Cargas

As cargas são inicialmente especificadas pela potência complexa consumida. Elas podem ser especificadas também pelos pares de (potência aparente, fator de potência), (potência ativa, fator de potência) ou pela (potência ativa, potência reativa). As cargas trifásicas podem estar conectadas de duas formas: estrela ou delta. Nos casos monofásicos, a carga pode estar

conectada entre linhas (conexão linha-linha) ou entre uma das linhas e a terra (conexão linha-terra). Para retratar o comportamento de diversos equipamentos alimentados pelo SDPEE, diferentes modelos ainda podem ser utilizados, tais como o da potência constante (P), o da corrente constante (I) e o da admitância constante (Z) (KERSTING e MENDIVE, 1976).

4.3.2.1 Cargas Concentradas ou Pontuais

As cargas podem ser modeladas simplesmente como drenos constantes de corrente ou potência cujo valor nominal pode ser dado pelo valor de pico da curva que caracteriza o seu comportamento. Entretanto, a consideração da variação da carga ao longo de um intervalo de tempo é mais realística para se determinar o carregamento de um alimentador em um dado instante t da operação. O alimentador atende usualmente diferentes tipos de consumidores primários (e indiretamente secundários) que são categorizados em classes de acordo com a natureza (comercial, industrial, etc) e nível de demanda de potência (LOPEZ *et al.*, 2004). Cada uma dessas classes é representada por uma curva obtida por método estatístico aplicado ao conjunto de dados coletados, por exemplo, em campanhas de medição feitas pela concessionária de energia, caracterizada principalmente pelo valor de pico e pela faixa de variação da demanda.

As cargas concentradas retratam um consumo de potência em uma das barras do sistema e se associam a uma dada demanda de corrente criada por um único componente com localização bem definida.

No modelo de potência constante (P), as tensões das fases mudam a cada iteração mas a potência aparente permanece constante. Este modelo admite que as cargas sejam especificadas em termos de potência ativa e potência reativa. Se a carga é modelada como uma potência constante, a corrente injetada por ela também dependerá do valor da tensão na barra correspondente. Portanto, as correntes nas linhas para as cargas trifásicas ou monofásicas modeladas dessa forma são dadas por:

$$I_C^f = \left(\frac{S^f}{V^{fn}}\right)^* = \frac{|S^f|}{|V^{fn}|}\angle\delta^f - \theta^f = |I_C^f|\angle\,\alpha^f \tag{4.14}$$

em que f representa uma das fases a, b ou c. A variável S^f corresponde à potência aparente presente na fase f, V^{fn} equivale à tensão entre a fase f e o condutor neutro n (tensão de fase). Os ângulos δ e θ são, respectivamente, os ângulos de fase e do fator de potência. No modelo de impedância (Z) constante ou admitância constante (Y), a carga é caracterizada pela sua admitância ou impedância de valor fixo. A tensão de barra V^{fn} altera seu valor a cada iteração e, consequentemente, a corrente demandada pela barra I_C^f ao qual está conectada a carga é função dessa tensão. A impedância é previamente calculada a partir da potência complexa inicialmente especificada. Portanto, neste modelo a potência complexa S^f e a tensão de fase V^{fn} relacionam-se do seguinte modo:

$$\frac{1}{Y^f} = Z^f = \frac{|V^{fn}|^2}{(S^f)^*} = \frac{|V^{fn}|^2}{|S^f|}\angle\theta_a = |Z_a|\angle\theta_a \tag{4.15}$$

As correntes nas cargas são obtidas em função das impedâncias constantes:

$$I_C^f = \left(\frac{V^{fn}}{Z^f}\right)^* = \frac{|V^{fn}|}{|Z^f|}\angle\delta^f - \theta^f = |I_C^f|\angle\,\alpha^f \tag{4.16}$$

Já no modelo de corrente constante (I), a corrente solicitada pela carga é calculada, antes do processo iterativo, admitindo-se uma tensão nominal presente na barra. As magnitudes das correntes nominais são calculadas pela Equação (4.14). A partir daí, as magnitudes são mantidas constantes, mas os ângulos mudam com a alteração do ângulo da tensão. Desse modo, o fator de potência da carga mantém-se constante:

$$I_C^f = |I_C^f|\angle\,\alpha^f - \theta^f \tag{4.17}$$

Naturalmente, os três tipos de carga mostrados podem compor uma carga com comportamento híbrido. A corrente nesta carga é obtida pela combinação dos três modelos:

$$I_C^f = \kappa I_P^f + \sigma I_Z^f + \eta I_I^f \tag{4.18}$$

em que $\kappa, \sigma, \eta \in [0,1]$ e $\kappa + \sigma + \eta = 1$.

Uma revisão detalhada dos modelos de carga adotados em simulações foi apresentada por (IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE, 1995). Apesar do modelo ZIP (impedância, corrente e potência constantes) ser simplificado para representar os comportamentos não-lineares existentes na faixa de operação considerada, ele foi empregado neste trabalho.

Em um sistema trifásico, cargas podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas, balanceadas ou desbalanceadas, dependendo da forma como são interconectadas e de seus valores individuais. Para o propósito do trabalho, é suficiente modelar toda e qualquer carga como a combinação linear entre uma carga de impedância constante, uma carga de potência constante e uma carga de corrente constante. As cargas devem ser então especificadas pelo valor nominal fixo correspondente ao tipo definido.

4.3.2.2 Cargas Distribuídas

O modelo de cargas distribuídas, apesar de ser pouco aplicável, foi implementado para fins de validação do método de fluxo de potência em sistemas conceituais como os alimentadores de teste do IEEE (IEEE DISTRIBUTION PLANNING WORKING GROUP REPORT, 1991). Quando existe uniformidade na distribuição de um tipo de componente de rede como, por exemplo, cargas ou transformadores, o procedimento de cálculo deve considerar a definição de tensões e correntes diferenciais, além de uma distância incremental, o que evita a modelagem individualizada para n elementos no trecho do SDEE em que se verifica tal uniformidade. Para fins de caracterização de determinados casos reais, cargas diferenciais são especificadas por parâmetros similares à "densidade" linear. Nestes casos, as cargas são admitidas como sendo do tipo corrente constante ou potência constante. A Figura 4.4 mostra uma representação possível para uma carga distribuída, especificada pelas potências real (P_{er}^{cd}) e reativa (Q_{er}^{cd}) demandadas, no trecho **e-r**. Admite-se que a linha tenha um comprimento total L, seja segmentada em n trechos com demandas de corrente Δi supridas por uma corrente total $\mathrm{I_T}$. A barra receptora ainda tem uma carga concentrada que drena uma corrente I_r. Portanto, as quedas intermediárias de tensão ΔV_k são dadas por (MWAKABUTA e SEKAR, 2007):

$$\Delta V_1 = I_T \cdot \Delta x \cdot \frac{Z_{serie}^{cd}}{L} = (n.\Delta i + I_r) \cdot \Delta x \cdot \frac{Z_{serie}^{cd}}{L}$$

$$\Delta V_2 = (I_T - \Delta i) \cdot \Delta x \cdot \frac{Z_{serie}^{cd}}{L} = ((n-1).\Delta i + I_r) \cdot \Delta x \cdot \frac{Z_{serie}^{cd}}{L}$$

$$\vdots$$

$$\Delta V_n = (\Delta i + I_r) \cdot \Delta x \cdot \frac{Z_{serie}^{cd}}{L}$$

em que $\Delta x = L/n$, $\Delta i = I_T/n$ e $I_T = n.\Delta i + I_r$. Uma impedância série equivalente à carga total distribuída pode ser definida pela relação entre a tensão na barra emissora V_e e as potências real e reativa nominais da carga:

$$Z_{serie}^{cd} = \frac{(V_e)^2}{(P_{er}^{cd} + j.Q_{er}^{cd})}$$

Reunindo os termos comuns, tem-se:

$$\Delta V_T = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \cdots + \Delta V_n = [n.I_r + (1 + 2 + \cdots + \mathrm{n}).\Delta i] \cdot \Delta x \cdot \frac{Z_{serie}^{cd}}{L}$$

$$\Delta V_T = \left[nI_r + \frac{\mathrm{n}(\mathrm{n}+1)}{2} \cdot \Delta i \right] \cdot \Delta x \cdot \frac{Z_{serie}^{cd}}{L}$$

$$\Delta V_T = \left[nI_r + \frac{\mathrm{n}(\mathrm{n}+1)}{2} \cdot \frac{\mathrm{I_T}}{\mathrm{n}} \right] \cdot \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{n}} \cdot \frac{Z_{serie}^{cd}}{L}$$

$$\Delta V_T = \left[I_r + \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\mathrm{n}}\right) \cdot \mathrm{I_T} \right] \cdot Z_{serie}^{cd}$$

Desse modo, a diferença de tensão no trecho **e-r** que apresenta uma carga distribuída pode ser obtida pela expressão:

$$\lim_{\mathrm{n}\to\infty} \Delta V_T = \left[I_r + \frac{\mathrm{I_T}}{2} \right] \cdot Z_{serie}^{cd} \qquad (4.19)$$

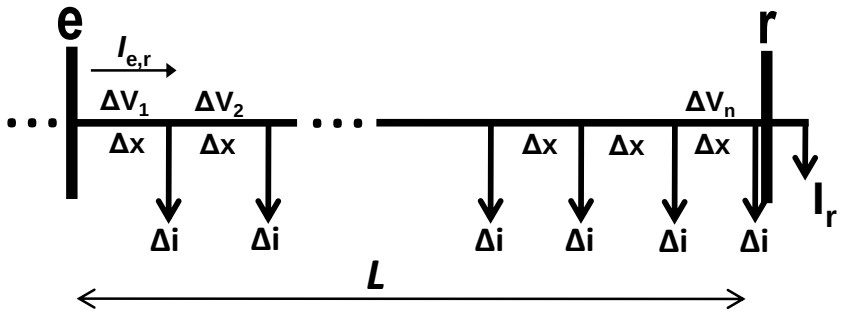

Figura 4.4 – Representação do trecho de linha que contém carga distribuída.

4.3.3 Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores conectam-se ao sistema para suprir a falta de reativos e, com isso, auxiliam no perfil de tensão menos acentuado. Assim como as cargas, os bancos de capacitores podem ser conectados em delta ou estrela, se forem trifásicos. Nos casos

monofásicos, o capacitor pode estar conectado entre linhas (conexão linha-linha) ou entre uma das linhas e a terra (conexão linha-terra). Como eles são tratados como susceptâncias constantes e especificados pela potência reativa nominal, as equações vistas na Seção 4.3.2 são igualmente válidas.

4.3.4 Religadores

Os religadores são equipamentos de proteção amplamente utilizados com o intuito de reduzir o tempo de interrupção de áreas do SDPEE afetadas por faltas transitórias, aumentando a confiabilidade desses sistemas. Atuam como relés e realizam ações de desligamento e religamento seqüenciais com o objetivo de identificar se uma falta em andamento é transitória ou permanente. Diante das faltas transitórias, eles permitem o restabelecimento rápido e automático da rede, assegurando um sentido preferencial do fluxo de potência nos trechos de linha em que estão instalados. São especificados segundo a corrente e tensão nominais, o número de fases, a forma de atuação (ação rápida ou com retardo), quantidade e intervalos entre tentativas de religamento. A operação temporizada normalmente depende da intensidade da corrente que circula por ele (característica tempo vs. corrente). Algumas concessionárias de energia brasileiras fazem uso da funcionalidade de chaveamento telecomandado disponível em modelos de religadores. Para o presente trabalho, a funcionalidade de telecomando foi considerada nos sistemas simulados.

4.3.5 Chaves Seccionadoras e de Interconexão

As chaves seccionadoras e de interconexão são consideradas ideais, ou seja, perdas não ocorrem nestes elementos e o acionamento das mesmas não apresenta retardo. Elas são simplesmente representadas por variável binária indicativa dos estados: aberta ou fechada. Diante de uma falta ou isolamento de uma grande área do SDPEE atingida, nem todas as chaves do sistema poderão estar em condições de operação. Ainda é necessário identificar se a chave encontra-se operacional para ser comandada e o modo de comando da mesma (telecomandada ou manual).

4.3.5.1 Identificação dos Efeitos das Manobras de Chaveamento

Uma sequência m de chaveamentos leva um alimentador do SDPEE a assumir $m-1$ configurações temporárias. Toda manobra pode apresentar algum tipo de risco para a operação do sistema. Portanto, a ferramenta computacional deve estimar o risco de colapso associado ao chaveamento pertencente ao conjunto de manobras que levam a rede elétrica da configuração vigente à configuração ótima. Aproximar as condições críticas encontradas nos estados intermediários é importante para se determinar se uma dada sequência de chaveamento é viável ou não, mesmo que todas as chaves envolvidas estejam manobráveis/operacionais. Uma das principais perturbações é a transferência de carga que pode provocar uma sobrecarga danosa aos componentes que assumirão a carga adicional após o fechamento de uma chave. Outro problema é a possibilidade de atuação antecipada de algum dispositivo de proteção ou a sobrecarga excessiva de algum equipamento.

Há dois tipos de chaveamento: (1) com tensão e (2) sem tensão. A manobra com tensão consiste em se fechar uma chave do sistema (geralmente uma chave de interconexão),

modificando temporariamente uma topologia radial para uma fracamente reticulada. Essa manobra somente poderá ser executada se as duas subestações que alimentam a mesma barra apresentarem as mesmas especificações em termos de potência (do transformador de saída) e tensão, além do defasamento angular bem próximo. Outra condição permitida seria o fechamento de ciclo em um mesmo alimentador, isto é, entre pontos energizados pela mesma subestação. Em seguida, outra chave do sistema deve ser aberta (normalmente uma chave seccionadora). Neste caso, as cargas não sofrem interrupção do fornecimento de energia. Já na manobra sem tensão o procedimento é inverso, ou seja, uma chave é fechada após outra ter sido aberta. A rede elétrica não modifica sua topologia, porém há desenergização de algumas cargas durante certo intervalo de tempo. Nesse trabalho, ambas as situações são analisadas.

Uma reconfiguração deve sempre buscar a menor quantidade possível de chaveamentos. Do contrário, os seguintes problemas poderão surgir na prática:

- desgaste prematuro das partes mecânicas articuladas;
- funcionamento incorreto do esquema de proteção do sistema;
- produção de harmônicos;
- se for chaveamento manual, implicará no aumento do tempo da recomposição do sistema.

4.3.6 Reguladores de Tensão

Em um sistema de distribuição, a demanda de potência pelas cargas varia periodicamente, e, portanto, a regulação de tensão em determinadas barras torna-se necessária para que o fornecimento de energia nos extremos (ponto de acesso de consumidores) esteja dentro das especificações técnicas predefinidas. Nesses sistemas, um tipo especial de transformador é utilizado para controlar automaticamente, por meio de compensação, o módulo da tensão de uma determinada fase que alimenta cargas e outros equipamentos à jusante (posteriormente) do local onde o mesmo se encontra. Os reguladores de tensão mantêm níveis adequados de tensão em locais específicos do sistema elétrico diante das variações das cargas. São equipamentos de transformação que elevam ou reduzem o nível de tensão em uma linha de distribuição para garantir uma discrepância controlada em relação à tensão de referência especificada. Os reguladores com passos de ajuste, com mudança de *tap* de carga (*Load Tap Changer*) e capacitores *shunt* são os mais comuns.

O regulador de tensão ajustável por passos é modelado como um autotransformador com *tap* regulável discretamente em níveis que dependem da faixa de variação de tensão (largura de banda) e da quantidade de posições de ajuste. Os reguladores – trifásicos ou monofásicos – podem ser inseridos em qualquer segmento de linha, inclusive internamente à subestação. As posições de regulação do *tap* são definidas por ajuste em um circuito compensador cujas especificações são: nível de tensão ou tensão desejada, largura de banda, compensador, razão de espiras do transformador de potencial que alimenta o circuito compensador e o valor nominal da corrente no lado primário do transformador de corrente que alimenta o circuito compensador. Outras informações, como a localização do equipamento, a identificação das fases monitoradas e o tipo de conexão às fases, também são necessárias. No modelo concebido para o regulador trifásico, existem três transformadores monofásicos

independentes com razão de transformação real, ou seja, não há deslocamento no ângulo da fase. Cada *tap* referente a um dos três enrolamentos é ajustado independentemente dos demais. A posição efetiva do *tap* é mais importante do que a razão de transformação real de cada par de enrolamentos para se determinar a regulação do equipamento. Se cada posição do *tap* efetua uma mudança de 0,00625 p.u., por exemplo, então a razão efetiva do regulador torna-se:

$$a_R = 1 \mp 0{,}00625 \cdot tap \tag{4.20}$$

No cálculo do fluxo de potência trifásico, os reguladores integram a estrutura de dados que representam o componente de interconexão entre duas barras. Em cada uma das fases, há uma impedância-série acoplada a um transformador ideal com *tap* ajustável no lado secundário. Inicialmente, as posições dos *taps* são ajustadas para um valor padrão conhecido. Durante a execução do algoritmo de varredura, os *taps* serão modificados para reduzir ou aumentar o nível de tensão de maneira a mantê-la o mais próximo possível do valor base V^{ref}.

O regulador modifica apenas as magnitudes das tensões da barra controlada por ele e das barras posteriores. A Figura 4.5 mostra o modelo adotado para o regulador de tensão.

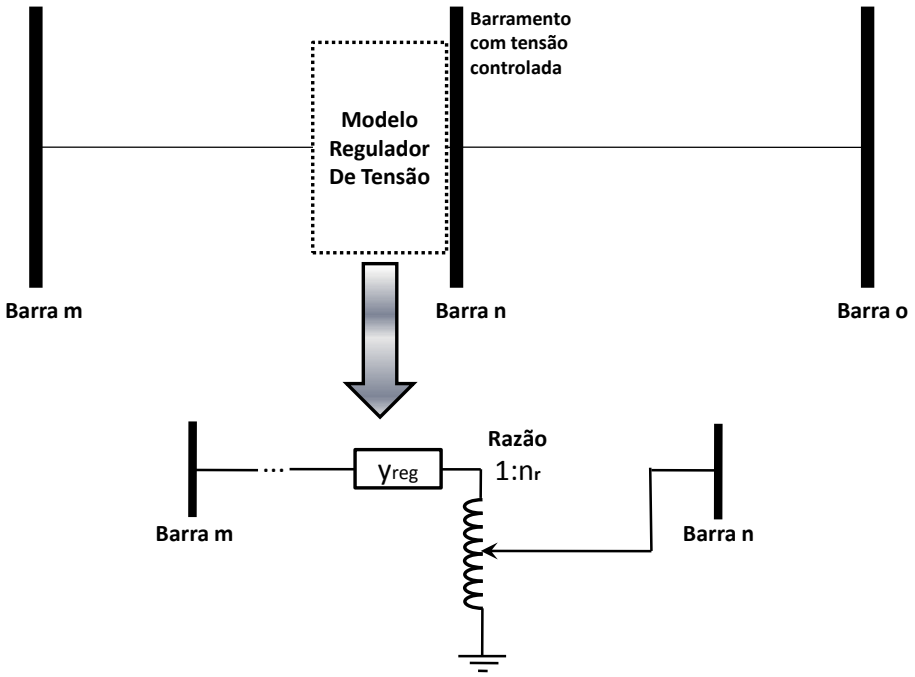

Figura 4.5 – Modelo adotado para reguladores de tensão.

O regulador de tensão é um componente amplamente utilizado em sistemas de distribuição, especialmente os brasileiros. Cada regulador tem uma quantidade máxima de degraus que permite ao mesmo atuar em uma faixa de regulação. O modelo adotado para o regulador de tensão é descrito pela equação a seguir (PEREIRA, 2009):

$$V_S = V_E \left(1 + \frac{tap * fx}{100 * np}\right) \tag{4.21}$$

em que np é o número de posições para elevar ou reduzir a tensão, fx corresponde à faixa de regulação percentual característica do equipamento, V_E e V_S são tensões de entrada e saída nos terminais do regulador. O valor do tap de operação é calculado pela seguinte expressão:

$$tap = ard\left\{\frac{\left(V^{ref} - V_E\right) * 100}{V_E * (fx/np)}\right\} \quad (4.22)$$

sendo que a função ard correponde ao arredondamento do argumento para o valor inteiro mais próximo.

4.3.6.1 Ajuste de taps – integração do regulador ao MVRD

A forma como o modelo do regulador de tensão com ajuste de passo (RTAP) é integrado ao fluxo de potência pode afetar a convergência do método de varredura e, com isso, diferentes ajustes podem ser obtidos. Duas abordagens são usadas na consideração de RTAPs no MVRD-AC como foi feito em (RIBEIRO *et al.*, 2012).

A primeira, denominada de ajuste simultâneo, é a mais simples e direta. Ela consiste na execução do MVRD-AC com a admissão de que todos os RTAPs tenham ajustes pré-fixados para a posição neutra, o que equivale desconsiderar os efeitos dos RTAPs no sistema. Em seguida, os *taps* são ajustados de acordo com os parâmetros *R* e *X* de cada circuito compensador e com os valores de corrente e tensão encontrados ao final da primeira execução do MVRD-AC. Uma nova execução é então realizada para que todos os RTAPs tenham seus *taps* ajustados. Os valores finais de tensão e corrente no sistema são admitidos como a solução final para o fluxo de potência.

A segunda abordagem emprega o ajuste hierárquico. Antes da execução do fluxo, uma hierarquia para os RTAPs do sistema é estabelecida. O primeiro nível hierárquico contém os RTAPs imediatamente acessíveis a partir da barra raiz (NPP). O segundo nível hierárquico contém os RTAPs que são ligados ao NPP por um caminho que contém necessariamente um único RTAP, já o terceiro nível é formado por aqueles RTAPs que estão ligados ao NPP por meio de um caminho que passa por dois RTAPs associados aos níveis 2 e 1, e assim sucessivamente. A primeira execução do método de fluxo de potência (MFP) é usada para se ajustar os taps dos reguladores de primeiro nível. Em seguida, uma execução do MFP é realizada, sem alterações de taps, para se garantir apenas a convergência dos valores de tensão nos demais trechos do alimentador. A partir daí, uma nova execução do MFP é feita para o ajuste dos taps nos reguladores do segundo nível, acompanhada de outra execução para estabilizar os valores de tensão no alimentador. Esse processo é repetido até que se atinja o nível hierárquico mais baixo. Finalmente, uma última execução do MFP assegura a convergência global do processo. Nas simulações realizadas, a segunda abordagem foi escolhida por se mostrar mais eficaz.

4.3.7 Transformadores de Distribuição

Muitos modelos de transformador supõem que o mesmo esteja operando em um sistema trifásico equilibrado e que não há deslocamentos nos ângulos das tensões. Os transformadores trifásicos podem ser modelados por uma matriz de admitâncias que depende do tipo de conexão em ambos os lados e da admitância de dispersão. Esta matriz pode ser descrita como:

$$Y = \begin{bmatrix} Y^{pp} & Y^{ps} \\ Y^{sp} & Y^{ss} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Para transformadores com conexão Y aterrado em ambos os lados, a matriz de admitâncias passa a ter um tamanho 6×6. Isso porque há relações adicionais entre correntes e tensões de

fase tanto no primário quanto no secundário do transformador. Se um lado do transformador possui um padrão de conexão sem aterramento (conexão Y não-aterrado ou delta), a matriz de admitâncias se reduz ao tamanho 5×5. Se o transformador possui conexões não-aterradas em ambos os lados, tensões de linha são utilizadas e a matriz passa a ter uma dimensão 4×4.

4.3.7.1 Modelo do Transformador Trifásico

Em sistemas de transmissão, a modelagem do transformador muitas vezes é feita admitindo-se uma operação balanceada e, portanto, um equivalente monofásico pode ser empregado sem provocar maiores distorções na análise de fluxo de potência em regime permanente senoidal. Já nos sistemas de distribuição, essa hipótese não pode ser tomada em consideração, haja vista que desbalanceamentos provocados pelas cargas são comuns. Além de a abordagem considerar as três fases, os efeitos do condutor neutro e do aterramento devem ser contemplados preferencialmente no modelo final do transformador. Nesse trabalho, esse modelo foi empregado para validar os sistemas de teste IEEE (IEEE DISTRIBUTION PLANNING WORKING GROUP REPORT, 1991), haja vista que o método deverá ser aplicável a sistemas trifásicos e não apenas aos sistemas unifilares ou trifásicos equilibrados.

A modelagem apresentada a seguir baseia-se nos trabalhos de (CHEN *et al.*, 1991) (KERSTING *et al.*, 1999) (ZIMMERMAN *et al.*, 2003) e considera os deslocamentos angulares provocados pelo arranjo das conexões entre os enrolamentos (delta, estrela). Sendo o transformador um componente passivo, as admitâncias de sequência negativa serão iguais às admitâncias de sequência positiva (MOORTHY e HOADLEY, 2002).

O transformador trifásico é obtido pela associação de 3 transformadores monofásicos – banco de transformadores. O conjunto de equações que representam a relação tensão/corrente de cada uma das fases está codificado em matrizes que, de forma condensada, se assemelham aos coeficientes das equações para o caso monofásico (vide Equação (4.12)).

Os modelos de transformadores apresentados são válidos desde que eles não estejam saturados, pois não-linearidades no componente real não serão fielmente retratadas, invalidando assim os resultados. Visto que as motivações do presente trabalho já foram apresentadas, a análise de fluxo de potência deve ser minimamente acurada para viabilizar a decisão de reconfiguração acertada. Dessa forma, os modelos dos componentes trifásicos para o regime permanente, especialmente o transformador, devem ser tão simples quanto possíveis.

A presença de um transformador trifásico entre duas barras é tratada pelo método da varredura reversa / direta com o auxílio dos seis coeficientes matriciais (**a**, **b**, **c**, **d**, **A** e **B**). Para a varredura direta, os coeficientes **A** e **B** são usados na expressão que relaciona a tensão e a corrente do lado primário com a tensão do lado secundário do transformador. No procedimento reverso, o que se busca é obter a corrente do lado primário a partir da tensão e corrente do lado secundário utilizando, para isso, os coeficientes matriciais: **a**, **b**, **c** e **d**. A Equação (4.24) descreve matematicamente o que foi dito:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_p^{a,b,c} \\ \bar{I}_p^{a,b,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{a} & \boldsymbol{b} \\ \boldsymbol{c} & \boldsymbol{d} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \bar{V}_s^{a,b,c} \\ \bar{I}_s^{a,b,c} \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_s^{a,b,c} = \boldsymbol{A}.\bar{V}_p^{a,b,c} - \boldsymbol{B}.\bar{I}_p^{a,b,c} \tag{4.24}$$

Os valores das constantes **a**, **b**, **c**, **d**, **A** e **B** encontram-se indicados no Quadro 4.3 para os diversos tipos de conexões.

Quadro 4.3 - Constantes matriciais para as conexões mais comuns em transformadores trifásicos.

Conexão	Direção Reversa	Direção Direta
YG-yg	$\boldsymbol{a} = [n_t \boldsymbol{I}]$	$\boldsymbol{A} = [n_t \boldsymbol{I}]^{-1}$
	$\boldsymbol{b} = [n_t \boldsymbol{I}].[Z_t^{abc}]$	$\boldsymbol{B} = [Z_t^{abc}]$
	$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{d} = [n_t \boldsymbol{I}]^{-1}$	
D-d	$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{W}.[n_t \boldsymbol{I}].\boldsymbol{D}$	$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{W}.[n_t \boldsymbol{I}]^{-1}.\boldsymbol{D}$
	$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{W}.[n_t \boldsymbol{I}].[Z_t^{abc}].\boldsymbol{L}$	$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{W}.[Z_t^{abc}].\boldsymbol{L}$
	$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{d} = [n_t \boldsymbol{I}]^{-1}$	
Y-d	$\boldsymbol{a} = [n_t \boldsymbol{I}].\boldsymbol{D}$	$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{W}.[n_t \boldsymbol{I}]^{-1}$
	$\boldsymbol{b} = [n_t \boldsymbol{I}].[Z_t^{abc}].\boldsymbol{L}$	$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{W}.[Z_t^{abc}].\boldsymbol{L}$
	$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{d} = [n_t \boldsymbol{I}]^{-1}.\boldsymbol{L}$	
YG-d	$\boldsymbol{a} = [n_t \boldsymbol{I}]$	$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{W}.[n_t \boldsymbol{I}]^{-1}$
	$\boldsymbol{b} = [n_t \boldsymbol{I}].[Z_t^{abc}]$	$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{W}.[Z_t^{abc}]$
	$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{d} = [n_t \boldsymbol{I}]^{-1}.\boldsymbol{L}$	
D-y	$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{W}.[n_t \boldsymbol{R}]$	$\boldsymbol{A} = [n_t \boldsymbol{R}]^{-1}.\boldsymbol{D}$
	$\boldsymbol{b} = [n_t \boldsymbol{R}].[Z_t^{abc}]$	$\boldsymbol{B} = [Z_t^{abc}]$
	$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{d} = \boldsymbol{D}.[n_t \boldsymbol{I}]^{-1}$	
D-yg	$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{W}.[n_t \boldsymbol{R}]$	$\boldsymbol{A} = [n_t \boldsymbol{R}]^{-1}.\boldsymbol{D}$
	$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{W}.[n_t \boldsymbol{R}].[Z_t^{abc}]$	$\boldsymbol{B} = [Z_t^{abc}]$
	$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{d} = \boldsymbol{D}.[n_t \boldsymbol{I}]^{-1}$	

As matrizes W e D, utilizadas na conversão dos valores de tensão de linha para tensão de fase e vice-versa, são:

$$W = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

Além de W e D, as conexões que provocam deslocamentos da fase ainda utilizam as seguintes matrizes (KERSTING, 2002):

$$R = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 1/3 & -1/3 & 0 \\ 1/3 & 2/3 & 0 \\ -2/3 & -1/3 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

4.4 Sistemas Nebulosos Aplicados ao SDPEE

O emprego da inferência/predição nebulosa nesse trabalho teve diversos propósitos: predição de comportamento das cargas, estimativa de tensão nas barras e acoplamento ao método de tomada de decisão. A seguir serão descritas as duas primeiras aplicações da arquitetura empregada. A terceira aplicação é discutida no Capítulo 6. As adaptações foram propostas visando melhorar o desempenho computacional do AE e do método de fluxo de potência, uma vez que são estágios com o maior custo de processamento.

