

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LEANDRO SOARES REZENDE**

**PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE  
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO:  
AVALIAÇÃO DE METAHEURÍSTICAS  
E CRITÉRIOS DE SEGURANÇA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Armando Martins Leite da Silva

Co-Orientador: Prof. Leonardo de Mello Honório

Novembro de 2011

Itajubá – MG

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Cristiane Carpinteiro- CRB\_6/1702

R467p

Rezende, Leandro Soares

Planejamento da expansão de sistemas de transmissão: avaliação de metaheurísticas e critérios de segurança. / por Leandro Soares Rezende. – Itajubá (MG) : [s.n.], 2011.

197 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Armando Martins Leite da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo de Mello Honório.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Planejamento da expansão de sistemas de transmissão. 2. Metaheurísticas. 3. Otimização. 4. Critérios de segurança. I. Silva, Armando Martins Leite da, orient. II. Honório, Leonardo de Mello, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.





Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Criada pela Lei nº 10435, de 24 de abril de 2002

**FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TESE DE DOUTORADO**

Título da Tese: **“Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão:  
Avaliação de Metaheurísticas e Critérios de Segurança”**

Autor: **Leandro Soares Rezende**

**JULGAMENTO**

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	
5º	A	
6º	A	

**A** - APROVADO: Se a Tese obtiver aprovação unânime da Comissão Examinadora.

**AC** - APROVADO CONDICIONAL: Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese deva sofrer alterações de conteúdo ou conter resultados novos ou adicionais.

**RE** - REEXAME: Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese, embora contendo contribuições relevantes, não tenha sido defendida adequadamente, ou deve sofrer modificações mais profundas. Caso em que o candidato terá mais uma única e última oportunidade para reestruturar a Tese se for o caso, e defendê-la novamente em um prazo não superior a 6 (seis) meses contados a partir da data da primeira defesa.

**R** - REPROVAÇÃO: Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese não contém contribuições relevantes para a área do tema da Tese.

(\* Este documento terá a validade de 90 (noventa) dias a contar da data da defesa da Tese.

Resultado Médio: Conceito: A, ou seja, Aprovado

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 09 de Novembro de 2011.

Prof. Dr. Luiz Antonio da Fonseca Manso  
1º Examinador – UFSJ

Prof. Dr. Edimar José de Oliveira  
2º Examinador – UFJF

Prof. Dr. João Guilherme de Carvalho Costa  
3º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Cláudio Ferreira  
4º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Leonardo de Mello Honório  
5º Examinador (Co-Orientador) – UFJF

Prof. Dr. Armando Martins Leite da Silva  
6º Examinador – UNIFEI – (Orientador)

Prof. Dr. Carlos Henrique Valério de Moraes  
Presidente da Banca – UNIFEI



Dedico à minha esposa Sílvia  
aos meus pais Antônio e Maria,  
e à minha irmã Elaine

# AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de vivenciar esta conquista além da coragem e saúde para ultrapassar todas as barreiras impostas para que este sonho pudesse se tornar realidade.

Aos meus pais, Antônio e Maria, pelo carinho, amor, incentivo e ensinamentos que levarei para o resto de minha vida e por terem destinado grande parte de suas vidas em prol de minha formação.

À Sílvia, por estar ao meu lado nos momentos mais marcantes de minha vida, pela sua paciência e, principalmente, pelo seu amor incondicional o qual tenho recebido deste o primeiro instante que nos encontramos.

À Elaine, pela sua amizade, sinceridade e por ser a irmã mais importante que Deus poderia colocar na minha vida.

Ao professor Armando Martins Leite da Silva, pelos ensinamentos transmitidos durante o processo de orientação, incentivos para que eu pudesse concluir este trabalho e sua paciência.

Ao professor Leonardo de Mello Honório, pela amizade, co-orientação e confiança depositada.

Ao professor Luiz Antônio da Fonseca Manso, por ter sido o principal responsável por minha formação em São João Del Rei e por ter acreditado na minha capacidade de seguir este caminho.

Aos meus queridos avós presentes e ausentes que tanto amo, amigos e familiares que contribuíram com suas orações para que este objetivo pudesse ser alcançado.

Ao apoio recebido dos pesquisadores George Anders (Kinectrics, Canadá), Gomaa Hamoud e Larry Lee (Hydro One, Canadá), e Carlos Henrique Valério de Moraes (UNIFEI).

À CAPES pelo apoio financeiro indispensável para minha formação.

# RESUMO

O problema de planejamento de expansão da transmissão (PET) deve responder às seguintes questões: quais reforços são necessários para atender o crescimento de consumo de energia elétrica, e ainda, onde e quando deverão ser alocados. Quando incertezas internas são consideradas, o objetivo consiste em selecionar o plano de expansão que melhor atende a demanda futura de carga com mínimo custo e máxima qualidade de energia. A consideração de incertezas externas também possui um papel essencial de forma a obter planos de expansão mais flexíveis ou robustos, capazes de suportar os diferentes cenários futuros.

Dentre inúmeras técnicas de otimização, as metaheurísticas têm apresentado os melhores resultados para a solução deste problema por possuir características que permitem uma melhor exploração do espaço evitando o aprisionamento em ótimos locais. Inicialmente, esta tese tem como objetivo comparar várias destas técnicas considerando uma abordagem dinâmica (i.e., cronológica) e determinística. Seus desempenhos são avaliados quanto à qualidade dos planos encontrados e seus respectivos esforços computacionais.

Atenção também é dada a definição de critérios de segurança a serem atendidos nos estudos de planejamento. É levantada uma discussão sobre a adoção do critério determinístico “N-1” e o atendimento de índices de confiabilidade a partir de estudos de casos. Baseada nesta discussão, é proposta uma metodologia eficiente para classificação de contingências de até 3ª ordem baseada em índices de desempenho. A partir de tais índices, são apontados novos critérios de segurança em alternativa aos índices de confiabilidade, já que não há um consenso entre as empresas do setor elétrico sobre valores aceitáveis, e ao critério determinístico “N-1” que configura em uma ação cautelosa podendo conduzir a elevados investimentos. Ao final é desenvolvida uma ferramenta computacional capaz de avaliar sistemas de grande porte incluindo o atendimento a critérios de segurança além de permitir a definição de uma ordem de mérito para o despacho de unidades de geração.

# ABSTRACT

The problem of transmission expansion planning (TEP) should address the following issues: which reinforcements are necessary to meet the growing electric energy consumption, and, also, where and when they should be allocated. When internal uncertainties are taken into consideration, the aim is to select the expansion plan that best meets the future load demand at the minimum cost and maximum energy quality. The consideration of external uncertainties also plays an important role in obtaining more flexible or robust expansion plans, capable of dealing with different future scenarios.

Among several optimization techniques, metaheuristics have presented the best results in solving this problem since they have characteristics that allow a better exploration of the space, thus avoiding the imprisonment in local optima. Initially, this thesis has the objective of comparing many of these techniques considering a dynamic (i.e., chronological) and deterministic approach. Their performances are evaluated in relation to the quality of the plans found and their respective computational efforts.

Attention is also given to the definition of the security criteria to be met in the TEP studies. A discussion is raised about the adoption of the deterministic “N-1” criterion and meeting the reliability indices from case studies. Based on this discussion, one proposes an efficient methodology for ranking of the contingencies up to 3<sup>rd</sup> order based on performance indices. From such indices, new security criteria are pointed out as alternative for the reliability indices, since there is not a general agreement among electric energy companies on acceptable values, and for the deterministic “N-1” criterion that represents a cautious action that may lead to high investments. At the end, one develops a computational tool capable of evaluating large systems including the meeting of the security criteria, besides allowing the definition of a merit order for dispatching generating units.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 ESTADO DA ARTE.....	6
1.2.1 Técnicas de Otimização.....	6
1.2.1.1 Modelos Clássicos .....	6
1.2.1.2 Modelos Heurísticos.....	7
1.2.1.3 Modelos Metaheurísticos .....	10
1.2.2 Modelos de Representação de Sistemas de Potência .....	23
1.2.2.1 Modelos Lineares.....	23
1.2.2.2 Modelos Não-Lineares.....	24
1.2.3 Linhas de Abordagem .....	25
1.2.3.1 Planejamento Estático .....	25
1.2.3.2 Planejamento Dinâmico .....	25
1.2.3.3 Planejamento Determinístico .....	26
1.2.3.4 Planejamento Não-determinístico: Incertezas Internas .....	28
1.2.3.5 Planejamento Não-determinístico: Incertezas Externas .....	30
1.3 CONCLUSÕES.....	33
1.4 ESTRUTURA DA TESE.....	35
<b>2 METAHEURÍSTICAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO ..</b>	<b>37</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	37
2.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA PET .....	37
2.3 INICIALIZAÇÃO INTELIGENTE .....	44
2.4 METAHEURÍSTICAS.....	46
2.4.1 Busca Tabu ( <i>Tabu Search</i> – TS) .....	47
2.4.2 Inteligência de Enxames ou Coletiva ( <i>Swarm Intelligence</i> – SI).....	52



2.4.2.1	Otimização por Enxame de Partículas ( <i>Particle Swarm Optimization – PSO</i> ) .....	52
2.4.2.2	Otimização por Colônia de Formigas ( <i>Ant Colony Optimization – ACO</i> ).....	58
2.4.3	Algoritmos Evolucionários ( <i>Evolutionary Algorithms – EA</i> ).....	65
2.4.3.1	Estratégias de Evolução ( <i>Evolution Strategies – ES</i> ) .....	66
2.4.3.2	Evolução Diferencial ( <i>Differential Evolution – DE</i> ) .....	70
2.4.3.3	Sistemas Imunológicos Artificiais ( <i>Artificial Immune Systems – AIS</i> ).....	75
2.5	CONCLUSÕES.....	81
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS METAHEURÍSTICAS .....</b>	<b>82</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	82
3.2	DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA ESTUDADOS .....	82
3.2.1	Sistema 6-Barras .....	82
3.2.2	Sistema CEMIG .....	85
3.3	RESULTADOS.....	89
3.3.1	Definição de Parâmetros das Metaheurísticas .....	89
3.3.1.1	Parâmetros TS .....	90
3.3.1.2	Parâmetros PSO .....	90
3.3.1.3	Parâmetros ACO.....	90
3.3.1.4	Parâmetros ES.....	91
3.3.1.5	Parâmetros DE.....	91
3.3.1.6	Parâmetros AIS.....	91
3.3.2	Mecanismos de Construção da População Inicial .....	91
3.3.3	Desempenho das Metaheurísticas.....	99
3.3.4	Planos de Expansão para o Sistema 6-Barras e Sistema CEMIG .....	104
3.4	CONCLUSÕES.....	106
<b>4</b>	<b>CRITÉRIOS DE SEGURANÇA.....</b>	<b>107</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	107
4.2	ESTUDO DE CASO – SISTEMA GARVER.....	109
4.2.1	Modelo de Otimização .....	111
4.2.2	Estudo de Confiabilidade .....	113

4.3	CLASSIFICAÇÃO DE CONTINGÊNCIAS DE TRANSMISSÃO .....	118
4.3.1	Estado da Arte .....	118
4.3.2	Metodologia Proposta .....	123
4.3.2.1	Novos Índices de Desempenho para Classificação de Contingências	125
4.3.2.2	Isolação de Barras e Sistemas .....	128
4.3.2.3	Classificação de Contingências de 2ª e 3ª Ordens .....	129
4.3.3	Resultados .....	130
4.3.3.1	IEEE-RTS 24 Barras .....	131
4.3.3.2	IEEE-RTS 72 Barras .....	134
4.3.3.3	IEEE 118 Barras .....	136
4.4	CONCLUSÕES .....	139
<b>5</b>	<b>PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE GRANDE PORTE .....</b>	<b>142</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	142
5.2	AMBIENTE PLANNER .....	143
5.2.1	Classificação de Contingências de Transmissão – TRANK .....	144
5.2.2	Planejamento da Expansão da Transmissão – TEPOP .....	148
5.3	ESTUDO DE CASO – SISTEMA DE GRANDE PORTE .....	159
5.3.1	Planejamento de Expansão – CASO 1 .....	161
5.3.2	Planejamento de Expansão – CASO 2 .....	171
5.4	CONCLUSÕES .....	175
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>179</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>186</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Sistema 6-Barras.....	83
Figura 3-2: Sistema CEMIG.....	86
Figura 3-3: Inicialização Inteligente x Inicialização Aleatória – $IQ$ (%) - Sistema 6 - Barras.....	95
Figura 3-4: Inicialização Inteligente x Inicialização Aleatória – $IQ$ (%) - Sistema CEMIG .....	95
Figura 3-5: Inicialização Inteligente x Inicialização Aleatória – $IS^{best}$ (%) - Sistema 6-Barras.....	96
Figura 3-6: Inicialização Inteligente x Inicialização Aleatória – $IS^{best}$ (%) - Sistema CEMIG. ....	96
Figura 3-7: Desempenho das Metaheurísticas – $IQ$ (%) – Sistema 6-Barras.....	100
Figura 3-8: Desempenho das Metaheurísticas – $IQ$ (%) – Sistema CEMIG.....	100
Figura 3-9: Desempenho das Metaheurísticas – $IS^{best}$ (%) – Sistema 6-Barras.....	101
Figura 3-10: Desempenho das Metaheurísticas – $IS^{best}$ (%) – Sistema CEMIG. ....	101
Figura 4-1: Sistema Garver .....	109
Figura 4-2: Sistema IEEE-RTS .....	121
Figura 5-1: Programa PLANNER.....	143
Figura 5-2: Arquivo de Dados – Ferramenta <i>TRANK</i> .....	144
Figura 5-3: Definição de Parâmetros – Ferramenta <i>TRANK</i> .....	146
Figura 5-4: Contingências Definidas pelo Usuário – Ferramenta <i>TRANK</i> .....	146
Figura 5-5: Zonas de Interesse – Ferramenta <i>TRANK</i> .....	147
Figura 5-6: Ordem de Despacho de Geração – Ferramenta <i>TEPOP</i> .....	150
Figura 5-7: Custos de Expansão de Linhas de Transmissão – Ferramenta <i>TEPOP</i> ....	152
Figura 5-8: Custo de Expansão de Transformadores – Ferramenta <i>TEPOP</i> .....	153
Figura 5-9: Parâmetros da Metaheurística Estratégias de Evolução – Ferramenta <i>TEPOP</i> .....	153
Figura 5-10: Parâmetros de Planejamento – Ferramenta <i>TEPOP</i> .....	154

Figura 5-11: Ramos Elegíveis para Expansão Definidos pelo Usuário – Ferramenta <i>TEPOP</i> .....	155
Figura 5-12: Arquivo “Best Expansion Plans” – CASO 1.....	156
Figura 5-13: Arquivo “Generation Dispatches” – CASO 1 .....	156
Figura 5-14: Arquivo “Best Expansion Plans” – CASO 2.....	157
Figura 5-15: Arquivo “Generation Dispatches” – CASO 2 .....	157
Figura 5-16: Ramos Elegíveis para Expansão Definidos pelo Usuário – CASO 3.....	158
Figura 5-17: Arquivo “Best Expansion Plans” – CASO 3.....	158
Figura 5-18: Lista de Contingências de 1ª Ordem – RATEA.....	160
Figura 5-19: Lista de Contingências de 1ª Ordem – Maior RATE .....	161
Figura 5-20: Ordem de Despacho de Geração .....	162
Figura 5-21: Custos de Expansão de Linhas de Transmissão .....	162
Figura 5-22: Custos de Expansão de Transformadores.....	163
Figura 5-23: Parâmetros da Metaheurística Estratégias de Evolução .....	163
Figura 5-24: Parâmetros de Planejamento .....	164
Figura 5-25: Melhores Planos de Expansão – Caso 1 .....	164
Figura 5-26: Despachos de Geração – Caso 1 .....	165
Figura 5-27: Diagrama Unifilar da Vizinhança 7000 Antes do Planejamento.....	168
Figura 5-28: Diagrama Unifilar da Vizinhança 7000 Após o Planejamento – CASO 1 ....	169
Figura 5-29: Diagrama Unifilar da Vizinhança 5000 Antes do Planejamento.....	170
Figura 5-30: Diagrama Unifilar da Vizinhança 5000 Após o Planejamento – CASO 1 ....	171
Figura 5-31: Melhores Planos de Expansão – Caso 2 .....	172
Figura 5-32: Despachos de Geração – Caso 2 .....	172
Figura 5-33: Diagrama Unifilar da Vizinhança 7000 Após o Planejamento – Caso 2.....	174

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Dados das Unidades Geradoras – Sistema 6-Barras. ....	83
Tabela 3-2: Dados de Carga – Sistema 6-Barras.....	84
Tabela 3-3: Dados de Circuitos – Sistema 6-Barras. ....	84
Tabela 3-4: Previsão da Capacidade de Geração e da Carga do Sistema Teste.....	85
Tabela 3-5: Dados das Barras – Sistema CEMIG.....	86
Tabela 3-6: Dados dos Circuitos Existentes – Sistema CEMIG.....	87
Tabela 3-7: Dados dos Circuitos Candidatos a Reforços – Sistema CEMIG.....	88
Tabela 3-8: Previsão da Capacidade de Geração e da Carga do Sistema CEMIG.....	89
Tabela 3-9: Dimensões da população – Sistema 6-Barras. ....	93
Tabela 3-10: Dimensões da população – Sistema CEMIG. ....	94
Tabela 3-11: Índices $IQ$ (%) e $IS^{best}$ (%) para as Metaheurísticas TS e ACO.....	97
Tabela 3-12: Dimensões Escolhidas para a População das Metaheurísticas.....	99
Tabela 3-13: Melhor Plano de Expansão para o Sistema 6-Barras. ....	105
Tabela 3-14: Melhor Plano de Expansão para o Sistema CEMIG. ....	105
Tabela 4-1: Dados de Geração e Carga.....	110
Tabela 4-2: Previsão da Capacidade de Geração e Carga do Sistema Garver.....	110
Tabela 4-3: Dados de Linhas de Transmissão.....	111
Tabela 4-4: Valor Presente das 10 Melhores Seqüências sem o Modelo Determinístico “N-1” .....	112
Tabela 4-5: Valor Presente das 10 Melhores Seqüências com o Modelo Determinístico “N-1” .....	113
Tabela 4-6: Comparação do Índice LOLE .....	115
Tabela 4-7: Valor Presente das 10 Melhores Seqüências sem o Modelo Determinístico “N-1” – Modelo de Carga Horária.....	115
Tabela 4-8: Plano de Expansão – Seqüência A.....	116
Tabela 4-9: Influência de Índices PI na Criação de Listas de Contingências.....	122
Tabela 4-10: Listas de Contingências Classificadas pelos índices Propostos .....	127

Tabela 4-11: Sistema IEEE–RTS 24 Barras – Contingências de 2ª Ordem (10,89%) ....	132
Tabela 4-12: Sistema IEEE–RTS 24 Barras – Contingências de 2ª Ordem (41,71%) ....	132
Tabela 4-13: Sistema IEEE–RTS 24 Barras – Contingências de 3ª Ordem (1,90%) .....	133
Tabela 4-14: Sistema IEEE–RTS 24 Barras – Contingências de 3ª Ordem (7,52%) .....	133
Tabela 4-15: Sistema IEEE–RTS 72 Barras – Contingências de 2ª Ordem (10,05%) ....	135
Tabela 4-16: Sistema IEEE–RTS 72 Barras – Contingências de 3ª Ordem (0,49%) .....	135
Tabela 4-17: Sistema IEEE 118 Barras – Contingências de 2ª Ordem (9,79%) .....	137
Tabela 4-18: Sistema IEEE 118 Barras – Contingências de 3ª Ordem (0,32%) .....	137



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ACO	-	Otimização por Colônia de Formigas ( <i>Ant Colony Optimization</i> ).
ACS	-	Sistema de Colônia de Formigas ( <i>Ant Colony System</i> ).
AIS	-	Sistemas Imunológicos Artificiais ( <i>Artificial Immune Systems</i> ).
CEMIG	-	Companhia Energética de Minas Gerais.
CHA	-	Algoritmo Heurístico Construtivo ( <i>Constructive Heuristic Algorithm</i> ).
DE	-	Evolução Diferencial ( <i>Differential Evolution</i> ).
EA	-	Algoritmos Evolucionários ( <i>Evolutionary Algorithms</i> ).
EENS	-	Energia Esperada Não-Suprida ( <i>Expected Energy Not-Supplied</i> ).
EP	-	Programação Evolucionária ( <i>Evolutionary Programming</i> ).
ES	-	Estratégias de Evolução ( <i>Evolution Strategies</i> ).
FS	-	Conjuntos <i>Fuzzy</i> ( <i>Fuzzy Sets</i> ).
GA	-	Algoritmos Genéticos ( <i>Genetic Algorithms</i> ).
GRASP	-	Procedimento de Busca Adaptativa Aleatória Gulosa ( <i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i> ).
LOLC	-	Custo de Corte de Carga ( <i>Loss of Load Cost</i> ).
LOLE	-	Expectativa de Perda de Carga ( <i>Loss of Load Expectation</i> ).
NPL	-	Programação Não-Linear ( <i>Nonlinear Programming</i> ).
OO	-	Otimização Ordinal ( <i>Ordinal Optimization</i> ).
PET	-	Planejamento da Expansão da Transmissão.
PI	-	Índice de Desempenho ( <i>Performance Index</i> ).
PL	-	Programação Linear ( <i>Linear Programming</i> ).
PSO	-	Otimização por Enxame de Partículas ( <i>Particle Swarm Optimization</i> ).
SA	-	Recozimento Simulado ( <i>Simulated Annealing</i> ).
SI	-	Inteligência de Enxame ou Coletiva ( <i>Swarm Intelligence</i> ).
SS	-	Busca Dispersa ( <i>Scatter Search</i> ).
TS	-	Busca Tabu ( <i>Tabu Search</i> ).