4.4.1 Demandas das Cargas – Variação Sazonal

O comportamento sazonal da demanda das cargas é comum em SDPEEs. A variação do carregamento da rede inviabiliza, muitas vezes, a operação ótima por meio de uma única configuração. A reconfiguração de rede pode ser necessária sempre que houver uma mudança nas demandas das cargas suficiente para perturbar o padrão de carregamento no alimentador. Devido ao comportamento sazonal das cargas, configurações recorrentes podem ser tornar ótimas a intervalos regulares de tempo. Nesse sentido, a Figura 4.6 apresenta a possibilidade de se aplicar um procedimento de reconfiguração regular a um dado sistema de distribuição. A variação da demanda normalmente é resolvida com a identificação de uma configuração ótima para o valor das cargas em seus instantes de pico (MERLIN e BACK, 1975; CIVANLAR *et al.*, 1988) ou para a minimização das perdas de energia relativas a um dado período de tempo (CHEN e CHO, 1993; PEPONIS *et al.*, 1996).

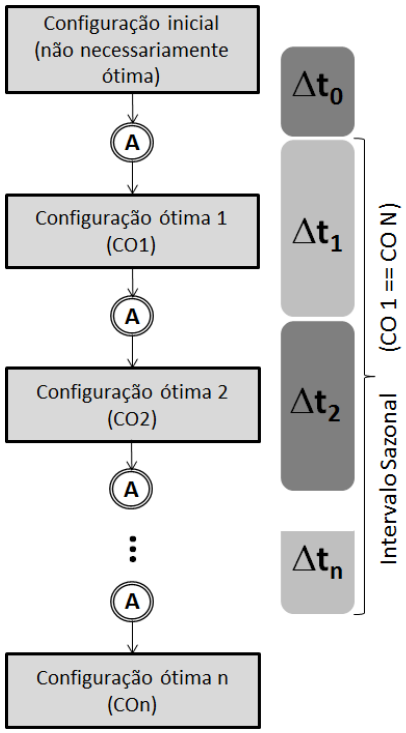

Figura 4.6 – Execução de n-1 reconfigurações para n intervalos sazonais de variação das cargas.

É importante admitir a variação nas cargas ao se tratar a reconfiguração como mecanismo de correção das condições operacionais do SDPEE. A variação de uma única carga ao longo do tempo pode ser insuficiente para modificar sensivelmente a distribuição do carregamento em um alimentador. Porém, o efeito da variação de um conjunto de cargas em um dado

alimentador pode acarretar a alteração sensível de seu carregamento e, com isso, prejudicar ou até mesmo inviabilizar as condições atuais de operação. Em casos extremos, pode ser necessária a transferência de cargas para alimentadores adjacentes, se ela for uma medida viável. Caso contrário, as cargas menos prioritárias deverão ser desligadas (*load shedding*).

4.4.2 Predição do Comportamento de Cargas via Inferência Nebulosa

A variação de carga implica em situações com maior ou menor potencial de risco para as condições de operação de alimentadores de um SDPEE. Atuar preventivamente no SDPEE por meio de manobras orientadas pode atenuar os riscos de sobrecarga de equipamentos e colapso de tensão. Para se atuar de forma acertada na estabilidade do SDPEE com manobras de chaveamento, é necessário contar com um mecanismo de predição confiável que determine o estado do SDPEE em regime permanente em um momento arbitrário da operação do sistema. Os valores de magnitude e módulo das tensões nas barras devem ser tais que a margem de erro, não-desprezível, mantenha-se inferior à variação mínima necessária capaz de causar alterações significativas no contexto do SDPEE.

Sabe-se que a variabilidade das cargas pode modificar as configurações ótimas (BOUHOURAS e LABRIDIS, 2012). Portanto, a variação não-desprezível das cargas requer uma nova execução do método de fluxo de potência para encontrar o novo estado operacional do sistema. O sistema de distribuição provê potência a diversos tipos de cargas que variam periodicamente de modo suave em períodos mais longos (anual) ou de modo mais acentuado em períodos mais curtos (diária). Nesse sentido, as predições das cargas podem auxiliar na identificação das configurações mais indicadas para um período de tempo e não apenas para um dado instante. Dessa forma, pode-se conseguir uma redução no número de reconfigurações necessárias para se manter um patamar de perdas predefinido ou um perfil de tensão ao longo dos alimentadores. A variação do carregamento (Δ_L) pode ser definida como:

$$\Delta_L = \sum_{k \in N_B} \left| \frac{P_k - P_k^{'}(t)}{P_k^{'}(t)} \right| + \left| \frac{Q_k - Q_k^{'}(t)}{Q_k^{'}(t)} \right| \tag{4.27}$$

em que $P_k'(t)$ e $Q_k'(t)$ denotam as demandas das potências real e reativa esperadas para a carga localizada na barra k de acordo com o tipo de curva de demanda e com o instante de tempo t. Aproveitando os aspectos sazonais do carregamento, uma rede *Neo-Fuzzy Neuron* (JANG *et al.*, 1997) pode ter êxito ao ser utilizada para se estimar as demandas das cargas, supondo-se desvios aceitáveis dos valores em relação aos nominais. Juntamente com dados históricos recentes, a predição baseia-se na identificação do comportamento das cargas por meio das curvas de demanda. Porém, diferentemente de Broadwater (1993), a abordagem aqui sugerida aplica um processo simples, mas efetivo para se estimar as demandas das cargas. Cada carga no sistema pode ser calculada usando a seguinte combinação linear:

$$P_k^{stim}(t) = \alpha P_k^{stat}(t) + (1-\alpha) P_k^{hist}(t) \tag{4.28}$$

em que $0 \leq \alpha \leq 1$, $P_k^{stat}(t)$ é avaliada para uma curva de demanda correspondente no t-ésimo intervalo de um período cíclico (ex. diário) em que as cargas apresentam um padrão de variação já conhecido, $P_k^{hist}(t)$ é um valor de potência outrora (ex. ciclos anteriores) demandado pela carga da barra k para o mesmo intervalo t. Um valor de α próximo da

unidade torna a predição mais sensível às variações recentes da demanda na barra k. Por outro lado, um valor de α próximo de zero faz a predição ignorar valores de demanda recentes e assumir os valores próximos àqueles historicamente já conhecidos. De modo similar, as operações nebulosas foram usadas para se estimar as demandas em pontos de derivação em (KUO e HSU, 1993). Porém, o comportamento dessas demandas foi caracterizado por variáveis linguísticas associadas a conjuntos nebulosos, o que difere da abordagem aqui proposta. Esta, por sua vez, trata todas as cargas classificando-as em cinco classes de consumidores (residencial, comercial, industrial leve, industrial pesada e iluminação pública), como visto em (SHENKMAN, 1990).

4.4.3 Estimativa Nebulosa das Tensões de Barra

No presente texto, descreve-se uma metodologia que aplica explicitamente as redes de inferência com arquitetura *Neo-Fuzzy Neuron* (NFN) (JANG *et al.*, 1997) na predição das magnitudes e ângulos das tensões das barras em um SDPEE diante de variações sazonais das cargas. A proposta é também avaliada no contexto da reconfiguração e uma avaliação preliminar da mesma está em (BARBOSA *et al.*, 2011). Aqui, ela é denominada de Sistema de Inferência Nebulosa para Tensão de Barramentos em Alimentadores (SIN-TBA). Os resultados obtidos com o sistema de inferência aqui descrito são apresentados no Capítulo 7 e também no artigo submetido a periódico (*Speeding Up Optimization for Feeder Reconfiguration Through Fuzzy Bus Voltage Estimation*).

4.4.3.1 Revisão Bibliográfica

A Teoria da Lógica Nebulosa tem sido empregada na resolução de problemas de sistemas elétricos de potência desde a década de 1980 (MOMOH *et al.*, 1995). A partir daí, diversas aplicações voltadas ao planejamento, operação e controle desses sistemas foram investigadas.

Mais especificamente, vários trabalhos abordaram o PRec-SDPEE (HSU e KUO, 1994; VENKATESH e RANJAN, 2003; DAS, 2006; DAS, 2006; BERNARDON *et al.*, 2009; ARUN e ARAVINDHABABU, 2010; SWARNKAR *et al.*, 2010; SAFFAR *et al.*, 2011) em seus diversos aspectos. O conhecimento da teoria e lógica nebulosa permitiu o desenvolvimento de propostas para contornar as limitações das metodologias até então existentes ou ampliar o espectro de implementações computacionais para resolver questões importantes relacionados ao problema de reconfiguração. Dentre elas, podem ser citadas: (i) nebulização de variáveis de decisão ou de objetivos, (ii) combinação nebulosa de objetivos em formulação multiobjetivo ou tomada de decisão via funções de pertinência, (iii) controle nebuloso de mecanismos de busca em algoritmos evolucionários e (iv) predição nebulosa da demanda e melhorias no desempenho dos métodos de fluxo de potência aplicáveis aos SDPEEs. O quarto tópico inclui também a estimativa de tensão na rede de distribuição. Nesse sentido, alguns trabalhos propuseram ideias que visavam reduzir o custo computacional demandado por métodos de fluxo de potência convencionais (HSU e YANG, 1993; FALCÃO e HENRIQUES, 2001; BIJWE e RAJU, 2006; BARBOSA *et al.*, 2011). No entanto, esse custo aumentava consideravelmente para sistemas de grande porte (mais de 300 barras).

A substituição intermitente desses métodos por outros que realizavam aproximações foi uma das principais estratégias usadas em alguns trabalhos (HSU e YANG, 1993; BARBOSA *et al.*,

2011). De forma pioneira, os trabalhos de McClelland (MCCLELLAND e VAN HORNE, 1983) e Chang (CHANG, 1989) introduziram técnicas orientadas por base de conhecimento e por dados gerados e armazenados continuamente para a predição rápida de tensões em sistemas elétricos de potência. Em seu trabalho, Hsu empregou as redes neurais artificiais para predizer os valores de tensão em sistemas sob a situação de contingência (HSU e YANG, 1993). Uma versão paralelizada dessa proposta foi feita em (SRIVASTAVA *et al.*, 1998). Ainda em 1993, Kuo descreveu um procedimento nebuloso para predizer o carregamento do sistema que era orientado por curvas de demanda com valores intervalares das cargas associados a termos linguísticos. Posteriormente, Falcão combinou redes neurais com técnicas de conjuntos nebulosos para elaborar curvas de demanda relativas a classes distintas de consumidores (FALCÃO e HENRIQUES, 2001). A partir de tais curvas, os ajustes das demandas puderam ser feitos através de estimativas.

4.4.3.2 Aplicação da Teoria

Diferentemente de outras abordagens de inteligência computacional aplicáveis a dados baseados em regras, tais como a rede multicamadas *perceptron* e a *support vector machine*, a teoria nebulosa utiliza termos linguísticos que lidam com relações causais entre variáveis de entrada e saída (ARUN e ARAVINDHABABU, 2010) de um sistema. Além disso, o sistema de inferência nebulosa é capaz de encontrar valores dentro do intervalo previsto mesmo na presença de discrepâncias. Por ser simples, mas eficiente, a arquitetura ANFIS escolhida foi a NFN (YAMAKAWA *et al.*, 1992). Esse tipo de rede comporta-se como um aproximador universal com capacidade para detectar e reproduzir não-linearidades entre as variáveis de entrada e saída de um sistema. Em uma rede NFN, cada grupo de regras pode ser atribuído de modo independente a cada entrada v_i. Cada regra pode conter apenas uma premissa, cuja intensidade de disparo $\mu_{ij}(v_i)$ é igual ao grau de pertinência da entrada v_i associada com alguma saída u_i. O tamanho do conjunto de regras não depende do número de entradas ou da quantidade de funções de pertinência por entrada. Nesta arquitetura, as entradas são desacopladas umas das outras e têm suas próprias regras, o que pode resultar em uma quantidade total de regras inferior à necessária em outras arquiteturas de rede clássicas. Para calcular a saída equivalente do sistema, funções de pertinência elementares como a triangular (veja a Figura 4.7) ou a trapezoidal (JANG *et al.*, 1997), estão dentre as mais escolhidas por requererem computação numérica simplificada. Uma função de pertinência triangular facilita o cálculo da contribuição de cada regra para a saída resultante visto que apenas aquelas regras ativadas, ou seja, que contribuem com valor diferente de zero, são verificadas. Funções triangulares unitárias e sobrepostas, como visto na Figura 4.7, tornam os valores das funções adjacentes correlacionados dentro do universo de discurso $\mathbf{V}$. Se uma dada entrada v_i resulta em m para uma função de pertinência, avaliar essa mesma entrada para uma função vizinha resultará em $1 - m$. Para as redes NFN, as regras tem a seguinte forma geral:

$$\begin{aligned} R_i^1 &\longrightarrow If\ \ v_i\ \ is\ \ A_{i1}, then\ \ u_i\ \ is\ \ w_{i1} \\ &\vdots \\ R_i^m &\longrightarrow If\ \ v_i\ \ is\ \ A_{im}, then\ \ u_i\ \ is\ \ w_{im} \end{aligned} \tag{4.29}$$

A parte consequente da m-ésima regra é composta de um termo independente w_{im} o qual define o ajuste da influência dessa regra sobre a saída.

Os parâmetros de ajuste da NFN - $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$ e $\boldsymbol{w_{im}}$ – correspondem a matrizes. Os demais parâmetros $\boldsymbol{v_{min}}$ e $\boldsymbol{delta}$ são vetores que devem ser encontrados. São poucos os parâmetros NFN a serem ajustados e, desse modo, eles podem ser armazenados em uma base de dados. A Figura 4.7 mostra a relação de cada parâmetro NFN com as funções triangulares sobrepostas, com exceção do termo independente w_{im}. Nota-se que cada tripla (a_{ij},b_{ij},c_{ij}) define uma função de pertinência triangular.

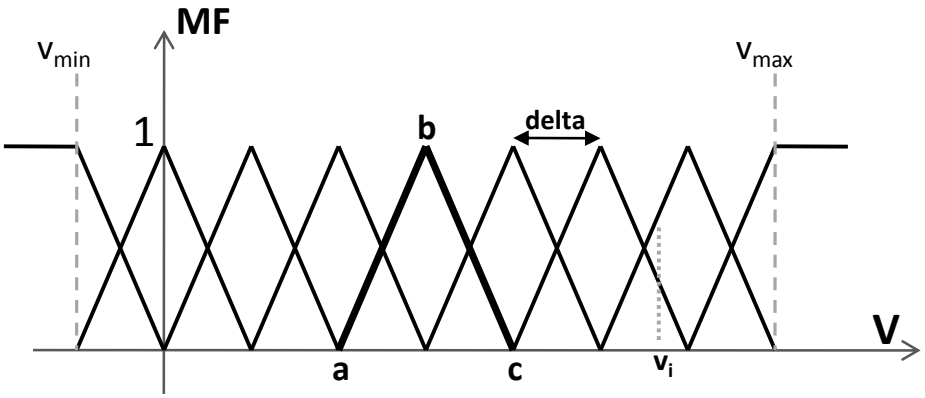

Figura 4.7 – Funções de pertinência triangulares sobrepostas e o significado dos parâmetros NFN.

O SIN-TBA é então acoplado ao procedimento de avaliação de mérito da solução que deve executar um algoritmo de fluxo de potência (MFP) convencional se (a) não existe uma rede NFN treinada disponível para estimar as tensões de barra ou (b) a rede NFN não gera aproximações aceitáveis. Os detalhes dos esquemas implementados são mostrados nas Figuras 4.8 e 4.9. A Figura 4.8 detalha o estágio presente na Figura 4.6, rotulado com a letra A, que equivale ao processo de otimização. Naquela mesma figura, o estágio rotulado com a letra B corresponde ao procedimento de atualização esboçado pela Figura 4.9.

As manobras de reconfiguração são justificáveis se as demandas de potência variarem o suficiente para modificar o ponto de operação de um alimentador. Portanto, é necessário definir um limiar para disparar a execução do procedimento mostrado na Figura 4.8. Esse limiar impede que a reconfiguração seja analisada em casos de variação muito pequena no carregamento e, portanto, evita análises mais frequentes do que o necessário. Assim que os parâmetros das redes NFN são determinados, o MFP pode ser substituído pela estimativa nebulosa. O laço principal da lógica é destacado em fundo cinza na Figura 4.8, onde os valores das demandas das cargas já armazenados são usados para comparação com as estimativas feitas com base nas curvas de demanda específicas por classe.

Quando um número de tuplas <entrada, saída> suficiente é obtido, a rede NFN é treinada conforme a estratégia de mapeamento de dados a ser detalhada na próxima seção. No treinamento, o processo de determinação dos coeficientes, enumerados na seção anterior, utiliza uma estrutura em malha fechada para minimizar o erro quadrático médio entre os valores esperados e os estimados (JANG *et al.*, 1997). Após um número de épocas predefinido, espera-se que esse erro seja menor do que uma tolerância especificada. A quantidade de amostras é definida de acordo com o tamanho da rede e com a extensão das variações nas cargas. No treinamento da rede NFN, o método do gradiente é utilizado para minimizar o erro quadrático médio (EQM). Se a rede NFN for suficientemente treinada, ela então poderá substituir o MFP logo no início do processo de otimização. A substituição gradual do MFP pela

rede de inferência acaba reduzindo o esforço computacional sem causar deteriorações suficientes na avaliação da solução sob a ótica do fluxo de potência e, com isso, levando à identificação das mesmas soluções tidas como ótimas. Assim, um tempo computacional considerável pode ser eliminado.

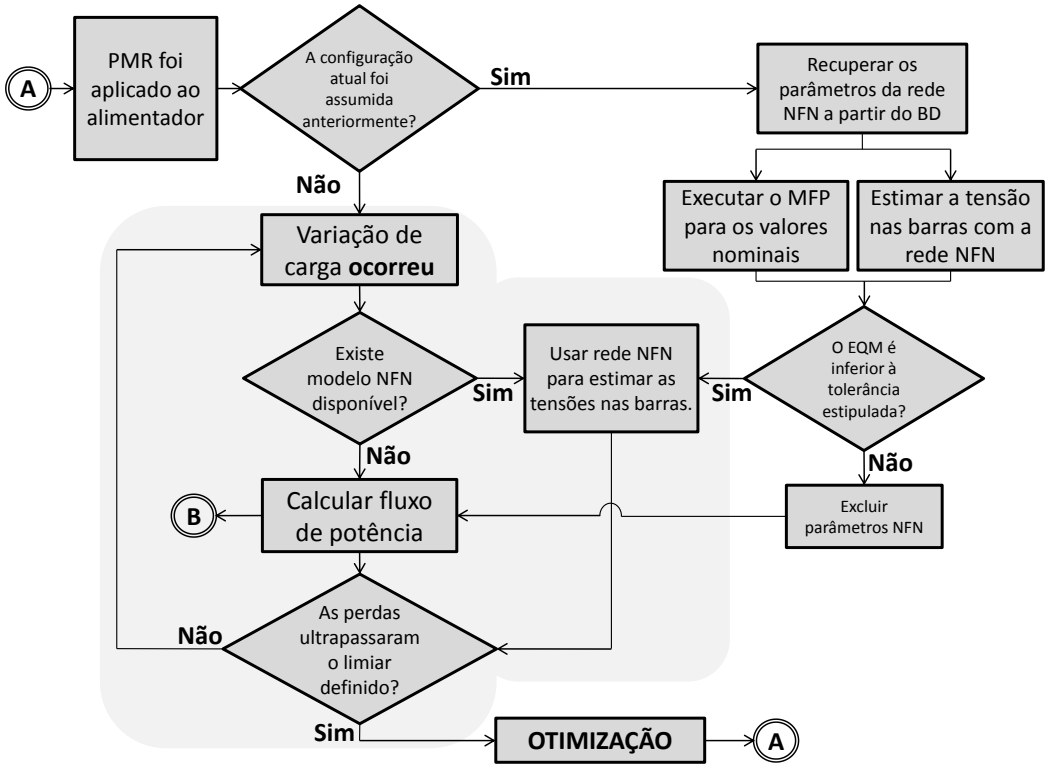

Figura 4.8 – Esquema para o uso da rede NFN no processo de otimização da configuração feita pelo AE.

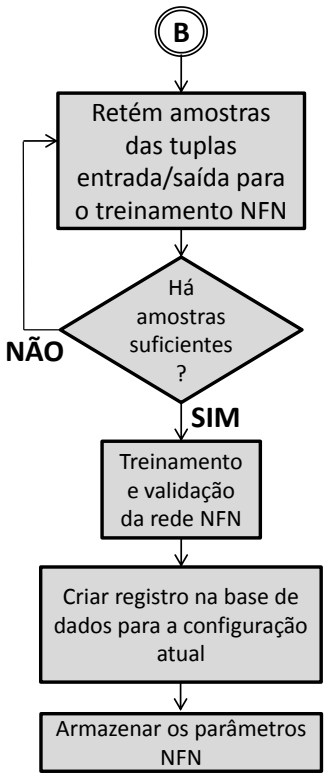

Figura 4.9 – Atualização da base de dados.

O MOEA deve ser adaptado para o problema de reconfiguração com uso de inferência nebulosa. A Figura 4.10 esquematiza a relação entre o MOEA, o fluxo de potência e o sistema de inferência.

As redes NFN são tolerantes a falhas, uma vez que são construídas a partir de estruturas paralelas em modo redundante. Portanto, é possível tirar proveito dessa característica em ambientes multiprocessados.

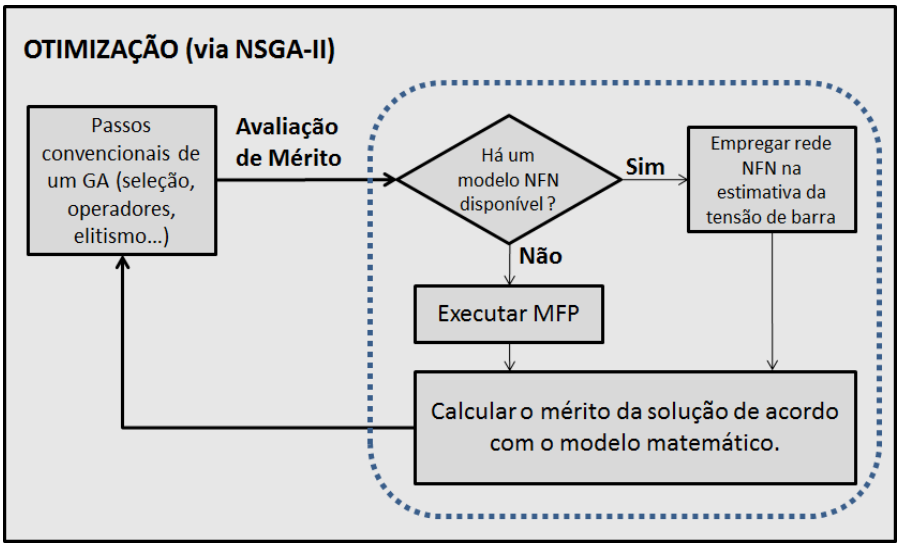

Figura 4.10 – Passos gerais do processo de otimização.

4.4.3.3 Estratégias de Mapeamento de Dados

Para assegurar uma estimativa aceitável das tensões de barra nos alimentadores reconfiguráveis, as variáveis do fluxo de potência mais representativas devem ser escolhidas em número suficiente e um mapeamento entre as mesmas deve ser feito. Nesta seção, serão discutidas as três estratégias de mapeamento concebidas – Mapa1, Mapa2 e Mapa3 – que relacionam as variáveis de entrada (valores de demanda) com as variáveis de saída (módulo e ângulo das tensões).

Foi demonstrado em (BARBOSA *et al.*, 2011) que o módulo da tensão $|V_k|$ assim como seu ângulo θ_k pode ser satisfatoriamente estimado por meio das demandas de potência real (P_k) e reativa (Q_k) em cada barra k do sistema, juntamente com as potências totais agregadas (P_T,Q_T). Os conjuntos de dados relativos às entradas e às saídas podem ser assim descritos:

$$\begin{aligned} s_{in} &= [P_1\ Q_1 \cdots P_k\ Q_k \cdots P_{N_B}\ Q_{N_B}\ P_T\ \ Q_T] \\ s_{out} &= [|V_1|\ \theta_1\ \cdots |V_{N_B}|\ \theta_{N_B}] \end{aligned} \tag{4.30}$$

em que s_{in} denota o vetor de dados das variáveis de entradas e s_{out} corresponde ao vetor de dados das variáveis de saída. Entretanto, essa estratégia (Mapa1) é facilmente afetada pela variação do carregamento e da configuração da rede.

Outra estratégia possível (Mapa2) toma em consideração os valores de tensão em todas as barras exceto naquela em que se pretende estimá-la. Neste caso, o ANFIS é composto de duas camadas. A primeira camada é elaborada assim:

$$\begin{aligned} s_{in} &= [P_k + P_k^{jus} \quad Q_k + Q_k^{jus} \quad P_T \quad Q_T] \\ s_{out} &= [|V'_k|\ \theta'_k] \end{aligned} \tag{4.31}$$

em que P_k^{jus}(Q_k^{jus}) corresponde à agregação da potência real (reativa) em relação às barras à jusante da barra k. A segunda camada é implementada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} s_{in} &= [|V'_1|\ \theta'_1 \dots |V'_j|\ \theta'_j \dots |V_{N_B}|\ \theta_{N_B}] \\ s_{out} &= [|V_k|\ \theta_k] \quad \forall k \neq j \end{aligned} \tag{4.32}$$

Os vetores de entrada mostrados em (4.30) e (4.31) são mais sensíveis à reconfiguração do que a opção descrita em (4.32). Ainda, uma terceira estratégia dada em (4.33) foi verificada e se mostrou mais adequada do que as duas anteriores nos experimentos computacionais realizados. Essa abordagem consiste em estimativas interdependentes cujas relações se estabelecem com base no padrão da configuração (Figura 4.11).

Embora as aproximações possam se degradar ao longo da cadeia, os valores cumulativos das cargas à jusante estão fortemente vinculados aos rearranjos de conexão entre as barras:

$$\begin{aligned} s_{in} &= [|V_{k-1}|\ \theta_{k-1} \quad P_k + P_{dw}^k \quad Q_k + Q_{dw}^k] \\ s_{out} &= [|V_k|\ \theta_k] \end{aligned} \tag{4.33}$$

em que o índice $k-1$ refere-se à barra pai. A Figura 4.11 mostra um exemplo de estimativa baseada na terceira estratégia (Mapa3) realizada para um sistema radial de cinco barras. A qualidade da estimativa do módulo ou do ângulo da tensão de uma dada barra depende estritamente da estimativa dos valores para a barra pai.

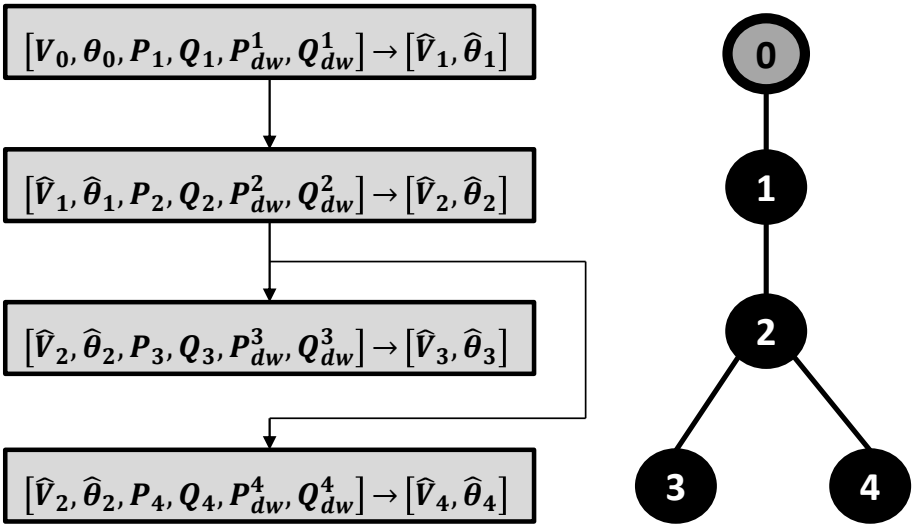

Figura 4.11 – Estimativa sequencial das tensões em um alimentador com 4 barras.