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Anteriormente à década de 70, a expansão de sistemas de potência era relativamente simples. Além de haver poucas alternativas de expansão, as incertezas da demanda e fontes energéticas eram mínimas. Naquela época, a tarefa de planejar reforços em sistemas de transmissão era inteiramente realizada pelos planejadores, os quais eram auxiliados apenas por programas de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade transitória. Estes métodos eram em sua grande maioria determinísticos, visto que a análise estava limitada a alguns cenários de demanda, hidrologia e parâmetros econômicos.

A partir dos anos 70, o crescimento acentuado dos sistemas e a disponibilidade de maiores recursos computacionais estimularam o desenvolvimento de programas baseados em técnicas de otimização com uma tendência para o planejamento automático. Alguns trabalhos [G70, DE73] caracterizam muito claramente esta transição.

Nas últimas décadas, tem se observado um grande crescimento em pesquisas destinadas à elaboração de modelos de planejamento da transmissão. Muitos artigos têm sido publicados na literatura técnica, devido ao surgimento de novos algoritmos de otimização e a elevação do nível de incertezas pela nova regulamentação do setor elétrico [LCAV03].

A dimensão dos atuais sistemas de transmissão, a natureza discreta das decisões de investimentos, o comportamento aleatório dos equipamentos de geração e transmissão, as incertezas no crescimento da carga e na localização de novas fontes de geração tornam o Planejamento de Expansão da Transmissão (PET)

um problema de otimização não-linear inteiro-misto de grande complexidade. Portanto, a escolha de um modelo que represente adequadamente o problema torna-se essencial para a obtenção de bons resultados. O problema PET pode ser ainda classificado como NP-completo, isto é, não existe qualquer método que o resolva em um tempo polinomial, uma vez que existem inúmeras soluções de ótimos locais, as quais aumentam exponencialmente à medida que se analisa um sistema de maior dimensão [EGR04].

O objetivo do planejamento de sistemas de transmissão consiste em definir a localização, o número de reforços a serem adicionados ao sistema e o tempo adequado para a realização de tais investimentos. Ao final, o plano de expansão escolhido deve atender a demanda futura prevista minimizando todos os custos envolvidos, além de satisfazer os critérios técnicos e de segurança pré-estabelecidos.

Geralmente, o horizonte de planejamento é dividido em curto, médio e longo prazo. Em se tratando do horizonte de longo prazo, o PET pode ser classificado entre diferentes linhas de abordagem:

Quanto à consideração de incertezas:

- *Determinística*: os modelos determinísticos têm como objetivo definir alternativas de expansão que apresentem os menores investimentos e sejam capazes de minimizar o corte de carga para a condição da rede intacta e também mediante critérios determinísticos como o “N-1” ou “N-2” (contingências simples ou duplas). Pode-se constatar, ainda, que aspectos relacionados às incertezas são negligenciados ou muito simplificados. Por exemplo, nestes modelos não há qualquer avaliação quanto aos custos de produção (operação e manutenção, e gastos com combustível) e de interrupção de energia. A demanda de potência futura é caracterizada através de cenários mais ou menos otimistas e ponderações são feitas em relação às taxas de juros. A partir de um conjunto de alternativas tecnicamente equivalentes, o planejador escolhe aquela que apresenta o menor valor presente dos custos. Em

geral, uma decisão baseada somente na utilização desses critérios pode conduzir a investimentos elevados, além de não garantir níveis adequados de confiabilidade para todas as barras do sistema. Contudo, estes modelos determinísticos podem ser muito importantes numa etapa inicial do planejamento, tendo a finalidade de reduzir o número de alternativas a serem avaliadas por modelos mais completos.

- *Não-determinística*: nos modelos não-determinísticos algumas incertezas externas e internas associadas ao processo de planejamento são incluídas na análise. As incertezas externas podem envolver indefinições relacionadas aos seguintes aspectos: projeções de mercado (demanda e energia), taxas de desconto e de câmbio, regras de mercado, restrições ambientais, afluências hidrológicas, custos de combustíveis, geração distribuída, entre outras. Tendo em vista estas incertezas, é indispensável a obtenção de planos de expansão mais flexíveis ou robustos, capazes de suportar os diferentes cenários futuros produzindo uma melhor estratégia de expansão para o sistema. Já as incertezas internas envolvem as indefinições relacionadas às disponibilidades dos equipamentos dos sistemas de potência. Ao considerar estas incertezas, o objetivo consiste em selecionar o plano de expansão capaz de atender a demanda futura da carga com a melhor relação custo/benefício para a sociedade.

Quanto à interferência do planejador:

- *Automática*: nesta abordagem as decisões em relação à expansão da rede são definidas a partir de um algoritmo computacional sem que haja qualquer interferência do planejador.
- *Interativa*: na abordagem interativa, é permitido ao planejador interagir com o algoritmo de expansão da transmissão, cuja decisão final é baseada também em sua própria experiência e/ou através de estudos complementares.

Quanto à evolução temporal dos reforços:

- *Estática*: os modelos estáticos determinam, para um dado horizonte do planejamento, a localização e o número de reforços necessários. Nesta abordagem, o planejador não está interessado em obter quando os reforços devem ser instalados, mas sim em encontrar o estado final da rede.
- *Dinâmica (Cronológica)*: no planejamento dinâmico considera-se não somente a localização e quais reforços serão necessários, mas também a evolução temporal destas decisões. Neste caso, o modelo de otimização deve minimizar o valor presente dos custos envolvidos na sua função objetivo. Nesta abordagem o tamanho e o nível de complexidade dos sistemas proporcionam um número muito grande de variáveis e restrições a serem consideradas exigindo um maior esforço computacional para se obter os melhores planos.

Verifica-se, portanto, que o PET é um problema essencialmente dinâmico e de natureza não-determinística. Ademais, a inclusão de uma análise dinâmica [EGR04] juntamente com a consideração de incertezas externas [GCCP93, BCFL03] e internas [B04, ML04] aumenta a complexidade em termos de dados, modelos e custo computacional do problema. Processos de planejamento considerando todos estes aspectos dificilmente podem ser enfrentados utilizando-se apenas ferramentas automáticas. Neste caso, o planejador terá a difícil tarefa de escolher quais incertezas são mais relevantes para o problema, sendo sua participação essencial no processo de tomada de decisões.

Para a solução do problema de planejamento, devem-se utilizar três conjuntos distintos de ferramentas:

- *Técnicas de otimização*: esta ferramenta tem como objetivo principal minimizar todos os custos envolvidos na função objetivo da expansão de redes de transmissão: investimentos, operação e manutenção,

perdas, interrupção, multas, etc. Estas técnicas se dividem em modelos clássicos, heurísticos e metaheurísticos. Em relação ao primeiro, pode ser citada a programação linear, não-linear, dinâmica, inteiro-mista. Fazem parte dos métodos heurísticos e metaheurísticos o Algoritmo Heurístico Construtivo (*Constructive Heuristic Algorithm – CHA*), os Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms - GA*), Busca Tabu (*Tabu Search – TS*), Estratégias de Evolução (*Evolution Strategies – ES*), Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization – ACO*), etc.;

- *Modelagem de incertezas*: técnicas probabilísticas e baseadas em conjuntos *fuzzy* (*Fuzzy Sets – FS*) podem ser utilizadas. Os métodos baseados na teoria de probabilidades e processos estocásticos (incluindo teoria de confiabilidade) estão mais avançados para lidar com as incertezas internas mais relevantes deste problema, por exemplo, as disponibilidades dos componentes. Incertezas externas cujo comportamento passado caracteriza bem o comportamento futuro, como, por exemplo: séries hidrológicas e demanda de curto-prazo, também podem ser tratadas com maior segurança pela teoria de probabilidades. Em relação à demanda de potência de longo prazo, outro parâmetro importante no planejamento, o uso de variáveis lingüísticas baseados em FS podem ser mais convenientes. Contudo, deve-se destacar também a existência de aplicações baseadas em técnicas de cenários e análises via árvore de decisões em sistemas elétricos de potência;
- *Análise estática do sistema*: as possíveis configurações do sistema de potência são usualmente analisadas por um conjunto de programas já bastante conhecidos como o fluxo de potência não-linear (fluxo AC), análise de curto-circuito, estudo de estabilidade transitória, etc.

O objetivo final da aplicação dos três conjuntos de ferramentas anteriores é a determinação de um grupo de planos de expansão que devem fazer parte de um processo de decisão onde o custo e o benefício serão adequadamente avaliados.



Até o presente momento, as empresas do setor elétrico brasileiro têm utilizado metodologias interativas para planejar suas redes de transmissão, atendendo principalmente ao critério “N-1” [MSPCPP82] e fazendo uso basicamente do fluxo AC. Outros algoritmos de auxílio ao planejamento, como programas de avaliação de curto-circuito e de estabilidade transitória, também têm sido utilizados, fornecendo avaliações mais criteriosas das alternativas de reforços formuladas. Contudo, este quadro começa a ser mudado com o interesse destas empresas por ferramentas que incluem técnicas de otimização.

Na prática, a utilização de ferramentas de otimização ainda é muito limitada no Brasil. Entretanto, o emprego destas ferramentas em análises preliminares, destinadas a reduzir o número de alternativas de expansão a serem avaliadas pelo planejador, representa uma estratégia muito interessante de planejamento, podendo ser facilmente assimilada pelas empresas do setor elétrico.

## **1.2 ESTADO DA ARTE**

Nesta seção, será dada atenção ao estado da arte do problema PET onde serão apresentados os trabalhos mais relevantes em relação às técnicas de otimização utilizadas, aos modelos de representação dos sistemas de potência e às linhas de abordagem.

### **1.2.1 Técnicas de Otimização**

#### **1.2.1.1 Modelos Clássicos**

Nas últimas três décadas, várias técnicas de otimização têm sido propostas com o intuito de se encontrar os melhores planos de expansão para o problema PET. Nota-se que uma parte dos trabalhos desenvolvidos utiliza técnicas clássicas de otimização, sendo classificadas como modelos clássicos. Com esta característica podem ser citadas as programações: linear [G70, VGS85], dinâmica [DE73], não-linear [YH89] e inteiro-mista [SSL89, BOPG01, AMC03].

Em um dos primeiros modelos [G70], o problema foi formulado como um problema de fluxo e usado um algoritmo de programação linear (PL) para

encontrar as rotas mais diretas do parque de geração às cargas. Os reforços são feitos nos pontos de maior sobrecarga e um novo fluxo linear é analisado.

O trabalho [AMC03] apresenta uma técnica baseada em programação linear inteiro-mista incluindo a consideração de perdas ativas na solução do problema PET com abordagem estática. O modelo proposto minimiza os custos de investimento de novas linhas e os custos de operação das unidades geradoras. As duas principais contribuições deste trabalho são: uma rigorosa representação de perdas, através de expressões lineares, e uma formulação para a expansão da transmissão através da programação linear inteiro-mista, a qual prescinde da Decomposição de Benders. Apesar de fornecer soluções mais caras, a consideração de perdas pode fornecer alternativas de reforços mais consistentes, reduzindo os gastos com os futuros ajustes do plano de expansão.

Dois fortes obstáculos à utilização destes modelos são a não-linearidade (a formulação envolve o produto entre as variáveis: ângulo da tensão de barra e decisão de reforços) e a não-convexidade presentes nos estudos de expansão dos sistemas elétricos, em particular no caso da transmissão, que podem acarretar em problemas de convergência do algoritmo de solução do fluxo de potência e na obtenção de ótimos locais.

#### **1.2.1.2 Modelos Heurísticos**

A estratégia fundamental destes modelos consiste em realizar transições (adições e remoções de reforços), de forma eficiente, analisando as soluções do problema. Estas transições guiam o processo em direção a soluções de alta qualidade. A definição de reforços nestes modelos é geralmente obtida realizando buscas guiadas por sensibilidades (regras heurísticas). Tais sensibilidades podem estar relacionadas ao corte de carga [PP85], ao critério do mínimo esforço que visa uma melhor distribuição dos fluxos de potência [MSPCPP82, OSPC05] ou ainda o critério que estima o benefício em termos do índice de carga não-suprida, o qual é baseado em mudanças nas susceptâncias dos ramos a partir de adições de novos reforços [BOA01].

A referência [MSPCPP82] propõe um tratamento interativo para o problema da expansão de longo prazo, o qual incorpora análises de sensibilidade, fluxo de potência DC e análise de contingências. Este processo de planejamento é dividido em duas fases. Na primeira fase, os reforços são automaticamente adicionados de modo a eliminar todas as sobrecargas do sistema. O critério de adição de reforços, denominado de mínimo esforço, visa uma melhor distribuição dos fluxos de potência. O sistema obtido é novamente reforçado, através de uma segunda fase, quando são considerados os efeitos das contingências (remoção de circuitos) simples mais severas. Como todo processo interativo, a metodologia proposta não identifica a solução ótima. No entanto, ela é capaz de fornecer boas alternativas de reforços.

Técnicas como a Decomposição de Benders também têm sido usadas com o intuito de separar os subproblemas de investimento e operação [PPCO85, BPG01]. Inicialmente, o subproblema de investimento seleciona um plano preliminar e posteriormente o subproblema de operação analisa o mesmo indicando restrições operacionais violadas. Em seguida, estas restrições são adicionadas ao subproblema de investimento e uma nova iteração de Benders é repetida até que a convergência seja alcançada. Em [TGS08], o subproblema de segurança também é considerado através do critério N-1.

Em [RM94] um tratamento hierárquico é dado à representação da rede de transmissão. Neste trabalho, o processo de otimização começa com uma representação simples da rede (modelo de transportes). Em seguida é adotado um modelo híbrido, com utilização do modelo de transportes para novos circuitos e de fluxo de potência linearizado (fluxo DC) para circuitos existentes. O processo termina com a aplicação do fluxo DC a todos os circuitos. Em todas as fases a técnica de Decomposição de Benders é empregada para resolver os subproblemas de investimento e de operação.

Um Algoritmo Heurístico Construtivo (CHA) é desenvolvido em [RRMM03] para a solução do problema PET. Um modelo de transporte, o qual consiste em eliminar as restrições não-lineares do modelo DC, é usado para avaliar os

planos candidatos. De forma a indicar os melhores pontos da rede a serem reforçados, são utilizados índices de sensibilidade baseados no carregamento das linhas de transmissão. Como as decisões são locais, posteriormente, uma tentativa de retirada de reforços excedentes é realizada seguindo uma ordem dos mais dispendiosos. A metodologia é aplicada às abordagens estática e dinâmica. Apesar de bons resultados obtidos para sistemas de pequena dimensão, chega-se à conclusão que para sistemas maiores e mais complexos esta ferramenta torna-se ineficiente. Contudo, as topologias identificadas podem ser usadas para a definição de uma população inicial em outras técnicas de otimização mais eficientes como as metaheurísticas.

Em [RRMS05, SRMR05], o CHA anterior é aperfeiçoado para a resolução do problema PET estático. Em ambos os trabalhos o modelo de transporte é usado apenas para estimar índices de sensibilidade. A avaliação dos planos candidatos é feita usando um modelo DC completo. Apesar de o CHA ser capaz de encontrar soluções ótimas para sistemas de pequeno porte, somente soluções de boa qualidade são obtidas para sistemas de médio e grande porte. Em [SRMR05], o método de pontos interiores é empregado para resolver o problema de programação não-linear (*nonlinear programming* – NPL).

Em continuidade ao desenvolvimento da técnica CHA, em [RGR07] a mesma é apresentada usando um modelo AC para a solução do problema PET estático. A metodologia inclui o problema de alocação de potência reativa na resolução do problema PET. Ao final de um processo iterativo, também é verificada a possibilidade da retirada de fontes reativas excedentes. Contudo, o CHA não garante que sejam encontrados planos ótimos para o problema PET e sim soluções de boa qualidade.

De acordo com os trabalhos desenvolvidos usando os modelos heurísticos, nota-se que os mesmos representam uma melhor alternativa aos modelos clássicos, por utilizar sensibilidades para a definição de reforços e tratar a não-linearidade do problema através da consideração dos subproblemas de investimento e operação. Como as sensibilidades consistem de informações

locais, os modelos heurísticos possuem dificuldade para identificar as melhores soluções para o problema, apesar de encontrarem soluções de boa qualidade.

Portanto, ainda se trata de um grande desafio desenvolver modelos heurísticos que resolvam de forma eficiente o problema PET, principalmente quando uma abordagem dinâmica (objeto de estudo neste trabalho) e sistemas de grande porte são considerados, devido ao elevado nível combinatório existente. Modelos metaheurísticos são mais indicados já que são capazes de encontrar soluções de melhor qualidade a um menor esforço computacional.

### **1.2.1.3 Modelos Metaheurísticos**

Modelos metaheurísticos têm se tornado uma alternativa em relação aos demais modelos. Estes novos algoritmos utilizam técnicas de otimização que, passo a passo, realizam um processo de geração, avaliação e seleção de alternativas para a alocação de novos reforços. Na avaliação, a função objetivo pode incluir critérios como custos de investimento, operação e manutenção, custos de interrupção de energia, etc. Estes modelos são mais atrativos, pois podem obter boas (i.e. economicamente competitivas) soluções factíveis a um custo computacional aceitável. Ao mesmo tempo o processo de otimização pode utilizar estratégias que procuram evitar o aprisionamento em vales da função objetivo e, conseqüentemente, reduzir o risco de obtenção de ótimos locais.

Uma infinidade de técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas tem sido utilizada na solução do problema PET, como o Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* – SA) [RGM96, GAMR97], GA [RPCS96, GMR98a, GS01, DY02], TS [WC97, GRM00, SOOB01], Programação Evolucionária (*Evolutionary Programming* – EP) [CN99], Procedimento de Busca Adaptativa Aleatória Gulosa (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* – GRASP) [BOA01, FBRF05], Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) [SRC02, YHJX05], ES [LSRMSR06, MSLRSR07], ACO [R06, RLMSR06, RLM08], Evolução Diferencial (*Differential Evolution* – DE) [DLLW06, STIS07], Otimização Ordinal (*Ordinal Optimization* – OO) [XZW07] e Busca Dispersa (*Scatter Search* – SS) [MS07].

A seguir será apresentado um levantamento histórico, o qual seguirá a ordem estabelecida pela primeira aplicação destas metaheurísticas na resolução do problema PET.

- Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* – SA)

No momento em que modelos baseados em metaheurísticas despontavam como novas ferramentas para a solução do problema PET, a técnica SA, a qual simula o processo físico de solidificação e formação de cristais perfeitos, teve uma relativa aceitação com a publicação de alguns artigos [RGM96, GAMR97]. No entanto, o seu baixo desempenho, quando comparado ao GA e TS, em relação às qualidades dos planos obtidos e esforço computacional comprometeram a continuidade de seus estudos nos anos seguintes [GMR98b, MS01, MI07]. Neste período somente dois novos trabalhos foram dedicados à solução do problema PET [BS03, BS05].

Em [BS03], o modelo proposto baseado na metaheurística SA se dedica a abordagem dinâmica do problema PET. Para a avaliação dos planos candidatos é utilizado um PL baseado no fluxo DC que inclui um processo iterativo para o cálculo de perdas ativas no sistema. Estas perdas são representadas como cargas nas barras extremas de cada ramo. Como objetivo, o SA procura minimizar os custos de operação e investimento, e uma vez definido o plano de expansão, os preços marginais nodais de longo prazo e a remuneração marginal correspondente são obtidos. Ao final, torna-se possível definir adequadamente as tarifas para o uso da rede de transmissão.

Em continuidade ao trabalho [BS03], a referência [BS05] inclui na função objetivo o índice de confiabilidade conhecido por Energia Esperada Não-Suprida (*Expected Energy Not-Supplied* – EENS) calculado usando uma simulação Monte Carlo pseudo-cronológica [LMMB00]. Portanto, trata-se de um problema multicritérios de difícil resolução, principalmente por incluir índices de confiabilidade como restrição durante o processo de otimização. Através de uma metodologia interativa, são definidos, *a priori* pelo planejador, níveis aceitáveis para o custo de investimento e EENS. Estes níveis podem ser alterados impondo



uma melhoria ou degradação de um em relação ao outro até que o planejador esteja satisfeito com a solução encontrada. A grande desvantagem deste trabalho se refere ao elevado esforço computacional necessário à análise de confiabilidade, principalmente por adotar o modelo de simulação Monte Carlo durante o processo de otimização. Ademais, a metaheurística SA não tem sido a mais indicada para a solução do problema PET pelo seu fraco desempenho computacional.

- Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms – GA*)

Esta metaheurística, a qual é baseada no processo de evolução natural das espécies, tem demonstrado uma grande habilidade para tratar problemas de otimização inteiro-mista, não-convexos e não-lineares tais como o problema PET. Juntamente com o EP, ES e DE, o GA faz parte da classe dos Algoritmos Evolucionários (*Evolutionary Algorithms – EA*).

Em [Y01] é proposto um GA capaz de lidar com o problema PET considerando tanto uma abordagem estática como dinâmica, cujo objetivo é minimizar os custos de investimento, operação e manutenção, e perdas de energia. Além disso, é utilizado um modelo de fluxo AC com a possibilidade de redespacho das unidades geradoras de forma a garantir que as restrições operacionais e de segurança do sistema sejam atendidas. Testes são realizados considerando um sistema de seis barras e para um horizonte de planejamento dividido em apenas três estágios, o que não prova a viabilidade da utilização deste modelo em sistemas reais de maior porte. Ademais, é permitido que circuitos existentes sejam removidos o que não consiste em uma operação comum em sistemas reais de potência.