4.5 Conclusões

Neste capítulo, os aspectos relacionados à avaliação da configuração de redes foram tratados. Uma breve revisão dos trabalhos científicos publicados que propuseram métodos de cálculo do fluxo de potência em sistemas elétricos de potência foi feita. As especificidades dos sistemas de distribuição foram enumeradas e os métodos mais apropriados foram apresentados. Adicionalmente, constatou-se pelo levantamento bibliográfico realizado que o tipo de método de cálculo de fluxo de potência empregado afeta decisivamente o desempenho do algoritmo que realiza a otimização multiobjetivo. Nesse sentido, o método iterativo de varredura foi o adotado, uma vez que mostrou ser de fácil adaptação, precisão e convergência reguladas por tolerância e, principalmente, simplicidade para resolver os cálculos de fluxos em sistemas de distribuição radiais com até 2000 barras. Em seguida, as modelagens para os principais componentes do sistema de distribuição foram detalhadas: linha, carga, regulador de tensão e transformador, dentre outros. Ainda nesse capítulo, um sistema de inferência nebulosa baseado em redes do tipo NFN, denominado de SIN-TBA, foi descrito. Esse sistema foi usado com o propósito de acelerar o processo de avaliação das configurações de rede a partir das estimativas feitas para as tensões (módulo e ângulo) em cada uma das barras dos alimentadores. Alguns mapeamentos foram propostos para relacionar dados de entrada (ex. potência demandada) e saída para o sistema de inferência. A sazonalidade das demandas das cargas também foi aproveitada e um mecanismo de predição de cargas construído a partir da arquitetura NFN foi desenvolvido e acoplado ao módulo de avaliação.

5 - Tratamento de Incertezas na Demanda das Cargas

5.1 Introdução

Os problemas PRec-SDPEE e PRes-SDPEE que lidam com alimentadores tem sido frequentemente descritos na literatura sem a consideração de incertezas em parâmetros e variáveis relevantes como cargas e propriedades elétricas das linhas. Essas abordagens convencionais, a exemplo dos primeiros trabalhos na área (CIVANLAR *et al.*, 1988; BARAN e WU, 1989; SHIRMOHAMMADI e HONG, 1989), têm sido satisfatórias para identificar configurações que apresentam uma boa expectativa de operação ótima do SDPEE sob a premissa de que as incertezas são desprezíveis. Entretanto, se esse não for o caso, as soluções não podem ser consideradas tão confiáveis como aparentam (BROADWATER *et al.*, 1994). Ao contrário, sistemas elétricos de potência têm se mostrado susceptíveis a muitas fontes de incerteza, tais como aquelas relacionadas à demanda de potência pelas cargas, à disponibilidade de potência para ser fornecida às cargas e aos parâmetros elétricos das estruturas e equipamentos (BROADWATER *et al.*, 1994; CHATURVEDI *et al.*, 2006). Com essa motivação, alguns trabalhos foram desenvolvidos para conferir aos métodos de fluxo de potência (MFPs) clássicos a capacidade de tratarem diversos tipos de incertezas. Algumas versões de MFP para ambientes incertos foram descritas em (WANG e ALVARADO, 1992; DAS, 2006; CHATURVEDI *et al.*, 2006; VACCARO e VILLACCI, 2009). Variações de carga foram retratadas por funções de densidade de probabilidade Gaussianas em (CHATURVEDI *et al.*, 2006). Com o intuito de reduzir o domínio das variáveis sem perder as soluções válidas, Vaccaro (VACCARO e VILLACCI, 2009) sugeriu um MFP para sistemas radiais que empregava matemática intervalar. Em 1992, Wang adaptou um MFP clássico com aritmética intervalar para ser usado em redes radiais (WANG e ALVARADO, 1992). Nota-se, entretanto, que poucos MFPs foram especificamente planejados para analisar os SDPEEs (DAS, 2002; CHATURVEDI *et al.*, 2006).

A abordagem aqui proposta busca considerar incertezas nas cargas para a otimização da configuração. Assim, ela estende o tratamento das incertezas para além do método para cálculo do fluxo de potência (MFP). Ou seja, o processo de otimização também o considera. Diferentemente do MFP convencional, os valores de módulo e ângulo da tensão nas barras bem como os valores de corrente (módulo e ângulo) nas linhas serão obtidos na forma de intervalos. Como as funções objetivo utilizam tais grandezas, seus valores serão igualmente intervalares. Com isso, é importante se definir como a comparação entre duas configurações deve ser conduzida, visto que não apenas intervalos são comparados, mas caixas n-dimensionais (vide Figura 5.1) de acordo com (MOORE *et al.*, 2009).

Com a inclusão do tratamento intervalar no MFP, o AE precisa ser modificado e as condições de dominância redefinidas. A análise de dominância de Pareto entre soluções eficientes dotadas de intervalos é então orientada pelo pior caso no que diz respeito aos valores das

funções objetivo. Espera-se, portanto, que os dois conjuntos de soluções eficientes encontrados com a abordagem convencional e intervalar difiram em pelo menos algumas soluções, justificando assim o maior custo computacional exigido pela análise intervalar. As soluções obtidas com essa nova abordagem são ditas serem mais robustas.

A implementação visou identificar as configurações mais estáveis segundo os critérios predefinidos no modelo matemático multiobjetivo para um dado intervalo de operação de um SDPEE. O propósito principal do MOEA intervalar foi o de identificar as configurações robustas (mais estáveis) que garantissem as condições de operação de alimentadores mediante a presença de incertezas nas cargas nominais para certo período de tempo relativamente extenso. O tratamento das incertezas via abordagem intervalar mostrou-se comprovadamente eficaz para o contexto da reconfiguração como pode ser verificado pelos experimentos apresentados no Capítulo 7.

O desenvolvimento dessa abordagem resultou em um artigo intitulado "*A Robust Feeder Reconfiguration in Radial Distribution System*".

5.2 Análise Intervalar

Esta seção abordará os conceitos básicos sobre Análise Intervalar (AI) necessários à compreensão das modificações feitas para que o MOEA acoplado ao MVRD pudesse tratar intervalos. Um conhecimento mais detalhado sobre o assunto pode ser encontrado em (MOORE *et al.*, 2009). A análise intervalar trata um número real como a associação entre um valor central e um intervalo restrito pelos limites inferior e superior. O modelo adotado aqui usa notação intervalar para denotar o espalhamento de um valor numérico. Um intervalo real, conexo e fechado, é definido a seguir.

Definição 1. Um intervalo fechado $[a]$ é um subconjunto conexo em $\mathbb{R}$ definido por:

$$[a] = [a^-, a^+] := \{a \in \mathbb{R} \,|a^- \leq a \leq a^+\} \tag{5.1}$$

em que a^- e a^+ representam os limites inferior e superior de $[a]$, respectivamente. Todos os intervalos dados em (5.1) compõem o conjunto dos intervalos reais ($\mathbb{IR}$).

Definição 2. O intervalo real n-dimensional $[\mathbf{a}] \in \mathbb{IR}^n$, conhecido por caixa ou vetor intervalar, é descrito como se segue:

$$[\mathbf{a}] = [a_1] \times [a_2] \times \ldots \times [a_n] \tag{5.2}$$

Definição 3. Os limites inferiores $\mathbf{a}^-$ de $[\mathbf{a}]$ são dados por $\mathbf{a}^- = (a_1^-, a_2^-, \ldots, a_n^-)^T$. Do mesmo modo, os limites superiores podem ser definidos como sendo $\mathbf{a}^+ = (a_1^+, a_2^+, \ldots, a_n^+)^T$.

Definição 4. As quatro operações básicas da aritmética clássica para números reais pode ser estendida ao domínio intervalar. Para qualquer operador binário, denotado por $\odot$, realizar a operação equivale a:

$$[a] \odot [b] := \{a \odot b \,|a \in [a] \wedge b \in [b]\} \tag{5.3}$$

Em relação aos limites do intervalo resultante, as quatro operações aplicadas a intervalos fechados não vazios são descritas matematicamente:

$$[\mathrm{a}] + [\mathrm{b}] = [\mathrm{a}^- + \mathrm{b}^-, \mathrm{a}^+ + \mathrm{b}^+] \tag{5.4a}$$

$$[\mathrm{a}] - [\mathrm{b}] = [\mathrm{a}^- - \mathrm{b}^+, \mathrm{a}^+ - \mathrm{b}^-] \tag{5.4b}$$

$$[\mathrm{a}] * [\mathrm{b}] = [\min(\mathrm{s}), \max(\mathrm{s})] \tag{5.4c}$$

em que $\mathrm{s} = \{\mathrm{a}^- * \mathrm{b}^-, \mathrm{a}^- * \mathrm{b}^+, \mathrm{a}^+ * \mathrm{b}^-, \mathrm{a}^+ * \mathrm{b}^+\}$

$$[\mathrm{a}]/[\mathrm{b}] = [\mathrm{a}] * (1/[\mathrm{b}]) \tag{5.4d}$$

em que:

$1/[\mathrm{b}] = \emptyset$, if $[\mathrm{b}] = [0,0]$.
$1/[\mathrm{b}] = [1/\mathrm{b}^+, 1/\mathrm{b}^-]$, if $0 \notin [\mathrm{b}]$.
$1/[\mathrm{b}] = [1/\mathrm{y}^+, \infty]$, if $\mathrm{b}^- = 0 \wedge \mathrm{b}^+ > 0$.
$1/[\mathrm{b}] = [-\infty, 1/\mathrm{y}^-]$, if $\mathrm{b}^- < 0 \wedge \mathrm{b}^+ = 0$.
$1/[\mathrm{b}] = [-\infty, \infty]$, if $\mathrm{b}^- < 0 \wedge \mathrm{b}^+ > 0$.

Percebe-se que os operadores intervalares de adição, subtração, multiplicação e divisão aplicam-se a quaisquer dois intervalos (operandos) e que deles resulta um intervalo que contém todas as combinações aritméticas entre os valores pertencentes aos operandos. As demandas de potências P_k e Q_k são, portanto, representadas por intervalos de valores extensos o suficiente para englobarem as incertezas relativas às cargas. Em termos de implementação, cada operação real que utiliza variáveis intervalares é substituída pelo operador intervalar equivalente durante a execução do algoritmo de cálculo do fluxo de potência (MVRD). Assim, o teorema fundamental da AI (MOORE *et al.*, 2009) garante que todos os valores possíveis da análise estão contidos nos intervalos obtidos.

A AI inclui um pessimismo inerente produzido pelas operações intervalares, o que indica que os intervalos finais resultantes da análise são superestimados. Por exemplo, as expressões reais $g(x) = x * (1 - x)$ e $g'(x) = x - x^2$ são equivalentes para a aritmética intervalar. Entretanto, assumindo que $[x] = [0,1]$, as contrapartidas intervalares das duas funções serão diferentes ao se aplicar as propriedades dos operadores vistas nas Equações (5.4a-d): $g[x] = [0,1]$ e $g'[x] = [-1,1]$. Ambos os resultados incluem corretamente as saídas relacionadas aos intervalos de entrada. Por outro lado, o primeiro intervalo $g[x]$ é mais estreito (menos pessimista) do que o segundo. Em geral, esse pessimismo surge das múltiplas ocorrências de uma mesma variável. A reorganização da expressão matemática pode atenuar esse problema, mas a multiplicidade da variável nem sempre pode ser evitada.

5.3 Análise da não-dominância entre Soluções no Contexto Intervalar

A definição de não-dominância em um problema multiobjetivo resolvido em um contexto intervalar deve ser clara e livre de ambiguidades. A análise do pior caso em termos de desempenho do sistema é admitida para cada solução eficiente. Para tal, os parâmetros incertos $\boldsymbol{p}$, neste caso as demandas das cargas, são analisados como intervalos. O pior caso para uma dada configuração de rede é obtido por:

$$f_{wc}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}) = \max_{\boldsymbol{p} \in \mathrm{P}} \; f_n(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}) \quad , \qquad \mathrm{n} = \{1, \ldots, n_{obj}\} \tag{5.5}$$

As seguintes definições ainda se fazem necessárias.

Definição 5. Dados que $\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v} \in \mathbb{R}^{n_{obj}}$, $\boldsymbol{u} = (u_1, u_2, \dots, u_{n_{obj}})$ domina $\boldsymbol{v} = (v_1, v_2, \dots, v_{n_{obj}})$, denotado por $\boldsymbol{u} \prec \boldsymbol{v}$, se e somente se $\forall n \in \{1, \dots n_{obj}\}, u_n \leq v_n \ \wedge \ \exists n \in \{1, .., n_{obj}\} | u_n < v_n$.

Definição 6. O operador de dominância é estendido para a computação intervalar assim:

$$[\mathbf{a}] \prec [\mathbf{b}] \ \Leftrightarrow \ \mathbf{a}^+ \prec \mathbf{b}^+ \tag{5.6}$$

Na Figura 5.1, três espaços representam a incerteza, a variável de otimização e o objetivo em duas dimensões (2D). Essa figura ilustra o procedimento pelo qual as soluções em $\mathbf{X}$ são avaliadas nas funções objetivo ao considerar as perturbações em $\mathbf{P}$. Desse modo, uma configuração de rede está associada a uma caixa representada no espaço dos objetivos.

Na Figura 5.1, o pior caso de desempenho, balizado pelos objetivos contidos na definição do problema, é indicado pelo círculo preenchido e situado no canto superior direito de cada caixa. De acordo com a Definição 6, as caixas pontilhadas são dominadas por pelo menos uma outra caixa representada em linha contínua.

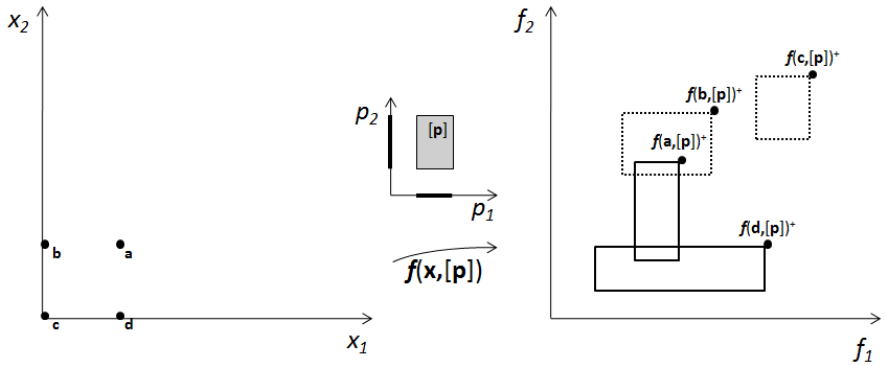

Figura 5.1 – Cálculo do pior caso para algumas soluções no espaço das variáveis de otimização – um exemplo em 2D.

5.4 A Formulação Robusta

O pior caso para o problema de otimização multiobjetivo robusto (POMR) pode ser visto como aquele capaz de maximizar os efeitos das incertezas sobre as funções objetivo e ulteriormente minimizar todas as funções objetivo, como explicado em (SOARES *et al.*, 2009). Matematicamente, dado que $\boldsymbol{x} \in \mathbf{X} \subseteq \mathbb{R}^{N_w}$, $\boldsymbol{p} \in \mathbf{P} \subseteq \mathbb{R}^{N_p}$ e $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p})$: $\mathbb{R}^{N_w} \times \mathbb{R}^{N_p} \mapsto \mathbb{R}^{n_{obj}}$, o POMR é definido como se segue:

$$\min_{\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{\Gamma}^{int}} \max_{\boldsymbol{p} \in \mathbf{P}} \ \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}) = \{f_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}), \dots, f_{N_f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p})\} \tag{5.7}$$

em que o espaço viável é dado por:

$$\boldsymbol{\Gamma}^{int} := \{\boldsymbol{x} \in \mathbf{X} \mid \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}) \leq \mathbf{0} \ \wedge \ \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}) = \mathbf{0} \ \forall \ \boldsymbol{p} \in \mathbf{P}\} \tag{5.8}$$

Ao resolver a Equação (5.7), um conjunto de minimizadores robustos é identificado. Esse conjunto pode ser matematicamente descritos como a seguir:

$$\mathbf{X}^* := \left\{\boldsymbol{x}^* : \nexists \ \boldsymbol{x} \mid \max_{\mathbf{p} \in \mathbf{P}} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}) \prec \max_{\mathbf{p} \in \mathbf{P}} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{p})\right\} \ \ \forall \boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{x} \in \boldsymbol{\Gamma}^{int} \tag{5.9}$$

5.5 Conclusões

A possibilidade da existência de incertezas quanto às demandas das cargas em um SDPEE é bastante razoável. Por isso, a inclusão da análise de tais incertezas no cenário de reconfiguração exigiu a elaboração de uma versão do EA-DFR com capacidade de tratamento intervalar. Os aspectos teóricos da análise intervalar que fundamentaram a implementação do algoritmo IMOEA-DFR foram apresentados nesse capítulo. O conceito de não-dominância foi contextualizado para o tratamento intervalar do problema e o procedimento de comparação entre soluções intervalares foi explicado.

No próximo capítulo, serão apresentados os procedimentos que complementam o processo de identificação da configuração de rede mais adequada de acordo com preferências de decisão. A análise de sequenciamento de manobras e a tomada de decisão, aliadas ao tratamento de incertezas nas demandas, buscam dar à solução final a fiabilidade necessária para ser aplicada em um sistema de distribuição real.

6 - Análise de Sequenciamento de Manobras e Tomada de Decisão

6.1 Introdução

Conforme já discutido no Capítulo 3, os problemas de PRec-SDPEE e PRes-SDPEE têm sido amplamente investigados. Em grande parte dos trabalhos, a identificação de uma configuração final factível e ótima é tida como suficiente para resolver ambos os problemas. Entretanto, pouquíssimos trabalhos consideram uma análise posterior do sequenciamento das operações que levarão a rede à configuração identificada ou o processo de tomada de decisão ao tratar de formulação multiobjetivo.

6.2 Sequenciamento Ótimo das Manobras de Chaveamento

O Problema do Sequenciamento Ótimo de Manobras (PSOM) consiste tanto na análise, orientada à segurança, do conjunto de operações de chaveamento quanto na melhor ordenação dessas operações que levem o SDPEE de uma configuração $\mathcal{F}_0$ a outra $\mathcal{F}_f$, evitando-se a violação das restrições técnicas em quaisquer dos estágios intermediários experimentados pelo sistema. Além da inviolabilidade das restrições advindas do fluxo de potência, ao resolver o PSOM operações redundantes podem ser criadas para garantir a transição minimamente segura entre $\mathcal{F}_0$ e $\mathcal{F}_f$.

Salienta-se que a análise aqui pretendida possui apenas cunho preliminar considerando aquelas simplificações já mencionadas no Capítulo 1. Tal verificação evita a obtenção de soluções aparentemente eficientes, mas que são de fato irrealizáveis devido à violação grosseira das restrições modeladas e, portanto, conhecidas.

6.2.1 Revisão da Literatura - Trabalhos Relevantes

Sarma (1994) apresentou uma metodologia para determinar o melhor conjunto de operações de chaveamento para recuperar as condições normais de um sistema que tenha sido afetado por falta. No trabalho, foram discutidos os passos necessários para a caracterização da área escura, das cargas passíveis de reenergização e das cargas impedidas, do desligamento de cargas ainda energizadas, etc. Uma análise da reenergização de cargas a frio (*Cold Load Pickup*) de um sistema que contém cargas especiais (e.g. dispositivos termostaticamente controlados), capazes de elevar a carga total em duas a cinco vezes o valor típico esperado, é feita por Uçak (UÇAK e PAHWA, 1994). Nesse trabalho, o seccionamento de setores da área afetada foi discutido como um procedimento de segurança a ser realizado antes do reestabelecimento pleno do sistema. Para isso, manobras deveriam ser acrescidas ao plano de sequenciamento indicado pela etapa de otimização. Em 1998, Miu descreveu um método adequado aos sistemas dotados predominantemente de chaves manuais e que utilizava informações analíticas obtidas da execução de um método de fluxo de potência para classificar os planos de manobras. A escolha levava em consideração diversos fatores tais como o índice EENS, a

prioridade relativa das cargas e a quantidade de chaveamentos. Em seu trabalho, Miu não fez uso de métodos heurísticos ou estocásticos. O cerne da proposta estava em um algoritmo de busca contendo quatro passos básicos para determinar a ordem das manobras. Ele abordou questões como a priorização diferenciada entre as cargas, o reestabelecimento concomitante de múltiplas áreas escuras causadas pelas faltas ocorridas, a transferência de carga entre alimentadores e a exclusão de cargas por sobrecargas.

Alguns trabalhos já fizeram uma análise de estratégias da abordagem direta de ciclos em grafos (CARVALHO e FERREIRA, 2002). Watanabe empregou um algoritmo genético de dois estágios para identificar as configurações radiais promissoras em problemas de restauração (1º estágio) e determinar a sequência ótima das operações de chaveamento (2º estágio) que pudesse minimizar o índice EENS relativo a cada uma das soluções encontradas (WATANABE, 2004). Em seu trabalho para escalonamento das manobras, qualquer chave do sistema foi admitida operar no máximo uma vez para se evitar as repetições de manobras. A análise de chaveamentos para a restauração também foi feita por Li (LI *et al.*, 2004) que por meio de uma busca em largura (*Breadth-First Search* - BFS) categorizou os nós do sistema em seis grupos para determinar quais deles poderiam ser reenergizados mediante condições distintas. Carvalho (CARVALHO *et al.*, 2007) propôs uma análise do problema de restauração de SDPEE em duas etapas. A primeira etapa consistiu no emprego de um algoritmo evolucionário para encontrar a solução ótima do problema de reconfiguração em sua versão mono-objetivo. Na segunda etapa, a programação dinâmica foi utilizada para se definir a sequência ótima das manobras de chaveamento necessárias. Nesse caso, as violações das restrições elétricas foram evitadas para as configurações intermediárias criadas. A dinâmica de despacho de equipes para a execução das manobras foi considerada em (CARVALHO *et al.*, 2007). Nesse trabalho, o tempo de cada chaveamento incorporou a disponibilidade e localização das equipes em campo por meio da programação dinâmica.

6.2.2 Políticas de Ordenamentos das Manobras

Após o emprego do AE para se determinar a fronteira Pareto, um conjunto de regras é usado para identificar quais soluções são realmente viáveis do ponto de vista dos estados intermediários assumidos pela rede ao realizar cada uma das manobras. Portanto, conhecer apenas as chaves que deverão ser operadas não é suficiente. Uma solução identificada como ótima em um procedimento de otimização garante a viabilidade técnica da configuração final de rede, uma vez que as restrições técnico-operacionais fazem parte da avaliação dos indivíduos durante a execução do AE. Entretanto, os estágios intermediários da rede que a levam da configuração vigente à configuração final pretendida podem ocasionar violações, ainda que temporárias, das condições e limites operacionais de equipamentos ou da estrutura. Por exemplo, a transferência temporária de um dado conjunto de cargas entre alimentadores pode sobrecarregar o alimentador que teve o acréscimo de demanda, ainda que parte dela seja transferida para um terceiro alimentador adjacente a este.

Dado um conjunto de $\boldsymbol{M}^c$ manobras, sabe-se que $\|\boldsymbol{M}^c\|!$ sequências de chaveamentos podem ser obtidas pela permutação simples dessas manobras. Cada possibilidade de ordenamento das manobras é um sequenciamento K_n^c. Nesse caso, diferentes sequenciamentos levam a diferentes configurações intermediárias. Se houver pelo menos um sequenciamento $K_n^{c\star}$

tecnicamente executável para uma dada solução $\mathcal{F}_c$, então esta solução é considerada realizável e o plano de manobras é um PMR. A identificação de um ou mais $K_n^{c\star}$ não é trivial e precisa ser constatada pela verificação de algumas premissas básicas:

(i) a execução da manobra não deve causar a inversão do fluxo de potência em trechos onde haja equipamento sensível ao sentido de fluxo como são alguns modelos de religadores. O sentido do fluxo em uma linha a ser energizada pode ser previsto pela comparação entre as tensões das barras a serem interligadas;

(ii) os trechos a serem interligados por uma manobra não podem apresentar número diferente de fases;

(iii) a manobra não deve ser executada se a situação atual do sistema elétrico for agravada, exceto nos casos em que fique constatada a melhoria garantida da segurança do sistema a partir da realização da mesma ou a admissão pelo sistema de uma sobrecarga "controlada" temporária.

As manobras devem ser ponderadas e ordenadas levando-se em consideração também o tempo para a execução das mesmas (telecomandadas, manuais) se não houver problemas de violação de restrições técnico-operacionais (ex. sobrecargas, curto-circuitos, inversão de fluxos de potência e reenergizações de curta duração). Por exemplo, se um PMR K_1^c encontrado define uma ordem de manobras que faça a equipe de manutenção viajar desnecessariamente por um trajeto mais longo e há outro PMR K_2^c que determine outra ordem para o mesmo conjunto $\boldsymbol{M}^c$ de manobras de modo a reduzir a distância total a ser percorrida pela equipe, então K_2^c será preferida.

Durante o processo de restauração, a configuração e até mesmo a topologia do sistema de distribuição muda, uma vez que as cargas e as linhas de distribuição são reconectadas de maneira diferente até que a configuração $\mathcal{F}_c$ seja obtida ($\mathcal{F}_c \in \boldsymbol{\Gamma}$) (veja Figura 6.1). É preciso que os limites técnicos de cada equipamento envolvido na migração sejam respeitados em cada configuração intermediária criada pela execução de uma manobra.

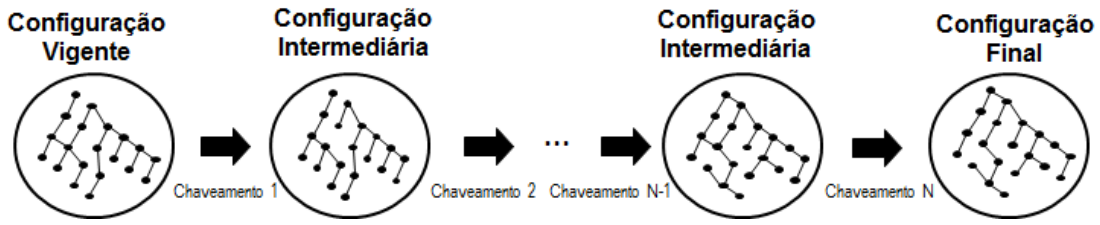

Figura 6.1 – Configurações intermediárias geradas durante o ajuste da configuração do sistema de distribuição.

6.2.2.1 Políticas mais Comuns

Para a implementação das políticas mais comuns do PSOM, faz-se uso de algumas propriedades básicas de grafos. Em qualquer configuração radial, o fechamento de uma chave implica necessariamente na formação de um ciclo. Em situações regulares, a escolha pela manobra de fechamento de uma chave deve preceder a manobra complementar de abertura de outra que pertença ao ciclo formado (WATANABE, 2004). Para o PRec-SDPEE, deve haver preferencialmente um vínculo entre duas manobras subsequentes: a chave a ser aberta deve pertencer necessariamente ao ciclo formado pela chave que foi fechada. Esse par de chaves operadas (abre, fecha) compõe o que se denomina de combinação elementar. Isso porque a

topologia radial deve ser mantida. Uma propriedade intrínseca de uma topologia radial é que se a configuração inicial for radial, então, após a execução de uma quantidade arbitrária de n combinações elementares, a configuração final ainda permanecerá radial. Portanto, a operação básica a ser adotada para evitar interrupções no fornecimento de energia às cargas já energizadas deve ser a seguinte (LEE *et al.*, 1994): (i) fechar uma chave criando um ciclo; (ii) abrir uma outra chave que desfaça o ciclo formado. Porém, essa política básica é inapropriada quando:

(i) os ciclos incluem mais de um NPP;

(ii) as manobras desenergizam clientes especiais, sensíveis às interrupções no fornecimento de energia (ex. hospitais, serviços básicos);

(iii) as manobras causam sobrecargas não toleradas nas estruturas ou equipamentos do SDPEE.

No presente trabalho, um PMR para a reconfiguração é entendido como uma sequência de combinações elementares, assim como Carvalho (2007) realizou.

Em situações de falta no sistema de distribuição, a análise por combinações elementares não é rígida, uma vez que a configuração assumida pelo SDPEE logo após o isolamento da(s) falta(s) pode ser radial, mas não conexa. As seguintes etapas da lógica de elaboração de um PMR para o PRes-SDPEE devem fazer parte das soluções: (i) restaurar a classe de carga emergencial (consumidores especiais); (ii) restaurar a maior parte das classes de cargas menos prioritárias (consumidores comuns); (iii) restaurar todas as cargas. Novamente, a conexão entre dois NPPs deve ser evitada. Para a reenergização de cargas, o fechamento de uma chave somente pode ocorrer se a demanda adicionada ao NPP não superar a capacidade dele.

Há duas formas de aliar o despacho de equipes com o sequenciamento de manobras: (i) identificar o sequenciamento utilizando apenas as propriedades das chaves e tempos de manobra estimados para posterior associação das operações às equipes disponíveis; ou (ii) embutir informações atualizadas sobre as equipes no processo de sequenciamento e atribuir as manobras às equipes disponíveis de forma ótima com base nos tempos das manobras.

6.2.2.2 Políticas mais Elaboradas

A ordenação das manobras deve ser tal que contemple as situações temporárias suportadas pela rede para o tempo estimado da próxima manobra. Nesse interim, há possibilidade de ocorrência de faltas e, portanto, a configuração intermediária assumida pela rede não deve comprometer a atuação de mecanismos de proteção ou a coordenação desses. Por exemplo, não se admite a interligação entre NPPs quando há dispositivos sensíveis ao sentido do fluxo de potência no primeiro trecho de um alimentador.