Na referência [EGR04], um eficiente GA é proposto para a resolução do problema PET com abordagem dinâmica utilizando um modelo de fluxo DC. É utilizada uma geração eficiente da população inicial através de modelos aproximados de fluxo DC e usando CHA baseados em sensibilidades [G70, MSPCPP82, PP85]. Mais uma vez populações iniciais de melhor qualidade proporcionam um melhor desempenho do algoritmo como já havia sido provado em [GMR98a, GMR98b].

Em [SRRGM05], é proposto um GA auxiliado por um modelo de fluxo DC para resolver o problema PET com abordagem estática. Restrições de segurança envolvendo o critério determinístico “N-1” são consideradas. Em alguns trabalhos [MSPCPP82, SSL89], primeiramente o processo de planejamento é feito sem análise de segurança. Numa segunda fase, reforços são adicionados simulando a saída de cada circuito de uma lista de contingências. Neste trabalho, o critério de segurança é considerado como parte do problema PET, o que proporciona soluções diferentes de quando o problema é tratado em duas fases. No entanto, principalmente para sistemas de médio e grande porte, o número de avaliações pelo PL aumenta substancialmente como pode ser comprovado nos resultados. Uma alternativa seria utilizar uma lista de contingência que inclua somente os pontos de interesse. Ademais, a construção desta lista consiste de uma tarefa difícil, pois à medida que se reforça a rede, os pontos críticos são alterados e assim a lista também precisa ser alterada.

Em [XDW06], é proposto um novo modelo para o problema PET considerando uma abordagem estática. Com o advento da nova regulamentação do setor de energia, novos modelos para o problema PET têm sido propostos cujo objetivo não é somente minimizar os custos de investimentos, mas também minimizar riscos e o impacto aos consumidores, além de maximizar o lucro e o benefício social dos projetos de expansão. Neste trabalho o objetivo é maximizar o benefício da expansão, o qual é definido pelo lucro esperado dos investimentos feitos na rede de transmissão e o custo de perdas de carga, sujeito às restrições financeiras e técnicas. A metaheurística GA e um modelo de fluxo DC são utilizados para a evolução e avaliação dos planos de expansão candidatos a serem selecionados. No entanto, este modelo de planejamento de transmissão descentralizado, o qual considera uma maior dinâmica quanto à inserção de novas unidades geradoras, ainda precisa ser aperfeiçoado antes de ser aceito como uma ferramenta usual, uma vez que proporciona uma maior dificuldade para o planejamento da transmissão. Assim, o modelo centralizado ainda tem recebido grande atenção devido à insuficiência de capacidade de transmissão das grandes redes de potência.

Já em [RRS07], é proposto um novo GA que possui algumas modificações em relação àquele apresentado em [EGR04], com o objetivo de melhorar o processo de busca. Dentre elas destacam-se: a inicialização e criação de somente indivíduos factíveis a partir de um melhoramento local das soluções infactíveis usando um CHA; e um aumento no controle de diversidade proporcionando uma população totalmente distinta que evolui através das gerações. Estes fatos contribuem para que o GA convirja usando um número menor de PL e para uma melhoria na qualidade do plano de expansão encontrado.

- Busca Tabu (*Tabu Search* – TS)

A metaheurística TS também tem sido utilizada em vários trabalhos, a qual se baseia em uma memória adaptativa, representada por uma lista tabu, de forma a garantir uma melhor exploração do espaço de busca.

Em [GMR98b], é realizado uma comparação das metaheurísticas SA, GA e TS destacando suas principais qualidades, além de propor um novo modelo híbrido baseado em TS, o qual possui algumas características das outras duas técnicas. Testes são realizados considerando uma abordagem estática e utilizando um modelo de fluxo DC. Resultados comprovam a superioridade do modelo híbrido em relação ao tempo computacional e a qualidade das soluções encontradas. Contudo, deve-se salientar que o sucesso deste novo modelo somente é alcançado quando são utilizados um mecanismo de redução eficiente de vizinhança das soluções e um algoritmo para a definição das soluções iniciais.

Na referência [MS01], é utilizado um novo modelo baseado em um TS paralelo. A estratégia usada visa decompor a vizinhança da solução atual em várias sub-vizinhanças de forma a reduzir o esforço computacional. Adicionalmente, também são consideradas listas tabu de diversos comprimentos permitindo que a busca seja feita em uma região mais ampla do espaço e resultando em uma melhoria da qualidade das soluções. O desempenho deste novo modelo é comparado às metaheurísticas SA, GA e o TS tradicional na resolução do problema PET com abordagem estática. Resultados apontam a nova

metodologia como vencedora tanto em relação ao esforço computacional quanto à qualidade das soluções encontradas. A desvantagem do modelo se refere à codificação binária utilizada, que em sistemas de grande porte pode aumentar drasticamente o vetor solução do problema.

Com o intuito de reduzir ainda mais o tempo computacional dos modelos baseados em TS, em [MI07], é proposto um modelo híbrido entre aquele desenvolvido em [MS01] e a metaheurística OO. Neste trabalho, OO é inserido com o objetivo de reduzir o número de soluções candidatas a serem analisadas na vizinhança. Esta seleção é feita de forma probabilística ao calcular um subespaço do conjunto de soluções factíveis na vizinhança. De fato, os resultados comprovam uma melhoria em relação ao esforço computacional na solução do problema PET com abordagem estática. Porém, apesar da melhor solução conhecida ser capturada, a qualidade das soluções encontradas é levemente deteriorada quando comparada às metaheurísticas TS tradicional e paralela. A justificativa da utilização deste novo modelo recai sobre a aplicação em sistemas de grande porte, onde o tempo computacional pode se tornar proibitivo usando modelos tradicionais baseados em TS. Resta saber se o comprometimento da qualidade das soluções não será maior em sistemas de grandes dimensões ao reduzir a dimensão do espaço de busca.

Em [LMRR08], a metaheurística TS é apresentada para a resolução de problemas PET considerando sua natureza dinâmica. Custos relacionados às perdas ôhmicas e envolvendo o valor da confiabilidade também são considerados para a escolha dos melhores planos. Para a definição de planos iniciais de melhor qualidade é utilizada uma função gulosa baseada na metaheurística GRASP. A definição de um plano de boa qualidade como ponto inicial das buscas pelo TS é essencial para a redução de vizinhança e para a obtenção de melhores resultados. O modelo proposto é aplicado, com sucesso, em dois sistemas de potência. Resultados apontam que, ao se incluir o custo de perdas no processo de otimização, e ainda, ao se assegurar um bom nível de confiabilidade, é possível obter uma melhor continuidade de estudo após o horizonte de planejamento. Como desvantagem, a natureza dinâmica do

problema PET é abordada através da solução de vários subproblemas estáticos separadamente. Cabe ressaltar que, na presente tese de doutorado, o objetivo é minimizar os custos em valor presente onde os estágios ao longo do horizonte são considerados simultaneamente.

- Programação Evolucionária (*Evolutionary Programming – EP*)

Em [CN99], é proposto um modelo baseado na metaheurística EP para a resolução do problema PET considerando uma abordagem estática. Esta técnica também tem origem no processo natural de evolução das espécies, no entanto, diferentemente do GA, somente os operadores de mutação e seleção são utilizados. O objetivo neste trabalho é encontrar o melhor plano de expansão minimizando custos de investimentos e operacionais, e o corte de carga no sistema. Para a avaliação das soluções é utilizado um PL que inclui o modelo de fluxo DC. A eficiência desta técnica é comprovada ao compararem-se os resultados apresentados em [GMR98b] que utiliza as metaheurísticas SA, GA e um modelo híbrido baseado em TS. O número de PL necessários para se obter a melhor solução conhecida é bastante reduzido. Estudos são realizados em um sistema com seis barras e um sistema real mexicano. Cabe ressaltar que um menor esforço computacional é obtido se um conjunto de soluções iniciais é definido de forma não-aleatória.

- Procedimento de Busca Adaptativa Aleatória Gulosa (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure - GRASP*)

Em [BOA01], a técnica denominada GRASP é apresentada, a qual é composta de duas fases. A primeira é responsável pela construção de soluções viáveis para o problema. Estas soluções são obtidas utilizando uma função gulosa (*greedy function*), a qual permite criar uma lista dos melhores pontos para adição de reforços. Na fase seguinte, é feita uma busca local na vizinhança visando o aprimoramento da solução obtida na fase de construção, a qual é baseada em trocas de reforços. Estudos são realizados utilizando os sistemas Sul e Sul-Sudeste Brasileiros considerando uma abordagem estática.

Na referência [FBRF05], um conceito generalizado de GRASP é utilizado juntamente com a técnica conhecida por *Path Relinking* com o objetivo de explorar diferentes trajetórias entre duas soluções de alta qualidade previamente encontradas. Isto é feito identificando diferentes pontos que receberam reforços entre estas duas soluções. Então são realizadas operações de retirada e adição de reforços baseado em uma função gulosa de forma a realizar uma busca na vizinhança das mesmas. Resultados são apresentados utilizando os mesmos sistemas Sul e Sul-Sudeste Brasileiros em [BOA01], com destaque para uma melhoria da solução encontrada para o sistema Sul-Sudeste. Apesar dos resultados promissores em ambos os trabalhos, uma melhor avaliação deve ser feita no tratamento do problema PET com abordagem dinâmica.

- Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization – PSO*)

Dentre as metaheurísticas que compartilham da Inteligência de Enxame ou Coletiva (*Swarm Intelligence – SI*), a técnica PSO tem sido utilizada em alguns trabalhos na resolução do problema PET. Esta metaheurística é baseada no comportamento de vôo de bando de pássaros, onde embora cada pássaro aparentemente movimente de forma independente, observa-se a existência de alguma forma de informação que é compartilhada entre os membros do bando.

Em [SRC02], pela primeira vez o PSO é utilizado para a resolução do problema PET. Neste trabalho, é considerada uma abordagem estática cujo modelo de avaliação da rede utiliza o fluxo AC. A função objetivo visa minimizar os custos de investimento e perdas em linhas e equipamentos e maximizar a receita bruta do uso da rede. Apesar de utilizar um modelo bem detalhado, o estudo é feito em um sistema de pequena dimensão. Ademais, aspectos relacionados à perda de convergência em sistemas de maior porte ainda merecem ser discutidos para a verificação da viabilidade da metodologia proposta.

Em [YHJX05], a metaheurística PSO é usada para a resolução do problema PET com abordagem dinâmica, o qual inclui restrições de segurança baseadas no critério determinístico “N-1”. A análise dos planos candidatos é feita utilizando um modelo de fluxo DC cujo PL visa minimizar os custos de

investimentos em linhas e transformadores e uma penalidade por não satisfazer as restrições de segurança. A metaheurística PSO é melhorada de forma a permitir que parte das partículas sofra mutações após um determinado número de iterações. Adicionalmente, uma mutação é aplicada ao melhor plano encontrado no final do processo na tentativa de melhorar o resultado. Quanto ao critério “N-1”, o mesmo é considerado somente para a melhor solução encontrada ao final de cada iteração, de modo a reduzir o esforço computacional. Contudo, os resultados surpreendem de forma negativa, pois a taxa de sucesso para encontrar o melhor plano conhecido é de apenas 20% para o PSO tradicional e 32% para a metodologia proposta.

Em [JCYZ07] também é utilizada a metaheurística PSO para o problema PET com abordagem estática. O objetivo neste trabalho é minimizar os custos de investimentos e perdas de potência ativa além de inserir uma penalidade para a violação de fluxos e conectividade da rede. O modelo de fluxo DC é considerado para a avaliação dos planos candidatos. Um estudo comparativo é apresentado utilizando as metaheurísticas PSO, GA e ACO. De acordo com os resultados, PSO e GA obtiveram um melhor desempenho para encontrar o melhor plano em ambos os sistemas. Contudo, o ACO teve uma velocidade de convergência maior, com um pequeno comprometimento no desempenho para se obter o melhor plano conhecido. Uma maior credibilidade seria dada ao estudo comparativo, se fosse considerada uma abordagem dinâmica para o problema PET. Neste caso, o espaço de busca aumentaria e uma melhor avaliação seria feita em termos das dificuldades encontradas por cada técnica de otimização.

Recentemente em [YGD08], foi proposto um novo modelo para a resolução do problema PET, no qual são considerados o efeito de crescimento de carga durante cada estágio do horizonte e o aumento do custo de construção de reforços no futuro. Um fluxo DC é usado para a avaliação das soluções e a metaheurística PSO aliada a uma otimização de *chaos* são utilizadas como ferramentas de otimização. A otimização de *chaos* é considerada na construção de melhores partículas que devem fazer parte da população inicial.

O estudo considera uma abordagem dinâmica com o objetivo de minimizar os custos de investimentos. A metodologia proposta é deficiente ao não considerar um modelo que também vise minimizar as perdas ôhmicas e atender aos critérios de segurança como o “N-1” ou índices de confiabilidade.

- Estratégias de Evolução (*Evolution Strategies – ES*)

Em [LSRMSR06], pela primeira vez a metaheurística ES é aplicada ao problema PET. O ES, ao contrário da maioria dos GA, utiliza uma codificação real, e não binária, para os reforços adicionados em cada ramo do sistema. Além disso, somente os mecanismos de mutação e seleção são usados como operadores de busca. Esta metaheurística é muito semelhante ao EP diferenciando desta somente pela forma como é aplicado o operador de mutação. Nesta referência, aliado ao ES, uma função gulosa proposta em [BOA01] também é utilizada para a definição de uma população inicial de melhor qualidade, cujo objetivo é melhorar o resultado final do processo de otimização. Este trabalho utiliza uma abordagem dinâmica onde se deseja minimizar os custos de investimento em um primeiro momento. Ao encontrar um conjunto de planos candidatos que satisfazem as condições operacionais, uma análise de confiabilidade é realizada. Assim, ao final, a metodologia visa também minimizar o custo de interrupção de energia (*Loss of Load Cost – LOLC*) [WB93, LMMB00, ML04].

Em continuidade ao trabalho anterior, em [MSLRSR07] é proposta uma nova metodologia baseada na metaheurística ES onde também é incluída, na função objetivo, a minimização do custo de perdas ôhmicas do sistema. Ao mensurar as perdas ativas e representá-las como cargas, o número de reforços necessários é acrescido e, conseqüentemente, o custo de investimentos. Os resultados obtidos apontam que é possível obter uma melhor continuidade do plano após o horizonte de planejamento ao incluir perdas e o custo de interrupção de energia.

- Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization – ACO*)

A metaheurística ACO também faz parte do grupo SI, uma vez que as formigas se comunicam através de rastros de feromônio depositados no solo, na tentativa de encontrar o menor caminho entre seu ninho e uma fonte de alimentos.



O algoritmo de Sistema de Colônia de Formigas (*Ant Colony System* – ACS), o qual consiste num dos mais eficientes e utilizados dentro do grupo de algoritmos da metaheurística ACO, foi utilizado primeiramente em [RLMSR06] na solução do problema PET com abordagem estática. Neste trabalho, destaque é dado à definição da função heurística responsável por guiar as buscas das formigas para as melhores regiões do espaço. Novamente, como já comentado em outros trabalhos, uma função que utiliza conceitos relacionados à função gulosa apresentada em [BOA01] e custos de investimentos de reforços, contribuiu para um melhor desempenho da metaheurística. A avaliação dos planos candidatos utiliza um PL baseado em um modelo de fluxo DC cujo objetivo é minimizar o custo de investimentos.

As referências [R06, RLM08] complementam o trabalho anterior, sendo que o trabalho [R06] traz o estado da arte de inúmeros algoritmos desenvolvidos baseados em ACO. Um estudo detalhado de ajustes de parâmetros é apresentado e verifica-se que os mesmos não precisam ser alterados no estudo de diferentes sistemas, o que comprova a robustez do algoritmo proposto. Resultados são apresentados considerando as abordagens estática e dinâmica e destacando a importância da inclusão do custo de perdas ôhmicas na função objetivo. Em [RLM08], uma análise de confiabilidade é realizada dentre os melhores planos selecionados pelo processo de otimização.

A referência [LSMRRS08] traz um trabalho comparativo entre o desempenho das metaheurísticas ES, TS e ACO desenvolvidas em trabalhos anteriores [R06, MSLRSR07, LMRR08, RLM08] considerando uma abordagem dinâmica. A avaliação dos planos candidatos é feita utilizando um modelo de fluxo DC. Para a definição dos planos iniciais nas metaheurísticas ES e TS e como função heurística no ACO, é utilizada uma função gulosa, baseada em [BOA01]. Depois de encontrados os melhores planos de expansão que minimizam os custos de investimento e perdas ativas, um estudo de confiabilidade é realizado para auxiliar a tomada de decisão. Ao final, o melhor plano escolhido deve minimizar os custos de investimento, perdas ôhmicas e interrupção de energia medida pelo índice LOLC. Resultados indicam um melhor desempenho do ACO e ES quanto à qualidade das soluções, enquanto que o esforço computacional é menor para

o ACO e TS. Contudo, um estudo mais detalhado merece ser realizado para uma melhor visão do desempenho destas e outras técnicas de otimização, o qual será apresentado no Capítulo 3 desta tese.

- Evolução Diferencial (*Differential Evolution* – DE)

Outro exemplo da classe EA, se refere à metaheurística DE. Em [DLLW06], esta técnica de otimização é utilizada para a resolução do problema PET considerando uma abordagem estática. A função objetivo visa minimizar o custo de investimento, a EENS, o bem estar social que envolve as perdas econômicas de consumidores e a flexibilidade de expansão do sistema em se readaptar de acordo com diferentes cenários de carga. Um modelo de fluxo AC é usado para a avaliação dos planos candidatos. Apesar da metodologia proposta tratar de critérios multi-objetivos, pouca atenção é dada às dificuldades possivelmente encontradas para resolver este problema, principalmente quanto à avaliação de índices de confiabilidade. Parte do trabalho se dedica ao estudo comparativo entre diferentes mecanismos de mutação existentes e também ao utilizar as metaheurísticas GA e ES.

Na referência [STIS07], a metaheurística DE é novamente utilizada. A função objetivo neste trabalho consiste em minimizar apenas o custo de investimentos de reforços considerando uma abordagem dinâmica. A metodologia inclui o modelo de fluxo DC sem permitir que haja um redespacho de potência entre os geradores. Ao final, uma comparação de desempenho é feita entre o DE e um GA convencional destacando um melhor resultado da metodologia proposta. Trata-se de uma aplicação interessante, mas aspectos relacionados à segurança do sistema bem como a inclusão do custo de perdas ativas não são considerados.

- Otimização Ordinal (*Ordinal Optimization* – OO)

A metaheurística conhecida por OO é utilizada em [XZW07] para a resolução do problema PET com abordagem dinâmica. Neste trabalho o objetivo é minimizar os custos de investimento, de produção de energia e perdas de carga baseado no índice LOLC. A metodologia em si não visa apresentar um modelo ideal para

a resolução do problema e sim demonstrar que a técnica OO é eficaz em selecionar um subconjunto de soluções do espaço de estados, no qual, boas soluções podem ser encontradas. A técnica não garante que o melhor plano de expansão seja encontrado, mas permite encontrar um conjunto de boas soluções com uma determinada probabilidade. Um sistema de seis barras, dividido em cinco estágios ao longo do horizonte, é usado como estudo de caso. Como a aplicação desta técnica ao problema PET ainda é insipiente, resta saber o seu desempenho comparado ao uso de metaheurísticas habitualmente utilizadas para a resolução do problema PET. No mínimo, esta técnica demonstra ser interessante para a redução de soluções a serem analisadas em uma vizinhança como já foi proposto em [MI07].

- Busca Dispersa (*Scatter Search – SS*)

Na referência [MS07], é proposta a metaheurística SS para a resolução do problema PET com abordagem estática. Esta técnica de otimização tem como característica criar um conjunto inicial de boas soluções onde a similaridade entre as mesmas procura ser evitado. Adicionalmente, este trabalho utiliza um GA aliado a uma busca local para auxiliar na identificação de melhores soluções para o problema. Uma comparação em termos da qualidade das soluções e esforço computacional é feita entre o método proposto e as metaheurísticas SA, GA, TS e GA com busca local. Resultados apontam a metodologia desenvolvida como aquela de melhor desempenho. Contudo, o estudo comparativo parece ser tendencioso, uma vez que uma população de boa qualidade e diversificada, a qual tem sido essencial para um melhor desempenho em vários trabalhos [GMR98b, CN99, BOA01, EGR04, RRS07, LSMRRS08], foi considerada somente para a metodologia proposta. Em [S07], também é realizado um estudo comparativo e a metaheurística SS é superada por outras tais como o TS e o ES.

Ao final desta seção, pode-se concluir que de fato as técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas têm sido amplamente utilizadas na resolução do problema PET. Entretanto, os trabalhos não têm se dedicado a um estudo minucioso comparando o desempenho destas ferramentas. Quando este tipo

de análise é apresentado, nota-se que uma atenção maior é dada à técnica que está sendo proposta em detrimento às demais. Portanto, um dos objetivos deste trabalho é apresentar um estudo detalhado de várias metaheurísticas e ao final indicar as mais adequadas ao problema PET.

## 1.2.2 Modelos de Representação de Sistemas de Potência

### 1.2.2.1 Modelos Lineares

Grande parte dos trabalhos desenvolvidos para a resolução de problemas PET utiliza modelos lineares para a representação e avaliação dos planos de expansão, como se observa na Seção 1.2.1. Em [RMGH02], são apresentados quatro modelos lineares: modelo de transportes (*transportation model*), modelo híbrido (*hybrid model*), modelo disjunto (*disjunctive model*) e o modelo DC (*DC model*).

O modelo de transportes é uma simplificação do modelo de fluxo DC, onde as restrições não-lineares, isto é, aquelas que envolvem o produto matricial entre os circuitos da rede e as aberturas angulares são desconsideradas. Normalmente, este problema é mais fácil de ser resolvido, contudo um plano escolhido por este modelo pode não ser factível numa análise pelo modelo de fluxo DC. Devido a esta simplificação, o modelo de transportes, bem como os modelos híbridos e disjuntos, tem sido utilizado em muitos trabalhos na definição de planos iniciais candidatos. Estes geralmente compõem a população inicial de forma a melhorar o desempenho da aplicação de metaheurísticas.

Os modelos híbridos combinam características do modelo DC e do modelo de transportes. O mais comum considera a restrição de balanço de fluxo de potência válida para todos os nós da rede de transmissão, enquanto as restrições não-lineares são consideradas somente para os circuitos já existentes.

O modelo disjunto é o menos usado entre todos, pois considera uma formulação binária para os reforços a serem selecionados. O aumento no número de variáveis do problema é tido como a principal desvantagem deste modelo.

Alguns modelos de fluxo DC ainda incluem técnicas para a estimação de perdas ôhmicas no sistema. Estes modelos são mais completos e, embora as perdas sejam aproximadas, os planos de expansão encontrados são geralmente mais robustos numa análise AC do que aqueles provenientes de um estudo incluindo o modelo DC convencional. As perdas de potência ativa são estimadas e posteriormente são representadas como cargas nas extremidades dos respectivos ramos do sistema de transmissão.

As seguintes desvantagens podem ser citadas em relação à utilização do modelo de fluxo DC convencional: separação do problema de alocação de potência reativa, necessidade de se reforçar o plano quando uma operação com o modelo AC é considerada, e finalmente, a dificuldade em considerar as perdas ativas. Contudo, as duas últimas desvantagens são parcialmente atendidas ao utilizar um modelo de fluxo DC com consideração de perdas ativas.

Portanto, apesar do modelo de fluxo DC não considerar o comportamento de tensão e reativos, o mesmo tem sido o mais aceito numa primeira fase do processo de planejamento, principalmente devido à complexidade e dimensão do problema a ser resolvido. Assim, no presente trabalho será utilizado um modelo de fluxo DC com consideração de perdas ativas no sistema. Conhecidos os melhores planos de expansão, os mesmos poderão ser reavaliados incluindo outras restrições operacionais tratadas pela utilização de um fluxo AC.

### **1.2.2.2 Modelos Não-Lineares**

O uso de modelos não-lineares (*AC model*) numa primeira fase do problema PET, isto é, como parte do processo de otimização, ainda é incipiente, sendo poucos trabalhos a considerar o assunto [YH89, Y01, SRC02, DLLW06, RGR07]. Dentre suas vantagens podem ser citadas: eficiente alocação de reforços, cálculo preciso de perdas do sistema e incorporação da operação de equipamentos não-lineares. No entanto, o modelo AC tem como desvantagem a dificuldade em ser adequado a uma eficiente técnica de otimização para a resolução do problema PET, já que se trata de um problema não-convexo e, assim, os métodos não-lineares (e.g. Newton) podem não apresentar convergência para uma dada configuração.

Portanto, a utilização deste modelo ainda parece ser inviável se uma abordagem dinâmica e/ou incertezas são consideradas na resolução do problema PET, principalmente para sistemas de grande porte. Sua viabilidade, acredita-se, fica condicionada a uma segunda fase do processo de planejamento quando se procura avaliar os planos obtidos pelo processo de otimização.

### **1.2.3 Linhas de Abordagem**

#### **1.2.3.1 Planejamento Estático**

A abordagem estática consiste em definir, para um determinado horizonte do planejamento, a localização e o número de reforços necessários à expansão do sistema sem se preocupar com o aspecto temporal de adição dos mesmos. A grande maioria dos trabalhos existentes na literatura, como pôde ser visto na Seção 1.2.1, se destina a esta linha de abordagem principalmente por apresentar um nível de complexidade menor do que a abordagem dinâmica. Assim, é possível realizar estudos incluindo vários tipos de incertezas externas e desenvolver novos modelos que visem não somente minimizar custos de investimentos, mas também custos relacionados a estas incertezas caracterizando o processo de otimização como um problema de multicritérios.

#### **1.2.3.2 Planejamento Dinâmico**

Na abordagem dinâmica, além de definir a localização e o número de reforços necessários, a evolução temporal destas decisões também é considerada. Nesta abordagem o tamanho e o nível de complexidade dos sistemas proporcionam um número muito grande de variáveis e restrições a serem consideradas exigindo um maior esforço computacional para se encontrar os melhores planos. Uma pequena parcela dos trabalhos encontrados na literatura se dedica a esta linha de abordagem. Quando considerada, aspectos relacionados a incertezas dificilmente são tratados e muitas vezes simplificados. Poucos trabalhos incluem estudo de incertezas à abordagem dinâmica.

Não há dúvida de que a abordagem dinâmica, cujo objetivo é minimizar os custos em valor presente da função objetivo, proporciona melhores resultados do

que quando vários subproblemas estáticos são resolvidos com este objetivo [EGR04]. Em alguns trabalhos [LSRMSR06, R06, MSLRSR07, S07, LMRR08, RLM08, LSMRRS08], apesar da abordagem dinâmica ser considerada pela resolução de vários subproblemas estáticos, a metodologia desenvolvida proporciona bons resultados ao considerar várias ordens de prioridade de avaliação dos estágios. Assim, é possível dar uma maior prioridade aos estágios mais relevantes, ou seja, aqueles nos quais importantes unidades de geração ou novos pontos de carga serão inseridos no sistema. No entanto, um modelo que procure otimizar toda a seqüência de investimentos ainda parece ser a opção mais aceitável a ser utilizada, o qual será considerado neste trabalho.

### **1.2.3.3 Planejamento Determinístico**

Os modelos determinísticos têm como objetivo definir alternativas de expansão que minimizem os investimentos e o corte de carga para a condição da rede intacta e mediante critérios conhecidos como “N-1” ou “N-2”. Aspectos relacionados às incertezas são negligenciados ou muito simplificados. Ademais, estes modelos determinísticos podem ser muito importantes numa etapa inicial do planejamento, tendo a finalidade de reduzir o número de alternativas a serem avaliadas por modelos mais completos.

Os principais modelos determinísticos utilizados ao longo das últimas três décadas podem ser classificados mediante as técnicas de otimização utilizadas: clássicas, heurísticas e metaheurísticas. Inúmeras referências foram apresentadas na Seção 1.2.1, dentre as quais a grande maioria se refere a esta abordagem. Entre estes trabalhos, a maior parte se dedica à abordagem determinística considerando somente o âmbito da rede intacta para a proposta de seus planos de expansão. Somente uma pequena parte [MSPCPP82, SSL89, RPCS96, SRRGM05, YHJX05, TGS08] inclui o critério determinístico “N-1”. A grande dificuldade da inclusão deste critério nos modelos diz respeito ao elevado esforço computacional necessário para se avaliar os planos de expansão candidatos mediante a ausência de qualquer um dos equipamentos do sistema de transmissão.

Uma das estratégias adotadas para a redução deste esforço consiste em aplicar o critério, baseado em uma lista de contingências, somente aos melhores planos encontrados numa primeira fase, que satisfazem o critério da rede intacta [MSPCPP82, SSL89, YHJX05]. Contudo, não se pode garantir que os planos finais, após incluída a restrição de segurança, se referem às melhores alternativas de expansão para o sistema estudado.

A consideração de uma lista de contingências que inclua todos os equipamentos pode ser tornar inviável para sistemas de grande porte. Portanto, deve-se criar uma lista que possua somente os equipamentos mais críticos para o sistema. Contudo, é difícil criar uma lista que inclua somente estes equipamentos, já que os mesmos podem ser diferentes para as diversas configurações da rede definida pelos planos candidatos. Quando a abordagem dinâmica é tratada, este problema se torna ainda maior, pois a criação de listas deve considerar as novas condições de carga e geração para cada horizonte do planejamento.

Uma segunda estratégia consiste em incluir o critério “N-1” como parte do problema, isto é, durante a criação dos planos candidatos [RPCS96, SRRGM05, TGS08]. A consideração de restrições de segurança como parte do problema proporciona soluções diferentes de quando o problema é tratado em duas fases. No entanto, principalmente para sistemas de médio e grande porte, torna-se inviável a utilização desta metodologia uma vez que o número de avaliações pelo PL aumenta substancialmente. Ademais, esta estratégia enfrenta o mesmo problema, para a criação de listas de contingências, comentado no parágrafo anterior.

Portanto, o benefício de se usar o critério “N-1”, baseado em uma lista de contingências, está relacionado a encontrar uma rede de transmissão mais robusta, a qual não se refere a um plano ótimo, já que as listas de contingências podem sofrer alterações na consideração de diferentes planos de expansão. A solução para este problema seria definir uma área de interesse onde o critério “N-1” deva ser respeitado, resultando em um menor número de contingências a ser considerado para cada plano de expansão candidato.



Outra forma de se atender restrições de segurança no estudo do problema PET é analisar índices de confiabilidade do sistema baseados nas indisponibilidades dos equipamentos, ou seja, trata-se de uma abordagem não-determinística, pois considera a modelagem de incertezas internas. Na próxima seção é apresentado um levantamento histórico considerando estas incertezas.

#### **1.2.3.4 Planejamento Não-determinístico: Incertezas Internas**

Numa abordagem não-determinística que considere incertezas internas, o problema PET tem por objetivo minimizar os custos de investimento e de produção requeridos para o atendimento da carga futura atendendo a um determinado nível de confiabilidade estabelecido por índices como o Corte de Carga Esperado (*Loss of Load Expectation* – LOLE).

Em alguns trabalhos, os investimentos relacionados à melhoria da confiabilidade do serviço prestado são explicitamente avaliados em relação aos seus custos e benefícios econômicos [BSS88, WB93, B04]. No entanto, pesa contra estes artigos, a adoção de aproximações quanto ao cálculo do valor da confiabilidade. Tais aproximações se referem a simplificações na utilização do custo unitário de interrupção de energia e incapacidade dos modelos de avaliação da confiabilidade em representar a evolução cronológica de cada interrupção.

Em geral, os trabalhos que consideram as incertezas internas fazem uso de funções de avaliação do sistema que apresentam um alto custo computacional. Por esta razão, o número de alternativas não pode ser elevado, principalmente para a abordagem dinâmica. Neste caso, técnicas de otimização, quando empregadas, são bem simples, fazendo uso de árvores de expansão truncadas [ML04], ou de técnicas de decomposição interativa [SB95, B04].

O trabalho [SB95] desenvolve um modelo automático para o planejamento probabilístico de sistemas de geração e transmissão sob a abordagem estática. O modelo computacional proposto faz uso da técnica de análise custo/benefício, levando em consideração os custos de investimentos, de operação e de interrupção de energia. O problema de otimização é tratado

através de programação não-linear inteiro-mista, sendo utilizado o modelo de fluxo AC para a representação da rede. A Decomposição de Benders é utilizada para desacoplar os subproblemas investimento e operação. Tendo em vista o esforço computacional necessário à avaliação dos custos de operação e de interrupção, várias simplificações (custo unitário de interrupção constante, apenas dois níveis diários de carga e uma lista reduzida de contingências) foram aplicadas ao problema. Tais simplificações alteram sobremaneira os valores esperados dos custos de interrupção e de operação, comprometendo a qualidade dos planos de expansão encontrados.

O trabalho [ML04] aborda o problema de planejamento composto de geração e transmissão considerando uma abordagem dinâmica. É proposto um modelo de planejamento dedicado à inclusão do valor da confiabilidade, expresso em termos do índice LOLC, na função objetivo do problema. Para viabilizar a avaliação rigorosa dos custos de produção e de interrupção de energia, é desenvolvido um processo de planejamento dividido em quatro etapas. Nas etapas iniciais são utilizados modelos de avaliação mais simples e velozes, sendo descartadas diversas alternativas de expansão com base no valor da EENS. À medida que o processo evolui são utilizados modelos mais complexos. Em todas as etapas do planejamento são utilizados critérios baseados na confiabilidade, evitando degradações na qualidade do atendimento aos consumidores. A cada ano do planejamento, heurísticas são empregadas para restringir o crescimento ou ramificação da árvore de alternativas de expansão do sistema.

A tese de doutorado [B04] propõe uma metodologia para o planejamento da expansão de redes de transmissão, de interligação entre subsistemas e de suporte de reativos em derivação. A metodologia é baseada em heurísticas, análises probabilísticas e decisão multicritérios, englobando, além dos custos de investimento e de perdas ativas, o valor da confiabilidade, os custos marginais de confiabilidade, os custos de congestionamento e os custos associados a penalidades por indisponibilidades dos equipamentos. Este trabalho representa um importante passo para a incorporação de critérios de confiabilidade no planejamento de sistemas de transmissão. No entanto, o

valor da confiabilidade é avaliado de maneira simplificada, utilizando custos unitários de interrupção fixos e considerando apenas as contingências mais críticas, através do método de Enumeração de Estados.

Para que seja possível uma avaliação precisa do custo de interrupção, o modelo de planejamento adotado, especialmente no caso da abordagem dinâmica, deve fazer uso de técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas, a qual deve dar um tratamento hierárquico para a avaliação da confiabilidade. Deste modo, quando se tem um número elevado de planos de expansão no início do processo, modelos simplificados devem ser utilizados como, por exemplo, a Enumeração de Estados. Somente em uma fase posterior ao processo de otimização, quando os melhores planos de expansão são conhecidos, é que se torna viável a utilização de modelos mais completos como, por exemplo, a simulação Monte Carlo pseudo-cronológica [LMMB00].

#### **1.2.3.5 Planejamento Não-determinístico: Incertezas Externas**

Atualmente, o setor elétrico está sendo submetido a mudanças no mundo inteiro. Entre estas mudanças está a nova regulamentação do setor de geração de energia elétrica, o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição, alterações na regulação econômica, crescente preocupação com os impactos ambientais da produção e uso da eletricidade, e aumento da oposição pública à construção de linhas de transmissão [CIGRE93]. Além disto, têm-se verificado incertezas quanto: ao futuro crescimento da carga, à disponibilidade e preços dos combustíveis e aos custos e tempos de construção de diferentes reforços. Para enfrentar esta realidade o modelo de atuação chamado Planejamento Integrado de Recursos (*Integrated Resource Planning - IRP*) vem sendo empregado [HG90, BSZ95a, BSZ95b]. O IRP avalia de forma consistente os recursos do lado da demanda e os recursos de fornecimento objetivando atender as necessidades dos consumidores ao menor custo econômico e social.

Para fazer frente às incertezas citadas anteriormente devem ser adotados planos de expansão flexíveis, capazes de adaptar o desenvolvimento planejado para o sistema, de forma rápida e a custos razoáveis, mediante mudanças não

previstas em relação às condições presentes à época do planejamento [CIGRE95]. Para este fim, são usados métodos como a técnica de cenários e a análise via árvore de decisões [GCCP93] para a obtenção das chamadas estratégias de expansão. Apesar dos constantes progressos na capacidade de desempenho dos computadores, a aplicação destes métodos é ainda muito limitada. Em geral, os trabalhos divulgados analisam um número muito reduzido de cenários, especialmente para o caso da transmissão [BCFL03, VMRDW03], o qual apresenta requisitos computacionais mais elevados.

O artigo [GCCP93], apesar de destinado ao planejamento da expansão de sistemas de geração, merece ser analisado, em função de sua grande relevância. Nele, os autores apresentam uma metodologia que considera incertezas presentes no crescimento da demanda, nos custos dos combustíveis, no instante de entrada dos reforços e em restrições financeiras. A técnica de cenários e o critério da minimização do máximo arrependimento, associado a cada cenário, são utilizados para a obtenção da melhor estratégia de expansão.

No artigo [CIGRE93], são apresentados resultados sobre a natureza das incertezas que devem ser enfrentadas pelos planejadores, e sobre os instrumentos que vêm sendo empregados para o tratamento destas incertezas. Em continuidade a este trabalho, na referência [CIGRE95], os resultados de uma pesquisa sobre o estado da arte das ferramentas e métodos de planejamento desenvolvidos para lidar com os conceitos de incerteza e de flexibilidade na expansão de sistemas de potência são apresentados. Após a definição destes conceitos são destacadas as técnicas mais empregadas e/ou promissoras (análise de cenários, árvore de decisões, programação estocástica e lógica *fuzzy*). Também são discutidos os critérios mais utilizados para a seleção de um plano de expansão (custo esperado, minimização do máximo arrependimento, *Laplace*, *Von Neumann-Morgenstern* e *Hurwicz*).

Pensando em um ambiente de mercado competitivo, a referência [FH03] propõe um novo modelo capaz de lidar com o aumento de incertezas na localização e dimensionamento dos parques geradores. Em consequência, as incertezas nos

fluxos de potência da rede também aumentam, influenciando o planejamento de sistemas de transmissão. Ao final, um critério de decisão baseado na técnica de mínimo-máximo arrependimento é usado para selecionar o plano que melhor se adapta a todos os cenários de despacho de geração considerados. O estudo de caso é feito considerando uma abordagem estática e um modelo de fluxo DC. Neste trabalho, não é dada atenção à técnica de otimização a ser utilizada para o subproblema de definição dos planos de expansão candidatos, o qual pode ser resolvido por modelos clássicos de acordo com o artigo. No entanto, como já comentado, modelos baseados em metaheurísticas possuem maior habilidade para resolver o problema PET, principalmente para sistemas de maiores dimensões e que consideram a abordagem dinâmica.

Em [BBSS04], é proposta uma ferramenta probabilística para calcular as funções densidade de probabilidade dos preços nodais da cada barra. Para se obter estes custos, um modelo de fluxo DC probabilístico é usado. Esta metodologia tem como vantagens: facilitar a competição entre todos os participantes e permitir acesso às gerações mais baratas a todos os consumidores. O plano final deve ser selecionado após a avaliação de risco de todas as soluções considerando os custos de investimento, operação, corte de carga, congestionamento, e o custo de não-confiabilidade do sistema no âmbito da abordagem estática. Incertezas internas também são consideradas incluindo a disponibilidade de geradores, sistema de transmissão e nível de carga. Um estudo de cenários é realizado ao tratar a modelagem de algumas incertezas externas como a inclusão de novos geradores e mudança no patamar das cargas. Através de combinações de cenários e mediante os critérios adotados, a metodologia é capaz de encontrar um bom plano de expansão resultando em um baixo preço de energia e contribuindo no aumento de competitividade do mercado.

A referência [BSBSP06] dá continuidade ao trabalho anterior onde sua contribuição é considerar o grau de importância dos participantes no mercado (consumidores, fornecedores de energia, operadores, proprietários de redes e reguladores) e o grau de importância que os critérios de planejamento (competição, confiabilidade, flexibilidade de operação, custo de expansão de transmissão e impactos ambientais) têm para cada um deles. Estes graus de

importância juntamente com o grau de ocorrência de possíveis cenários futuros são tratados como incertezas vagas e, portanto, técnicas baseadas em lógica *fuzzy* são utilizadas como critério para a tomada de decisão. De forma a considerar incertezas aleatórias, não-aleatórias e vagas, a metodologia consiste de uma combinação de fluxo de potência ótimo probabilístico, técnicas de cenários e lógica *fuzzy*. Estes novos modelos [BBSS04, BSBSP06] têm como desvantagem o elevado custo computacional para estimar as funções densidade de probabilidade dos preços marginais das barras. Por isto, o número de alternativas não pode ser elevado de forma a reduzir o número de análises.

Observa-se, portanto, que um dos principais desafios para o planejador é a identificação das incertezas mais relevantes, para que se possa dotar o sistema de meios para superá-las. Em princípio, as incertezas externas que devem receber mais atenção, no caso brasileiro, estão associadas à projeção de carga de longo prazo, à localização de novos produtores (geração distribuída) e à configuração futura do sistema elétrico.

### 1.3 CONCLUSÕES

A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura é dedicada ao planejamento determinístico, sendo empregada uma grande diversidade de técnicas de otimização. Para viabilizar o emprego destas técnicas, o sistema é avaliado através de modelos simplificados, baseados em fluxo DC. Em geral, somente os custos de investimento são considerados na função objetivo e as incertezas (internas e externas) são ignoradas ou modeladas de forma simplificada.

A resolução do problema PET deve responder a três questões básicas: quais reforços são necessários para atender o crescimento de consumo de energia elétrica, e ainda, onde e quando eles serão alocados. Quando apenas incertezas internas são consideradas, o objetivo se restringe a selecionar o plano de expansão que melhor atende a demanda futura de carga com mínimo custo e máxima confiabilidade. Porém, não há mais dúvidas quanto à necessidade de se considerar as incertezas externas. Deste modo, a obtenção de planos de

expansão mais flexíveis ou robustos, capazes de suportar os diferentes cenários futuros, representa a melhor estratégia.

A consideração de incertezas externas corresponde a uma tarefa extremamente complexa, pois contribui consideravelmente para o aumento de combinações de planos de expansão. Outro aspecto complicador está na modelagem destas incertezas, principalmente quando não se pode buscar no passado informações suficientes para extrapolar o seu comportamento futuro. Neste caso, as incertezas externas podem ser representadas através de técnicas de cenários, árvore de decisões e lógica *fuzzy*.

Duas ações distintas devem ser tomadas para enfrentar os problemas acima: o uso da experiência dos planejadores para reduzir a dimensão do problema, e a utilização de algoritmos eficazes e computacionalmente eficientes na avaliação dos custos envolvidos. Deste modo, é possível reduzir o volume de trabalho dos planejadores, que poderão dedicar a maior parte do seu tempo ao monitoramento do processo e à tomada de decisões.