O fechamento de uma chave pode ser antecipado por uma execução do MFP com o intuito de se determinar as tensões nas barras para a situação corrente do SDPEE. Conhecendo-se as tensões do sistema, ainda que de forma aproximada, ter-se-á uma previsão para o sentido do fluxo na interconexão a ser estabelecida. Um comparativo pode ser feito entre todas as manobras de fechamento ainda pendentes. Ao realizar essa análise, três situações são passíveis de acontecer: conexão entre duas barras energizadas, conexão de uma barra energizada com outra desenergizada e conexão entre barras desenergizadas. A Figura 6.2

ilustra essas situações. A partir daí, a escolha pela manobra com a maior diferença ΔV pode ser feita. Quanto maior a diferença de potencial entre os terminais de uma chave aberta, maior será a expectativa de redução de perdas (SCHMIDT *et al.*, 2005). Se for o caso, a manobra associada à combinação elementar deve ser necessariamente executada. Em seguida, uma nova execução do MFP para o estado intermediário atual do SDPEE pode ser feita. Outra análise similar em relação às tensões nas barras será retomada. As manobras do terceiro tipo (Figura 6.2(c)) podem ser analisadas em separado e se for mais seguro, todas elas podem ser executadas antes das demais. É o caso do setor 3 mostrado na Figura 6.3.

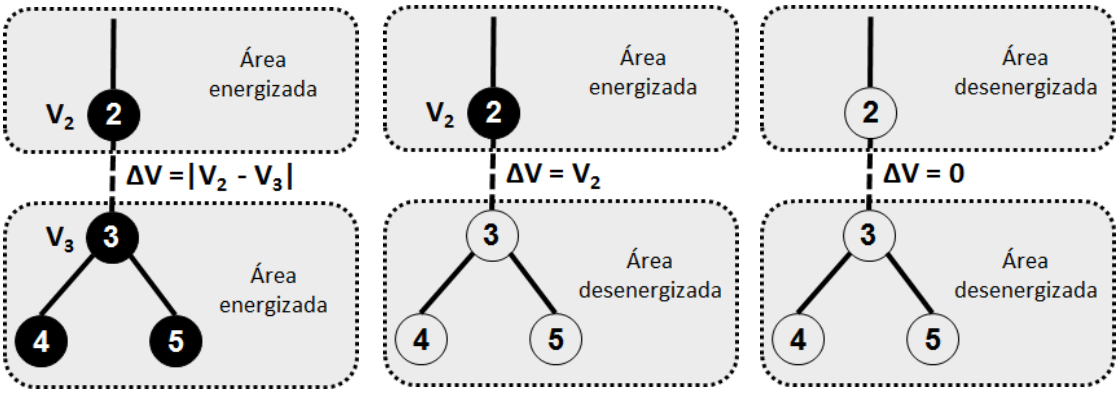

Figura 6.2 – Possíveis situações para a execução de um chaveamento.

As manobras realizadas na periferia dos alimentadores lidam com um montante de carga a jusante menor. Normlmente, elas correspondem a transferências de cargas entre alimentadores. Assim, devem ser priorizadas em relação às opções de chaveamento localizadas mais próximas à saída do transformador da subestação ou em regiões mais centrais do alimentador.

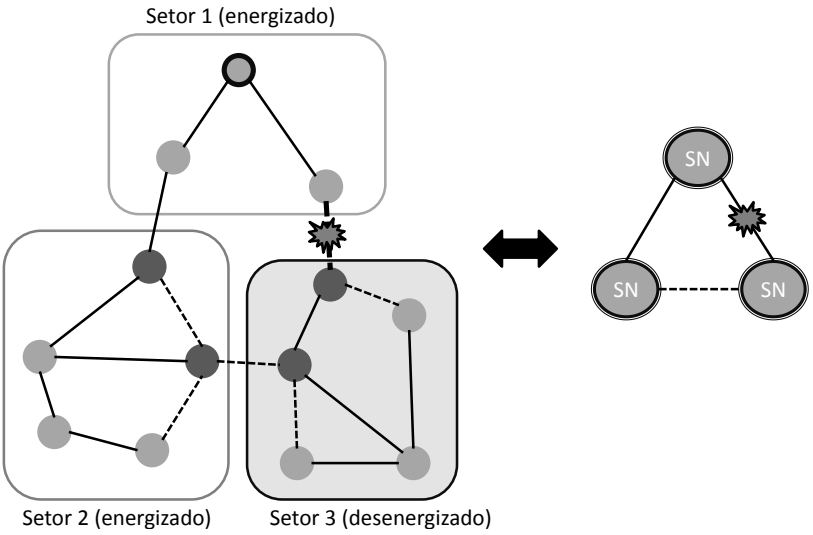

Figura 6.3 – Agregação de nós para facilitar a análise do sequenciamento ótimo de manobras.

A política para análise das manobras também admite que a transferência de cargas entre alimentadores seja um recurso capaz de reduzir as perdas e os riscos de sobrecargas (WANG *et al.*, 2012). A transferência de cargas será discutida mais adiante.

Ao se identificar as operações de chaveamento necessárias para obter a próxima configuração estável, segura e ótima do ponto de vista dos critérios adotados no problema da restauração, os PMRs devem ser analisados de acordo com outros critérios para a escolha definitiva do plano mais adequado ao contexto e os interesses da concessionária. Essa pós-análise faz parte do processo de tomada de decisão a posteriori e será assunto da próxima seção.

6.3 Tomada de Decisão

Após a convergência do algoritmo de otimização que resolveu o problema multiobjetivo, várias soluções podem ser obtidas. Elas ainda precisam ser ordenadas de acordo com as preferências e experiência do operador do SDPEE para que uma delas possa ser finalmente realizada.

A determinação do plano de manobras realizável (PMR) desejado leva à escolha de uma combinação de operações de chaveamento que atenda aos diversos critérios e restrições, definidos no modelo matemático do problema em questão: reconfiguração ou restauração. Nesse sentido, Miu (MIU *et al.*, 1998) foi uma dentre poucos pesquisadores a discutir a ordenação das soluções baseada em critérios ao lidar com múltiplos objetivos no problema de otimização. Durante o processo de otimização, várias soluções ótimas podem ser encontradas. A análise feita por uma técnica de tomada de decisão (ToD) deve auxiliar o operador, que é o decisor, a escolher a solução mais adequada aos seus propósitos.

A ToD pode fazer um refinamento das soluções eficientes encontradas atribuindo-se outros tipos de custo, inclusive custos associados a cada manobra dos sequenciamentos que fazem parte do conjunto final de soluções retornado pelo AE. O custo da manobra pode ser modificado em relação ao original que levou em consideração o tempo estimado para a realização da manobra. Os custos mais comuns são: tipo da chave, distância da chave em relação ao NPP, localização da equipe de manutenção mais próxima disponível e quantidade e categoria das cargas à jusante (veja a Figura 6.4).

Por exemplo, as operações de chaveamento contidas em uma solução realizável (PMR), pertencente ao conjunto Pareto-ótimo, podem ser manuais muito distantes entre si, o que a tornaria menos atrativa do ponto de vista de tempo e despesas operacionais com equipes de campo. Por outro lado, uma solução que indique uma sequência de chaveamentos telecomandados, no caso de uma restauração do SDPEE, pode ser mais atrativa.

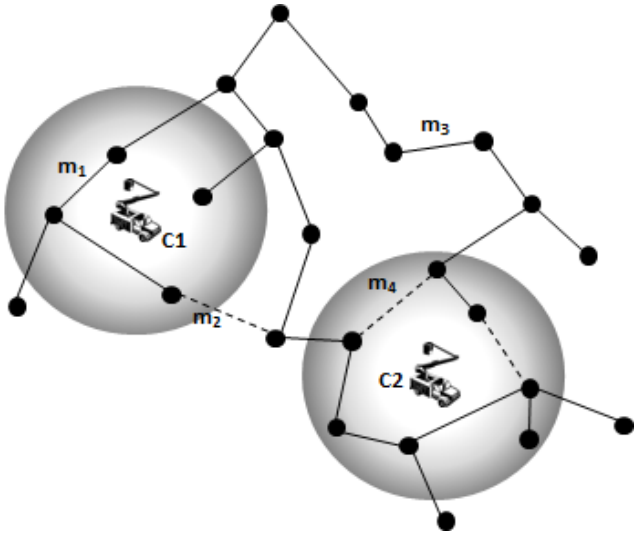

Figura 6.4 – Áreas de atendimento de equipes para a realização de manobras manuais.

A ToD codifica as preferências do usuário-decisor e usa procedimentos numéricos como recurso de classificação das soluções eficientes encontradas pela otimização de acordo com as relações de custo-benefício estabelecidas. Essas preferências podem basear-se nos mesmos critérios usados pela otimização ou em novas características mensuráveis (ex. indicadores). Nesse sentido, o decisor pode optar por considerar apenas critérios técnicos durante a fase de otimização e durante o processo de ToD critérios gerenciais podem ser considerados.

Foram consideradas duas formas de se implementar a análise multicritério: a decisão a priori e a decisão a posteriori. Na primeira, o decisor deve indicar sua preferência antes do processo de otimização para ser usada na identificação das melhores soluções e ordenação das mesmas. Na segunda, o decisor intervém após o processo de otimização e tem acesso ao conjunto das soluções ótimas encontradas pelo AE. Para o contexto da reconfiguração, essa modalidade é preferível visto que se houver mudança nos critérios da tomada de decisão, o processo de otimização não precisa ser repetido. Portanto, a modificação e a inclusão de novos critérios são facilitadas. No entanto, a decisão a posteriori exige mais tempo para se chegar à solução com melhor compromisso em relação às preferências do decisor. A metodologia para implementar a decisão a posteriori foi baseada em (CHEN, 2010). Ela avalia o desempenho dos PMRs identificados e atribui a cada um deles o índice de desempenho. Em seguida, o operador recebe os planos de manobra classificados em ordem decrescente do índice de desempenho. A etapa de ToD foi dividida em três partes: Processo Hierárquico Analítico (AHP), Avaliação Multiobjetivo Nebulosa (FMCE) e Análise Relacional de Grey (GRA).

6.3.1 Processo Hierárquico Analítico (AHP)

A primeira etapa consiste na aplicação do AHP como uma forma de determinar os pesos de cada função objetivo de acordo com as preferências do operador. Para isso, cada par de critérios deve ser comparado e valores inteiros de 1 a 9, que representam a importância do primeiro critério em relação ao segundo, devem ser atribuídos. O valor 1 denota a mesma importância de ambos e o valor 9 acusa uma importância muito superior do primeiro em relação ao segundo. A matriz de comparações é então formada com os valores numéricos determinados pelo decisor:

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

em que $a_{ii} = 1$ e $a_{ji} = 1/a_{ij}$. Cada elemento da matriz a_{ij} $(i, j = 1, \dots, n)$ equivale ao julgamento quantitativo de um par de objetivos (f_i, f_j) que define a importância relativa entre os mesmos. A ordem da matriz de comparações é determinada pelo número de funções objetivo do problema. A partir daí, o maior autovalor da matriz de comparações e o autovetor correspondente devem ser obtidos. O autovetor deve ser normalizado para que a soma das suas componentes atinja a unidade. E os pesos de cada função objetivo são derivados das componentes do autovetor normalizado. O peso da função objetivo f_1, por exemplo, é a primeira componente desse vetor. Dada a matriz de comparações MC, sua consistência deve ser verificada para assegurar que o julgamento das funções objetivo seja coerente. Essa consistência é comprovada pela razão de consistência CR (*consistency ratio*):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6.2)$$

em que CI é o índice de consistência (*consistency index*) e RI é o índice randômico (*random index*). O índice de consistência indica o desvio do maior autovalor em relação ao número de critérios usados no processo de comparação:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (6.3)$$

em que n denota a ordem da MC. Já o RI é dado em relação à ordem de MC de acordo com a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores do índice randômico (RI) para diferentes ordens n da matriz de consistência.

n	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Os valores de RI foram obtidos experimentalmente por Saaty (SAATY, 1990) a partir de médias do índice de consistência observados para um grande número de matrizes consistentes de mesma ordem compostas de valores aleatórios. Com essa determinação, Saaty definiu que se CR fosse menor ou igual a $0{,}10$, os pesos encontrados seriam considerados aceitáveis. Caso contrário, a matriz de comparações deveria ser revisada.

6.3.2 Avaliação Multiobjetivo Nebulosa (FMCE)

A Avaliação Multiobjetivo Nebulosa (FMCE) consiste de uma base de regras, funções de pertinência e de um mecanismo de inferência. As regras traduzem as relações entre os objetivos na forma linguística e são construídas com estruturas do tipo **se-então**, contendo a parte antecedente e a parte consequente. Por exemplo, "Se f_i é baixa, então o plano de manobra é bom". As funções objetivo f_i são descritas por três conjuntos nebulosos que indicam a importância efetiva da regra: baixa, média e alta. Os valores das funções objetivo

são utilizados para calcular a intensidade de disparo (*firing strength*) de cada regra. Já os valores desnebulizados são obtidos por meio de uma média ponderada conforme a equação:

$$f_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{NRN} \mu_j y_j}{\sum_{j=1}^{NRN} \mu_j} \tag{6.4}$$

em que μ_j e y_j são, respectivamente, a intensidade de disparo da parte antecedente e a função *singleton* nebulosa da parte consequente da j-ésima regra. A quantidade de regras é simbolizada por NRN.

6.3.3 Análise Relacional de Grey (GRA)

A terceira etapa do algoritmo consiste na aplicação da Análise Relacional de Grey (GRA) para medir a relação entre dois planos de manobras realizáveis com base em um valor de nota (*Grey relational grade* - GRG). A GRG é um número real pertencente ao intervalo $[0,1]$ que indica a correlação entre dois PMRs e é calculado a partir do coeficiente relacional de Grey (GRC). As sequências de chaveamento a serem comparadas são compostas pelos valores desnebulizados das funções objetivo relativos a cada um dos planos. Essas sequências são denotadas por um vetor $K_i^c(m)$, em que $i = 1, \dots, N_P$ e N_P equivale ao número de PMRs. Os PMRs precisam de um PMR referencial (PMR_0) para poderem ser comparadas. Para construir a sequência referencial $K_0^c(m)$, que será aquela com a qual todas as outras serão comparadas, o maior valor de cada função objetivo dentre todas as sequências $\boldsymbol{K}^c$ é identificado. Os GRCs expressam a relação entre cada sequência $K_i^c(m)$ e a sequência de referência $K_0^c(m)$:

$$\gamma(K_0^c, K_i^c) = \frac{\Delta_{max} - \Delta_{0i}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \tag{6.5}$$

em que $\gamma(K_0^c, K_i^c)$ é o GRC de K_i^c em relação a K_0^c, $K_0^c(m)$ é a m-ésima posição da sequência de chaveamentos referencial; $K_i^c(m)$ é a m-ésima posição da sequência a ser comparada, $\Delta_{0i}(m)$ é a diferença absoluta entre a sequência de referência K_0^c e cada sequência K_i^c:

$$\Delta_{0i}(m) \equiv |K_0^c(m) - K_i^c(m)| \tag{6.6}$$

O valor de Δ_{max} é o maior dentre todas as posições de todos os $\Delta_{0i}(m)$:

$$\Delta_{max} = \max_{\forall i} \max_{\forall m} |K_0^c(m) - K_i^c(m)| \tag{6.7}$$

O valor de Δ_{min} é o menor dentre todas as posições de todos $\Delta_{0i}(m)$:

$$\Delta_{min} = \min_{\forall i} \min_{\forall m} |K_0^c(m) - K_i^c(m)| \tag{6.8}$$

Então, o GRG para cada plano de restauração pode ser calculado a partir da equação abaixo:

$$\Gamma_{0i} \equiv \sum_{m=1}^{n} \beta_m \, \gamma(K_0^c, K_i^c) \tag{6.9}$$

onde Γ_{0i} é o GRG para a sequência K_i^c e β_m é o peso da m-ésima função objetivo que é determinado a partir do AHP. A sequência com maior GRG é preferível em relação às outras, pois isso significa que ela é a que mais se aproxima da sequência ideal ou de referência, que seria o melhor plano de restauração. Dessa forma, o GRG é utilizado como índice de desempenho.

6.4 Métodos de Transferência de Cargas

No balanceamento de carga, as transferências de cargas entre alimentadores mais indicadas são aquelas que envolvem as cargas concentradas em pequenas áreas do SDPEE, localizadas na periferia dos alimentadores (o mais distante das subestações). Uma transferência de carga geralmente afeta as correntes nos trechos de linha de distribuição que fazem parte do caminho compreendido entre o NPP e as cargas remanejadas. Consequentemente, estas ações também afetam as cargas e as linhas situadas entre o NPP e a área do remanejamento de carga, podendo reduzir sobrecargas.

Usando uma estratégia do tipo “dividir para conquistar”, transferências de carga podem ser realizadas após otimizações em cada área circunvizinha às áreas afetada por blecaute. O problema de identificação da configuração ótima pode ser drasticamente reduzido.

O procedimento de transferência de cargas em situações de restauração baseou-se também no trabalho de Hsu (HSU *et al.*, 1992). Segundo a abordagem adotada por esse trabalho, admitem-se dois procedimentos de transferência de cargas:

I) de um alimentador para outro alimentador adjacente;
II) de uma área escura para alimentadores vizinhos.

O transbordo de cargas é um recurso interessante para distribuir melhor a demanda entre as capacidades residuais dos NPPs. A redução de carga (*load shedding*) em um alimentador também pode ser resolvida pela transferência de cargas entre alimentadores. Entretanto, não havendo a possibilidade de transferir cargas para alimentadores menos sobrecarregados, o processo de redução ou exclusão de cargas (*load shedding*) deve ser realizado.

6.4.1 Robustez e Prontidão

A robustez de um sistema de distribuição pode ser mensurada pela sua capacidade em se manter no estado de operação estável e seguro, mesmo diante de situações anômalas com graus de severidade variados. Já a prontidão de um sistema de distribuição pode ser definida como a capacidade de recuperação após a ocorrência de anomalias, ou seja, ele consegue retornar ao estado de operação estável no menor tempo possível. As ações de seccionamento e interconexão devem ser orientadas não apenas ao balanceamento das cargas e às perdas, mas também às estruturas de redundância (linhas, ramais alimentadores, subestações etc.) para conferir robustez e prontidão ao sistema de distribuição. Nesse sentido, os planos de manobra também devem ser pensados levando-se em consideração a existência de ramais

alimentadores alternativos e a possibilidade de transferências de cargas para os mesmos. Tal abordagem visa mudar o ponto de operação do sistema de forma a prepará-lo preventivamente para as contingências mais prováveis identificadas a partir do histórico de ocorrências.

6.5 Conclusões

Neste capítulo, foram vistas as questões que se referem ao pós-processamento das soluções encontradas pelo EA-DFR. A análise da sequência de manobras e o processo de tomada de decisão usados nos problemas PRec-SDPEE e PRes-SDPEE são pouco explorados na literatura especializada. No início do capítulo, uma breve revisão sobre o primeiro assunto constata essa afirmativa. Concluiu-se que a obtenção da configuração final do SDPEE não é suficiente. Ainda é desejável aplicar um conjunto de regras para se resolver o problema de sequenciamento ótimo (PSOM) a fim de identificar a viabilidade das sequências de manobras encontradas. A análise de sequência de manobras para um dado PM, presente no conjunto Pareto obtido após a execução do algoritmo de otimização, pode constatar sua viabilidade, identificar a necessidade de reordenação dos chaveamentos ou mesmo reprová-lo por não atender aos requisitos mínimos codificados nas regras da distribuidora de energia que programam as políticas de operação do sistema de distribuição. A tomada de decisão é um procedimento que deve ser usado para oferecer ao decisor a melhor solução de acordo com o modelo matemático definido e as preferências informadas por ele. Portanto, nesse capítulo, foram discutidas duas formas conhecidas da teoria de tomada de decisão multicriterial (MCDM). Elas foram contextualizadas para os problemas PRec-SDPEE e PRes-SDPEE.

7 - Validação e Resultados Experimentais

7.1 Introdução

Neste capítulo, sistemas de distribuição equilibrados serão usados para validar as proposições discutidas nos capítulos anteriores. Casos de reconfiguração e de restauração são simulados com o intuito de se verificar a consistência da formulação matemática proposta, o desempenho dos algoritmos desenvolvidos, a consistência da lógica programada e a abrangência de aplicação do *software* implementado.

7.2 Sistemas de Teste

Para a realização dos testes computacionais, cinco sistemas de distribuição conhecidos da literatura e descritos na Tabela 2.1 foram usados. Os sistemas #1, #2, #3, #4 e #5 estão representados nas Figuras 7.1 a 7.5 respectivamente. O sistema #3 é ilustrado novamente com o intuito de facilitar a consulta. A carga total do sistema #1 corresponde à potência ativa de 3715 MW e à potência reativa de 2300 MVAr. O sistema #2 totaliza 3802,19 MW de demanda por potência ativa e 2694,6 MVAr de demanda por potência reativa. O sistema #3 tem um carregamento total de 28,7 MW e 5,9 MVAr. As potências de 2835 MW e 2070 MVAr correspondem ao carregamento total no sistema #4. Para o sistema #5, a potência total ativa é de 1831,4 MW e a potência total reativa é de 793,25 MVAr.

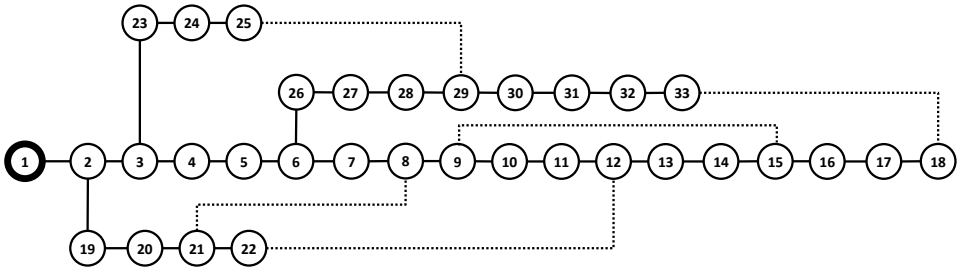

Figura 7.1 – Sistema #1 de 33 barras (ZHU, 2002).

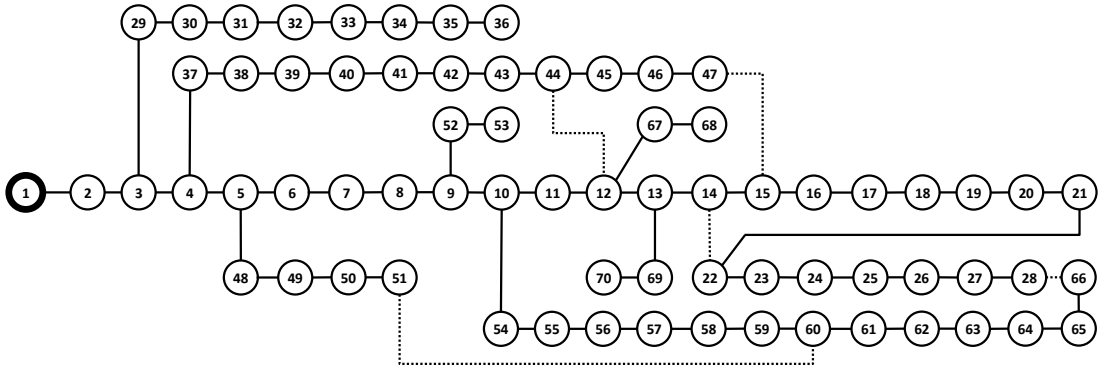

Figura 7.2 – Sistema #2 de 70 barras (BARAN e WU, 1989).

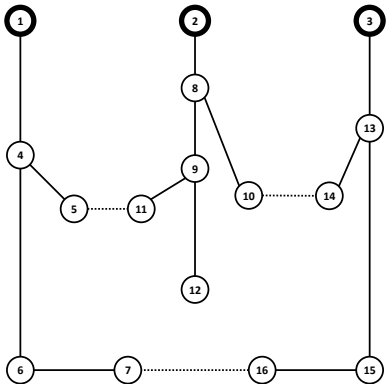

Figura 7.3 - Sistema #3 de 16 barras (ZHU, 2002).

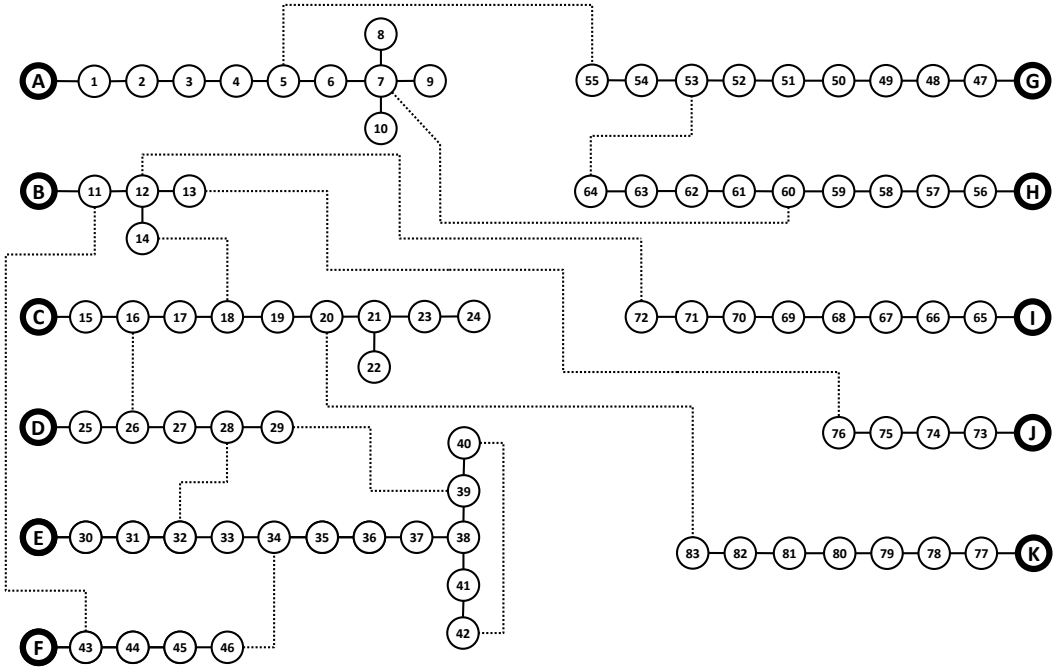

Figura 7.4 – Sistema #4 de 94 barras (SU e LEE, 2003).

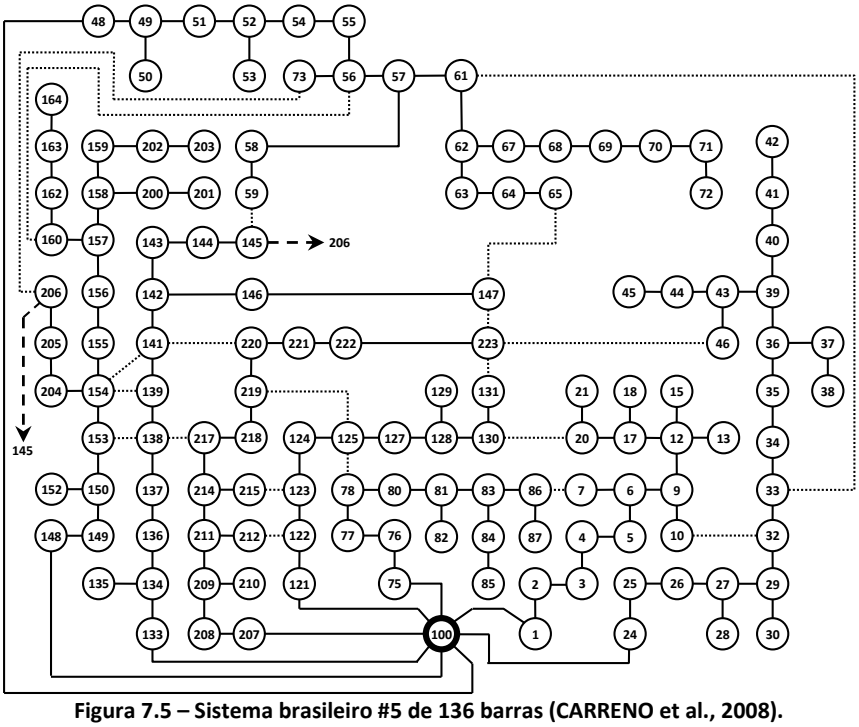

Figura 7.5 – Sistema brasileiro #5 de 136 barras (CARRENO et al., 2008).

7.3 Problema de Reconfiguração

7.3.1 Testes Preliminares do EA-DFR para Formulação Mono-objetivo (PRec-SDPEE)

Com o intuito de validar a codificação, as heurísticas de radialização, os operadores genéticos e os métodos de fluxo de potência, o PRes-SDPEE foi resolvido em uma versão mono-objetivo para as perdas de potência ativa com um algoritmo genético clássico (GOLDBERG, 1989) adaptado ao problema. O primeiro sistema testado foi o #1 cujo ótimo global foi descoberto por busca exaustiva e relatado em (GOMES *et al.*, 2006) para três situações distintas. A Tabela 7.1 apresenta esses três casos de simulação: sistema original conforme (BARAN e WU, 1989), configuração original alterada e modificação das cargas nas barras 9 e 13. Ficou constatado que o algoritmo convergia para o ótimo identificado independentemente da inclusão da configuração inicial na primeira população. Cada situação foi repetida 33 vezes com o propósito de se verificar a estabilidade do algoritmo e a representatividade dos resultados obtidos. Os tipos de mutação MT3 e MT7 (Seção 3.9.2) fizeram o algoritmo apresentar o melhor desempenho.