Portanto, de acordo com o que foi exposto sobre o problema PET, pretende-se neste trabalho, em um primeiro momento, apresentar um estudo comparativo de várias técnicas de otimização, baseadas em metaheurísticas, para a resolução do problema PET considerando uma abordagem dinâmica e determinística. Neste estudo, devem ser destacados os desempenhos destas técnicas em relação à qualidade dos planos de expansão encontrados e seus respectivos esforços computacionais. Ao final, as melhores técnicas de otimização devem ser indicadas. Esta análise corresponde a uma das contribuições importantes deste trabalho.

Em seguida, uma discussão sobre adoção de critérios de segurança considerando o modelo determinístico “N-1” e métodos probabilísticos baseado em índices de confiabilidade é abordada. Em consequência desta avaliação, é desenvolvida uma metodologia eficiente de análise de contingências considerando a saída de até três equipamentos simultaneamente (avaliação de terceira ordem) juntamente com a definição de índices de desempenho que

podem ser usados como critérios de segurança a serem atendidos pelo modelo de otimização. A própria análise de contingências também pode ser utilizada para a definição dos ramos elegíveis a receberem reforços nos estudos de planejamento numa etapa preliminar e durante o problema de otimização. A viabilidade da ferramenta desenvolvida é demonstrada através de aplicações em vários sistemas de médio e grande porte.

#### **1.4 ESTRUTURA DA TESE**

Esta Tese de Doutorado é composta por seis capítulos, os quais são descritos de forma resumida conforme mostrado a seguir.

O presente capítulo teve como objetivo fazer um levantamento do estado da arte do problema PET, bem como apresentar as razões pelas quais se justifica a aplicação de técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas e a adoção de tratamento de incertezas e de uma abordagem dinâmica para a resolução do problema.

O Capítulo 2 apresenta a formulação matemática do problema PET considerando uma abordagem determinística e dinâmica bem como a adequação das metaheurísticas selecionadas para o problema.

No Capítulo 3, um estudo minucioso compara a qualidade das seqüências encontradas pelas técnicas de otimização e seu desempenho computacional para a resolução do problema PET. Adicionalmente, é comprovado o benefício de se usar um mecanismo para a seleção de seqüências iniciais de melhor qualidade, o qual contribui para um melhor resultado das metaheurísticas estudadas.

O Capítulo 4 aborda uma discussão sobre adoção de critérios de segurança considerando o modelo determinístico “N-1” e métodos probabilísticos baseado em índices de confiabilidade, além de apontar o critério que tem sido mais adotado pelo setor elétrico no mundo. Em consequência, é desenvolvida uma metodologia de análise de contingências juntamente com a proposição de índices de desempenho para atendimento de critérios de segurança pelo modelo de



otimização, cujo objetivo final é obter melhores planos de expansão para os sistemas estudados.

O Capítulo 5 apresenta a ferramenta computacional desenvolvida para o estudo do problema PET, onde são apresentadas análises considerando sistemas de pequeno e grande porte.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e as principais contribuições e propostas de trabalhos futuros para continuação desta Tese de Doutorado.

## **CAPÍTULO 2**

# **METAHEURÍSTICAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo tem como objetivo apresentar as metaheurísticas selecionadas para a solução do problema PET considerando uma abordagem determinística e dinâmica. Neste tipo de problema, o interesse está voltado em não apenas definir quais reforços são necessários e suas respectivas localizações, mas também quando serão adicionados ao longo do horizonte de planejamento. Ao final, os melhores planos de expansão deverão ser indicados minimizando os custos envolvidos na função objetivo.

Nas seções deste capítulo, inicialmente será dada atenção à formulação matemática do problema PET destacando a definição da matriz solução e a apresentação do algoritmo de programação linear, o qual inclui o modelo de fluxo de potência DC com consideração de perdas ôhmicas, para a representação da rede e avaliação dos planos candidatos. Em seqüência, será apresentado o mecanismo utilizado para a construção da população inicial de boa qualidade, nomeado de Inicialização Inteligente, cuja importância é auxiliar as buscas de forma a contribuir para uma melhor qualidade do resultado final do processo de otimização. Posteriormente, é mostrada a adequação de todas as metaheurísticas selecionadas para a solução do problema, incluindo suas características, os correspondentes algoritmos e suas particularidades.

### **2.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA PET**

O primeiro passo na formulação matemática do problema PET é definir a representação da matriz solução  $S$  que será considerada nas buscas pelas

ferramentas de otimização, a qual corresponde à configuração dos planos candidatos ou seqüências de investimentos. Por se tratar de um problema com abordagem dinâmica, o aspecto temporal também deve ser incluído. Posteriormente, na apresentação das metaheurísticas estudadas, esta matriz solução será nomeada apropriadamente. Assim, a  $k$ -ésima matriz solução pode ser representada conforme a seguir:

$$S^k = \begin{bmatrix} s_{11}^k & s_{12}^k & \cdots & s_{1l}^k & \cdots & s_{1n}^k \\ s_{21}^k & s_{22}^k & \cdots & s_{2l}^k & \cdots & s_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{t1}^k & s_{t2}^k & \cdots & s_{tl}^k & \cdots & s_{tn}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{y1}^k & s_{y2}^k & \cdots & s_{yl}^k & \cdots & s_{yn}^k \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde  $n$  indica o número de possíveis ramos da rede a receber reforços,  $y$  corresponde ao número de estágios do horizonte de planejamento e  $s_{tl}^k$  refere-se ao número total de reforços no estágio  $t$  no ramo  $l$  em relação à configuração base do sistema. Se uma abordagem estática é considerada, tem-se o seguinte vetor solução:

$$S_t^k = [s_{t1}^k \quad s_{t2}^k \quad \cdots \quad s_{tl}^k \quad \cdots \quad s_{tn}^k] \quad (2.2)$$

Deste ponto em diante entenda-se por seqüência como sendo a matriz solução e solução como o vetor solução.

Durante o processo de otimização, a seleção dos planos candidatos é feita considerando todo o horizonte, visando minimizar o valor presente da função objetivo. Nos trabalhos [R06, LMRR08, LSMRRS08], a estratégia era minimizar os custos para cada estágio individualmente e ao final, de posse de um conjunto de planos candidatos, eram escolhidos aqueles que apresentassem o menor valor presente de investimentos ao longo do horizonte. Portanto, havia necessidade de se definir uma ordem de priorização de avaliação dos anos.

Para a construção de uma seqüência, é necessário que o número máximo de reforços permitidos em cada ramo seja respeitado e que haja uma coordenação da adição dos mesmos. Por exemplo, os reforços inseridos no estágio  $t$  devem obrigatoriamente estar presentes nos estágios posteriores  $t+1$ ,  $t+2, \dots, y$ . Estas restrições são definidas a seguir:

$$\begin{aligned} s_{t,l}^k &\leq N_{lmax} & \forall l \in \{1, \dots, n\}; & \forall t \in \{1, \dots, y\}; \\ s_{t,l}^k &\leq s_{(t+1),l}^k & \forall l \in \{1, \dots, n\}; & \forall t \in \{1, \dots, y-1\}; \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde  $N_{lmax}$  corresponde ao número máximo de reforços permitidos no ramo  $l$ .

Uma vez encontrada a seqüência, para um determinado horizonte de planejamento composto de  $y$  estágios, o problema PET pode ser definido como:

$$Min f(S^k) = \sum_{t=1}^y \frac{(\sum_{l=1}^n Cinv_l m_{t,l}^k + Cperdas_t^k + \alpha^T r_t)}{(1+e)^{h(t)}} \quad (2.4)$$

onde  $f(S^k)$  representa a função custo total em valor presente associado com a  $k$ -ésima seqüência;  $e$  indica a taxa de desconto considerada para o problema;  $h(t)$  corresponde a uma função que retorna o valor da diferença entre o ano correspondente ao estágio  $t$  e o ano base;  $Cinv_l$  representa o custo de investimento unitário para a adição de reforços no ramo  $l$ ;  $m_{t,l}^k$  corresponde ao número de reforços alocados no estágio  $t$  no ramo  $l$  da seqüência  $k$ , isto é,  $m_{t,l}^k = s_{t,l}^k - s_{(t-1),l}^k$  (caso  $t$  seja igual ao estágio inicial, então  $m_{t,l}^k = s_{t,l}^k$ );  $Cperdas_t^k$  representa o custo das perdas ôhmicas existentes no estágio  $t$  da seqüência  $k$ ;  $\alpha$  indica o vetor de penalidade de carga não-suprida; e  $r_t$  o vetor de carga não-suprida no estágio  $t$ .

A cada configuração obtida pelo processo de otimização, realiza-se uma avaliação da mesma através de um PL baseado no modelo de fluxo de potência DC, conforme descrito a seguir:

Minimizar

$$z = \alpha^T r \quad (2.5)$$

sujeito a:

$$\mathbf{g} + \mathbf{r} + \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{d} \quad (2.5.1)$$

$$0 \leq \mathbf{g} \leq \mathbf{g}_{max} \quad (2.5.2)$$

$$0 \leq \mathbf{r} \leq \mathbf{d} \quad (2.5.3)$$

$$|\mathbf{f}| \leq \mathbf{f}_{max} \quad (2.5.4)$$

onde  $\mathbf{g}$  refere-se ao vetor de geração de potência nas barras,  $\mathbf{B}$  representa a matriz de susceptância do sistema,  $\boldsymbol{\theta}$  é o vetor dos ângulos de tensão das barras,  $\mathbf{d}$  corresponde ao vetor de carga ativa nas barras,  $\mathbf{g}_{max}$  trata-se do vetor de limites de geração de potência de barras,  $\mathbf{f}$  representa o vetor de fluxo de potência e  $\mathbf{f}_{max}$  é o vetor de limites de fluxo de potência.

Este PL, o qual é aplicado a todos os estágios do horizonte de planejamento, pode ser eficientemente resolvido pelo método de pontos interiores. Os multiplicadores de *Lagrange* (variáveis duais) associados às restrições da Equação (2.5.1), que correspondem a um subproduto da solução do PL, são de grande interesse, uma vez que eles podem auxiliar na construção de seqüências iniciais de melhor qualidade para as metaheurísticas ou até mesmo auxiliar o processo de busca. Estes multiplicadores estimam o benefício em termos do índice de carga não-suprida, o qual é baseado em mudanças nas susceptâncias dos ramos pela adição de novos reforços. Sendo  $\boldsymbol{\pi}^d$  este vetor de multiplicadores de *Lagrange*, este benefício pode ser estimado por [BOA01]:

$$\pi_{ij}^d = (\theta_i - \theta_j)(\pi_i^d - \pi_j^d) \quad (2.6)$$

onde  $\pi_{ij}^d$  é o multiplicador de *Lagrange* associado a susceptância do ramo conectando as barras  $i$  e  $j$ .

Portanto, a função heurística ou função gulosa definida a seguir, a qual considera também os custos de investimento associados aos novos reforços, é de grande utilidade para ajudar as metaheurísticas a encontrarem seqüências de melhor qualidade:

$$\eta(i, j) = \frac{\pi_{ij}^d}{C_{inv_l}} \quad (2.7)$$

onde  $C_{inv_l}$  já foi definido em (2.4) sendo  $l$  o ramo que conecta as barras  $i$  e  $j$ .

O cálculo do custo das perdas ôhmicas, o qual aparece na Equação (2.4), é descrito conforme mostrado a seguir:

$$C_{perdas} = w \times \sum P_{ij} \quad (2.8)$$

onde  $P_{ij}$  representa as perdas ôhmicas entre as barras  $i$  e  $j$  e  $w$  é um coeficiente de perdas, calculado por:

$$w = 8736 \times C_{kWh} \times FP \quad (2.9)$$

onde 8736 representa o número total de horas em um ano;  $C_{kWh}$  corresponde a uma tarifa de compra de energia para as perdas ôhmicas do sistema, dado em R\$/kWh; e  $FP$  é o fator de perdas.

A utilização do coeficiente  $w$  visa transformar o custo incremental de perdas em custos anuais. Desta forma, as parcelas de custo referentes ao investimento e às perdas ôhmicas são todas obtidas em uma base anual.

Como as perdas ôhmicas são calculadas para a carga pico, então é necessário que o coeficiente  $w$  inclua um fator de perdas  $FP$ , o qual deve representar o quociente entre as perdas ôhmicas médias do sistema ao longo de um ano e as perdas encontradas para a carga pico. Contudo, este fator foi representado de forma aproximada pelo fator de carga da curva horária para os sistemas estudados. Na verdade, sabe-se que as perdas ôhmicas são proporcionais ao quadrado da corrente, e não à carga do sistema.

No modelo DC, as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão são obtidas de forma aproximada pelo produto das condutâncias das linhas e os quadrados das diferenças angulares entre duas barras interconectadas por essas linhas.

Com o intuito de aproximar as perdas calculadas no modelo DC daquelas que seriam obtidas no modelo AC, a condutância de cada circuito é aproximada por:

$$g_{ij} \cong \frac{r_{ij}}{x_{ij}^2} \quad (2.10)$$

onde  $r_{ij}$ ,  $x_{ij}$  e  $g_{ij}$  são a resistência, a reatância e a condutância do circuito que interliga as barras  $i$  e  $j$ , respectivamente.

Pode ser observado que tal aproximação implica no aumento do valor da condutância, o que compensa parte das perdas devido ao fluxo de potência reativa. Contudo, quanto melhor a compensação de reativos de um sistema melhor será a representação das perdas pelo modelo DC. Vale salientar que os resultados dessa aproximação serão tão melhores quanto menor for a relação  $r/x$ . Desta forma, as perdas podem ser obtidas pela seguinte expressão:

$$P_{ij} \cong g_{ij} \times (\theta_{ij})^2 \cong r_{ij} \times \left( \frac{\theta_{ij}}{x_{ij}} \right)^2 \quad (2.11)$$

onde  $\theta_{ij}$  é a diferença angular entre as barras  $i$  e  $j$ .

Esta maneira aproximada e de baixo custo computacional de se incluir o efeito das perdas de transmissão no fluxo DC foi baseada na metodologia apresentada em [M83]. Basicamente, as perdas são calculadas utilizando as aberturas angulares obtidas pela solução do PL de uma determinada configuração. Posteriormente, estas perdas são alocadas apropriadamente nas barras  $i$  e  $j$ . Novamente, um novo PL é resolvido considerando este acréscimo de carga e novas aberturas angulares são encontradas. Esta então corresponde à solução para uma determinada configuração.

Como se sabe, a inclusão do efeito das perdas implica em um aumento dos fluxos nos circuitos. Por isto, em [R06, LMRR08, LSMRRS08], o despacho ótimo obtido pelo PL era realizado considerando uma folga nos circuitos cuja capacidade era reduzida para 95%. Após o cálculo das perdas, as mesmas eram representadas como cargas e então se fazia uma nova verificação

considerando a capacidade máxima de todos os circuitos. Esta estratégia resulta em um plano de expansão com um número maior de reforços. Neste trabalho, as perdas são calculadas a partir da solução do PL considerando a capacidade máxima dos circuitos. Após a representação das perdas como carga, uma nova análise a partir de um PL é realizada. Portanto não há a necessidade de se reduzir a capacidade em 5%. As perdas são acomodadas automaticamente. No próximo capítulo serão apresentados os resultados para os sistemas estudados e, então, poderá ser comprovada uma redução no custo de expansão através desta nova política para a inclusão de perdas ôhmicas.

Percebe-se pela Equação (2.4) e pela formulação matemática do problema apresentada até então que critérios de segurança (N-1) ou índices de confiabilidade não são considerados na resolução do problema PET. Conforme comentado na Seção 1.2.3.1 a inclusão do critério determinístico N-1 possui algumas desvantagens, dentre elas, a de considerar a mesma lista de contingências para diferentes configurações da rede. Este problema é resolvido se todos os equipamentos são incluídos nesta lista, no entanto, esta possibilidade demanda um elevado esforço computacional, principalmente para sistemas de grandes dimensões e quando se trata de uma abordagem dinâmica.

Outra forma de se incluir critérios de segurança no estudo do problema PET é analisar índices de confiabilidade do sistema. Em alguns trabalhos [LSRMSR06, S07, LMRR08, LSMRRS08], o índice LOLC foi inserido na função objetivo do problema PET. Contudo, a metodologia utilizada não inclui o estudo de confiabilidade durante a busca pelos melhores planos de expansão, já que seria inviável devido ao grande número de casos a serem avaliados. Nestes trabalhos, o estudo é realizado após encontrar o conjunto de melhores planos de expansão que minimizem a função dada pela Equação (2.4). Dentre estes planos, é escolhido aquele que apresentar o menor custo em valor presente incluindo também o índice LOLC. Verifica-se, então que a consideração de índices de confiabilidade é feita em um *loop* externo à otimização do problema. A seguir é apresentada esta nova função objetivo:



$$\text{Min } f(S^k) = \sum_{t=1}^y \frac{(\sum_{l=1}^n C_{inv,l} m_{t,l}^k + C_{perdas}_t^k + \alpha^T r_t) + LOLC_t^k}{(1+e)^{h(t)}} \quad (2.12)$$

onde  $LOLC_t^k$  indica o custo de interrupção de energia para o estágio  $t$  considerando a  $k$ -ésima seqüência.

Critérios de segurança e/ou índices de confiabilidade somente serão considerados nos Capítulos 4 e 5.

### 2.3 INICIALIZAÇÃO INTELIGENTE

Alguns trabalhos [GMR98b, CN99, BOA01, EGR04, RRS07, MS07, S07, YGD08, LSMRRS08] comentam sobre a importância de se usar um mecanismo para a construção de seqüências iniciais, o qual contribui para um melhor desempenho da busca das metaheurísticas. Considera-se uma seqüência inicial como de boa qualidade quando a maioria dos circuitos que fazem parte dos melhores planos de expansão está presente nesta seqüência. Neste caso, a chance de se encontrar os melhores planos são maiores através dos operadores das metaheurísticas. A maioria destas ferramentas se baseia em populações que se interagem e evoluem ao longo das gerações. Portanto, nestes casos, é interessante construir uma população inicial de boa qualidade. Dentre as metaheurísticas apresentadas nas próximas seções, o TS é o único que não utiliza uma população, mas uma inicialização inteligente pode ser de grande utilidade para cada etapa de intensificação de suas buscas. Já o ACO, apesar de ser uma técnica baseada em populações, possui uma característica de algoritmos construtivos e, assim, uma apropriada função heurística também deverá ser usada para auxiliar no processo de construção das seqüências.

Neste trabalho, a função heurística dada pela Equação (2.7) é usada como o conhecimento básico para a construção das seqüências iniciais de boa qualidade. Para a seleção dos reforços que farão parte destas seqüências é proposto um mecanismo parecido com a regra de transição de estados da metaheurística ACO, que é representado pelas Equações (2.19 e 2.20). A diferença se refere à eliminação da parcela dos rastros de feromônio  $\tau(i,j)$  e a

definição de  $\beta = 1$ . Este mecanismo permite selecionar os melhores reforços indicados pela função heurística através da função *arg max*, Equação (2.19), ou então selecioná-los de forma probabilística, Equação (2.20).

### **Algoritmo Proposto**

A seguir são apresentados os passos do algoritmo de Inicialização Inteligente para a construção destas seqüências iniciais de boa qualidade:

- i) Escolher aleatoriamente uma ordem de avaliação dos estágios do horizonte de planejamento, selecionar aquele na primeira posição e ir para o passo (ii);
- ii) Executar um fluxo de potência ótimo DC com perdas de acordo com (2.5), observando as condições de geração e carga do estágio sob análise e considerando como base a rede de transmissão do estágio anterior mais próximo já analisado. Se uma solução factível é encontrada (i.e. corte de carga = 0), ir para o passo (v), caso contrário ir para o passo (iii);
- iii) Avaliar a função heurística, de acordo com (2.7) e aplicar o mecanismo de seleção dos reforços, Equações (2.19 e 2.20). Para a definição do conjunto de ramos  $T_t^k$ , deve-se observar os limites inferior e posterior dos anos mais próximos já analisados, conforme as restrições impostas em (2.3). Selecionar o circuito a ser adicionado ao sistema e ir para o passo (iv);
- iv) Executar um novo fluxo de potência ótimo DC com perdas. Se a nova solução é factível, ir para o passo (v), caso contrário, voltar ao passo (iii);
- v) Se o estágio sob análise corresponde ao último da ordem de avaliação, armazenar a seqüência  $S^k$ , interromper a construção desta seqüência e ir para o passo (vi). Caso contrário, selecionar o próximo estágio da ordem de avaliação definido em (i) e voltar ao passo (ii);
- vi) Se o número de seqüências que devem fazer parte da população é alcançado, o algoritmo é interrompido. Caso contrário, deve-se iniciar a construção de uma nova seqüência, voltar ao passo (i) <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> A metaheurística TS não é baseada em população, assim, o processo é interrompido.

Encontrada a população inicial (constituída de seqüências factíveis), a mesma deve ser usada como ponto de partida das buscas das metaheurísticas. No próximo capítulo, será apresentado um estudo comparativo do desempenho destas ferramentas ao utilizar este mecanismo de Inicialização Inteligente e se a população inicial é escolhida aleatoriamente. O algoritmo para a construção de seqüências de forma aleatória deve permitir somente seqüências que atendam as restrições mostradas em (2.3) e que também sejam factíveis. Os reforços são adicionados em todos os estágios seguindo uma distribuição uniforme.

## 2.4 METAHEURÍSTICAS

Inúmeras ferramentas de otimização baseadas em metaheurísticas têm sido utilizadas para a solução do problema PET nas últimas décadas. Os principais trabalhos, destacando suas características e desempenho, foram apresentados na Seção 1.2.1.3. Seguindo uma ordem cronológica conforme a primeira aplicação ao problema PET, os seguintes trabalhos podem ser citados: SA [RGM96], GA [RPCS96], TS [WC97], EP [CN99], GRASP [BOA01], PSO [SRC02], ES [LSRMSR06], ACO [R06], DE [DLLW06], OO [XZW07] e SS [MS07].

Dentre as metaheurísticas expostas, algumas não serão abordadas neste trabalho devido a vários aspectos, sejam elas: SA e GA não foram selecionadas para o estudo devido a alguns artigos mencionarem o seu pior desempenho em comparação a outras técnicas [GMR98b, CN99, MS01, MI07, S07] como o TS, EP e ES; Por se tratarem de técnicas bastante semelhantes, as quais diferem somente na forma da aplicação do operador de mutação, a técnica de otimização ES foi selecionada, enquanto a EP foi descartada; No trabalho [S07], observa-se que as metaheurísticas SS e PSO demonstraram um desempenho inferior ao ES e TS. Contudo, somente a metaheurística SS será descartada. Apesar do PSO não ter apresentado um bom desempenho inclusive em outros trabalhos [YHJX05, JCYZ07], espera-se fazer uma comparação entre o desempenho das técnicas baseadas em inteligência coletiva, PSO e ACO; Quanto à metaheurística OO, ela não fará parte dos estudos neste momento, apesar de ser uma metaheurística promissora por ter

capacidade de reduzir o espaço de busca de forma inteligente. Conceitos envolvendo esta técnica podem ser usados em conjunto com outros operadores de evolução resultando em uma nova técnica de otimização mais robusta e eficiente. Por fim, a metaheurística GRASP não será analisada, no entanto, conceitos envolvendo a função gulosa proposta em [BOA01] e já apresentada pela Equação (2.7) será de grande utilidade para as demais metaheurísticas na definição de uma população inicial de melhor qualidade, conforme foi descrito na Seção 2.3 pelo mecanismo de Inicialização Inteligente.

A seguir, serão apresentados os conceitos bem como a adequação ao problema PET das seguintes metaheurísticas: TS, PSO, ACO, ES e DE. Adicionalmente, a técnica de otimização conhecida por Sistemas Imunológicos Artificiais (*Artificial Immune Systems* – AIS) também será considerada, uma vez que a mesma vem sendo utilizada na solução de vários problemas na área de sistemas de potência.

Tradicionalmente, estas ferramentas podem ser classificadas em dois grandes grupos: Inteligência de Enxames ou Coletiva (*Swarm Intelligence* – SI) ao qual pertencem o PSO e o ACO; e os Algoritmos Evolucionários (*Evolutionary Algorithms* – EA) que incluem o ES, o DE e o AIS. Este último pode ser interpretado como pertencente à classe EA por possuir os três maiores princípios da teoria de evolução de Charles Darwin: diversidade de repertório, variação genética e seleção natural [CZ02]. Quanto ao TS, cujo principal instrumento de busca se baseia em uma memória adaptativa, o mesmo não possui características que o permite ser classificado em qualquer destes grupos.

#### **2.4.1 Busca Tabu (*Tabu Search* – TS)**

A metaheurística TS [G89, G90, GLTW93] é uma técnica de busca em vizinhança cuja idéia fundamental consiste no uso de uma memória flexível dos estados previamente analisados. Esta memória guia o processo de modo que a busca não seja interrompida ou prejudicada quando não existem deslocamentos que melhorem a solução corrente. Com esta exploração do espaço, evita-se que haja um aprisionamento em soluções de ótimos locais.

Vários trabalhos têm sido publicados adotando a metaheurística TS como a ferramenta de otimização para a resolução do problema PET [WC97, GMR98b, GRM00, SOOB01, MS01, MI07, S07, LMRR08, LSMRRS08].

### **Formulação Matemática da Metaheurística TS**

Os conceitos básicos da metaheurística TS podem ser assim nomeados: Vizinhança, Movimento, Lista Tabu, Função de Aspiração, Intensificação e Diversificação.

- Vizinhança e Movimento:

A vizinhança de uma  $k$ -ésima seqüência  $S^k$ , inicial ou corrente, é definida como o conjunto de seqüências obtidas através de modificações elementares em  $S^k$ , chamadas de movimentos. Um movimento corresponde à adição ou remoção de um único reforço em qualquer estágio do horizonte de planejamento, de modo que as restrições impostas em (2.3) sejam respeitadas. A cada passo de intensificação, obtém-se a vizinhança da seqüência corrente, e a seguir identifica-se o seu melhor vizinho, transformando-o na seqüência corrente. Este procedimento é empregado mesmo em caso de piora da seqüência, o que é interessante para evitar o aprisionamento prematuro em ótimos locais. Devido o conceito de vizinhança corresponder a um aspecto chave na aplicação da metaheurística TS ao problema PET, um pequeno exemplo é apresentado.

Considere um sistema cujo horizonte de planejamento seja dividido em 4 estágios e existam 5 possíveis ramos a receber reforços. Além disso, pode haver no máximo 3 reforços em cada ramo. A seguir é mostrada uma  $k$ -ésima seqüência com a sua respectiva vizinhança:

$$S^k = \begin{bmatrix} 0 & 0^{(+1)} & 0 & 1_{(-1)} & 0 \\ 0^{(+1)} & 1_{(-1)}^{(+1)} & 0 & 1^{(+1)} & 0 \\ 1_{(-1)} & 2_{(-1)}^{(+1)} & 0 & 2_{(-1)} & 0 \\ 1^{(+1)} & 3_{(-1)} & 0^{(+1)} & 2^{(+1)} & 0^{(+1)} \end{bmatrix}$$

Os índices em cada posição da seqüência  $S^k$  correspondem aos pontos onde pode haver adições (+1) ou remoções (-1) de reforços respeitando as restrições dadas por (2.3). Portanto, existem 15 planos de expansão na vizinhança da seqüência mostrada. Obviamente, entre estes vizinhos, podem existir planos não-factíveis, os quais devem receber uma penalidade de carga não-suprida adequada ao minimizar a função dada pela Equação (2.4). Contudo, é necessário que a metaheurística TS permita que a busca passe por seqüências não-factíveis, reduzindo as chances de aprisionamento em ótimos locais.

- Lista Tabu e Função de Aspiração:

A estratégia de realizar o movimento da seqüência corrente para o seu melhor vizinho (intensificação), mesmo quando houver piora na seqüência obtida, não é suficiente para escapar da obtenção precoce de ótimos locais. Para isto, é utilizado o conceito de lista tabu, a qual é composta por regras que proíbem movimentos reversos (i.e. contrários aos movimentos realizados anteriormente) prevenindo, assim, a repetição de ciclos. O comprimento da lista tabu ( $D_{list}$ ) é um parâmetro que define por quantas iterações um movimento reverso permanecerá na lista, devendo ser cuidadosamente dimensionado para cada tipo de problema. Vê-se, então, que a lista tabu é do tipo FIFO (*first-in, first-out*), ou seja, o primeiro elemento (movimento) a entrar é o primeiro elemento a sair. No problema PET considerando uma abordagem dinâmica, cada restrição da lista tabu deve informar o tipo de movimento (adição ou remoção), sua localização (qual ramo do sistema) e o aspecto temporal (qual estágio).

Uma restrição tabu pode ser ignorada quando se identifica que o respectivo movimento levará à visita de novas seqüências atrativas, ou seja, quando a seqüência visitada é a melhor seqüência encontrada em toda a fase de intensificação. Isto é determinado pela função de aspiração, a qual permite que um movimento proibido pela lista tabu seja excepcionalmente realizado.

- Intensificação e Diversificação:

A etapa de intensificação consiste em identificar a vizinhança da seqüência  $S^k$ , e escolher o seu melhor vizinho, transformando-o na seqüência corrente.

Quanto mais promissora for a região, mais intensa será a busca. Por outro lado, quanto mais intenso se torna o processo de busca, maior será a probabilidade de aprisionamento em uma região promissora, obtendo apenas ótimos locais. Assim, um procedimento de diversificação é empregado várias vezes reiniciando o processo de busca a partir de novas seqüências iniciais. A diversificação permite que o algoritmo faça uma busca mais abrangente, visitando regiões ainda não exploradas e aumentando a probabilidade de envolver todo o universo de seqüências possíveis do problema.

A metaheurística TS é interrompida quando o número máximo de diversificações ( $div_{max}$ ) pré-estabelecido é atingido. Por sua vez, cada diversificação é cessada após um número máximo de intensificações ser alcançado ( $int_{max}$ ) ou quando a melhor seqüência da presente diversificação permanecer inalterada após um número consecutivo de intensificações ( $int_{cons}$ ).

### **Algoritmo Proposto**

O algoritmo a seguir apresenta os passos da metaheurística TS para a resolução do problema PET:

- i) Criar uma seqüência usando o algoritmo de Inicialização Inteligente descrito na Seção 2.3, ou através de um mecanismo de construção aleatória. Atribuir esta seqüência como sendo a corrente (passo de diversificação) e iniciar o processo de intensificação, isto é, ir para o passo (ii);
- ii) Construir toda a vizinhança da seqüência corrente baseado nas restrições impostas em (2.3) e ir para o passo (iii);
- iii) Selecionar uma das seqüências da vizinhança criada no passo (ii) e avaliar o valor presente da parcela de custo de investimentos. Se este valor é superior ao valor presente total, dado por (2.4), da melhor seqüência encontrada na vizinhança até o momento, então esta seqüência é descartada (este critério tem como finalidade reduzir a vizinhança a ser analisada pelo PL, diminuindo assim o esforço computacional), ir para o passo (vii). Senão, ir para o passo (iv);

- iv) Avaliar a seqüência selecionada no passo (iii) a partir de fluxo de potência ótimo DC com perdas de acordo com (2.5). Se o valor presente, Equação (2.4), for o menor entre as seqüências já avaliadas nesta vizinhança, ir para o passo (v). Caso contrário, ir para o passo (vii);
- v) Verificar a lista tabu. Se o movimento que criou esta seqüência não estiver presente na lista tabu, então esta seqüência passa a ser o melhor vizinho até o momento, ir para o passo (vii). Caso contrário, ir para o passo (vi);
- vi) Aplicar a função de aspiração. Se o movimento está presente na lista tabu, mas o valor presente da seqüência é o melhor já encontrado em todo o processo de intensificação, então esta seqüência passa a ser o melhor vizinho até o momento e a melhor seqüência do correspondente processo de intensificação (neste caso a proibição imposta pela lista tabu é desconsiderada). Ir para o passo (vii);
- vii) Voltar ao passo (iii) se todas as seqüências na vizinhança ainda não foram analisadas. Caso contrário, ir para o passo (viii);
- viii) Selecionar o melhor vizinho como a seqüência corrente e atualizar a lista tabu. Primeiro, elimina-se o movimento situado na primeira posição da lista e o movimento reverso correspondente ao melhor vizinho selecionado é inserido na última posição da lista. Esta lista tem o objetivo de evitar movimentos cíclicos de busca. Ir para o passo (ix);
- ix) Ir para o passo (x) se o número máximo de intensificações  $int_{max}$  é alcançado ou se a melhor seqüência encontrada não for melhorada em um determinado número de intensificações consecutivas  $int_{con}$ . Caso contrário, voltar ao passo (ii) dando continuidade ao processo de intensificação;
- x) Atualizar a penalidade do vetor de carga não-suprida. Se o número máximo de diversificações é alcançado  $div_{max}$ , a metaheurística TS é interrompida e as melhores seqüências factíveis encontradas durante todo o processo de busca são selecionadas. Caso contrário, uma nova diversificação deve ser iniciada, voltar ao passo (i).



Na metodologia desenvolvida, o valor da penalidade de carga não-suprida é considerado igual para todas as barras. Este valor é modificado de acordo com a evolução do processo de busca. Se a melhor seqüência escolhida durante o processo de intensificação for factível, então a penalidade sofre uma redução pela metade (o objetivo é permitir que, no próximo processo de intensificação, seqüências não-factíveis sejam mais visitadas). Caso a melhor seqüência escolhida seja não-factível, a penalidade é aumentada baseada na diferença de custo, em valor presente, entre a pior seqüência factível do grupo definido em (x) e esta seqüência escolhida (isto permitirá que numa próxima intensificação, as buscas se situam em maior parte em regiões factíveis).

#### **2.4.2 Inteligência de Enxames ou Coletiva (*Swarm Intelligence* – SI)**

Inteligência Coletiva é um tipo de inteligência artificial baseada no comportamento coletivo de agentes organizados. Estes métodos são tipicamente compostos de uma população de simples agentes que se interagem em seu ambiente. Apesar de seguirem regras bastante simples e de não haver uma estrutura de controle orientando como estes agentes devem se comportar, interações entre os mesmos conduzem ao aparecimento de um comportamento global inteligente, desconhecido para os agentes individualmente. Fazem parte deste grupo as metaheurísticas PSO e ACO.

##### **2.4.2.1 Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO)**

A observação do movimento de bandos de pássaros, caracterizado pela sua sincronia e ausência de colisões entre seus membros, resultou no surgimento da metaheurística baseada em Inteligência Coletiva conhecida por PSO. Foi observado que embora cada pássaro aparentemente se movimente de forma independente, existe alguma informação compartilhada entre seus membros. Esta técnica utiliza regras baseadas em movimentos físicos dos pássaros (partículas), onde, a cada partícula, é atribuída uma velocidade e então as mesmas voam através do espaço de estados do problema seguindo as melhores partículas.

A metaheurística PSO foi primeiramente apresentada em [KE95], onde partículas colaboram entre si, como em uma população, para alcançar um objetivo coletivo global. Cada partícula é afetada por três fatores: sua própria velocidade, sua melhor posição alcançada até o momento e a melhor posição geral obtida por todas as partículas.

Na área de sistemas de potência, PSO tem sido aplicada [Y CZ07] no problema de despacho econômico [PLSL05], controle de tensão e potência reativa [YKFTN01, MF02], minimização de perdas de potência [ELZ05], planejamento de geração [KSP05, KSBM07], planejamento de transmissão [SRC02, YHJX05, JCYZ07, YGD08], entre outros.

### **Formulação Matemática da Metaheurística PSO**

A formulação básica da metaheurística PSO aplicada ao problema PET consiste de um enxame de  $k$  partículas movendo-se em um espaço de busca de dimensão  $(y \times n)$ . A posição da  $k$ -ésima partícula  $S^k$  (seqüência do problema PET) é definida como em (2.1) e sua velocidade é denotada por:

$$V^k = \begin{bmatrix} v_{11}^k & v_{12}^k & \cdots & v_{1l}^k & \cdots & v_{1n}^k \\ v_{21}^k & v_{22}^k & \cdots & v_{2l}^k & \cdots & v_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{t1}^k & v_{t2}^k & \cdots & v_{tl}^k & \cdots & v_{tn}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{y1}^k & v_{y2}^k & \cdots & v_{yl}^k & \cdots & v_{yn}^k \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

onde  $v_{tl}^k$  refere-se à uma variável real correspondente à velocidade atribuída à partícula  $k$  no estágio  $t$  no ramo  $l$ , cujos limites são definidos por:

$$v_{min} \leq v_{tl}^k \leq v_{max} \quad \forall t \in y; \quad \forall l \in n \quad (2.14)$$

onde  $v_{min}$  é o valor mínimo permitido para  $v_{tl}^k$ , se  $v_{tl}^k \leq v_{min}$ , então  $v_{tl}^k = v_{min}$ ; e  $v_{max}$  é o valor máximo permitido para  $v_{tl}^k$ , se  $v_{tl}^k \geq v_{max}$ , então  $v_{tl}^k = v_{max}$ ;

A cada iteração do processo de otimização, as posições das partículas são atualizadas a partir da atualização de suas velocidades. Estes são os principais mecanismos utilizados pela metaheurística PSO, os quais são descritos a seguir.

- Atualização da Velocidade:

Para se determinar a nova posição de uma partícula, primeiramente deve-se atualizar a sua parcela de velocidade. A Equação (2.15) mostra como a velocidade da  $k$ -ésima partícula é atualizada para todos os estágios  $t$  do horizonte de planejamento:

$$V_t^{k(i_{ter}+1)} = w.V_t^{k(i_{ter})} + c_1.u_1^k(P_t^k - S_t^{k(i_{ter})}) + c_2.u_2^k(P_t^{g^*} - S_t^{k(i_{ter})}) \quad (2.15)$$

onde  $i_{ter}$  corresponde à iteração do processo de otimização;  $V_t^{k(i_{ter}+1)}$  indica a velocidade da partícula  $k$  na iteração  $(i_{ter}+1)$  no estágio  $t$ ;  $V_t^{k(i_{ter})}$  corresponde à velocidade da partícula  $k$  na iteração  $(i_{ter})$  no estágio  $t$ ;  $P_t^k$  refere-se à melhor posição já encontrada pela partícula  $k$  no estágio  $t$ ;  $P_t^{g^*}$  refere-se à contribuição de uma das melhores posições já encontradas por todas as partículas durante o processo no estágio  $t$ ;  $S_t^{k(i_{ter})}$  indica a posição da  $k$ -ésima partícula na iteração  $(i_{ter})$ , conforme já apresentado em (2.2) no estágio  $t$ ;  $c_1$  e  $c_2$  são parâmetros constantes que atribuem pesos a suas parcelas;  $w$  é uma função decrescente,  $w=0,5+1/(2\ln(i_{ter}+1))$ , a qual reduz progressivamente a importância da velocidade atual com o progresso das iterações;  $u_1^k$  e  $u_2^k$  são números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo  $[0,1]$  sorteados para a atualização da velocidade da partícula  $k$ .

Nesta equação, a primeira parcela está relacionada com a velocidade corrente da partícula e é chamado de termo de momento ou termo de inércia. A segunda está associada a uma busca local implicando em uma tendência da partícula  $k$  retornar para a sua melhor posição já visitada, portanto, está relacionada com a memória da partícula. A terceira, associada a uma busca global, implica em uma tendência da partícula se deslocar para a vizinhança de uma das melhores posições já visitadas por todas as partículas. A cooperação (troca de informações e características) entre partículas é representada por esta última parcela.

A definição de limites para a velocidade conforme descrito por (2.14) é essencial para a evolução do processo de busca. Caso contrário, a contribuição da velocidade corrente passa a ser dominante em relação às outras parcelas, o que pode contribuir para uma divergência na atualização da velocidade.

No algoritmo proposto, foi considerada uma velocidade inicial nula para todas as partículas. No entanto, a maioria dos algoritmos baseados na metaheurística PSO propõe que seja definida uma velocidade inicial aleatória para cada partícula. Testes realizados indicam que o desempenho da metaheurística PSO não apresenta qualquer prejuízo em se utilizar uma velocidade inicial nula ou aleatória.

No algoritmo básico da metaheurística PSO, a última parcela da atualização da velocidade se refere à contribuição da melhor posição já visitada por todas as partículas. No entanto, no problema PET, ao usar somente a informação desta melhor posição, a busca adquire uma maior dificuldade para escapar de ótimos locais. Para superar este problema, o cálculo de atualização da velocidade foi alterado em relação a sua última parcela, como pôde ser notado em (2.15). No algoritmo proposto que será apresentado, ao invés de selecionar a melhor posição conhecida  $P^g$ , é realizado um sorteio considerando um conjunto que possua as melhores posições já visitadas e então uma destas é selecionada. Além disso, é aplicada uma perturbação  $Z_t^k$  normalmente distribuída sobre a posição selecionada em todos os estágios  $t$  do horizonte de planejamento, conforme descrito a seguir:

$$P_t^{g*} = P_t^g + Z_t^k \quad (2.16)$$

$$Z_t^k = \sigma \times [N_{t1}(0,1) \quad N_{t2}(0,1) \quad \dots \quad N_{tj}(0,1) \quad \dots \quad N_{tn}(0,1)] \quad (2.17)$$

onde  $P_t^{g*}$  representa a posição na vizinhança, no estágio  $t$ , de uma das melhores posições já visitadas por todas as partículas;  $P_t^g$  indica a posição selecionada, no estágio  $t$ , entre o conjunto de melhores posições já visitadas por todas as partículas;  $\sigma$  é a amplitude da perturbação;  $N_{tj}(0,1)$  corresponde a uma distribuição Normal com média zero e variância unitária.

Esta perturbação foi inserida nesta atualização da velocidade mediante a observação de um novo algoritmo proposto em [MF02] conhecido por Otimização por Enxame de Partículas Evolucionário (*Evolutionary Particle Swarm Optimization* – EPSO). Neste trabalho, também é considerada uma perturbação sobre a melhor posição global visitada. Durante o processo, faz todo sentido não somente usar a informação da melhor posição visitada e sim uma vizinhança em torno desta posição, principalmente quando a melhor posição conhecida para o problema ainda não foi encontrada. Isto proporciona uma maior diversidade na busca, aumentando as chances de se encontrar a melhor posição para o problema e evitando o aprisionamento em ótimos locais.

Na metaheurística EPSO, é utilizado um procedimento cujos parâmetros ( $w$ ,  $c_1$  e  $c_2$ ) possuem propriedades de auto-adaptação evoluindo com o andamento das iterações do algoritmo. Para o problema PET, testes foram realizados e pôde-se observar que ao utilizar parâmetros auto-adaptativos, nenhuma contribuição foi dada à qualidade das seqüências encontradas. Por sua vez, a metaheurística PSO teve um melhor desempenho ao manter os valores constantes destes parâmetros.