Tabela 7.1 – Soluções ótimas do sistema #1 para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE usando MVRD-AP-DP[8] e MVRD-AP-CP[9].

Caso de Simulação	MVRD-AP-DP			MVRD-AP-CP		
	Melhor Solução Encontrada	Tempo Médio de Processamento (s)	Taxa de Convergência para 33 tentativas (%)	Melhor Solução Encontrada	Tempo Médio de Processamento (s)	Taxa de Convergência para 33 tentativas (%)
Problema como foi originalmente proposto na literatura	s7-s9-s14-s32-s37	2,13	100	s7-s9-s14-s32-s37	2,95	100
Configuração inicial diferente	s7-s9-s14-s32-s37	2,18	100	s7-s9-s14-s32-s37	2,93	100
Cargas das barras 9 e 13 modificadas	s9-s14-s28-s32-s33	2,19	100	s9-s14-s28-s32-s33	2,99	100

A abordagem anterior também foi verificada para o sistema #2 e comparada com os ótimos encontrados por outras três referências. Um método de busca exaustiva foi aplicado ao sistema, visto que não havia registro na literatura relacionado à aplicação desse método ao sistema #2. Pela Tabela 7.2, percebe-se que o *landscape* é multimodal com quatro ótimos globais que não coincidem com as melhores soluções encontradas pelos trabalhos referenciados. Por outro lado, o AG implementado com as funcionalidades desenvolvidas por esse trabalho encontrou de forma persistente um dos quatro ótimos em todas as execuções realizadas. Para as 33 tentativas, as quatro soluções foram encontradas pelo menos uma vez.

O sistema #3 foi avaliado pela execução do AG acoplado ao **MVRD-AP-CP** que também demonstrou consistência ao convergir todas as vezes (100%) para a mesma solução encontrada em (ZHU, 2002). O algoritmo demandou 0,08 segundos em média para alcançar a melhor configuração de rede (s6 - s9 - s11) não dependendo do conjunto das soluções iniciais tampouco da configuração inicial. A melhor solução corresponde a um total de perdas ativas

[8] Método de Varredura com Agregação de Potência e desconsideração de perdas.
[9] Método de Varredura com Agregação de Potência e consideração de perdas.

de 466,1 kW. Foram executadas 33 tentativas para o sistema em questão admitindo um total de 200 avaliações para um tamanho de população igual a 20 indivíduos. Com o método **MVRD-AP-DP** acoplado ao AG foi encontrado um ótimo que levava a um total de perdas reais de 449,67 kW, coincidindo com a solução publicada na literatura. O sistema #4 foi avaliado com o AG acoplado ao método cuja formulação foi descrita em (SU e LEE, 2003). A mesma solução reportada no artigo de Su foi alcançada em 82% das execuções, após cerca de 112,8 segundos (s7-s13-s34-s39-s41-s55-s62-s72-s83-s86-s89-s90-s92), e que correspondia a uma configuração com perdas de 469.88 kW.

Tabela 7.2 – Soluções ótimas do sistema #2 para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE resolvida pelo AG acoplado ao MVRD-AP-CP.

Método	Melhores Soluções Encontradas †	PPA (kW)	Tempo de Processamento (s) ††
Busca Exaustiva	s13-s21-s56-s62-s70, s13-s21-s57-s62-s70, s13-s21-s58-s62-s70, s13-s21-s59-s62-s70	94,026	-
Huang (HUANG, 2002)	s13-s59-s70-s71-s74	113,406	não indicado
Savier (SAVIER e DAS, 2011)	s15-s57-s64-s70-s71	99,59	1,8
Swarnkar (SWARNKAR *et al.*, 2011)	s15-s57-s62-s70-s71	99.59	3.3
Proposto	s13-s21-s56-s62-s70, s13-s21-s57-s62-s70, s13-s21-s58-s62-s70, s13-s21-s59-s62-s70	94.026	9.4

† Identificações das chaves foram consideradas as mesmas de (HUANG, 2002).

†† Os tempos de execução foram obtidos para uma mesma plataforma computacional.

O AG foi utilizado também para otimizar o sistema #5. A solução ótima, encontrada antes por busca exaustiva, foi alcançada com êxito pelo AE acoplado ao **MVRD-AP-CP** após 10840 avaliações em média: s7 -s35 - s51 - s90 - s96 - s106 - s118 - s126 - s135 - s137 - s138 - s141 - s142 - s144 - s145 - s146 -147 - s148 - 150 - 151 - 155. O AE apresentou um padrão de convergência adequado para a solução que leva a um total de perdas ativas de 280,1 kW em contraposição à configuração inicial (s135 - s136 - s137 - s138 - s139 - s140 - s141 - s142 - s143 - s144 - s145 - s146 - s147 - s148 - s149 - 150 - s151 - 152 - 153 - 154 - 155) cujas perdas são de 320,3 kW. A otimização permitiu então uma redução de 12,6 % nas perdas reais.

7.3.2 Testes do EA-DFR para Formulação Multiobjetivo (PRec-SDPEE)

Os sistemas foram verificados para um procedimento de força bruta baseado em enumeração de grafos (ANDREI e CHICCO, 2008). As Tabelas 7.3 e 7.4 apresentam o conjunto de soluções pertencentes à curva Pareto real obtido para o sistema de teste #1 em que os métodos de agregação de potência **MVRD-AP-DP** e **MVRD-AP-CP** foram usados.

As Tabelas 7.5 e 7.6 apresentam o conjunto Pareto-ótimo para o sistema #2 obtido com método de busca exaustiva e funções de avaliação acopladas aos métodos **MVRD-AP-DP** e **MVRD-AP-CP**. Assim como para o sistema #1, os conjuntos obtidos para as formulações diferentes do MVRD são ligeiramente diferentes e apresentam soluções em comum.

Tabela 7.3 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #1 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando o MVRD-AP-DP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (ZHU, 2002) para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro.

Solução	Chaves Abertas					Funções Objetivo				Solução	Chaves Abertas					Funções Objetivo			
	S1	S2	S3	S4	S5	PPA(kW)	IDT	ICC	NM		S1	S2	S3	S4	S5	PPA(kW)	IDT	ICC	NM
1	7	9	14	27	37	136.8573	0.0326	0.5480	8	20	7	13	27	35	37	146.2070	0.0369	0.5575	6
2	7	9	14	28	32	132.1250	0.0318	0.5511	10	21	7	13	28	35	37	143.1198	0.0357	0.5591	6
3	7	9	14	28	37	133.7701	0.0314	0.5496	8	22	8	33	34	36	37	144.1015	0.0368	0.6519	2
4	7	9	14	32	33	131.8484	0.0339	0.6218	8	23	9	14	27	34	37	140.4228	0.0320	0.5731	6
5	7	9	14	33	37	134.0667	0.0338	0.6251	6	24	9	14	28	32	34	136.3446	0.0312	0.5793	8
6	7	10	14	27	32	135.6836	0.0332	0.5482	10	25	9	14	28	34	37	138.0678	0.0311	0.5748	6
7	7	10	14	27	37	137.3173	0.0328	0.5468	8	26	9	17	28	34	36	141.1753	0.0324	0.5721	6
8	7	10	14	28	32	132.7685	0.0321	0.5498	10	27	9	27	34	36	37	140.5511	0.0336	0.5730	4
9	7	10	14	28	37	134.2301	0.0316	0.5484	8	28	9	28	34	36	37	137.8256	0.0326	0.5746	4
10	7	10	14	32	33	132.4920	0.0342	0.6205	8	29	9	33	34	36	37	144.5005	0.0364	0.6503	2
11	7	10	14	33	37	134.5267	0.0340	0.6238	6	30	10	27	34	36	37	140.0848	0.0330	0.5743	4
12	7	10	27	36	37	139.4704	0.0341	0.5593	6	31	10	28	32	34	36	135.7674	0.0326	0.5806	6
13	7	10	28	36	37	136.3832	0.0329	0.5609	6	32	10	28	34	36	37	137.4405	0.0320	0.5759	4
14	7	10	33	36	37	136.6798	0.0353	0.6363	4	33	10	33	34	36	37	145.4609	0.0363	0.6516	2
15	7	11	27	36	37	138.9756	0.0337	0.5604	6	34	11	28	32	34	36	135.6151	0.0321	0.5840	6
16	7	11	28	36	37	135.8884	0.0325	0.5620	6	35	11	28	34	36	37	137.5742	0.0317	0.5794	4
17	7	11	33	36	37	136.1850	0.0349	0.6374	4	36	27	34	35	36	37	165.2175	0.0412	0.6431	2
18	7	12	27	35	37	146.8668	0.0372	0.5560	6	37	28	34	35	36	37	163.3912	0.0406	0.6449	2
19	7	12	28	35	37	143.7797	0.0360	0.5576	6	38	33	34	35	36	37	186.0441	0.0496	0.7233	0

Tabela 7.4 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #1 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando o MVRD-AP-CP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (ZHU, 2002) para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro.

Solução	Chaves Abertas					Funções Objetivo				Solução	Chaves Abertas					Funções Objetivo			
	S1	S2	S3	S4	S5	PPA(kW)	IDT	ICC	NM		S1	S2	S3	S4	S5	PPA(kW)	IDT	ICC	NM
1	7	9	14	28	32	139.9823	0.0326	0.5650	10	18	8	33	34	36	37	153.4974	0.0378	0.6707	2
2	7	9	14	28	37	141.9213	0.0322	0.5636	8	19	9	14	27	34	37	149.4261	0.0327	0.5878	6
3	7	9	14	32	33	139.5542	0.0348	0.6381	8	20	9	14	28	32	34	144.5838	0.0319	0.5936	8
4	7	9	14	33	37	142.1687	0.0347	0.6420	6	21	9	14	28	34	37	146.6722	0.0319	0.5891	6
5	7	10	14	27	37	145.9686	0.0336	0.5613	8	22	9	17	28	34	36	150.4038	0.0332	0.5872	6
6	7	10	14	28	32	140.7099	0.0329	0.5638	10	23	9	27	34	36	37	149.5296	0.0345	0.5882	4
7	7	10	14	28	37	142.4342	0.0324	0.5624	8	24	9	28	34	36	37	146.3735	0.0334	0.5894	4
8	7	10	14	32	33	140.2818	0.0351	0.6370	8	25	9	33	34	36	37	153.9966	0.0374	0.6690	2
9	7	10	14	33	37	142.6815	0.0349	0.6408	6	26	10	27	34	36	37	148.9915	0.0338	0.5893	4
10	7	10	27	36	37	148.3988	0.0350	0.5744	6	27	10	28	32	34	36	143.9339	0.0334	0.5954	6
11	7	10	28	36	37	144.8643	0.0337	0.5756	6	28	10	28	34	36	37	145.9220	0.0328	0.5906	4
12	7	10	33	36	37	145.1117	0.0362	0.6540	4	29	10	33	34	36	37	155.1353	0.0374	0.6704	2
13	7	11	27	36	37	147.8276	0.0346	0.5754	6	30	11	28	32	34	36	143.7160	0.0329	0.5986	6
14	7	11	28	36	37	144.2932	0.0333	0.5766	6	31	11	28	34	36	37	146.0456	0.0325	0.5940	4
15	7	11	33	36	37	144.5405	0.0358	0.6550	4	32	27	34	35	36	37	177.2866	0.0424	0.6625	2
16	7	12	27	35	37	156.7469	0.0382	0.5722	6	33	28	34	35	36	37	175.1384	0.0418	0.6640	2
17	7	12	28	35	37	153.2123	0.0370	0.5734	6	34	33	34	35	36	37	202.6861	0.0515	0.7492	0

Tabela 7.5 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #2 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando o MVRD-AP-DP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (HUANG, 2002) para a versão "multiobjetivo" do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro.

Solução	Chaves Abertas					Funções Objetivo				Solução	Chaves Abertas					Funções Objetivo			
	S1	S2	S3	S4	S5	PPA(kW)	IDT	ICC	NM		S1	S2	S3	S4	S5	PPA(kW)	IDT	ICC	NM
1	13	20	59	62	70	94.0357	0.0131	0.2121	8	26	14	21	27	59	70	116.9494	0.0133	0.1747	8
2	13	20	59	63	70	94.8489	0.0130	0.2085	8	27	14	21	59	62	70	100.4805	0.0125	0.1923	8
3	13	20	59	65	70	107.9623	0.0120	0.1872	8	28	14	21	59	63	70	100.8507	0.0125	0.1900	8
4	13	20	59	70	74	113.4621	0.0124	0.1823	6	29	14	21	59	65	70	110.9406	0.0120	0.1777	8
5	13	21	59	62	70	94.0258	0.0130	0.2121	8	30	14	21	59	70	74	115.6911	0.0125	0.1751	6
6	13	21	59	63	70	94.8399	0.0129	0.2085	8	31	14	59	62	70	71	98.5935	0.0141	0.2285	6
7	13	21	59	65	70	107.9599	0.0120	0.1872	8	32	14	59	63	70	71	98.9570	0.0139	0.2238	6
8	13	21	59	70	74	113.4615	0.0124	0.1824	6	33	14	59	65	70	71	109.5435	0.0125	0.1948	6
9	13	59	65	70	71	109.5371	0.0126	0.1951	6	34	14	59	70	71	74	114.5668	0.0129	0.1879	4
10	13	59	70	71	74	113.4058	0.0129	0.1860	4	35	17	27	46	59	70	124.3711	0.0161	0.1700	8
11	14	16	59	63	70	110.2821	0.0153	0.1870	8	36	18	26	43	59	72	126.3141	0.0174	0.1689	8
12	14	16	59	70	74	121.3372	0.0143	0.1720	6	37	18	26	59	70	72	123.6836	0.0161	0.1699	6
13	14	17	27	59	70	120.4348	0.0144	0.1718	8	38	18	27	43	59	72	125.2246	0.0167	0.1691	8
14	14	17	59	63	70	107.1823	0.0145	0.1872	8	39	18	27	46	59	70	124.4017	0.0161	0.1696	8
15	14	17	59	65	70	115.1063	0.0134	0.1748	8	40	18	27	59	70	72	122.5501	0.0154	0.1701	6
16	14	17	59	70	74	119.3066	0.0137	0.1722	6	41	18	43	59	65	72	120.3626	0.0159	0.1721	8
17	14	18	27	59	70	118.4204	0.0139	0.1728	8	42	18	43	59	72	74	124.1857	0.0161	0.1695	6
18	14	18	59	63	70	103.7524	0.0137	0.1881	8	43	18	46	59	70	74	123.3578	0.0154	0.1701	6
19	14	18	59	65	70	112.7536	0.0128	0.1758	8	44	18	59	63	70	72	110.2842	0.0160	0.1855	6
20	14	18	59	70	74	117.2275	0.0132	0.1733	6	45	18	59	65	70	72	117.4579	0.0146	0.1731	6

21	14	20	27	59	70	116.9690	0.0134	0.1747	8	**46**	18	59	70	72	74	121.4671	0.0148	0.1705	4
22	14	20	59	62	70	100.5263	0.0128	0.1922	8	**47**	19	59	63	70	72	110.3591	0.0160	0.1859	6
23	14	20	59	63	70	100.8939	0.0128	0.1899	8	**48**	59	65	70	71	72	121.2523	0.0161	0.1846	4
24	14	20	59	65	70	110.9658	0.0122	0.1777	8	**49**	59	70	71	72	74	124.0634	0.0160	0.1792	2
25	14	20	59	70	74	115.7118	0.0126	0.1751	6	**50**	70	71	72	73	74	204.7992	0.0251	0.2201	0

A Figura 7.6 apresenta os dois conjuntos de soluções eficientes para o sistema #1, obtidos via busca exaustiva, com a formulação simplificada (MVRD-AP-DP) e com a formulação que admite perdas durante o processo iterativo (MVRD-AP-CP). Quatros objetivos são apresentados, a saber, PPA, IDT, ICC e NM. Os três primeiros estão representados nos eixos e o quarto objetivo é mapeado pela barra de cores. Percebe-se que os conjuntos são bem distintos e o padrão de dispersão das soluções relacionadas com a formulação simplificada tende a "dominar", ou seja, superar em desempenho o conjunto de soluções associadas à formulação mais realista. Um comportamento similar dos dois conjuntos de soluções é notado na Figura 7.7 para o sistema #2.

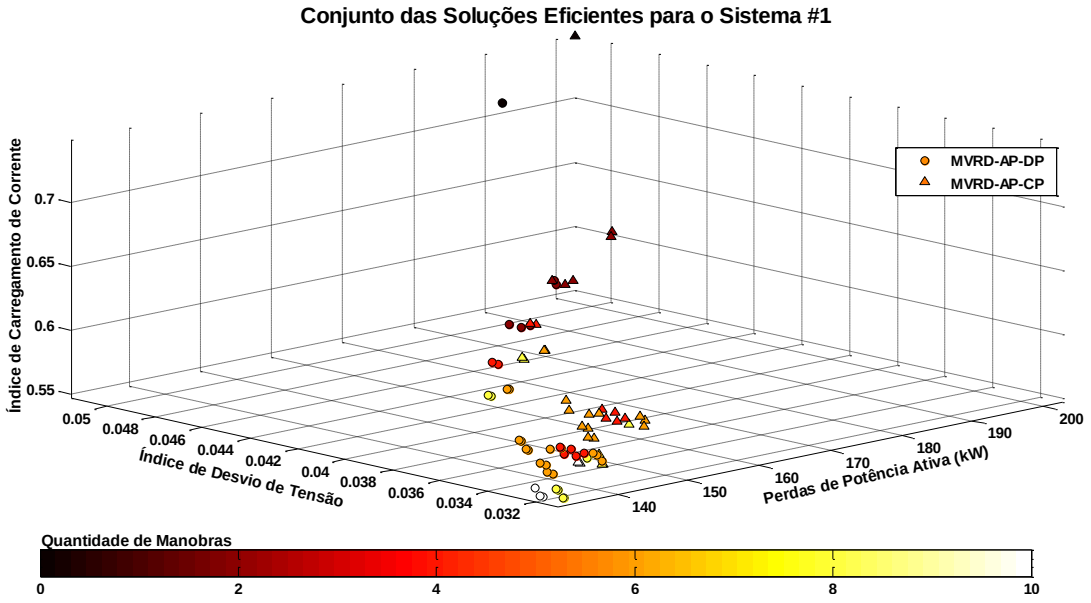

Figura 7.6 – Distribuição das soluções eficientes no espaço dos objetivos para o Sistema #1.

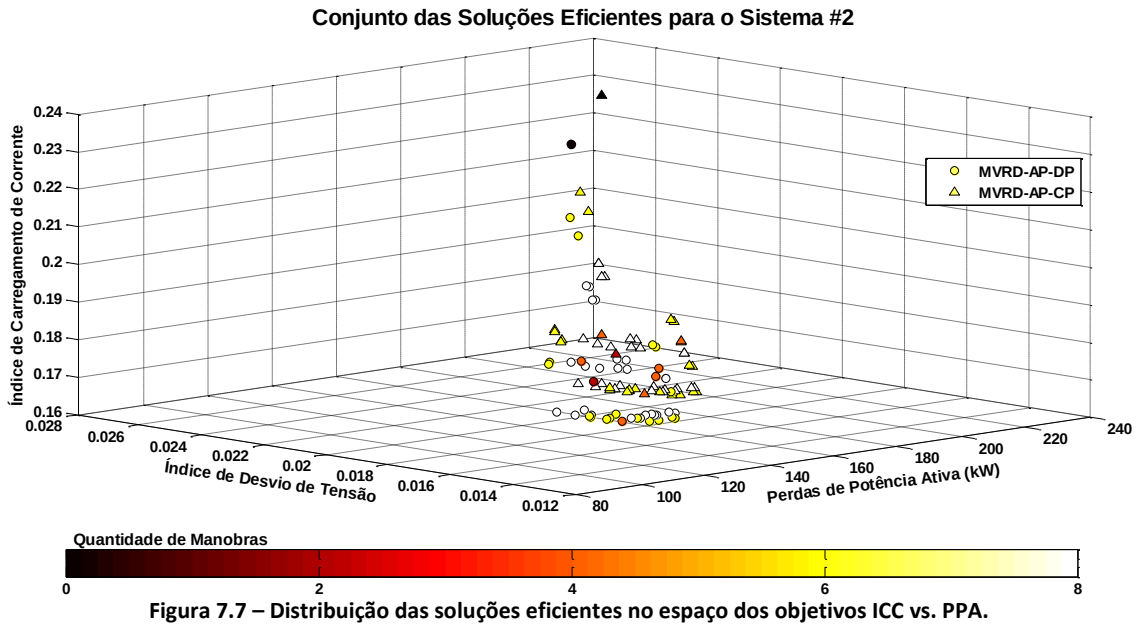

Figura 7.7 – Distribuição das soluções eficientes no espaço dos objetivos ICC vs. PPA.

Percebe-se, portanto, que o resultado final da otimização (conjunto Pareto) é fortemente dependente da expressão analítica, usada no método de fluxo de potência para se determinar as tensões e correntes do sistema elétrico, no problema PRec-SDPEE.

A Tabela 7.7 reúne as soluções Pareto-ótima relativas ao sistema #3, o menor dentre os sistemas de teste. Ambos as formulações do MVRD (AP-DP e AP-CP) fizeram a busca exaustiva identificar o mesmo conjunto de soluções eficientes.

Tabela 7.6 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #2 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando o MVRD-AP-CP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (HUANG, 2002) para a versão "multiobjetivo" do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro.

Solução	Chaves Abertas					Funções Objetivo				Solução	Chaves Abertas					Funções Objetivo			
	S1	S2	S3	S4	S5	PPA(kW)	IDT	ICC	NM		S1	S2	S3	S4	S5	PPA(kW)	IDT	ICC	NM
1	13	20	59	62	70	99.6735	0.0133	0.2173	8	**28**	14	21	59	63	70	106.9591	0.0127	0.1945	8
2	13	20	59	63	70	100.7195	0.0133	0.2135	8	**29**	14	21	59	65	70	119.6241	0.0123	0.1828	8
3	13	20	59	65	70	116.5636	0.0123	0.1924	8	**30**	14	21	59	70	74	125.3567	0.0128	0.1805	6
4	13	20	59	70	74	123.0714	0.0128	0.1877	6	**31**	14	59	62	70	71	104.4965	0.0144	0.2342	6
5	13	21	59	62	70	99.6629	0.0133	0.2173	8	**32**	14	59	63	70	71	105.0487	0.0142	0.2293	6
6	13	21	59	63	70	100.7099	0.0132	0.2136	8	**33**	14	59	65	70	71	118.1894	0.0128	0.2001	6
7	13	21	59	65	70	116.5612	0.0123	0.1924	8	**34**	14	59	70	71	74	124.2021	0.0132	0.1933	4
8	13	21	59	70	74	123.0707	0.0127	0.1877	6	**35**	17	46	59	70	74	133.2759	0.0158	0.1760	6
9	13	59	65	70	71	118.1852	0.0129	0.2004	6	**36**	18	26	43	59	72	136.7585	0.0178	0.1745	8
10	13	59	70	71	74	124.1743	0.0132	0.1937	4	**37**	18	26	59	70	72	134.0463	0.0165	0.1755	6
11	14	16	59	63	70	116.9634	0.0156	0.1918	8	**38**	18	27	43	59	72	135.4212	0.0171	0.1747	8
12	14	16	59	65	70	126.2977	0.0143	0.1798	8	**39**	18	27	46	59	70	134.5805	0.0164	0.1752	8
13	14	16	59	70	74	131.2090	0.0146	0.1774	6	**40**	18	27	59	70	72	132.6620	0.0158	0.1756	6
14	14	17	27	59	70	130.4756	0.0148	0.1773	8	**41**	18	43	59	65	72	129.4040	0.0163	0.1774	8
15	14	17	59	63	70	113.6739	0.0148	0.1919	8	**42**	18	43	59	72	74	134.1433	0.0165	0.1750	6
16	14	17	59	65	70	123.9570	0.0137	0.1799	8	**43**	18	46	59	65	70	128.5366	0.0156	0.1779	8
17	14	17	59	70	74	129.1022	0.0140	0.1776	6	**44**	18	46	59	70	74	133.2975	0.0158	0.1756	6
18	14	18	27	59	70	128.3896	0.0142	0.1783	8	**45**	18	59	62	70	72	116.8439	0.0165	0.1927	6
19	14	18	59	63	70	110.0358	0.0140	0.1927	8	**46**	18	59	63	70	72	116.9415	0.0163	0.1903	6
20	14	18	59	65	70	121.5088	0.0131	0.1809	8	**47**	18	59	65	70	72	126.3968	0.0149	0.1783	6
21	14	18	59	70	74	126.9473	0.0135	0.1786	6	**48**	18	59	70	72	74	131.3368	0.0151	0.1760	4
22	14	20	59	62	70	106.4344	0.0130	0.1968	8	**49**	19	59	62	70	72	116.8942	0.0165	0.1931	6
23	14	20	59	63	70	107.0049	0.0130	0.1944	8	**50**	19	59	63	70	72	117.0126	0.0163	0.1907	6
24	14	20	59	65	70	119.6503	0.0124	0.1827	8	**51**	59	65	70	71	72	130.4130	0.0164	0.1901	4
25	14	20	59	70	74	125.3781	0.0129	0.1804	6	**52**	59	70	71	72	74	134.0666	0.0163	0.1848	2
26	14	21	27	59	70	126.8681	0.0136	0.1801	8	**53**	70	71	72	73	74	225.0028	0.0262	0.2289	0
27	14	21	59	62	70	106.3857	0.0128	0.1968	8										

Tabela 7.7 – Soluções Pareto-ótima para o sistema #3 identificadas por busca exaustiva (força bruta) usando MVRD-AP-DP e MVRD-AP-CP. A configuração inicial da rede está destacada em cinza claro e a configuração ótima encontrada em (ZHU, 2002) para a versão mono-objetivo do PRec-SDPEE está realçada em cinza escuro.

Solução	Chaves Abertas			Funções Objetivo			
	S1	S2	S3	PPA(kW)	IDT	ICC	NM
1	4	9	11	483.8689	0.0125	0.2616	2
2	4	11	13	511.4355	0.0132	0.2601	0
3	6	9	11	466.1267	0.0115	0.2611	4
4	6	11	13	493.1542	0.0121	0.2597	2

Aos maiores sistemas (#4 e #5) não foi aplicada a busca exaustiva. A FPO foi estimada por meio de uma execução estendida do EA-DFR para 20 milhões de avaliações e uma população composta de 2000 indivíduos, que demandou cerca de quatro horas para a plataforma computacional usada (Processador Intel Core i7-2600 3.4Ghz RAM 4GB). Acredita-se que esses ajustes para o AE sejam suficientes dadas as características do espaço de busca descritas na Tabela 2.1. A FPO resultante para o sistema #4 é composta de 303 soluções eficientes se o **MVRD-AP-CP** for usado. Essas soluções não são enumeradas no texto por razões de praticidade.

Conhecendo-se a FPO de todos os sistemas de teste, é possível realizar uma avaliação mais apropriada do desempenho do AE ao adotar os operadores sugeridos para resolver o problema PRes-SDPEE. Para validar a codificação proposta, três critérios foram escolhidos: tempo de processamento (CPU), cardinalidade da primeira fronteira e quantidade de soluções eficientes encontradas. Os valores indicados na Tabela 7.8 correspondem a uma média para cinco execuções efetuadas para cada tipo de codificação. Todos os casos foram tratados com um AE acoplado ao **MVRD-AP-DP** e ajustado para taxas de cruzamento e mutação iguais a 0,98 e 0,05, respectivamente. Foi usada uma população de 20 indivíduos e 60 gerações para os sistemas #1, #2 e #4. No caso do sistema #3, esses parâmetros foram definidos para 10 e 30. A Tabela 7.8 apresenta os resultados para os dois primeiros sistemas e a Tabela 7.9 para os dois sistemas seguintes.

Tabela 7.8 – Comparação dos desempenhos alcançados pelo AE para diferentes esquemas de codificação ao otimizar os Sistemas #1 e #2.

Lista de Referências		Sistema #1				Sistema #2			
Codificação	**Comprimento do Cromossomo**	**Tempo médio de CPU (s)**	**Cardinalidade Média da Fronteira #1**	**Número médio de soluções da FPO encontradas**	**Percentual médio da FPO (%)**	**Tempo médio de CPU (s)**	**Cardinalidade Média da Fronteira #1**	**Número médio de soluções da FPO encontradas**	**Percentual médio da FPO (%)**
Binária Clássica (ZHU, 2002)	N_W	17,5	13,8	12,2	32,1	37,8	13,8	8,2	16,4
Inteira (CARRENO *et al.*, 2008)	N_L	18,5	11,4	3,8	10	40,2	11,4	2,0	4,0
Binária com subgrupos (MILANI e HAGHIFAM, 2011)	N_W	22,5	16,2	15	39,5	50,6	16,4	6,2	12,4
Ciclos fundamentais e elitismo local (MENDOZA *et al.*, 2006)	N_O	17,2	9,4	6,4	16,8	35,9	12,4	3,4	6,8
Ciclos fundamentais sem elitismo local (MENDOZA *et al.*, 2006)	N_O	16,3	12,8	7,8	20,5	32,3	13,8	6,6	13,2
Proposto	N_W	16,4	15,0	12,2	32,1	36,3	14,2	8,2	16,4

Tabela 7.9 – Comparação dos desempenhos alcançados pelo AE para diferentes esquemas de codificação ao otimizar os Sistemas #3 e #4.