- Atualização da Posição:

Uma vez atualizada a velocidade da  $k$ -ésima partícula, a sua posição é atualizada conforme a equação a seguir para todos os estágios  $t$  do horizonte de planejamento:

$$S_t^{k(i_{ter}+1)} = S_t^{k(i_{ter})} + Round(V_t^{k(i_{ter}+1)}) \quad (2.18)$$

onde  $S_t^{k(i_{ter}+1)}$  corresponde à nova posição da partícula  $k$  na iteração  $(i_{ter}+1)$ , a qual deve satisfazer às restrições impostas por (2.3); e *Round* se refere a uma função de arredondamento que é aplicada a parcela de velocidade  $V_t^{k(i_{ter}+1)}$ , já que a mesma consiste de elementos não-discretos.

Após a aplicação destes operadores de atualização de velocidade e posição, uma nova iteração é iniciada e o processo continua até que o número máximo

de iterações ( $n_{iter}^{max}$ ) seja atingido. Então, as melhores seqüências são apresentadas como solução do problema PET.

### **Algoritmo Proposto**

O algoritmo a seguir apresenta os passos da metaheurística PSO para a resolução do problema PET:

- i) Obter a posição inicial de  $k$  partículas (seqüências), usando o algoritmo de Inicialização Inteligente descrito na Seção 2.3, ou através de um mecanismo de construção aleatória. As velocidades de cada partícula são definidas, inicialmente, iguais a zero. Seguir para o passo (ii);
- ii) Selecionar a  $k$ -ésima partícula,  $S^k$ ; sua velocidade,  $V^k$ ; sua melhor posição visitada,  $P^k$  (se  $i_{ter} = 1$ , então  $P^k = S^k$ ); bem como escolher uma dentre o grupo de melhores posições já visitadas por todas as partículas,  $P^g$ . Sortear os números aleatórios  $u_1^k$  e  $u_2^k$  e seguir para o passo (iii);
- iii) Selecionar o estágio  $t$  do horizonte de planejamento seguindo uma ordem descendente, iniciando do último estágio em direção ao ano base. Ir para o passo (iv);
- iv) Obter  $P_t^{g*}$  a partir das Equações (2.16 e 2.17) para o estágio  $t$  do horizonte de planejamento, considerando a posição  $P^g$  selecionada no passo (ii). Seguir para o passo (v);
- v) Aplicar a atualização de velocidade para o estágio  $t$  do horizonte de planejamento, conforme (2.15), respeitando os limites impostos por (2.14) e seguir para o passo (vi);
- vi) Aplicar a atualização da posição para o estágio  $t$  do horizonte de planejamento, conforme (2.18) respeitando as restrições impostas por (2.3). Executar um fluxo de potência ótimo DC com perdas de acordo com (2.5). Se o vetor solução é factível, ir para o passo (vii). Caso contrário, repetir os passos (iv, v e vi) até que seja encontrado um vetor solução factível ou um número máximo de tentativas ( $n_{ten}$ ) seja alcançado. Nesta última hipótese, a seguinte atribuição deve ser feita: se  $t = y$ , então  $S_t^{k(i_{ter}+1)} = S_t^{k(i_{ter})}$ , se  $t < y$ , então  $S_t^{k(i_{ter}+1)} = S_{t+1}^{k(i_{ter}+1)}$ ;

- vii) Se todos os estágios do horizonte de planejamento já foram analisados, ir para o passo (viii), senão voltar ao passo (iii);
- viii) Se todas as partículas tiveram sua posição atualizada, seguir para o passo (ix), senão, voltar ao passo (ii);
- ix) Se o número máximo de iterações ( $n_{iter}^{max}$ ) não for atingido, uma nova iteração é iniciada, voltar ao passo (ii). Senão, o processo de busca é encerrado e as melhores posições visitadas por todas as partículas são selecionadas como as melhores seqüências para o problema PET.

Uma maior atenção deve ser dada aos passos (iv, v e vi) do algoritmo proposto. Enquanto no último estágio do horizonte de planejamento estas operações são aplicadas a todos os ramos, nos demais estágios, somente os ramos que possuem reforços no estágio imediatamente superior ao analisado estão sujeitos a receberem estas operações. De fato, os demais ramos nestes estágios não podem receber reforços, de forma a manter a coordenação do plano de expansão.

Por fim, nota-se no algoritmo proposto que somente seqüências factíveis são consideradas durante o processo de otimização. Assim, não há necessidade de se usar um fator de penalidade para eliminar seqüências não-factíveis.

#### **2.4.2.2 Otimização por Colônia de Formigas (Ant Colony Optimization – ACO)**

Formigas são insetos que vivem em comunidade e que procuram estabelecer os menores caminhos entre sua colônia e fontes de alimentos. Tal resultado só é possível porque durante suas buscas as formigas deixam no solo rastros de uma substância conhecida por feromônio marcando todo o seu caminho percorrido. Através desta realimentação positiva de informações, com o tempo, a probabilidade de uma formiga escolher um determinado caminho aumenta em proporção ao número de formigas que anteriormente fizeram a mesma escolha. Este processo ocasiona um crescimento mais acelerado da quantidade de feromônio sobre o caminho mais curto. Esta tem sido a principal inspiração para a aplicação de colônia de formigas em diversos problemas de otimização.

O problema do Caixeiro Viajante foi um dos primeiros a ser estudado, tendo apresentado ótimos resultados [DG97]. Desde então, várias outras aplicações têm sido realizadas [DS04]. Em sistemas de potência, algumas importantes aplicações de ACO já podem ser encontradas em áreas como planejamento de transmissão [R06, JCYZ07, RLM08, LSMRRS08], planejamento de distribuição [GKOOYVU04], expansão de geração [KSP05] e fluxo de potência [VHL05].

Na representação do problema PET, os caminhos a serem escolhidos pela metaheurística correspondem aos ramos entre as barras existentes, onde possíveis reforços (circuitos) podem ser adicionados à rede a ser planejada. Embora formigas reais não tenham memória associada aos caminhos percorridos, esta informação é essencial em algoritmos ACO, uma vez que ela permite construir um conjunto de seqüências que satisfaça às restrições do problema. Por exemplo, em problemas PET, uma destas restrições se refere ao número máximo de circuitos que podem ser adicionados entre cada par de barras do sistema. Cabe ressaltar que cada formiga representa uma tentativa de encontrar uma seqüência para o horizonte de planejamento, onde sua busca deve ser orientada por alguma informação sobre o problema (função heurística) e por rastros de feromônio que são depositados sobre os possíveis ramos a serem reforçados.

### ***Formulação Matemática da Metaheurística ACO***

Para lidar com o problema PET será utilizado neste trabalho o algoritmo conhecido como *Ant Colony System* – ACS, uma vez que o mesmo tem apresentado melhor desempenho na resolução de grandes problemas combinatórios [DG97, DS04]. Seus principais mecanismos, já adaptados para o problema PET, são apresentados a seguir.

- Regra de Transição de Estados

A configuração de um novo estado é caracterizada sempre que um circuito é adicionado à rede sob análise. Uma missão ou busca é completada quando uma formiga encontra um conjunto de circuitos definindo uma seqüência factível para



a rede em estudo, i.e. quando a demanda é atendida pela geração disponível em todas as barras sem violar quaisquer restrições, tais como as capacidades de transmissão. Durante a  $k$ -ésima missão, uma formiga se move de um circuito a outro por meio de transições. As regras de transição são definidas através de probabilidades envolvendo informações heurísticas e rastros de feromônio depositados sobre os possíveis ramos. Estas probabilidades devem apontar as regiões mais interessantes do espaço de busca, e, ao mesmo tempo, ser capaz de evitar uma rápida convergência para ótimos locais. A próxima equação mostra este mecanismo de transição de estados conhecido por regra proporcional pseudo-aleatória [DG97, DS04], o qual é aplicado a todos os estágios  $t$  do horizonte de planejamento:

$$c = \begin{cases} \arg \max_{(i,j) \in T_t^k} \{ [\tau(i,j)_t][\eta(i,j)_t]^\beta \}, & \text{se } q \leq q_0 \\ C, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.19)$$

onde  $c$  indica o circuito selecionado;  $\tau(i,j)_t$  corresponde ao rastro de feromônio depositado sobre o ramo entre as barras  $i$  e  $j$  no estágio  $t$ ;  $\eta(i,j)_t$  representa o valor da função heurística associado ao ramo  $(i,j)$  no estágio  $t$ ;  $\beta$  define a importância da função heurística em relação ao rastro deixado sobre o ramo correspondente;  $\arg \max$  é uma função que seleciona o valor máximo para o resultado  $[\tau(i,j)_t][\eta(i,j)_t]^\beta$ ;  $T_t^k$  é o conjunto de ramos que ainda não atingiram o número máximo de circuitos selecionados pela  $k$ -ésima formiga no estágio  $t$ ;  $q$  representa um número aleatório uniformemente distribuído em  $[0,1]$ ;  $q_0$  é um parâmetro ajustável ( $0 \leq q_0 \leq 1$ ), o qual indica o grau de intensidade que a busca se concentrará sobre os melhores ramos sugeridos pela função heurística e os rastros de feromônio;  $C$  corresponde a uma variável aleatória que segue uma distribuição discreta dada pela equação (2.20), onde  $p_t^k(i,j)$  é a probabilidade da  $k$ -ésima formiga escolher o ramo  $(i,j)$  a receber um circuito no estágio  $t$ :

$$p_t^k(i,j) = \begin{cases} \frac{[\tau(i,j)_t][\eta(i,j)_t]^\beta}{\sum_{(t,u) \in T_t^k} \{ [\tau(t,u)_t][\eta(t,u)_t]^\beta \}}, & \text{se } (i,j) \in T_t^k \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.20)$$

A regra proporcional pseudo-aleatória tem dois propósitos: se  $q \leq q_0$ , o ACS aproveita o conhecimento acumulado sobre o problema PET para selecionar os melhores ramos. Caso contrário, o circuito a ser adicionado ao ramo é obtido pela exploração do espaço de estados de acordo com (2.20) através de um sorteio seguindo uma distribuição uniforme. Em qualquer caso, a regra de transição de estado deve favorecer circuitos que trazem o melhor benefício para a rede ao menor custo.

- Regras de Atualização de Feromônio

Estas regras possuem um papel importante no processo de aprendizagem do algoritmo ACS. Os valores numéricos associados com os rastros de feromônio, depositados sobre os possíveis ramos, indicam o quanto a busca será intensificada na direção das seqüências previamente encontradas. O algoritmo ACS possui dois meios para atualizar os feromônios [DG97, DS04]: regra de atualização local e regra de atualização global.

A atualização local dos rastros de feromônio é realizada durante a construção de uma seqüência, i.e. durante cada missão de uma formiga. Seu objetivo é reduzir os rastros dos ramos mais relevantes de forma a diminuir a probabilidade de escolha do respectivo circuito por todas as formigas durante a mesma expedição (i.e. número pré-determinado de missões). Deste modo, cada seqüência criada por uma formiga tende a ser diferente da anterior. Isto contribui para uma maior diversificação da busca, evitando ótimos locais e prevenindo uma convergência prematura. Toda vez que um circuito é escolhido por uma formiga em qualquer estágio  $t$ , a quantidade de feromônio sob o respectivo ramo é alterada pela aplicação da regra de atualização local a seguir:

$$\tau(i, j)_t = (1 - \varphi) \tau(i, j)_t + \varphi \tau_0 \quad (2.21)$$

onde  $\varphi$  é a taxa de redução local dos rastros de feromônio, e  $\tau_0$  é um rastro de feromônio definido para todos os possíveis ramos no início do processo de busca.

Esta atualização também deve ser aplicada a este ramo em todos os estágios posteriores a  $t$  até aquele imediatamente anterior ao primeiro estágio superior já

analisado. Por exemplo, suponha que o estágio 7 já tenha sido analisado e que a análise atual corresponda ao estágio 3, assim esta regra é aplicada aos estágios 3, 4, 5 e 6, uma vez que o circuito adicionado obrigatoriamente estará presente nos estágios subseqüentes.

A atualização global dos rastros de feromônio é realizada ao final de cada expedição. Seu objetivo é favorecer a escolha dos melhores ramos pelas formigas nas expedições posteriores. Existem duas estratégias que podem ser usadas considerando esta atualização de rastros [DS04]: *iteration-best* ou *best-so-far*. A estratégia *best-so-far* usa a melhor seqüência encontrada entre todas as missões de todas as expedições analisadas até então. Esta estratégia tem apresentado melhores resultados para diversas aplicações incluindo o problema do caixeiro viajante. Entretanto, no problema PET, a estratégia escolhida se refere à *iteration-best*, a qual tem conduzido à melhores resultados. Esta estratégia utiliza a melhor seqüência encontrada ao final de cada expedição. Esta atualização também é aplicada a todos os estágios  $t$ , sendo descrita pelas seguintes equações:

$$\Delta\tau(i, j)_t = \begin{cases} \left( \frac{K_{pher}}{V^*} \right) \sqrt{nc_t}, & \text{se } (i, j) \in S^* \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.22)$$

onde  $K_{pher}$  é um parâmetro [GKOOYVU04] de ajuste dos rastros de feromônio, o qual deve ter valor maior do que o custo de qualquer seqüência obtida durante a primeira expedição;  $V^*$  representa o menor custo em valor presente associado com a melhor seqüência  $S^*$  encontrada na expedição anterior;  $nc_t$  corresponde ao número de circuitos adicionados ao ramo  $(i, j)$  no estágio  $t$ ; e  $\Delta\tau(i, j)_t$  é o rastro depositado sobre o ramo  $(i, j)$  no estágio  $t$  devido a  $S^*$ . Assim:

$$\begin{cases} \text{se } (i, j) \in S^* \rightarrow \tau(i, j)_t^n = (1 - \rho) \tau(i, j)_t^o + \rho \Delta\tau(i, j)_t \\ \text{se } (i, j) \notin S^* \rightarrow \tau(i, j)_t^n = (1 - \rho) \tau(i, j)_t^o + \rho \tau_0 \end{cases} \quad (2.23)$$

onde  $\rho$  representa a taxa de aprendizagem do algoritmo em relação aos rastros de feromônio;  $\tau(i, j)_t^o$  corresponde aos rastros de feromônio obtidos pela última atualização global no estágio  $t$ ; e  $\tau(i, j)_t^n$  é o novo rastro de feromônio que será

usado na próxima expedição no estágio  $t$ . A Equação (2.23) é levemente diferente daquela usada pelo tradicional algoritmo ACS [DG97, DS04], já que ela sempre tenta manter a memória das atualizações dos rastros das expedições anteriores. Além disso, os rastros sob os ramos que não pertencem a  $S^*$  também são atualizados nesta fase sendo reduzidos de forma semelhante à Equação (2.21).

### ***Informação Heurística***

Durante a construção dos planos de investimentos, as formigas utilizam dois tipos de informações para a orientação de suas buscas, como pode ser notado pela Equação (2.19). A parcela referente à informação heurística  $\eta(i,j)_t$  é de extrema importância para o correto aprendizado do algoritmo ACS, uma vez que ainda não se possui informações relacionadas aos rastros de feromônio  $\tau(i,j)_t$  no início do processo. Conforme estudos realizados [R06], concluiu-se que o algoritmo ACS adquire uma maior probabilidade para encontrar boas seqüências, com menor esforço computacional, quando a função heurística dada pela Equação (2.7) é utilizada. Antes que um ramo seja escolhido para receber um circuito, esta informação é atualizada através da solução de um PL baseado em um modelo de fluxo de potência DC com perdas, conforme já apresentado.

### ***Busca Local***

Incluir alguma busca local pode ser interessante para melhorar o desempenho da metaheurística ACS de modo a auxiliar sua busca. Neste trabalho, foi considerado um mecanismo de busca em árvore que visa reduzir ao máximo o número de circuitos adicionados ao sistema. Esta busca local é aplicada apenas sobre um grupo de melhores seqüências encontradas pela metaheurística, ao final de cada expedição, antes da atualização global dos rastros de feromônio. Vale ressaltar que a profundidade da busca é limitada para não aumentar demasiadamente o número de combinações a serem analisadas. Esta estratégia é interessante, pois permite à metaheurística analisar planos de investimentos que se encontram em regiões vizinhas às melhores seqüências encontradas. Além disso, ao restringir o número de seqüências e a profundidade de análise, o tempo computacional não é comprometido, já que a convergência da metaheurística é alcançada em um número menor de expedições.

### **Algoritmo Proposto**

A seguir são apresentados os passos do algoritmo desenvolvido baseado na metaheurística ACS para a resolução do problema PET dinâmico:

- i) Escolher aleatoriamente uma ordem para a avaliação dos estágios do horizonte de planejamento, selecionar aquele na primeira posição e ir para o passo (ii);
- ii) Executar um fluxo de potência ótimo DC com perdas de acordo com (2.5), observando as condições de geração e carga do estágio sob análise e considerando como base a rede de transmissão do estágio anterior mais próximo já analisado. Se uma solução factível é encontrada (i.e. corte de carga = 0), ir para o passo (v), caso contrário ir para o passo (iii);
- iii) Avaliar a função heurística, de acordo com (2.7) e aplicar a regra proporcional pseudo-aleatória, de acordo com (2.19) e (2.20). Para a definição do conjunto de ramos  $T_t^k$ , deve-se observar os limites inferior e posterior dos anos mais próximos já analisados, conforme as restrições impostas em (2.3). Selecionar o circuito a ser adicionado ao sistema e ir para o passo (iv);
- iv) Aplicar a regra de atualização local, de acordo com (2.21), considerando o correspondente ramo do circuito adicionado. Executar um novo fluxo de potência ótimo DC com perdas. Se a nova solução é factível, ir para o passo (v), caso contrário, voltar ao passo (iii);
- v) Se o estágio sob análise corresponde ao último da ordem de avaliação, armazenar a seqüência  $S^k$ , interromper a missão da formiga e ir para o passo (vi). Caso contrário, selecionar o próximo estágio da ordem de avaliação definido em (i) e voltar ao passo (ii);
- vi) Se o número pré-estabelecido de missões ( $n_a$ ) dentro de uma expedição é alcançado, ir para o passo (vii). Caso contrário, outra formiga deve iniciar uma nova missão, voltar ao passo (i);
- vii) Escolher as melhores seqüências entre todas as missões da última expedição e aplicar o mecanismo de busca local. De forma a facilitar a

coordenação dos reforços, procura-se reduzir o número de circuitos adicionados seguindo uma análise ascendente de avaliação dos estágios, partindo do estágio inicial até o último do horizonte de planejamento. Selecionar a melhor seqüência de acordo com (2.4) e ir para o passo (viii);

- viii) A partir da seqüência escolhida no passo anterior, aplicar a regra de atualização global, baseado em (2.22) e (2.23). Esta regra é aplicada em todos os estágios do horizonte. Se o número máximo de expedições ( $n_{exp}^{max}$ ) é alcançado, ir para o passo (ix). Caso contrário, uma nova expedição deve ser iniciada, voltar ao passo (i);
- ix) Selecionar as melhores seqüências encontradas entre todas as expedições e interromper o processo de otimização.

Nota-se através do algoritmo que, para a construção das seqüências, cada formiga segue uma ordem de avaliação dos estágios ao longo do horizonte de planejamento. Para cada estágio, reforços são adicionados até que se obtenha uma solução factível, isto é,  $z = 0$  de acordo com a Equação (2.5). Portanto, somente seqüências factíveis são consideradas no processo de otimização. Assim, não há necessidade de se usar um fator de penalidade para eliminar seqüências não-factíveis.

### 2.4.3 Algoritmos Evolucionários (*Evolutionary Algorithms – EA*)

Algoritmos Evolucionários, os quais correspondem a um subconjunto da Computação Evolucionária (*Evolutionary Computation – EC*), se baseiam em um processo de evolução natural. Estes algoritmos modificam o vetor solução ao longo de uma seqüência de gerações, através de mecanismos de mutação, cruzamento e seleção. Atualmente, existem muitas variedades de EA, podendo ser citados: ES, DE e AIS. Estas abordagens diferem entre si nos mecanismos de evolução, contudo, atualmente todas as classes de algoritmos EA são bastante similares, sendo que cada área tem copiado e alterado idéias apresentadas pelas demais.

### 2.4.3.1 Estratégias de Evolução (*Evolution Strategies – ES*)

Inicialmente, a metaheurística ES foi desenvolvida por Fogel, Schwefel e Rothenberg [F94, SR95]. Atualmente já existem algumas aplicações na área de sistemas de potência como em planejamento ótimo de potência reativa [LY98], definição de coordenação de controladores FACTS [NADRV07] e planejamento de sistemas de transmissão [LSRMSR06, MSLRSR07, S07, LSMRRS08].

Esta metaheurística não necessita de um processo de codificação/decodificação (geralmente necessário no GA), uma vez que sua representação é baseada em variáveis reais do problema. Esta ferramenta procura encontrar os melhores planos de expansão por meio da aplicação de operadores de evolução em um conjunto de seqüências (população). A cada geração, ou iteração, as seqüências (indivíduos) sofrem mutações e são avaliadas pela função objetivo do problema. Posteriormente, os melhores indivíduos entre a população original e mutada são selecionados para fazerem parte da população de progenitores da próxima geração. Este procedimento é repetido, geração após geração, até que um critério de interrupção de busca seja satisfeito. Como em cada geração os melhores indivíduos são selecionados e procriados, espera-se que as futuras gerações sejam constituídas de indivíduos de boa qualidade. Ao final da busca, os melhores indivíduos são selecionados como solução do problema PET.

#### ***Formulação Matemática da Metaheurística ES***

Nesta ferramenta, a  $k$ -ésima seqüência definida por (2.1) é chamada de indivíduo, onde cada elemento  $s_{i,l}^k$  referente às opções de reforços corresponde a um gene deste indivíduo. Os operadores de seleção e mutação são os únicos mecanismos utilizados por esta ferramenta.