Lista de Referências		Sistema #3				Sistema #4			
Codificação	**Comprimento do Cromossomo**	**Tempo médio de CPU (s)**	**Cardinalidade Média da Fronteira #1**	**Número médio de soluções da FPO encontradas**	**Percentual médio da FPO (%)**	**Tempo médio de CPU (s)**	**Cardinalidade Média da Fronteira #1**	**Número médio de soluções da FPO encontradas**	**Percentual médio da FPO (%)**
Binária Clássica (ZHU, 2002)	N_W	2,0	3,4	3,4	85,0	44,1	15,2	4,1	1,4
Inteira (CARRENO *et al.*, 2008)	N_L	2,1	2,2	2,0	50,0	47,8	9,0	2,2	0,7
Binária com subgrupos (MILANI e HAGHIFAM, 2011)	N_W	2,4	3,2	3,2	80,0	69,9	13,3	3,5	1,2
Ciclos fundamentais e elitismo local (MENDOZA *et al.*, 2006)	N_O	2,0	1,6	1,6	40,0	41,7	10,9	1,5	0,5
Ciclos fundamentais sem elitismo local (MENDOZA *et al.*, 2006)	N_O	1,9	2,4	2,2	55,0	38,1	12,6	2,8	0,9
Proposto	N_W	1,9	3,6	3,6	90,0	42,2	16,2	5,4	1,8

7.3.3 Tratamento de Incertezas na Demanda (PRec-SDPEE)

Os experimentos que tratam das incertezas na demanda de potência foram realizados com o sistema #2. Eles foram divididos em três casos. No Caso I, os valores de demanda real e reativa originais sofrem uma variação em torno de 8%. As Figuras 7.8(a-b) mostram o alcance das variações em cada uma das barras do sistema #2. No Caso II, admitem-se perturbações isoladas em determinadas barras (Figuras 7.9(a-b)). Finalmente, curvas de demanda baseadas em (SHENKMAN, 1990) são usadas para descrever o comportamento sazonal das cargas classificadas em cinco perfis no Caso III. Esses perfis foram atribuídos a cada barra do alimentador conforme a definição de faixa de valores correspondente e o valor nominal da carga definido no sistema original (BARAN e WU, 1989). Incertezas foram incorporadas com a especificação de intervalos para cada barra conforme o valor mínimo e o valor de pico encontrado pela associação entre o valor nominal e a curva de carga correspondente Figuras 7.10(a-b).

É importante mencionar que as incertezas para os casos II e III são as mais significativas e estão relacionadas com oscilações maiores na demanda das cargas. Nas simulações foi empregado o MOEA-DFR com os seguintes ajustes: tamanho da população igual a 60, quantidade máxima de gerações igual a 30, probabilidade de cruzamento de 98% e taxa de mutação de 5%.

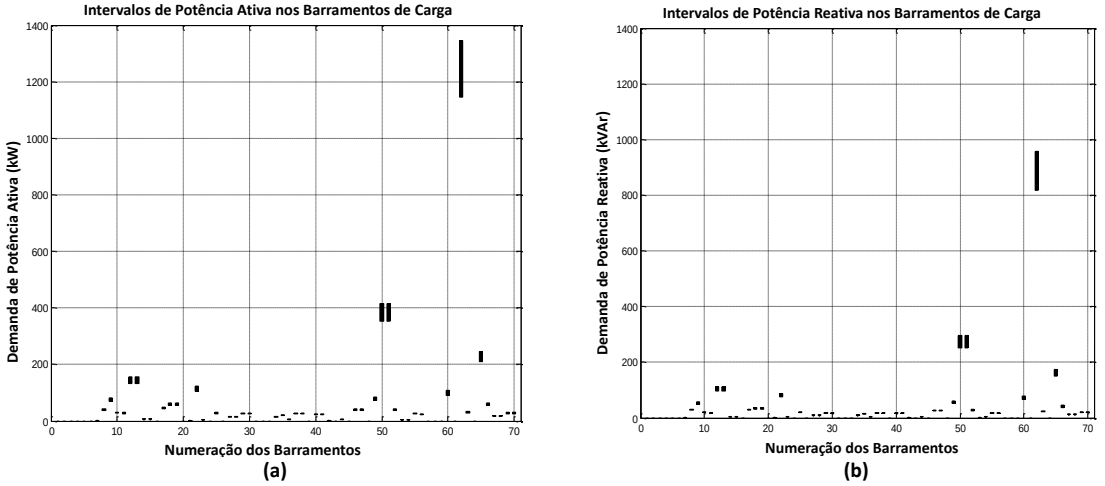

Figura 7.8 – Faixas de variação consideradas para as demandas real e reativa nas barras do sistema #2 (Caso I).

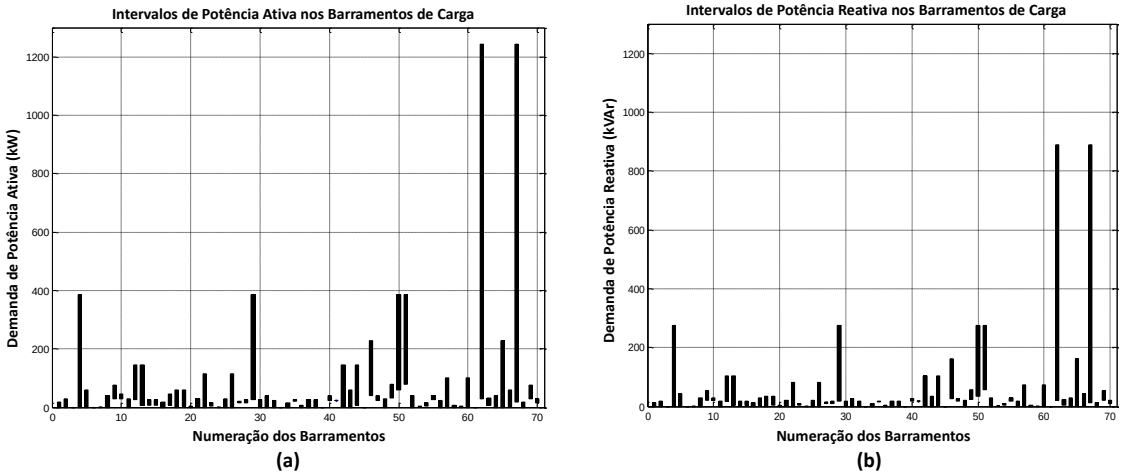

Figura 7.9 – Faixas de variação consideradas para as demandas real e reativa nas barras do sistema #2 (Caso II).

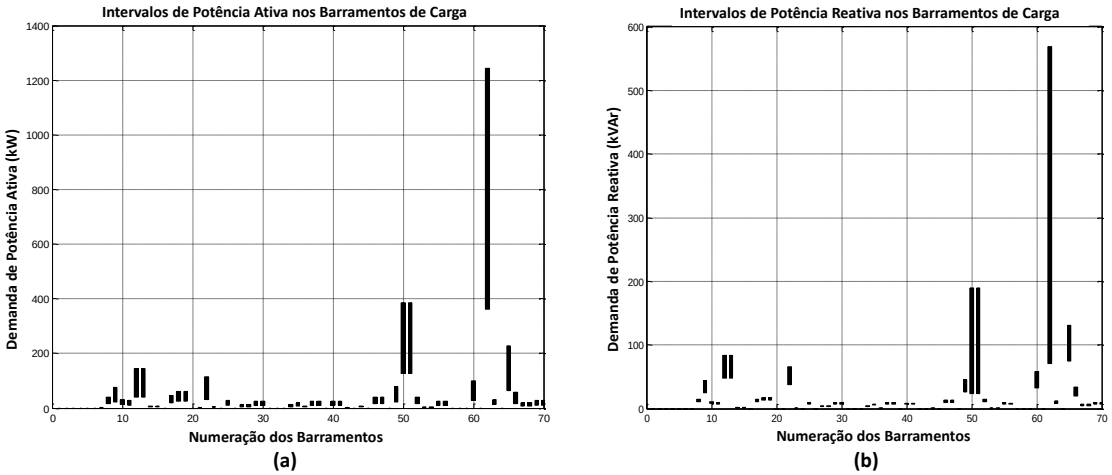

Figura 7.10 – Faixas de variação consideradas para as demandas real e reativa nas barras do sistema #2 (Caso III).

Caso I: Na Tabela 7.10, a primeira e a segunda coluna contém os resultados obtidos em (HUANG, 2002) e pelo MOEA-DFR, respectivamente, para o sistema #2 livre de incertezas. Constata-se que as configurações ditas eficientes são idênticas, o que valida o algoritmo para a situação básica. A configuração inicial do sistema é a mesma assumida em (HUANG, 2002). É importante notar que embora a formulação proposta naquele trabalho fosse apresentada na forma multiobjetivo, o cálculo do mérito das soluções foi feito por meio de ponderação de objetivos, o que conduz à definição de um ótimo e não de um conjunto de soluções eficientes. O MOEA gera uma fronteira na qual consta a solução de Huang. Nas duas últimas colunas da Tabela 7.10 estão os intervalos de valores referentes a cada um dos critérios adotados no modelo matemático para a solução de referência (Huang) avaliada pelo MOEA intervalar e para outra solução dentre aquelas identificadas por esse algoritmo MOEA intervalar quando incertezas são adicionadas ao modelo. Neste caso, as duas soluções são não-dominadas de acordo com a Definição 6 apresentada no Capítulo 5. Portanto, dadas as incertezas do Caso I, as soluções podem ser utilizadas na situação em que há incertezas de demanda de até 8%. Diferentemente de outros métodos, o MOEA intervalar admite incertezas na modelagem para que as soluções encontradas tenham maior robustez em termos de garantia de atendimento mínimo aos critérios de otimização contemplados no modelo matemático.

Tabela 7.10 – Soluções ótimas para o sistema #2. As duas últimas colunas referem-se à consideração de 8% de incerteza para todas as cargas.

Critério ou Parâmetro	Solução de referência encontrada em (HUANG, 2002)	Solução do MOEA	Solução de referência considerando os efeitos de Incertezas	Solução da versão intervalar do MOEA
PPA (kW)	113,406	113,406	[96,5678;134.125]	[96,592;134,1582]
IDT	0,0129	0,0129	[0,011851;0.013959]	[0,011804;0,013905]
ICC	0,1860	0,1860	[0,17297;0.20342]	[0,17268;0,20308]
NM	4	4	4	4
Mínima Tensão de Barra (p.u.)	0,9288	0,9288	[0,92288;0,93471]	[0,92288;0,93471]
Máxima Corrente de Linha (p.u.)	0,9203	0,9203	[0,84664;0,99388]	[0,84664;0,99388]
Configuração (chaves abertas)	{13, 59, 70, 71, 74}	{13, 59, 70, 71, 74}	{13, 59, 70, 71, 74}	{14, 59, 70, 71, 74}

Caso II: Admitir o mesmo grau de incerteza para todas as cargas é uma suposição ainda inadequada, visto que cada barra tem um perfil de demanda diferente. Desse modo, assumem-se diferentes níveis de incerteza para o Caso II. As faixas de variação das demandas são ilustradas nas Figuras 7.9(a-b). Três cenários são idealizados: (i) cenário original como descrito em (HUANG, 2002), (ii) cenário com perturbações em que as incertezas levam os valores de carga ao limite oposto dentro da faixa estipulada para o cenário original, e (iii) cenário que considera os intervalos de cada barra mostrados nas Figuras 7.9(a-b) (cenário intervalar). Os cenários (i) e (ii) foram resolvidos pelo MOEA e o cenário (iii) pelo MOEA intervalar. As fronteiras obtidas nos experimentos foram formadas a partir de 10 execuções dos respectivos algoritmos, cujos parâmetros foram ajustados para os valores previamente discutidos. A fronteira final referente a cada cenário foi, portanto, composta por todas as soluções não-dominadas pertencentes à primeira fronteira identificada ao final de cada execução isolada. As fronteiras obtidas para cada um dos três cenários são discriminadas na Tabela 7.11 de acordo com o critério número de chaveamentos (NM). O MOEA encontrou as fronteiras $\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_O}^{\#1}$ e $\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_P}^{\#1}$ contendo 40 e 65 soluções eficientes, respectivamente, para o primeiro e segundo cenários. A interseção entre essas fronteiras ($\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_O}^{\#1} \cap \boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_P}^{\#1}$) contém apenas a solução inicial, visto que o quarto critério da formulação (NM) acaba retendo-a visto que nenhuma outra tem quantidade de chaveamentos inferior a zero. Da comparação entre as fronteiras, pode-se depreender que todas as soluções de $\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_O}^{\#1}$ são configurações inviáveis ou subótimas para o cenário perturbado. Para obter configurações válidas (e robustas) para o cenário original e para o cenário perturbado, o MOEA intervalar deve resolver o terceiro cenário que considera margens de incerteza suficientemente amplas para englobar as situações existentes nos dois cenários anteriores. O MOEA intervalar identificou uma fronteira $\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_I}^{\#1}$ com 75 soluções viáveis, das quais 14 são compartilhadas com a fronteira $\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_O}^{\#1}$ e quatro delas são coincidentes com a fronteira $\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_P}^{\#1}$. Como esperado, apenas a solução inicial está presente na interseção entre as três fronteiras.

Tabela 7.11 – A melhor fronteira encontrada pelo MOEA e pelo MOEA intervalar nos três cenários: cenário original descrito em (HUANG, 2002), cenário perturbado e cenário intervalar.

Número de Chaveamentos	Cenário Original (40 soluções)	Cenário c/ Perturbações (65 soluções)	Cenário Intervalar (75 soluções)
0	1*	1*	1*
2	1	11	3
4	4 (inclusa a solução de Huang)	20**	11**
6	15	22	30
8	19	11	30

* Solução inicial.
** A solução de Huang foi descartada devido ao critério de dominância.

É válido notar que a solução prevista em (HUANG, 2002) não consta nas fronteiras $\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_P}^{\#1}$ e $\boldsymbol{\mathcal{F}}_{r_I}^{\#1}$. Sendo assim, ela não é indicada para o pior caso de incerteza contemplado no segundo cenário. A Tabela 7.12 mostra que esta solução é subótima no cenário com perturbações, porém ela se mantém viável dentro das restrições do problema. Não se pode dar garantias de factibilidade para as outras possibilidades de incertezas dentro das faixas de valores previstas nas Figuras 7.9(a-b). Por outro lado, as soluções providas pelo MOEA intervalar são robustas o

suficiente para se conservarem viáveis nas situações de incerteza, desde que contempladas no modelo, mais adversas.

Tabela 7.12 – Comparação de desempenho entre a configuração encontrada por Huang e a configuração identificada pelo MOEA intervalar. Os melhores valores de objetivo estão destacados na cor cinza.

Configuração	Cenário Original (Cargas Nominais)					Cenário Perturbado (Cargas com Incertezas)				
	PPA (kW)	IDT	ICC	Mínima Tensão de Barra (p.u.)	Máxima Corrente de Linha (p.u.)	PPA (kW)	IDT	ICC	Mínima Tensão de Barra (p.u.)	Máxima Corrente de Linha (p.u.)
Solução de Huang {13, 59, 70, 71, 74}	113,406	0,0129	0,1860	0,9288	0,9203	73,219	0,0169	0,1759	0,9582	0,9159
Solução identificada pelo MOEA intervalar {13, 20, 59, 65, 70}	107,962	0,0120	0,1872	0,9322	0,9203	55,902	0,0107	0,1752	0,9745	0,9159

Caso III: Neste caso, as cargas com seus valores nominais dados em (HUANG, 2002) são admitidas variarem conforme as curvas de demanda descritas por Shenkman (SHENKMAN, 1990) para um período de 24 horas. Cada uma das seis classes foi delimitada por intervalos para fins de classificação. Cargas abaixo de 5 kVA são consideradas do tipo iluminação pública. As cargas do tipo rural, residencial urbana, comercial e industrial leve correspondem aos intervalos de demanda 5-15 kVA, 15-100 kVA, 100-400 kVA e 400-800 kVA, respectivamente. Potências aparentes maiores do que 800 kVA estão associadas ao tipo de carga industrial pesada. Uma solução encontrada pelo MOEA intervalar é comparada com as configurações original e de Huang na Tabela 7.13 para sete horas distintas ao longo do dia. A Figura 7.11 claramente demonstra que a solução dada pelo MOEA intervalar supera as demais soluções.

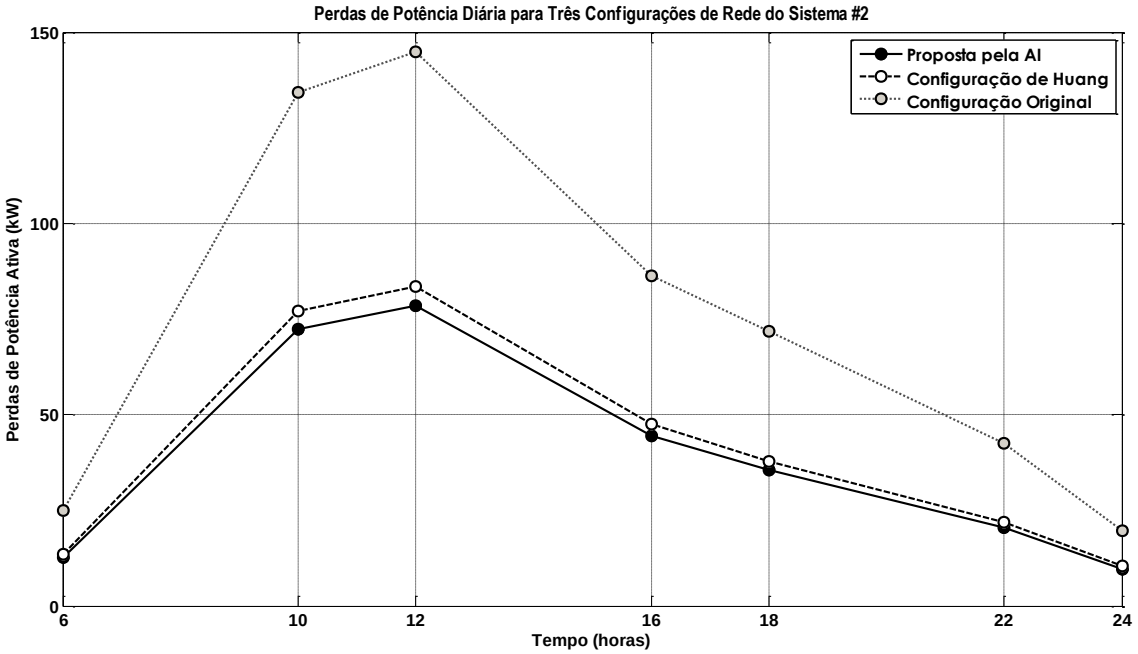

Figura 7.11 – Perdas de potência ativa para as três configurações: original, a de Huang e a indicada pelo MOEA intervalar.

A Tabela 7.13 provê maiores detalhes a respeito do desempenho das configurações em questão. As perdas de potência cumulativas para o período diário em relação a cada configuração são 524,3 (original, 100%), 291,7 (Huang, 55,64%) e 273,6 (MOEA intervalar, 52,19%). Embora o número de manobras esteja contemplado na formulação multiobjetivo, deve-se ter em mente que configurações obtidas com um maior número de manobras podem ser interessantes no médio prazo, uma vez que as manobras subsequentes necessárias podem

ser poucas. Neste exemplo, a configuração identificada pelo MOEA intervalar é obtida com 8 manobras. Entretanto, não há necessidade de se efetuar manobras adicionais se as variações diárias nas cargas não forem alteradas significativamente.

Tabela 7.13 – Detalhamento do desempenho obtido pelas três configurações (O: configuração original, H: configuração de Huang, I: configuração identificada pelo MOEA intervalar) nos sete momentos do dia em termos dos critérios PPA, IDT, ICC e Mínima Tensão de Barra (MTB).

Critério	Hora do dia											
	6h			10h			12h			16h		
	O	H	I	O	H	I	O	H	I	O	H	I
PPA	24,9296	13,4737	12,6627	134,2435	77,1615	72,3263	144,8284	83,4442	78,4205	86,2404	47,5188	44,5449
IDT	0,0095	0,0047	0,0045	0,0200	0,0095	0,0089	0,0206	0,0097	0,0091	0,0167	0,0081	0,0075
ICC	0,0832	0,0748	0,0743	0,1728	0,1452	0,1452	0,1773	0,1481	0,1480	0,1425	0,1224	0,1220
MTB	0,9701	0,9788	0,9802	0,9272	0,9437	0,9467	0,9242	0,9413	0,9443	0,9425	0,9564	0,9589

Tabela 7.13 (cont.) – Detalhamento do desempenho obtido pelas três configurações (O: configuração original, H: configuração de Huang, I: configuração identificada pelo MOEA intervalar) nos sete momentos do dia em termos dos critérios PPA, IDT, ICC e Mínima Tensão de Barra (MTB).

Critério	Hora do dia								
	18h			22h			24h		
	O	H	I	O	H	I	O	H	I
PPA	71,7563	37,8639	35,4880	42,6348	21,8797	20,4509	19,6122	10,3552	9,7072
IDT	0,0159	0,0077	0,0073	0,0131	0,0066	0,0062	0,0086	0,0043	0,0041
ICC	0,1343	0,1181	0,1173	0,1133	0,1043	0,1033	0,0749	0,0680	0,0675
MTB	0,9485	0,9624	0,9646	0,9623	0,9739	0,9758	0,9738	0,9818	0,9831

7.3.4 Estimativa das Tensões de Barra (PRec-SDPEE)

A primeira parte dos experimentos (casos I e II) foi realizada com o sistema #1. Essa rede tem linhas cuja razão R/X varia de 0,3 a 3,0 e demanda de potência nominal entre 10 e 420 MW. Algumas barras não possuem carga. Em todos os casos avaliados, a população inicial do AG foi preenchida com indivíduos aleatórios. O modelo matemático usado levou em consideração apenas o critério de perdas ativas (PPA).

Caso I: As cargas são mantidas fixas com seus respectivos valores nominais como apresentados em (WU *et al.*, 2010). Uma comparação entre os valores de tensão obtidos pelo MVRD e a estimativa nebulosa é feita. As redes NFN são previamente treinadas com 1000 amostras geradas para o terceiro mapeamento com 20% de variação da carga em torno dos valores nominais. Da Tabela 7.14, percebe-se que ambas as abordagens puras identificam a solução esperada, destacada em cinza. A combinação entre os dois métodos conseguiu atingir um valor equivalente a 87% do tempo usado pelo MVRD na média entre 30 execuções.

Tabela 7.14 – Comparação entre as diferentes combinações dos métodos de fluxo de potência (MVRD) e estimativa nebulosa (EN) para realizar a avaliação das configurações durante o processo evolutivo do AE.

Estratégia para Avaliação das Soluções	Npop	$Nger_{max}$	Configuração	Tempo (%)
MVRD	30	30	10-13-20-33-37	100 (16,0s)
EN	30	30	10-13-20-33-37	81,9
0,66 MVRD + 0,33 EN	30	30	10-13-20-33-37	90,1
0,5 MVRD + 0,5 EN	30	30	10-13-20-33-37	87,8
0,33 MVRD + 0,66 EN	30	30	10-13-20-33-37	86,9
0,66 EN + 0,33 MVRD	30	30	10-13-20-33-37	87,3
0,5 EN + 0,5 MVRD	30	30	10-13-20-33-37	87,4
0,33 EN + 0,66 MVRD	30	30	10-13-20-33-37	90.5

Caso II: Cada carga varia de acordo com a sua curva de demanda acrescida de uma parcela de 10% do valor nominal, obtida de uma função de distribuição de probabilidades do tipo Gaussiana, e que representa a incerteza inerente aos métodos estatísticos que geram tais curvas. As cinco classes de carga já foram discutidas no Capítulo 4 e foram distribuídas igual e aleatoriamente por entre as barras do sistema #1. Essas atribuições de classe às cargas foram definidas e mantidas para a realização do Caso III. Tomando a variação diária (0-23h) como o intervalo de simulação a ser considerado e um limiar de disparo de 20%, foram identificados dois instantes de reconfiguração oportuna que podem ser vistos na Figura 7.12. As setas realçam esses instantes.

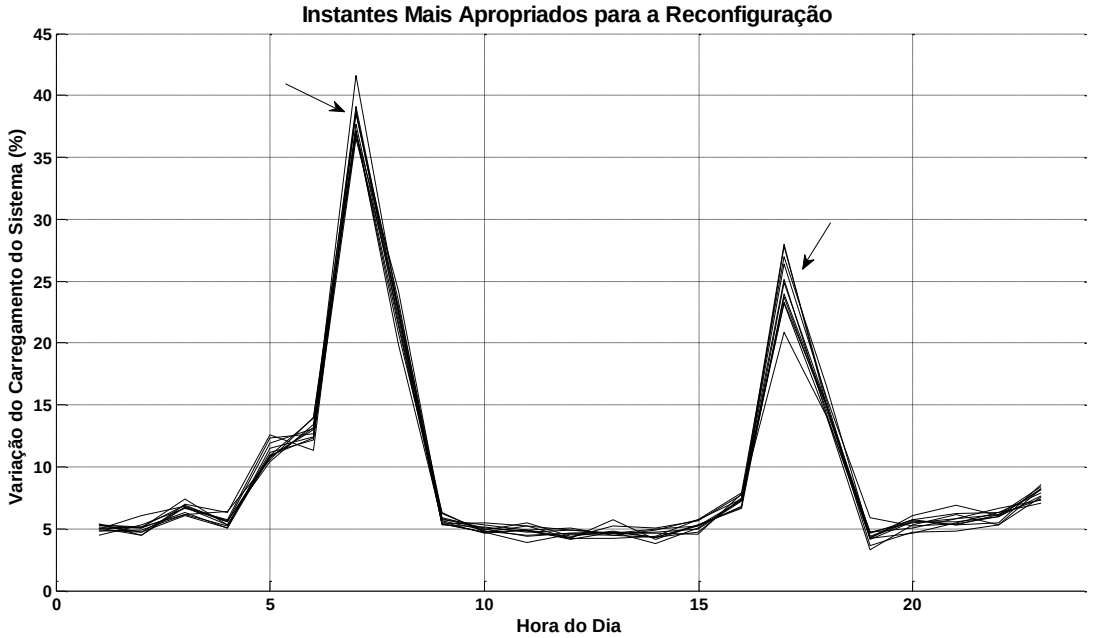

Figura 7.12 – Variação diária do carregamento no sistema #1 para 20 simulações de valores nas cargas em torno de 20% do especificado.

O AG acoplado ao MVRD foi executado de modo preliminar para cada um dos instantes com o intuito de identificar as soluções ótimas referentes ao problema de minimização de perdas (problema mono-objetivo). Foi adotada uma população com 30 indivíduos a ser evoluída por 30 gerações. Os ótimos encontrados para os dois instantes identificados na Figura 7.12 são mostrados na Tabela 7.15. As chaves cujos estados distinguem-se do ótimo encontrado para o

Caso I estão destacadas em negrito. Portanto, sugere-se que a chave 37 seja fechada e a chave 36 aberta às oito horas. Às 18 horas, sugere-se ainda que a chave 33 seja fechada e a chave 30 aberta.

Tabela 7.15 – Soluções ótimas do sistema #1 identificadas para os dois instantes de reconfiguração por meio da execução do AG acoplado ao MVRD.

Hora do dia (h)	Solução Ótima (chaves abertas)
8	10-13-20-33-**36**
18	10-13-20-**30**-**36**
(referência)	10-13-20-33-37

Na Tabela 7.16, uma comparação entre AG+MVRD e AG+EN é relizada. As tensões das barras são inferidas para um período de 24 horas de variação de carga. Os três tipos de mapeamento identificados na tabela como Map1, Map2 e Map3, são avaliados em termos da taxa de convergência. A taxa de convergência foi considerada aceitável para a aplicação pretendida. Em execuções mal sucedidas, as melhores soluções encontradas divergiam em até duas manobras. A terceira estratégia de mapeamento foi a mais promissora em todos os cenários.

Tabela 7.16 – Desempenho da Estimativa Nebulosa (EN) para o sistema #1 (30 tentativas admitindo as variações diárias nas cargas e os três mapeamentos sugeridos).

Estratégia	Hora (h)	Solução encontrada (chaves abertas)	Taxa de Convergência (%)
EN (Map1)	8	7-11-20-33-36	91
EN (Map1)	18	7-11-20-30-37	89
EN (Map2)	8	10-11-20-33-37	92
EN (Map2)	18	10-11-20-33-36	89
EN (Map3)	8	**10-13-20-33-36**	86
EN (Map3)	18	**10-13-20-30-36**	83

Caso III: Os sistemas #2 e #4 são incluídos na análise. O tempo de processamento é comparado para os três sistemas, e os valores são mostrados na Tabela 7.17. O tamanho da população do AG foi definido para 30 indivíduos e o número de gerações para 30 em todos os testes. A taxa de convergência indica o percentual de identificação da solução ótima para 30 tentativas. Na Tabela 7.17, nota-se uma tendência de redução do tempo usado pelo AG ao resolver SDPEE maiores quando a estimativa nebulosa é acoplada. A taxa de convergência também melhora à medida que a predição de carregamento é considerada nos períodos de 24-horas seguintes, como mostra a Figura 7.13.

Tabela 7.17 – Comparação de desempenho da estimativa nebulosa (EN) para 3 sistemas dentro de um intervalo de 24-horas.

Sistema de Testes	MVRD TPM* (s)	EN TPM (s)	Solução Encontrada (chaves abertas)	Taxa de Convergência (%)
Sistema #1	16,0 (100%)	13,1 (82%)	10-13-20-33-36	83
Sistema #2	27,5 (100%)	22,2 (81%)	16-20-31-64-69	86
Sistema #4	71,0 (100%)	54,6 (77%)	3-5-15-19-21-31-34-37-50-64-74-83-87	88

*TPM: Tempo de Processamento Médio para 30 tentativas.

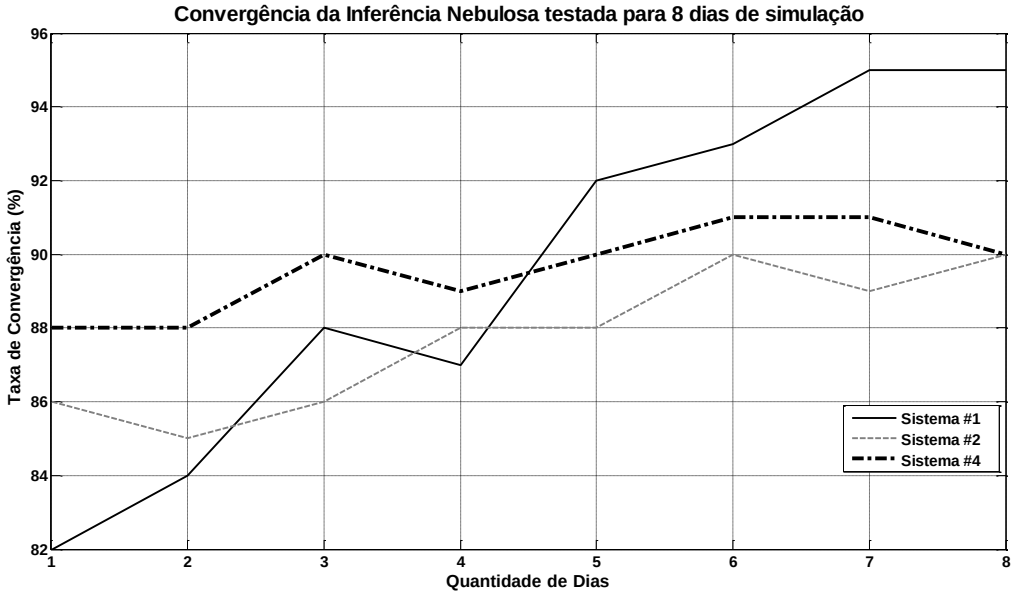

Figura 7.13 – Taxas de convergência para os 3 sistemas avaliados que se referem a oito dias de simulação.

7.4 Testes Computacionais para o Problema de Restauração

A seguir, serão apresentados os testes computacionais para casos de restauração.

7.4.1 Ocorrência de Faltas Não-Superpostas (PRes-SDPEE)

Para os testes com o problema de restauração foram investigados dois cenários em SDPEEs diferentes. No primeiro cenário (A), os sistemas #1 e #3 são usados. Faltas idênticas àquelas criadas em (SINGH *et al.*, 2009) são provocadas para fins de comparação. No cenário B, o sistema #5 é empregado para uma situação em que os tipos de chaves são levados em consideração no processo de otimização do PRes-SDPEE.

7.4.1.1 Cenário A

A ocorrência de faltas simples foi investigada nesse cenário em dois sistemas de testes (Figura 7.14). O sistema #1 sofreu uma falta no vão situado entre os nós 7 e 8 que ocasionou a interrupção no fornecimento de energia a partir da barra 8, incluindo, portanto, todas as demais barras à jusante. No cenário A, todas as chaves são manuais. O algoritmo de otimização retornou 19 soluções dentre as quais a que indica as chaves abertas: 7_8, 8_21, 9_15, 18_33 e 27_28.

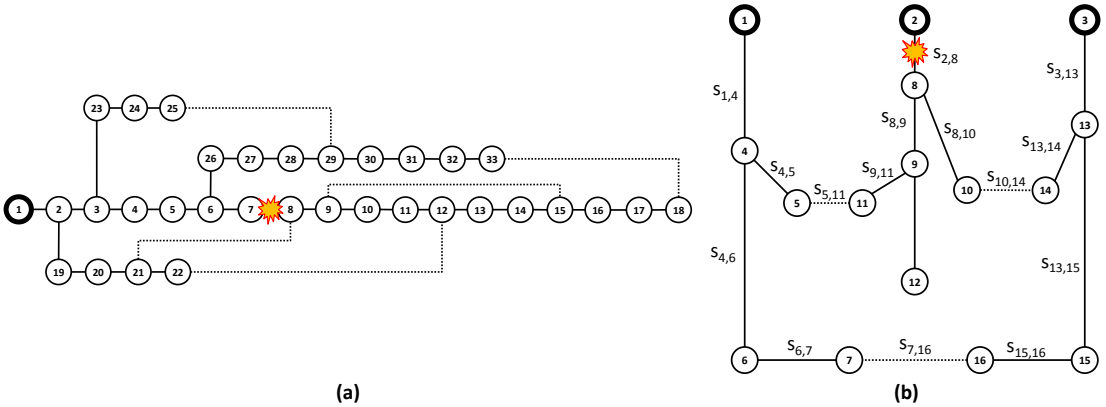

Figura 7.14 – Ocorrência de falta (a) na interconexão 7_8 do sistema #1 e (b) no alimentador 2 do sistema #3.

Já no sistema #3, foi simulada uma falta no início do alimentador #2, entre os nós 2 e 8. Uma das soluções eficientes encontrada pelo algoritmo coincide com aquela identificada em (SINGH *et al.*, 2009), conforme a Tabela 7.18.

Tabela 7.18 – Configurações para a restauração do sistema #3 após a ocorrência de uma falta simples no alimentador #2.

Referência	Chaves abertas	PCD	ICMC	IDT
Singh (2009)	s2_8, s8_9, s7_16	0,0	0,6	4,6%
Lin (1998)	s2_8, s8_10, s7_16	0,0	1,1	5,2%
Proposto	s2_8, s8_9, s7_16	0,0	0,6	4,6%

7.4.1.2 Cenário B

O Quadro 7.1 apresenta a relação das chaves telecomandadas para o sistema #5 que possui 136 barras, 156 linhas chaveáveis, estando 21 delas abertas (vide Tabela 2.1). Admite-se que, inicialmente, a rede opere em condições normais e o máximo desvio de tensão presente seja de 6,56%. Duas faltas são então provocadas. Os vãos 29_32 e 57_61 são desconectados causando a desenergização de barras, identificados na Figura 7.15 pelas regiões contornadas. A partir daí, um processo de restauração é realizado para restabelecer o maior número de cargas possível. As melhores configurações são aquelas que minimizam os critérios apresentados na Seção 2.3.3, com $C_m = 5$ e $C_a = 0{,}1$. A relação entre os custos C_m e C_a foi definida com base em (ZIDAN e EL-SAADANY, 2012).

Quadro 7.1 – Relação de chaves telecomandadas para o sistema #5.

Interconexões Chaveáveis	Estado inicial
33_61	Aberta
46_223	Aberta
59_145	Aberta
65_147	Aberta
73_206	Aberta
81_083	Fechada
125_219	Aberta
131_223	Aberta
211_214	Fechada

Foram encontradas 22 soluções de restauração que abrangem opções com IDT entre 4,3% e 7,08%, operações em chaves manuais que variam de 0 a 9 e $ICMC$ entre 0,2 e 45,3. Todas as soluções levam à restauração das cargas da rede e não violam as restrições técnicas. Duas delas são apresentadas na Tabela 7.19 a título de comparação. Na Tabela 7.19, a solução #1 pode ser adotada imediatamente, uma vez que o plano envolve apenas as chaves telecomandadas. Ela é ideal para reestabelecer o serviço no menor tempo e sem custo de movimentação de equipes. Porém, o IDT é de 7,08%, o pior dentre todas as demais opções. Já a solução #2 demanda nove manobras em chaves manuais, mas apresenta um IDT de 4,3%. A partir do conjunto de soluções encontrado, a concessionária pode realizar um PMR mais adequado aos critérios gerenciais. Se as barras desenergizadas tiverem cargas mais prioritárias, pode-se optar pela solução que reestabeleça o fornecimento de energia. Em seguida, um PMR mais custoso, que implique em melhores condições operativas (ex. menor IDT), pode ser executado sem a restrição de tempo imposta pelo contexto de restauração.

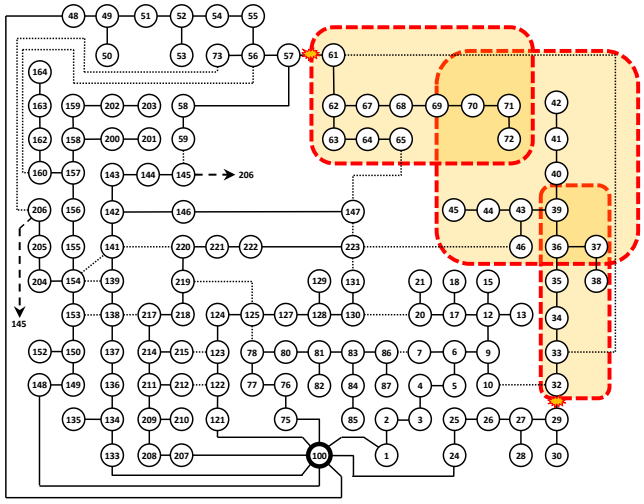

Figura 7.15 – Sistema brasileiro #5 de 136 barras (CARRENO et al., 2008).

Tabela 7.19 – Configurações ótimas identificadas pela otimização para o sistema #5 que sofreu duas faltas.

Solução	Chaves abertas	Manobras Manuais	ICMC	IDT
1	212_122, 215_123, 78_125, 138_153, 29_32, 125_219, 138_217, 139_154, 141_154, 10_32, 141_220, 7_86, 33_61, 160_56, 57_61, 73_206, 20_130, 145_206, 131_223, 59_145, 223_147	0	0,2	7,08%
2	212_122, 215_123, 78_125, 138_153, 29_32, 125_219, 138_217, 139_154, 141_154, 6_7, 155_156, 141_220, 33_61, 142_143, 57_61, 73_206, 145_206, 17_20, 131_223, 223_147, 39_43	9	45,3	4,32%

Foram encontradas, portanto, configurações de rede que minimizam os critérios do modelo matemático visto na Seção 2.2.3 para um cenário de restauração. Os resultados apresentaram bom compromisso entre custo de chaveamento, tempo médio de execução do plano de restauração e desvio máximo de tensão.

7.5 Aplicação de Tomada de Decisão

Com o intuito de verificar a coerência do processo de ToD implementado, foram usadas 40 soluções eficientes obtidas pelo MOEA-DFR aplicado ao PRec-SDPEE para o sistema #5 (Figura 7.5). Os modelos de quantificação direta e de julgamento adotaram a seguinte matriz:

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 1 & 3/2 \\ 3 & 1 & 1 & 3/2 \\ 2 & 2/3 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}$$

Os valores da matriz MC foram escolhidos a título de demonstração. Por eles, percebe-se que foi dada maior importância aos índices IDT e ICC. A configuração inicial do sistema (Figura 7.5) teve a seguinte avaliação em relação aos critérios da otimização: PPA de 320.364 kW, IDT de 0.025 p.u., ICC de 0.702 e NM igual a 0. Os melhores PMRs escolhidos são mostrados na Tabela 7.20. As chaves destacadas em negrito são aquelas que diferem das chaves mantidas abertas na configuração inicial do sistema. Ambas as opções são realizáveis do ponto de vista do sequenciamento. A obtenção de PMRs diferentes para cada método é esperada, uma vez que cada um se baseia em procedimentos de análise dissimilares. Apesar de cada método indicar seu PMR, percebe-se que os objetivos de maior peso (IDT e ICC), em conformidade

com a MC correspondente, têm valores próximos em ambos os casos, o que demonstra coerência para a definição do melhor plano.

Tabela 7.20 – Comparação entre os planos de manobra elegidos pelos métodos de tomada de decisão.

Critério	Quantificação Direta (AHP+ FMCE+GRA)	Modelos de Julgamentos (AHP)
PPA	312,627 kW	287,823 kW
IDT	0,024 p.u	0,023 p.u.
ICC	0,686	0,699
NM	6	4
Chaves abertas	212_122, 215_123, 78_125, 138_153, 138_217, 139_154,215_123, **211_212**, 78_125, 138_153, 125_219, 138_217, 141_154, 10_32, **218_219**, 141_220, 7_86, **156_157**,139_154, 141_154, 10_32, 141_220, 7_86, 33_61, **156_157**, **057_061**, 73_206, 20_130, 145_206, 131_223, 59_145,73_206, 20_130, 145_206, 131_223, 59_145, 65_147, 65_147, 223_147 e 46_223	223_147 e 46_223

A divisão do problema em níveis hierárquicos no Modelo de Julgamentos torna mais fácil o seu entendimento. Entretanto, esse método utiliza uma escala subjetiva de julgamento, o que o torna mais vulnerável ao erro humano. Já o Método de Quantificação Direta alia a escala subjetiva do AHP com a FMCE e a GRA, o que torna a análise quantitativa. A desvantagem desse método é a necessidade de maior número de informações a ser usado.

7.6 Conclusões

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das simulações computacionais criadas para cada uma das propostas de abordagem aos problemas PRec-SDPEE e PRes-SDPEE. O desempenho dos algoritmos de otimização e a coerência das soluções obtidas com diversos resultados já publicados na literatura mostraram ser tais propostas promissoras. Dentre as características positivas verificadas nos algoritmos desenvolvidos, pode-se destacar a eficiência na sondagem do espaço de busca, a capacidade de identificação de soluções robustas, a redução do custo computacional necessário para avaliar uma configuração e a consistência do processo de escolha da solução mais compatível às preferências do decisor. Também Foi notada a contribuição da estimativa nebulosa para o processo de avaliação das configurações de rede propostas pelo AE no que diz respeito ao ganho de desempenho computacional.

8 - Considerações Finais e Trabalhos Futuros

8.1 Conclusões

Os operadores experientes utilizam o processo de lógica baseado em suas experiências empíricas acumuladas diariamente quando lidam com diferentes situações de contingência e controle do sistema. À medida que os sistemas se tornam incrivelmente complexos, até esses operadores mais experientes encontram dificuldades em determinar o procedimento mais adequado para a recuperação de uma área afetada por blecaute, corrigir uma sobrecarga ou atenuar os riscos iminentes de uma situação provocada pela configuração atual da rede. Assim, para novos, inexperientes e mesmo para experientes operadores, uma ferramenta computacional como a que foi desenvolvida nesse trabalho além de servir de instrumento auxiliar para as suas decisões, permite a eles adquirir conhecimento em simulações de casos prováveis. As funcionalidades devem evitar que operações errôneas sejam realizadas e, com isso, levem o SDPEE para uma condição com potencial de dano ou risco de acidentes.

Apesar dos evidentes benefícios, a reconfiguração ainda é uma estratégia pouco adotada pelas concessionárias de energia brasileiras seja pela automação ainda considerada insuficiente, seja por motivos gerenciais conservadores ou por falta de um *software* que auxilie o operador na tomada de decisão. Com isso, a oportunidade de melhoria de uso dos recursos (estruturas e equipamentos) do SDPEE, cujas capacidades são sinalizadas pelas margens residuais, não é aproveitada.

O presente trabalho buscou contribuir nos seguintes tópicos relacionados aos problemas de reconfiguração e restauração em sistemas de distribuição primária:

- formulação matemática mais completa que contemplasse as situações de reconfiguração e restauração;
- codificação eficiente de solução para ser empregada em técnicas evolucionárias;
- operadores genéticos orientados à factibilidade das soluções;
- tratamento de restrições de dois tipos (crítica e não-crítica);
- tratamento de incertezas nas demandas de potência;
- estimativa de condição elétrica do SDPEE que reduzisse o custo computacional de métodos de fluxo de potência convencionais;
- melhorias em modelos matemáticos dos componentes de um SDPEE;
- análise do sequenciamento de manobras;
- procedimento de tomada de decisão acoplado que filtrasse a melhor solução de forma consistente.

A formulação apresentada no Capítulo 2 reuniu os critérios mais empregados até então por trabalhos científicos relevantes da área. Ela foi sugerida de maneira a unificar os problemas de

restauração e reconfiguração, procurando considerar os mais significativos dentre os critérios comuns a esses dois problemas. A proposição da modelagem foi feita também com o intuito de facilitar a concepção dos algoritmos EA-DFR, IMOEA-DFR e MMOPBIL.

O esquema para representação de soluções de rede mostrou ser promissor. Ele foi aliado a um algoritmo construtor de soluções que têm dupla utilidade: interpretar uma solução já existente e construir novas soluções. O esquema proposto foi comparado a outros esquemas, descritos na literatura especializada, e apresentou flexibilidade ao encontrar de modo persistente grande diversidade de ótimos do problema multiobjetivo à custa de pouco espaço em memória e baixa exigência computacional. O algoritmo rotulador é o cerne da codificação que é aplicável tanto aos sistemas com um NPP ou mais.

Ficou constatado por um experimento comparativo extenso que o esquema de codificação implementado EA-DFR obteve êxito em todos os sistemas testados. Os algoritmos evolutivos desenvolvidos para os testes utilizaram os operadores genéticos modificados para os problemas de reconfiguração e restauração. Esses operadores foram elaborados de maneira a evitar a reparação das soluções topologicamente infactíveis e, com isso, evitar o esforço computacional empregado por outras abordagens mais comuns que não impedem a obtenção de soluções inviáveis.

Dentre os esquemas comparados, o proposto nessa tese foi aquele que exibiu o comportamento mais estável para sistemas pequenos, médios, mais e menos carregados. Mesmo não sendo o método mais rápido, o esquema convergiu para grande parte das tentativas realizadas, diferentemente dos demais esquemas comparados. Ele foi capaz de identificar os ótimos globais em um problema mono-objetivo de reconfiguração de um alimentador de 70 barras, bastante conhecido na literatura. Foram encontradas quatro soluções coincidentes com aquelas determinadas pelo método de busca exaustiva, distintas das até então reportadas na literatura científica.

Por se tratarem de problemas do mundo real, o PRec-SDPEE e o PRes-SDPEE contêm inúmeras restrições que devem ser devidamente tratadas pelo algoritmo de otimização. No entanto, em uma modelagem matemática mais detalhada, algumas das restrições podem ser consideradas não-críticas, uma vez que a violação das mesmas não acarreta em danos para o sistema. Assim, uma solução que viole apenas as restrições não-críticas ainda pode ser útil. As restrições foram divididas em dois grupos para serem analisadas separadamente durante a etapa de avaliação da configuração de rede. A comparação e o descarte de soluções são feitos por meio do tratamento de restrições, explicados no Capítulo 3 (Seção 3.11).

A inclusão de incertezas ao problema de reconfiguração mostrou que as melhores soluções identificadas por métodos não intervalares podem não ser de fato ótimas em um cenário mais realista. A versão intervalar do MOEA (IMOEA-DFR) teve como propósito oferecer um procedimento de identificação de soluções mais robustas, uma vez que a magnitude de variação das incertezas seja conhecida. Os experimentos realizados comprovaram a superioridade das soluções encontradas pelo IMOEA-DFR, cujos benefícios são maiores para um período de tempo mais extenso.

O tempo computacional de avaliação é crítico em um contexto de análise de configurações *on-line*. Se a aproximação dos valores de tensão nas barras for suficientemente precisa para garantir a identificação das configurações ótimas, então o método de cálculo de fluxo pode ser substituído pelo mecanismo de inferência. Nesse sentido, a estimativa nebulosa criada com redes de arquitetura do tipo NFN mostrou ser viável para os problemas aqui tratados. Os experimentos evidenciaram uma redução no custo computacional do AE quando o método de cálculo do fluxo de potência (varredura) é substituído gradativamente pela estimativa.

Foi feita ainda uma análise extensiva de modos de ajuste de taps de reguladores de tensão durante as iterações de um método de varredura quando vários desses equipamentos fazem parte de um mesmo alimentador. Esse estudo foi motivado pela necessidade real de determinadas concessionárias brasileiras de energia que empregam bastante os reguladores de tensão como recurso para atenuar afundamentos de tensão ao longo dos alimentadores.

A avaliação de sequência das manobras foi desenvolvida nesse trabalho com o propósito de complementar a análise de viabilidade das soluções eficientes encontradas pelo processo de otimização. A tomada de decisão foi incorporada para encerrar o procedimento de identificação da solução de rede mais adequada ao intento do operador do sistema. Os métodos de ToD construídos foram avaliados para o sistema de 136 barras e mostraram-se coerentes de acordo com as preferências previamente especificadas.

Com as contribuições descritas acima, espera-se que esse trabalho possa oferecer novos conhecimentos a respeito dos problemas combinatoriais de reconfiguração e restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica, trifásicos e desequilibrados.

8.2 Sugestão para Trabalhos Futuros

Diversas possibilidades para a continuidade do trabalho são naturalmente vislumbradas:

- desenvolvimento de um método mais eficiente de separação em fronteiras para o caso de SDPEE de porte elevadíssimo (sistemas com 5000 barras ou mais);
- estudo mais aprofundado da relação entre o espaço de busca e o método de enumeração/ordenamento das chaves do SDPEE com o intuito de caracterizar melhor a localidade das soluções viáveis;
- admissão de incertezas em outros parâmetros do SDPEE como, por exemplo, a impedâncias das linhas e a potência disponível nos NPPs.

Além disso, as simplificações assumidas para esse trabalho, enumeradas no Capitulo 1, podem ser investigadas tornando assim o modelo matemático e os algoritmos mais complexos.

Referências Bibliográficas

ABABEI, C.; KAVASSERI, R. Efficient Network Reconfiguration Using Minimum Cost Maximum Flow-Based Branch Exchanges and Random Walks-Based Loss Estimations. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 1, p. 30-37, February 2011.

ABDELAZIZ, A. Y.; MOHAMMED, F. M.; MEKHAMER, S. F.; BADR, M. A. Distribution Systems Reconfiguration using a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm. **Electric Power Systems Research**, v. 79, n. 11, p. 1521-1530, November 2009.

ABRADEE. Furto e Fraude de Energia. **Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica**, 2007. Disponivel em: <http://www.abradee.org.br/>. Acesso em: 23 Fevereiro 2012.

AFSARI, M.; SINGH, S. P.; RAJU, G. S.; RAO, G. K. A Fast Power Flow Solution of Radial Distribution Networks. **Electric Power Components and Systems**, v. 30, n. 10, p. 1065-1074, October 2002.

AHUJA, R.; MAGNANTI, T.; ORLIN, J. **Network Flows:** Theory, Algorithms and Applications. [S.l.]: Prentice Hall, 1993.

ANDREI, H.; CHICCO, G. Identification of the Radial Configurations Extracted From the Weakly Meshed Structures of Electrical Distribution Systems. **IEEE Transactions on Circuits and Systems — I: Regular Papers**, v. 55, n. 4, p. 1149-1158, May 2008.

AOKI, K.; ICHIMORI, T.; KANEZASHI, M. Normal state optimal load allocation in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**,PER-7, n. 1, p. 147-155, January 1987.

AOKI, K.; KUWABARA, H.; SATOH, T.; KANEZASHI, M. An efficient algorithm for load balancing of transformers and feeders by switch operation in large scale distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 4, p. 1865-1872, October 1988.

AOKI, K.; NARA, K.; IOTH, M.; SATOH, T.; KUWABARA, H. A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 3, p. 1832-1839, July 1989.

AOKI, K.; SATOH, T.; ITOH, M.; KUWABARA, H.; KANEZASHI, M. Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 3, p. 1267-1274, July 1988.

ARAÚJO, L. R.; PENIDO, D. R. R.; CARNEIRO JR., S.; PEREIRA, J. L. R.; GARCIA, P. A. N. Comparisons between the Three-phase Current Injection Method and the Forward/Backward Sweep Method. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 32, p. 825–833, 2010.

ARUN, M.; ARAVINDHABABU, P. Fuzzy based Reconfiguration Algorithm for Voltage Stability Enhancement of Distribution Systems. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 6974–6978, 2010.

BALUJA, S. **Population-Based Incremental Learning: A Method for Integrating Genetic Search Based Function Optimization and Competitive Learning**. Carnegie Mellon University. Pittsburgh, P.A., CMUCS-CS-94-163, 1994.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, April 1989.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 1, p. 735-743, January 1989.

BARAN, M.; WU, F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 1, p. 725-734, January 1989.

BARBOSA, C. H. N. R.; CAMINHAS, W. M.; VASCONCELOS, J. A. **Adaptive Technique to Solve Multi-objective Feeder Reconfiguration Problem in Real Time Context**. LNCS Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Ouro Preto: Lecture Notes in Computer Science. p. 418-432, 2011.

BARBOSA, C. H. N. R.; RIBEIRO, R. S.; VASCONCELOS, J. E. O.; SILVEIRA, T. A. G.; CUNHA, T. B.; PEREIRA, E. C.; VASCONCELOS, J. A. **Reconfiguração Autônoma de Sistemas Primários de Distribuição de Energia Elétrica**. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Goiânia: [s.n.], p. 1-6, 2012.

BERG JR., R.; HAWKINS, E. S.; PLEINES, W. W. Mechanised Calculation of Unbalanced Load Flow for Radial Distribution Circuits. **IEEE Transactions PAS-86**, p. 415-421, April 1967.

BERNARDON, D. P.; GARCIA, V. J.; FERREIRA, A. Q.; CANHA, L. N. Electric distribution network reconfiguration based on a fuzzy multi-criteria. **Electric Power Systems Research**, p. 1-8, 2009.

BIJWE, P. R.; RAJU, G. K. V. Fuzzy Distribution Power Flow for Weakly Meshed Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 4, p. 1645-1652, November 2006.

BOROZAN, V.; RAJICIC, D.; ACKOVSKI, R. Improved Method for Loss Minimization in Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 3, p. 1420-1425, August 1995.

BOUHOURAS, A. S.; LABRIDIS, D. P. Influence of Load Alterations to Optimal Network Configuration for Loss Reduction. **Electric Power Systems Research**, v. 86, p. 17-27, January 2012.

BRAZ, H. M.; SOUZA, B. A. Distribution Network Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Sequential Encoding: Subtractive and Additive Approaches. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 2, p. 582-593, May 2011.

BROADWATER, R. P.; CHANDRASEKARAM, A.; HUDDLESTON, C. T.; KHAN, A. H. Power flow analysis of unbalanced multiphase radial distribution systems. **Electric Power Systems Research**, 14, p. 23-33, February 1988.

BROADWATER, R. P.; KHAN, A. H.; SHALAN, H. E.; LEE, R. E. Time Varying Load Analysis to Reduce Distribution Losses through Reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 1, p. 294–300, January 1993.

BROADWATER, R. P.; SHAALAM, H. E.; FABRYCKY, W. J.; LEE, R. E. Decision Evaluation With Interval Mathematics: A Power Distribution System Case Study. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 59-67, January 1994.

CARRENO, M.; ROMERO, R.; PADILHA-FELTRIN, A. An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 4, p. 1542-1551, November 2008.

CARVALHO, P. M. S.; CARVALHO, F. J. D.; FERREIRA, L. A. F. M. **Dynamic Restoration of Large-Scale Distribution Network Contingencies:** Crew Dispatch Assessment. IEEE Power Tech. Lausanne: [s.n.], p. 1453-1457, 2007.

CARVALHO, P. M. S.; FERREIRA, L. A. F. M. On the Robust Application of Loop Optimization Heuristics in Distribution Operations Planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 4, p. 1245-1249, November 2002.

CARVALHO, P. M. S.; FERREIRA, L. A. F. M.; BARRUNCHO, L. M. F. Optimization Approach to Dynamic Restoration of Distribution Systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 29, p. 222–229, 2007.

CASTRO, C. H.; BUNCH, J. B.; TOPKA, T. M. Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 99, n. 2, p. 549-557, March/April 1980.

CAYLEY, A. A Theorem on Trees. **Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 23, p. 376–378, 1889.

CÉSPEDES, R. New Method for the Analysis of Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 391-396, January 1990.

CHANG, C. S. Fast Power System Voltage Prediction using Knowledge-based Approach and On-line Box Data Creation. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, v. 136, n. 2, p. 87-99, March 1989.

CHATURVEDI, A.; PRASAD, K.; RANJAN, R. Use of Interval Arithmetic to Incorporate the Uncertainty of Load Demand for Radial Distribution System Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 2, p. 1019 - 1021, April 2006.

CHEN, C. S.; CHO, M. Y. Energy Loss Reduction by Critical Switches. **Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 3, p. 1246-1253, July 1993.

CHEN, T. H.; CHEN, M. S.; HWANG, K. J.; KOTAS, P.; CHEBLI, E. A. Distribution system power flow analysis - a rigid approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 3, p. 1146-1152, July 1991.

CHEN, W.-H. Quantitative Decision-Making Model for Distribution System Restoration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 1, p. 313-321, February 2010.

CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D. A Three-phase Power Flow Method for Real-time Distribution System Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2, p. 671-679, May 1995.

CHIANG, H. D.; JUMEAU, R. J. Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems, Part 1: a new Formulation and a Solution Methodology. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 4, p. 1902-1909, November 1990.

CHIANG, H. D.; JUMEAU, R. J. Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 2 - Solution Algorithms and Numerical Results. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 3, p. 1568-1574, July 1990.

CHIANG, H.; BARAN, M. E. On the Existence and Uniqueness of Load Flow Solution for Radial Distribution Power Networks. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, v. 37, n. 3, p. 410-416, March 1990.

CHOWDHURY, A. A.; KOVAL, D. O. **Power Distribution System Reliability Practical Methods and Applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. J.; YIN, H.; LEE, S. S. H. Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 3, p. 1217-1223, July 1988.

COELLO, C. A.; LAMONT, G. B. **Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms**. [S.l.]: World Scientific Pub Co Inc, 792 p., 2004.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to Algorithms**. 1st. ed. [S.l.]: MIT Press, 1292 p., 1990.

DAS, B. Radial Distribution System Power Flow Using Interval Arithmetic. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 24, n. 10, p. 827-836, December 2002.

DAS, B. Consideration of Input Parameter Uncertainties in Load Flow Solution of Three-Phase Unbalanced Radial Distribution System. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 3, p. 1088-1095, August 2006.

DAS, D. A Fuzzy Multiobjective Approach for Network Reconfiguration of Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 1, p. 202-209, January 2006.

DAS, D. Reconfiguration of Distribution System using Fuzzy Multi-objective Approach. **Electrical Power and Energy Systems**, 28, p. 331–338, 2006.

DAS, D.; KOTHARI, D. P.; KALAM, A. Simple and Efficient Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 17, n. 5, p. 335-346, July 1995.

DAS, D.; NAGI, H. S.; KOTHARI, D. P. Novel Method for Solving Radial Distribution Networks. **IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution**, v. 141, n. 4, p. 291-298, July 1994.

DEB, K. An Efficient Constraint Handling Methods for Genetic Algorithms. **Comput. Methods in Appl. Mech. Eng.**, v. 186, p. 311–338, 2000.

DEB, K. **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

DEB, K. **A Robust Evolutionary Framework for Multi-objective Optimization**. Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and Evolutionary Computation. Atlanta, Georgia, USA: ACM. p. 633-640. July 12–16, 2008.

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, April 2002.

DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. C. F.; BRETAS, N. G. Main Chain Representation for Evolutionary Algorithms Applied to Distribution System Reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 1, p. 425-436, February 2005.

DELBEM, A. C.; CARVALHO, A.; BRETAS, N. G. Optimal Energy Restoration in Radial Distribution Systems Using a Genetic Approach and Graph Chain Representation. **Electric Power Systems Research**, v. 67, p. 197-205, March 2003.

ENACHEANU, B.; RAISON, B.; CAIRE, R.; DEVAUX, O.; BIENIA, W.; HADJSAID, N. Radial Network Reconfiguration Using Genetic Algorithm Based on the Matroid Theory. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 1, p. 186-195, February 2008.

FALCÃO, D. M.; HENRIQUES, H. O. **Load Estimation in Radial Distribution Systems Using Neural Networks and Fuzzy Set Techniques**. Power Engineering Society Summer Meeting. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 1002-1006, 2001.

FUDO, H.; TOUNE, S.; GENJI, T.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. An Application of Reactive Tabu Search for Service Restoration in Distribution Systems and Its Comparison with the Genetic Algorithm and Parallel Simulated Annealing. **Electrical Engineering in Japan**, 133, n. 3, p. 1063-1069, August 2000.

FUKUYAMA, Y.; CHIANG, H. D.; MIU, K. N. **A Hybrid system for service restoration using expert system and genetic algorithm**. Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems - ISAP. [S.l.]: [s.n.]. p. 394-398, 1996.

FUKUYAMA, Y.; CHIANG, H. D.; MIU, K. N. Parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 18, n. 2, p. 111-119, 1996.

GARCIA, P. A. N.; PEREIRA, J. L. R.; CARNEIRO JR., S.; COSTA, V. M.; MARTINS, N. Three-Phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method. **IEEE Transactions on Power Systems**, 15, n. 2, p. 508-514, May 2000.

GARCIA, V. J.; FRANÇA, P. M. Multiobjective Service Restoration in Electric Distribution Networks using a Local Search Based Heuristic. **European Journal of Operational Research**, p. 694-705, 2008.

GHOSH, S.; DAS, D. Method for Load-flow Solution of Radial Distribution Networks. **IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution**, v. 146, n. 6, p. 641-648, November 1999.

GLAMOCANIN, V. Optimal Loss Reduction of Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 3, 774-782, 1990.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. 1 st. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.

GOMES, F. V.; CARNEIRO JR., S.; PEREIRA, J. L. R.; VINAGRE, M. P.; GARCIA, P. A. N.; ARAUJO, L. R. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution system. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1373-1378, August 2005.

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

GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; RAMOS, E. R. Reliable Load Flow Technique for Radial Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 14, n. 3, p. 1063-1069, August 1999.

GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. Direct solution of distribution systems. **IEE Proceedings**, 188, n. 1, January 1991. 78-88.

GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 3, p. 1484-1491, July 1992.

HAQUE, M. H. Efficient Load Flow Method for Distribution Systems with Radial or Mesh Configuration. **IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.**, v. 143, n. 1, p. 33-38, January 1996.

HARIK, G. R.; LOBO, F. G.; GOLDBERG, D. E. The Compact Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 3, n. 4, p. 287-297, November 1999.

HONG, Y. Y.; HO, S. Y. Determination of Network Configuration Considering Multiobjective in Distribution Systems Using Genetic Algorithms. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 2, p. 1062-1069, May 2005.

HORN, J.; NAFPLIOTIS, N.; GOLDBERG, D. E. **A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization**. Proceedings of the First IEEE Conference on Computational Intelligence. Orlando: [s.n.]. p. 82-87, 1994.

HSIAO, Y. T. Multiobjective Evolution Programming Method for Feeder Reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 1, p. 594-599, February 2004.

HSIAO, Y. T.; CHIEN, C. Y. Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy–GA Method. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 4, p. 1394-1400, November 2000.

HSU, Y. Y.; HUANG, H. M. Distribution system service restoration using the artificial neural network approach and pattern recognition method. **IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution**, v. 142, n. 3, p. 251-256, May 1995.

HSU, Y. Y.; HUANG, H. M.; KUO, H. C.; PENG, S. K.; CHANG, C. W.; YU, H. S.; CHOW, C. E.; KUO, R. T. Distribution System Service Restoration using a Heuristic Search Approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 2, p. 734-740, April 1992.

HSU, Y. Y.; KUO, H. C. A Heuristic based Fuzzy Reasoning Approach for Distribution System Service Restoration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 2, p. 948-953, April 1994.

HSU, Y. Y.; YANG, C. C. Fast voltage estimation using artificial neural network. **Electrical Power System**, v. 27, n. 11, p. 1-9, 1993.

HUANG, Y. C. Enhanced Genetic Algorithm-based Fuzzy Multi-objective Approach to Distribution Network Reconfiguration. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, v. 149, n. 5, p. 615-620, September 2002.

IEEE DISTRIBUTION PLANNING WORKING GROUP REPORT. Radial distribution test feeders. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 6, n. 3, p. 975-985, August 1991.

IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE. Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 3, p. 1302-1313, August 1995.

JANG, J. R.; SUN, C. T.; MIZUTANI, E. **Neuro-Fuzzy and Soft Computing:** A Computational Approach to Learning and Machine Inteligence. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

JEON, Y. J.; KIM, J. C.; KIM, J. -O.; SHIN, J.; LEE, K. Y. An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 4, p. 1070-1078, October 2002.

KASHEM, M. A.; JASMON, G. B.; MOHAMED, A.; MOGHAVVEMI, M. Artificial neural network approach to network reconfiguration for loss minimization in distribution networks. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 20, n. 4, p. 247-258, 1998.

KELLEGÖZ, T.; TOKLUB, B.; WILSON, J. Comparing Efficiencies of Genetic Crossover Operators for one Machine Total Weighted Tardiness Problem. **Applied Mathematics and Computation**, v. 199, n. 2, p. 590–598, June 2008.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. New York: CRC Press, 2002.

KERSTING, W. H.; MENDIVE, D. L. **An Application of Ladder Network Theory to the Solution of Three Phase Radial Load-Flow Problems**. IEEE PAS Winter Meeting. New York: [s.n.]. 1976.

KERSTING, W. H.; PHILIPS, W. H.; CARR, W. A new approach to modeling three-phase transformer connections. **IEEE Transactions on Industrial Applications**, v. 35, p. 169-175, January/February 1999.

KIM, H.; KO, Y.; JUNG, K. H. Artificial Neural-Network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 3, p. 1356-1366, July 1993.

KIM, J. C.; CHO, S. M.; SHIN, H. S. Advanced Power Distribution System Configuration for Smart Grid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 99, p. 1-6, 2013.

KING, R. T. F.; RADHA, B.; RUGHOOPUTH, H. C. S. **A Real-Parameter Genetic Algorithm for Optimal Network Reconfiguration**. IEEE International Conference on Industrial Technology. [S.l.]: [s.n.]. p. 54-59, 2003.

KNOWLES, J.; CORNE, D. **The Pareto Archived Evolution Strategy:** a New Baseline Algorithm for Pareto Multiobjective Optimisation. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation - CEC 99. Washington: [s.n.]. p. 98-105, 1999.

KRUSKAL, J. B. On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem. **Proceedings of the American Mathematics Society**, v. 7, n. 1, p. 48-50, 1956.

KUBBA, H.; MOKHLIS, H. An Enhanced RCGA for a Rapid and Reliable Load Flow Solution of Electrical Power Systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 43, p. 304–312, April 2012.

KUMAR, Y.; DAS, D.; SHARMA, J. Multiobjective, Multiconstraint Service Restoration of Electric Power Distribution System with Priority Customers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 1, p. 261-270, January 2008.

KUO, H.; HSU, Y. Distribution system load estimation and service restoration using a fuzzy set approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 4, p. 1950-1957, October 1993.

LARRANAGA, P.; LOZANO, J. A. **Estimation of Distribution Algorithms:** A New Tool for Evolutionary Computation. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2002.

LEE, T. E.; CHO, M. Y.; CHEN, C. S. Distribution System Reconfiguration to Reduce Resistive Losses. **Electric Power Systems Research**, v. 30, p. 25-33, January 1994.

LI, W.; WANG, P.; LI, Z.; LIU, Y. Reliability Evaluation of Complex Radial Distribution Systems Considering Restoration Sequence and Network Constraints. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 2, p. 753-758, April 2004.

LIN, W. M.; CHENG, F. S.; TSAY, M. T. Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm. **IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution**, v. 147, n. 6, p. 349-354, November 2000.

LIN, W. M.; CHIN, H. C. A new Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 3, p. 870-875, 1998.

LIN, W. M.; HONG, C. C. A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 3, p. 870-875, July 1998.

LIU, C.; LEE, S. J.; VENKATA, S. S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 2, p. 619-626, May 1988.

LIU, C.; LEE, S. J.; VU, K. Loss Minimization of Distribution Feeders: Optimality and Algorithms. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 1281-1289, April 1989.

LOPEZ, E.; OPAZO, H.; GARCIA, L.; BASTARD, P. Online Reconfiguration Considering Variability Demand: Applications to Real Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 1, p. 549-553, February 2004.

LUO, G. X.; SEMLYEN, A. Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 4, p. 1309-1316, November 1990.

MAURER, S. B. Matrix Generalizations of some Theorems on Trees, Cycles and Cocycles in Graphs. **SIAM Journal on Applied Mathematics**, v. 30, n. 1, p. 143-148, 1976.

MCCLELLAND, E. C.; VAN HORNE, P. R. Fast Voltage Prediction Using a Knowledge Based Approach. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-102, n. 2, p. 315-319, February 1983.

MCDERMOTT, T. E.; DREZGA, I.; BROADWATER, R. P. A Heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration. **IEEE Transactions on Power System**, v. 14, n. 2, p. 478-483, May 1999.

MENDOZA, J.; LÓPEZ, R.; MORALES, D.; LÓPEZ, E.; DESSANTE, P.; MORAGA, R. Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Restricted Population and Addressed Operators: Real Application. **IEEE Transactions on PowerSystems**, v. 21, n. 2, p. 948-954, May 2006.

MERLIN, A.; BACK, H. **Search for a minimal loss operating spanning tree configuration for an urban power distribution system**. Proceedings on 5th Power System Computation Conference - PSCC. Cambridge: [s.n.]. 1975.

MEZURA-MONTES, E.; COELLO, C. A. C. Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: Past, present and future. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 1, p. 173-194, 2011.

MICHALEWICZ, Z. **A Survey of Constraint Handling Techiniques in Evolutionary Computation Methods**. Proceedings of the 4th Annual Conference on Evolutionary Programming. Cambridge: MIT Press. p. 135-155, 1995.

MILANI, A. E.; HAGHIFAM, M. R. A New Probabilistic Approach for Distribution Network Reconfiguration: Applicability to Real Networks. **Mathematical and Computer Modelling**, p. 1-11, June 2011.

MIRANDA, V.; RANITO, J. V.; PROENÇA, L. M. Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 4, p. 1927-1933, November 1994.

MIU, K. N.; CHIANG, H.; YUAN, B.; DARLING, G. Fast Service Restoration for Large-Scale Distribution Systems with Priority Customers and Constraints. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 13, n. 3, p. 789-795, August 1998.

MOMOH, J. A.; MA, X. W.; TOMSOVIC, K. Overview and Literature Survey of Fuzzy Set Theory in Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 3, p. 1676-1690, August 1995.

MOON, Y.; CHOI, B.; CHO, B.; KIM, S.; HA, B.; LEE, J. Fast and Reliable Distribution System Load Flow Algorithm based on the Ybus Formulation. **IEEE Transactions**, p. 238-242, ISSN 0-7803-5569-5/99, 1999.

MOORE, R. E.; KEARFOOT, R. B.; CLOUD, M. J. **Introduction to Interval Analysis**. Philadelphia: SIAM, 2009.

MOORTHY, S.; HOADLEY, D. A New Phase-Coordinate Transformer Model for Ybus Analysis. **IEEE Transactios on Power Systems**, v. 17, n. 4, p. 951-956, November 2002.

MORELATO, A. L.; MONTICELLI, A. Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 4, p. 2235-2241, October 1989.

MORI, H.; OGITA, Y. A Parallel Tabu Search Based Approach to Optimal Network Reconfigurations for Service Restoration in Distribution Systems. **Proceedings of the 2002 IEEE International**, 2 p. 814-819, September 2002.

MORI, H.; TAKEDA, K. Parallel simulated annealing for power system decomposition. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 2, p. 789-795, May 1994.

MORTON, A. B.; MAREELS, I. Y. An Efficient Brute-Force Solution to the Network Reconfiguration Problem. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 3, p. 996-1000, July 2000.

MWAKABUTA, N.; SEKAR, A. **Comparative Study of the IEEE 34 Node Test Feeder under Practical Simplifications**. NAPS '07 - 39th North American Power Symposium. [S.l.]: [s.n.]. p. 484-491. Sept. 30 - Oct. 2, 2007.

NAGATA, T.; SASAKI, H.; YOKOYAMA, R. Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 3, p. 1473-1479, August 1995.

NAHMAN, J.; STRBAC, G. A new algorithm for service restoration in large-scale urban distribution systems. **Electric Power Systems Research**, 29, p. 181-192, 1994.

NARA, K.; SHIOSE, A.; KITAGAWA, M.; ISHIHARA, T. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 7, n. 3, p. 1044-1051, August 1992.

NGUYEN, H. L. Newton-Raphson Method in Complex Form. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 3, p. 1355-1359, August 1997.

NIKNAM, T. An Efficient Hybrid Evolutionary Algorithm based on PSO and HBMO Algorithms for Multi-objective Distribution Feeder Reconfiguration. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 2074-2082, 2009.

PEPONIS, G. J.; PAPADOPOULOS, M. P.; HATZIARGYRIOU, N. D. Optimal Operation of Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, 1996**, v. 11, n. 1, p. 59-67, February 1996.

PEPONIS, G.; PAPADOPOULOS, M. Reconfiguration of radial distribution networks: application of heuristic methods on large-scale networks. **IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution**, v. 142, n. 6, p. 631-638, November 1995.

PERALTA, J. A.; LÉON, F.; MAHSEREDJIAN, J. Unbalanced Multiphase Load-Flow Using a Positive-Sequence Load-Flow Program. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 2, p. 469-476, May 2008.

PEREIRA, C. A. N. **Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Unicamp. Campinas. 2009.

PRASAD, K.; RANJAN, R.; SAHOO, N. C.; CHATURVEDI, A. Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems using a Fuzzy Mutated Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1211-1213, April 2005.

PRIM, R. Shortest Connection Networks and Some Generalisations. **Bell Syst. Tech. Journal**, 36, p. 1389-1401, 1957.

QUEIROZ, L. M.; LYRA, C. Adaptive Hybrid Genetic Algorithm for Technical Loss Reduction in Distribution Networks Under Variable Demands. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 1, p. 445-453, February 2009.

RADHA, B.; KING, R. T.; RUGHOOPUTH, H. C. **A Modified Genetic Algorithm for Optimal Electrical Distribution Network Reconfiguration**. Congress on Evolutionary Computation CEC '03. [S.l.]: [s.n.]. p. 1472-1479, 2003.

RAIDL, G. R.; JULSTROM, B. A. Edge Sets: An Effective Evolutionary Coding of Spanning Trees. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 7, n. 3, p. 225-239, June 2003.

RAJICIC, D.; BOSE, A. A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X Ratios. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 79-87, May 1988.

RAMOS, E. R.; EXPÓSITO, A. G.; SANTOS, J. R.; IBORRA, F. L. Path-Based Distribution Network Modeling: Application to Reconfiguration for Loss Reduction. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 2, p. 556-564, May 2005.

REIS, B. F. S.; SALGADO, G. C.; LEITE, M. A. O.; BARBOSA, C. H. N. R.; PEREIRA, E. C.; VASCONCELOS, J. A. **Representação Eficiente de Soluções Para o Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Primária**. XIX Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande: [s.n.]. p. 1-8, 02 a 06 de setembro de 2012.

RIBEIRO, R. S.; COELHO, J. N.; BARBOSA, C. H. N. R.; PEREIRA, E. C.; VASCONCELOS, J. A. **Avaliação de Técnicas de Análise de Reguladores de Tensão para Métodos Iterativos de Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição Primária**. XIX Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande: [s.n.]. p. 1-7. 02 a 06 de setembro de 2012.

ROTHLAUF, F. On the Bias and Performance of the Edge-Set Encoding. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 13, n. 3, p. 486-499, June 2009.

ROYTELMAN, I.; MELNIK, V.; LEE, S. H.; LUGTU, R. L. Multi-objective Feeder Reconfiguration by Distribution Management System. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 11, n. 2, p. 661-667, May 1996.

SAATY, T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, September 1990.

SAFFAR, A.; HOOSHMAND, R.; KHODABAKHSHIAN, A. A New Fuzzy Optimal Reconfiguration of Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing using Ant Colony Search-based Algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 11, p. 4021–4028, March 2011.

SAHOO, N. C.; PRASAD, K. A Fuzzy Genetic Approach for Network Reconfiguration to Enhance Voltage Stability in Radial Distribution Systems. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 18, p. 3288-3306, 2006.

SAHOO, N. C.; RANJAN, R.; PRASAD, K.; CHATURVEDI, A. A Fuzzy-tuned Genetic Algorithm for Optimal Reconfigurations of Radial Distribution Network. **European Transactions on Electrical Power**, v. 17, n. 2, p. 97-111, 2007.

SARFI, R. J.; SALAMA, M. A.; CHIKHANI, A. Y. Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: An Algorithm Based on Network Partitioning Theory. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 11, n. 1, p. 504-510, February 1996.

SARFI, R. J.; SALAMA, M. M. A.; CHIKHANI, A. Y. A Survey of the State of the Art in Distribution System Reconfiguration for System Loss Reduction. **Electric Power Systems Research**, v. 31, n. 1, p. 61-70, October 1994.

SARMA, N. D. R.; GHOSH, S.; RAO, K. S. P.; SRINIVAS, M. Real Time Service Restoration in Distribution Networks - A Practical Approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 4, p. 2064-2070, October 1994.

SASTRY, K.; GOLDBERG, D. E.; LLORA, X. **Towards billion-bit optimization via a parallel estimation of distribution algorithm**. Proc. of the 9th annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. London: ACM press. p. 577-584, 2007.

SAVIER, J. S.; DAS, D. Loss Allocation to Consumers Before and After Reconfiguration of Radial Distribution Networks. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 33, p. 540–549, 2011.

SCHMIDT, H. P.; IDA, N.; KAGAN, N.; GUARALDO, J. C. Fast Reconfiguration of Distribution Systems Considering Loss Minimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1311-1319, August 2005.

SHENKMAN, A. L. Energy Loss Computation by Using Statistical Techniques. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 254-258, January 1990.

SHIN, D. J.; KIM, J.; KIM, T. K.; CHOO, J. B.; SINGH, C. Optimal Service Restoration and Reconfiguration of Network using Genetic-Tabu Algorithm. **Electric Power Systems Research**, 71, p. 145-152, January 2004.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 1402-1498, April 1989.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A Compensation-based Power Flow Method for weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753-762, May 1988.

SILVEIRA, T. A. G.; LEITE, M. A. O.; BARBOSA, C. H. N. R.; PEREIRA, E. C.; VASCONCELOS, J. A. **Estudo do Tratamento de Restrições Críticas e Não-Críticas no Problema de Reconfiguração em Sistemas de Distribuição Primária**. XIX Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande: [s.n.]. 2012. p. 1-8. 02 a 06 de setembro de 2012.

SINGH, S. P.; RAJU, G. S.; RAO, G. K.; AFSARI, M. A Heuristic Method for Feeder Reconfiguration and Service Restoration in Distribution Networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 31, n. 7-8, p. 309–314, September 2009.

SIVANGARAJU, S.; SRIKANTH, Y.; BABU, E. J. An efficient Genetic Algorithm for Loss Minimum Distribution System Reconfiguration. **Proceedings on Electric Power Components and Systems**, v. 34, n. 3, p. 249–258, March 2006.

SOARES, G. L.; GUIMARÃES, F. G.; MAIA, C. A.; VASCONCELOS, J. A.; JAULIN, L. **Interval Robust Multi-Objective Evolutionary Algorithm**. IEEE Congress on Evolutionary Computation. Trondheim - Norway: [s.n.]. p. 1637-1643, 2009.

SONG, Y. H.; WANG, G. S.; JOHNS, A. T.; WANG, P. Y. Distribution network reconfiguration for loss reduction using fuzzy controlled evolutionary programming. **IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution**, v. 144, n. 4, p. 345-350, July 1997.

SRINIVAS, M. S. Distribution load flows: A brief review. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, v. 2, p. 942-945, January 2000.

SRIVASTAVA, L.; SINGH, S. N.; SHARMA, J. Parallel Self-organising Hierarchical Neural Network-based Fast Voltage Estimation. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, v. 145, n. 1, p. 98-104, January 1998.

STOTT, B. Review of Load Flow Calculation Methods. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 7, p. 916-929, July 1974.

STOTT, B.; ALSAÇ, O. Fast Decoupled Load Flow. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-93, n. 3, p. 859-869, May/June 1974.

SU, C. T.; CHANG, C. F.; CHIOU, J. P. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. **Electric Power Systems Research**, v. 75, n. 2-3, p. 190-199, May 2005.

SU, C.-T.; LEE, C.-S. Network Reconfiguration of Distribution Systems Using Improved Mixed-Integer Hybrid Differential Evolution. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 3, p. 1022-1027, July 2003.

SWARNKAR, A.; GUPTA, N.; NIAZI, K. R. **Reconfiguration of Radial Distribution Systems with Fuzzy Multi-objective Approach using Adaptive Particle Swarm Optimization**. IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S.l.]: [s.n.]. p. 1-8, 2010.

SWARNKAR, A.; GUPTA, N.; NIAZI, K. R. A Novel Codification for Meta-heuristic Techniques used in Distribution Network. **Electric Power Systems Research**, v. 81, p. 1619–1626, April 2011.

TAYLOR, T.; LUBKEMAN, D. Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 239-246, January 1990.

TENG, J. H. A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solutions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 3, p. 882-887, July 2003.

TENG, J. H.; CHANG, C. Y. A Novel and Fast Three-Phase Load Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 4, p. 1238-1244, November 2002.

TINNEY, W. F.; HART, C. E. Power Flow Solution by Newton's Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 11, p. 1449-1460, November 1967.

TOUNE, S.; FUDO, H.; GENJI, T.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. **A Reactive tabu search for service restoration in electric power distribution systems**. [S.l.]: [s.n.]. p. 763-768, 1998.

TUTTE, W. T. **Graph Theory**. 1st edition. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 138 p., 2001.

UÇAK, C.; PAHWA, A. An Analytical Approach for Step-by-Step Restoration of Distribution Systems Following Extended Outages. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 3, p. 1717-1723, July 1994.

VACCARO, A.; VILLACCI, D. Radial Power Flow Tolerance Analysis by Interval Constraint Propagation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 1, p. 28-39, February 2009.

VASCONCELOS, J. A.; RAMÍREZ, J. A.; TAKAHASHI, R. H. C.; SALDANHA, R. R. Improvements in Genetic Algorithms. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 37, n. 5, p. 3414-3417, September 2001.

VENKATESH, B.; RANJAN, R. Optimal Radial Distribution System Reconfiguration using Fuzzy Adaptation of Evolutionary Programming. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 25, n. 10, p. 775–780, 2003.

VENKATRAMAN, S.; YEN, G. G. Generic Framework for Constrained Optimization Using Genetic Algorithms. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 9, n. 4, p. 424-435, August 2005.

VIEIRA JR., J. C. M.; FREITAS, W.; MORELATO, A. Phase-decoupled Method for Three-phase Power Flow Analysis of Unbalanced Distribution Systems. **IEE Proc.Gener. Transm. Distrib.**, v. 151, n. 5, p. 568-574, September 2004.

VIEIRA, D. A. G.; ADRIANO, R. L. S.; VASCONCELOS, J. A.; KRAHENBUHL, L. Treating Constraints as Objectives in Multiobjective Optimization Problems Using Niched Pareto Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 2, p. 1188-1191, March 2004.

WANG, J. C.; CHIANG, H. D.; DARLING, G. R. An Efficient Algorithm for Real-time Network Reconfiguration in Large-Scale Unbalanced Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 11, n. 1, p. 511-517, February 1996.

WANG, J.; CARVALHO, P. M. S.; KIRTLEY, J. **Emergency Reconfiguration and Distribution System Planning under the Single-Contingency Policy**. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), IEEE PES. Washington: [s.n.]. p. 1-5, 2012.

WANG, Z.; ALVARADO, F. L. Interval Arithmetic in Power Flow Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 7, n. 3, p. 1341-1349, August 1992.

WATANABE, I. **A Genetic Algorithm for Optimizing Switching Sequence of Service Restoration in Distribution Systems**. Congress on Evolutionary Computation - CEC2004. Tokyo: [s.n.]. p. 1683-1690, 2004.

WONG, K. P.; LI, A.; LAW, T. M. Y. Advanced Constrained Genetic Algorithm Load Flow Method. **IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, v. 146, n. 6, p. 609-616, November 1999.

WU, Y.-K.; LEE, C.-Y.; LIU, L.-C.; TSAI, S.-H. Study of Reconfiguration for the Distribution System with Distributed Generators. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 3, p. 1678-1685, July 2010.

YAMAKAWA, T.; UCHINO, E.; MIKI, T.; KUSABAGI, H. **A Neo Fuzzy Neuron and its Applications to System Identification and Predictions to System Behavior**. Proceedings of the 2nd IIZUKA. IIizuka-Japan: [s.n.]. p. 477-483, 1992.

ZHANG, F.; CHENG, C. S. A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 1, p. 389-397, February 1997.

ZHU, J. Z. Optimal Reconfiguration of Electrical Distribution Network using the Refined Genetic Algorithm. **Electric Power Systems Research**, 62, p. 37-42, January 2002.

ZIDAN, A.; EL-SAADANY, E. F. A Cooperative Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms in Distribution Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1525-1539, September 2012.

ZIMMERMAN, R. D. **Comprehensive Distribution Power Flow: modeling, formulation, solution algorithms and analysis**. Cornell University. Cornell. 1995.

ZIMMERMAN, R. D.; CHIANG, H. D. Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 4, p. 2045-2052, November 1995.

ZIMMERMAN, R. D.; CHIANG, H. D.; MIU, K. N. Transfomer Modeling Using Line-to-Line Voltages in Ungrounded Power Distribution Networks. **Proceedings on IEEE**, p. 1033-1036, 2003.

ZIZTLER, E.; LAUMANNS, M.; THIELE, L. **SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm**. ETH. Zurich, Switzerland. TR-103, 2001.