- Seleção

Os diversos modelos ES derivam do modelo geral  $(\mu, \kappa, \lambda, \rho)$  ES, cujos parâmetros têm os seguintes significados:  $\mu$  é o número de progenitores numa geração;  $\kappa$  corresponde ao número de gerações que um indivíduo sobrevive;  $\lambda$  indica o número de descendentes criados numa geração; e  $\rho$  é o número de progenitores

de um indivíduo. Neste trabalho é utilizado o modelo  $(\mu+\lambda)$  ES. Portanto,  $\kappa$  e  $\rho$  são feitos iguais a 1, e os novos  $\mu$  progenitores são selecionados do conjunto  $\mu+\lambda$ . Esta forma de seleção garante que, no conjunto, os indivíduos da geração futura nunca serão piores que os seus progenitores.

- Mutação

A mutação traz diversidade para as populações, garantindo assim, que diferentes regiões, dentro do espaço de busca, sejam exploradas. No ES, a operação de mutação consiste em adicionar ao indivíduo  $k$  uma perturbação  $Z_t^k$ , normalmente distribuída, a todos os estágios  $t$  do horizonte de planejamento, conforme mostrado por (2.24) e (2.25):

$$\tilde{S}_t^k = S_t^k + Z_t^k \quad (2.24)$$

$$Z_t^k = \sigma \times [N_{t1}(0,1) \quad N_{t2}(0,1) \quad \dots \quad N_{tl}(0,1) \quad \dots \quad N_{tn}(0,1)] \quad (2.25)$$

onde  $\tilde{S}_t^k$  representa um novo indivíduo, o qual é obtido através da mutação de  $S_t^k$ ;  $\sigma$  é a amplitude de mutação, que deve ser vista como um parâmetro estratégico;  $N_{tl}(0,1)$  corresponde a uma distribuição Normal com média zero e variância unitária.

Como pode ser observado, a perturbação  $Z_t^k$  é contínua. Portanto, uma função de arredondamento deve ser aplicada a cada um dos genes dos novos indivíduos conforme mostrado a seguir:

$$s_{tl}^k = \begin{cases} 0, & \text{se } \tilde{s}_{tl}^k < 0 \\ \text{Round}(\tilde{s}_{tl}^k), & \text{se } \tilde{s}_{tl}^k \in [0, N_{l \max}] \\ N_{l \max}, & \text{se } \tilde{s}_{tl}^k > N_{l \max} \end{cases} \quad (2.26)$$

onde  $\text{Round}(\tilde{s}_{tl}^k)$  corresponde à função de arredondamento que retorna o número inteiro mais próximo do valor da variável real  $\tilde{s}_{tl}^k$ ; e  $N_{l \max}$  já foi definido em (2.3)



A amplitude de mutação não necessariamente precisa ser a mesma para todos os genes do indivíduo, podendo ser individualizada e, ainda, ficar sujeita à mutação e seleção, caracterizando o modelo ES auto-adaptativo. Neste modelo, cada indivíduo fica governado por parâmetros objetos e estratégicos (amplitudes de mutação), os quais estão sujeitos à evolução. Para o caso em que  $\sigma$  é mantido constante durante todo o processo evolutivo, e apenas os parâmetros objetos ficam sujeitos à mutação e seleção, tem-se o ES não-adaptativo. Para o problema PET, o modelo não-adaptativo tem apresentado melhor desempenho [LSRMSR06, LSMRRS08], sendo também escolhido neste trabalho.

### **Algoritmo Proposto**

A seguir são apresentados os passos do algoritmo desenvolvido baseado na metaheurística ES para a resolução do problema PET dinâmico:

- i) Criar uma população composta de  $\mu$  seqüências usando o algoritmo de Inicialização Inteligente descrito na Seção 2.3, ou através de um mecanismo de construção aleatória. Definir esta população como progenitora e seguir para o passo (ii);
- ii) Selecionar a seqüência  $k$  da população progenitora e ir para o passo (iii);
- iii) Selecionar o estágio  $t$  do horizonte de planejamento seguindo uma ordem descendente, iniciando do último estágio em direção ao ano base. Ir para o passo (iv);
- iv) Aplicar o operador de mutação para o estágio  $t$  do horizonte de planejamento, conforme as Equações (2.24, 2.25 e 2.26), respeitando as restrições impostas por (2.3). Executar um fluxo de potência ótimo DC com perdas de acordo com (2.5). Se o vetor solução é factível, ir para o passo (v). Caso contrário, repetir este passo até que seja encontrado um vetor solução factível ou um número máximo de tentativas ( $n_{ten}$ ) seja alcançado. Nesta última hipótese, a seguinte atribuição deve ser feita: se  $t = y$ , então  $S_t^\lambda = S_t^k$ , se  $t < y$ , então  $S_t^\lambda = S_{t+1}^\lambda$ ;

- v) Se todos os estágios do horizonte de planejamento foram analisados, armazenar a nova seqüência criada  $S^A$ , que fará parte da população descendente, e seguir para o passo (vi). Senão, voltar ao passo (iii);
- vi) Se as  $\mu$  seqüências progenitoras já tiverem sido selecionadas para a geração das  $\lambda$  seqüências descendentes, seguir para o passo (vii). Senão, voltar ao passo (ii);
- vii) Dentre o número total de seqüências progenitoras ( $\mu$ ) e descendentes ( $\lambda$ ) (sendo  $\mu=\lambda$ ), selecionar a metade destas  $(\mu + \lambda)/2$ , as quais devem fazer parte da população progenitora da próxima geração. Esta seleção deve escolher as melhores seqüências que minimizem a função objetivo definida em (2.4) e que sejam distintas. Ir para o passo (viii);
- viii) Se o número máximo de gerações ( $n_{ger}^{max}$ ) não for atingido, uma nova geração é iniciada, voltar ao passo (ii). Senão, o processo de busca é encerrado e as melhores seqüências analisadas são selecionadas.

Uma maior atenção deve ser dada ao passo (iv) na aplicação do operador de mutação. Enquanto uma amplitude  $\sigma_1$  é aplicada a todos os ramos do último estágio do horizonte de planejamento, para os demais estágios, usa-se uma amplitude  $\sigma_2$ . Nestes estágios, o operador de mutação é aplicado somente aos ramos que possuem reforços no estágio imediatamente superior ao analisado. Os demais ramos neste estágio não podem receber reforços, de forma a manter a coordenação do plano de expansão.

De acordo com o método da operação de mutação descrito no parágrafo anterior, existe, portanto, uma maior probabilidade de que haja alterações no número de reforços no último estágio do horizonte, sendo conveniente utilizar uma amplitude de mutação menor para este estágio. Caso contrário, podem ser formadas seqüências com grande quantidade de reforços e, conseqüentemente, de pior qualidade. Para os demais estágios, deve-se usar uma amplitude de mutação maior, uma vez que a operação de mutação será aplicada a somente alguns ramos. Quanto menor a amplitude  $\sigma_2$ , maiores são as chances de não haver alteração no número de reforços em qualquer ramo do sistema, diminuindo, assim, a diversidade da população.

O critério de seleção adotado, descrito no passo (vii), resulta na seleção de uma população de boa qualidade e diversificada, evitando que apareçam seqüências semelhantes e contribuindo para uma menor probabilidade de aprisionamento em ótimos locais pela busca. Por fim, nota-se no algoritmo proposto que somente seqüências factíveis são consideradas durante o processo de otimização. Assim, não há necessidade de se usar um fator de penalidade para eliminar seqüências não-factíveis.

#### **2.4.3.2 Evolução Diferencial (*Differential Evolution – DE*)**

A metaheurística conhecida por DE, da mesma forma que o ES, também se enquadra no grupo dos algoritmos evolucionários (EA), os quais utilizam alguns operadores de evolução durante o processo de busca. Esta técnica foi primeiramente proposta por Storn e Price em 1995 [SP95]. Contudo, DE se difere das outras metaheurísticas baseadas em EA em relação aos seus operadores de evolução. Ao contrário das técnicas GA, EP e ES que seguem uma função de distribuição de probabilidades para produzir uma perturbação, o DE se baseia em diferenças ponderadas de indivíduos selecionados aleatoriamente, isto é, consiste de combinações aritméticas entre os indivíduos.

Basicamente, a cada geração, esta ferramenta aplica dois operadores, mutação e cruzamento, produzindo novos indivíduos. Então, o operador de seleção compara cada novo indivíduo com o correspondente da população anterior e o melhor entre eles é selecionado como membro da população na próxima geração. Nota-se, portanto, que o operador de seleção do DE também é diferente daqueles usados por outras técnicas, principalmente em comparação ao ES descrito na Seção 2.4.3.1

Dentre as aplicações existentes na área de sistemas de potência usando a metaheurística DE podem ser citados o problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição [CCS04], fluxo de potência ótimo reativo [LCWD07], despacho ótimo de potência reativa [VS08], planejamento de expansão da geração [KSP05, KSBM07], planejamento de sistemas de transmissão [DLLW06,

STIS07], entre outros. Nas próximas seções, a formulação matemática desta técnica será apresentada, bem como sua adequação ao problema PET.

### ***Formulação Matemática da Metaheurística DE***

A mesma representação usada pela metaheurística ES, também é utilizada pelo DE, onde a  $k$ -ésima seqüência  $S^k$  definida por (2.1) é chamada de indivíduo e cada elemento  $s_{t,l}^k$  referente às opções de reforços corresponde a um gene deste indivíduo. A seguir são apresentados os operadores de mutação, cruzamento e seleção usados por esta ferramenta.

- Mutação

O objetivo do operador de mutação é permitir que haja uma maior abrangência na avaliação do espaço de busca, trazendo assim uma maior diversidade. Na metaheurística DE, esta diversidade é obtida através de combinações entre seus próprios indivíduos que constituem sua população. Há, no entanto, inúmeras regras de combinação de indivíduos sendo classificadas como cinco diferentes estratégias. A seguir são apresentadas estas estratégias, as quais devem ser aplicadas a todos os estágios  $t$  do horizonte de planejamento:

i) *Best/Rand*

$$X_t^k = \text{Round}(S_t^{\text{best}} + F(S_t^{r_1} - S_t^{r_2})) \quad (2.27)$$

ii) *Rand/Rand*

$$X_t^k = \text{Round}(S_t^{r_1} + F(S_t^{r_2} - S_t^{r_3})) \quad (2.28)$$

iii) *Old/Best/Rand*

$$X_t^k = \text{Round}(S_t^k + F(S_t^{\text{best}} - S_t^k) + F(S_t^{r_1} - S_t^{r_2})) \quad (2.29)$$

iv) *Best/Rand-Rand*

$$X_t^k = \text{Round}(S_t^{\text{best}} + F(S_t^{r_1} - S_t^{r_2}) + F(S_t^{r_3} - S_t^{r_4})) \quad (2.30)$$

v) *Rand/Rand-Rand*

$$X_t^k = \text{Round}(S_t^{r_1} + F(S_t^{r_2} - S_t^{r_3}) + F(S_t^{r_4} - S_t^{r_5})) \quad (2.31)$$

onde  $X_t^k$  corresponde ao  $k$ -ésimo indivíduo mutante;  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  e  $k$  são índices escolhidos aleatoriamente, sendo  $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_4 \neq r_5 \neq k$ ;  $S_t^{r_1}, S_t^{r_2}, S_t^{r_3}, S_t^{r_4}, S_t^{r_5}$  e  $S_t^k$  são os respectivos indivíduos selecionados;  $S_t^{best}$  corresponde ao melhor indivíduo existente na população;  $F$  se refere a um fator de mutação; e *Round* é uma função que retorna o número inteiro mais próximo da operação de mutação.

Vários testes foram realizados para a solução do problema PET utilizando cada uma das estratégias apresentadas. Pôde-se concluir que cada uma possui uma característica específica e que a estratégia (2.28) foi aquela que proporcionou os melhores índices de qualidade para as seqüências encontradas, além de um melhor desempenho computacional. Pode-se dizer também que quanto maior o número de indivíduos selecionados aleatoriamente, maior será a diversidade proporcionada à busca e, conseqüentemente, maior capacidade de evitar aprisionamento em ótimos locais. Como desvantagem, a metaheurística terá uma maior dificuldade de convergência e pior desempenho computacional. Com estas características, podem ser citadas as estratégias (2.30 e 2.31). Estratégias que incluem a informação do melhor indivíduo da população possuem uma rápida convergência, contudo, maiores são as chances de se obter ótimos locais. As estratégias (2.27 e 2.29) são exemplos destas características. Portanto, a estratégia (2.28) foi escolhida para a aplicação da metaheurística DE ao problema PET.

- Cruzamento

A operação de cruzamento tem como propósito ajudar a metaheurística DE aumentar a diversidade entre os indivíduos mutantes  $X^k$ . A idéia consiste em misturar os genes dos indivíduos mutantes aos genes dos indivíduos da população progenitora. Portanto, para cada indivíduo mutante no estágio  $t$  é gerado um novo indivíduo  $W_t^k = [w_{t1}^k \ w_{t2}^k \ \dots \ w_{tl}^k \ \dots \ w_{tn}^k]$ . A equação a

seguir mostra como deve ser feita esta operação para todos os ramos  $l$  e estágios  $t$  do horizonte de planejamento:

$$W_{t,l}^k = \begin{cases} x_{t,l}^k & \text{se } (rand_l \leq CR) \text{ ou } (l = \gamma) \\ s_{t,l}^k & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.32)$$

onde  $rand_l$  é uma variável aleatória com distribuição uniforme  $[0,1]$ ;  $\gamma$  é escolhido aleatoriamente entre os possíveis ramos a receberem reforços, de forma a garantir que pelo menos um ramo será oriundo do indivíduo mutante;  $CR$  corresponde à taxa de cruzamento sendo responsável por controlar a diversidade da população e auxiliar o algoritmo a escapar de ótimos locais.

- Seleção

Finalmente, o operador de seleção é aplicado como o último passo da metaheurística DE. Este operador tem como função escolher os indivíduos que irão compor a população na próxima geração. A comparação deve ser feita entre cada um dos indivíduos resultantes das operações de mutação e cruzamento  $W^k$  com seus respectivos indivíduos da população progenitora  $S^k$ . A função objetivo do problema PET, dada pela Equação (2.4), é usada para avaliar cada um destes indivíduos, conforme é mostrado a seguir:

$$S^{k_{new}} = \begin{cases} W^k & \text{se } f(W^k) \leq f(S^k) \\ S^k & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.33)$$

onde  $S^{k_{new}}$  corresponde ao  $k$ -ésimo indivíduo selecionado para a próxima geração. Portanto, este critério de seleção realiza uma comparação aos pares e não entre todos os indivíduos como é feito nos demais algoritmos da classe EA.

### **Algoritmo Proposto**

A seguir são apresentados os passos do algoritmo desenvolvido baseado na metaheurística DE para a resolução do problema PET dinâmico:

- i) Criar uma população de seqüências usando o algoritmo de Inicialização Inteligente descrito na Seção 2.3, ou através de um mecanismo de construção aleatória. Definir esta população como progenitora e seguir para o passo (ii);
- ii) Selecionar as seqüências correspondentes aos índices  $k$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$  sorteados aleatoriamente da população progenitora, uma vez que a operação de mutação escolhida corresponde à equação (2.28). Seguir para o passo (iii);
- iii) Selecionar o estágio  $t$  do horizonte de planejamento seguindo uma ordem descendente, iniciando do último estágio em direção ao ano base. Ir para o passo (iv);
- iv) Aplicar o operador de mutação para o estágio  $t$  do horizonte de planejamento, conforme a Equação (2.28). Seguir para o passo (v);
- v) Aplicar o operador de cruzamento para o estágio  $t$  do horizonte de planejamento, conforme a Equação (2.32), respeitando as restrições impostas por (2.3). Executar um fluxo de potência ótimo DC com perdas de acordo com (2.5). Se o vetor solução é factível, ir para o passo (vi). Caso contrário, repetir este passo até que seja encontrado um vetor solução factível ou um número máximo de tentativas ( $n_{ten}$ ) seja alcançado. Nesta última hipótese, se  $t=y$  então se deve sortear novos índices  $k$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$ , selecionar as seqüências correspondentes e voltar ao passo (iv); se  $t < y$ , então  $W_t^k = W_{t+1}^k$ ;
- vi) Se todos os estágios do horizonte de planejamento já foram analisados, armazenar a seqüência obtida pelos operadores de mutação e cruzamento  $W^k$ , e seguir para o passo (vii). Senão, voltar ao passo (iii);
- vii) Aplicar o operador de seleção, baseado na Equação (2.4), entre a seqüência  $S^k$  da população progenitora e a seqüência  $W^k$ . Será selecionada, para a próxima geração, a seqüência que proporciona o menor valor para a função objetivo. Se todas as seqüências progenitoras já tiverem sido selecionadas, seguir para o passo (viii). Senão, voltar ao passo (ii);

- viii) Se o número máximo de gerações ( $n_{ger}^{max}$ ) for atingido ou se a população da próxima geração for constituída de indivíduos iguais, o processo de busca é encerrado e as melhores seqüências analisadas durante o processo de busca são selecionadas. Senão, uma nova geração é iniciada, voltar ao passo (ii).

Da mesma forma como foi comentado nos algoritmos propostos para as metaheurísticas PSO e ES, uma maior atenção merece ser dada a aplicação dos operadores definidos nos passos (iv e v) aos diferentes estágios do horizonte de planejamento. Para o último estágio do horizonte de planejamento, estas operações são aplicadas a todos os ramos, enquanto que nos demais estágios, somente aos ramos que possuem reforços no estágio imediatamente superior ao analisado estão sujeitos a receberem estas operações. Mais uma vez, os demais ramos nestes estágios não podem receber reforços, de forma a manter a coordenação do plano de expansão.

Apesar do operador de seleção do DE, definido pelo passo (vii), exigir um menor esforço computacional, uma vez que não há a necessidade de se ordenar a população de indivíduos, este operador muitas vezes acaba contribuindo para uma convergência prematura do algoritmo, obtendo uma população final totalmente idêntica e muitas vezes constituída de ótimos locais. Esta, portanto, representa uma grande desvantagem em relação ao ES, o qual usa a estratégia de sempre selecionar, para a próxima geração, os melhores indivíduos distintos dentre a população progenitora e descendente.

#### **2.4.3.3 Sistemas Imunológicos Artificiais (Artificial Immune Systems – AIS)**

A metaheurística AIS é baseada na resposta do sistema imunológico dos seres vivos à presença de um estímulo nocivo ao organismo conhecido por antígeno. Como já comentado, o AIS possui as principais características baseadas na teoria de evolução de Charles Darwin: diversidade de repertório, variação genética e seleção natural [CZ02]. Este fato, portanto, qualifica esta técnica a ser inserida na classe EA. De acordo com a referência [WGO04], a qual traz



um importante levantamento histórico de vários métodos e aplicações usando AIS, o método conhecido por Seleção Clonal (*Clonal Selection* – CLONALG) será abordado neste trabalho.

Esta metaheurística tem sido usada em diferentes problemas, desde reconhecimento de padrões até processos de otimização. A seleção clonal é um processo evolucionário natural em sistemas imunológicos, onde aqueles anticorpos que reconhecem os antígenos invasores são selecionados para a proliferação através de clonagens. Após um período de maturação, os que possuem maior afinidade aos antígenos são escolhidos e os demais são descartados. Proposto, primeiramente, por Castro e Zuben [CZ02], CLONALG é um dos métodos mais aplicados e aceitos pela comunidade científica.

Vários trabalhos, incluindo a área de sistemas de potência, têm sido desenvolvidos utilizando o AIS, como o problema de despacho econômico [RSM06], programação de geração a curto-prazo [L06], problemas de reconfiguração e planejamento de sistemas de distribuição [ADP07, CGTNC07, CSNT08], fluxo de potência ótimo [HLB07], entre outros. O problema PET ainda não havia sido tratado por esta ferramenta até o desenvolvimento deste trabalho, o qual resultou na publicação das referências [RLH09a, RLH09b]. Nas próximas seções serão apresentados os principais conceitos envolvendo esta metaheurística e sua adequação ao problema PET.

### ***Formulação Matemática da Metaheurística AIS***

De acordo com a teoria de seleção clonal, qualquer molécula reconhecida pelo sistema imunológico é chamada de antígeno. Quando um organismo é exposto a um antígeno, os linfócitos agem proliferando a quantidade de anticorpos no organismo atacado. Juntamente a esta proliferação, os anticorpos sofrem um processo de maturação, onde são diferenciados através de mutações. Como tais alterações podem conduzir ao surgimento de anticorpos com maior afinidade aos antígenos, o sistema imunológico então os seleciona e os armazena durante certo período.

Posteriormente, se o sistema imunológico é estimulado por antígenos semelhantes, estes anticorpos se proliferam proporcionando uma resposta mais rápida do organismo e tornando o sistema imunológico mais eficiente a cada infecção. Ao contrário dos anticorpos mais adaptados, aqueles de menor afinidade são geralmente eliminados. Contudo, de acordo com a teoria de seleção clonal, os anticorpos de menor afinidade são excluídos e em substituição novos anticorpos são criados.

Para a adequação desta ferramenta ao problema PET, a seqüência  $S^k$ , definida em (2.1), se refere a cada um dos anticorpos do sistema imunológico. Além disso, cada elemento  $s_{t,l}^k$ , referente às opções de reforços, corresponde a uma posição deste anticorpo. Ao contrário de problemas de reconhecimento de padrões, onde cada antígeno representa um padrão a ser reconhecido, na resolução de problemas de otimização, não existe uma representação explícita de antígenos, e sim uma função objetivo que deve ser otimizada. Deste modo, para o problema PET, a afinidade de cada anticorpo corresponde a sua avaliação mediante a função objetivo dada por (2.4). A seguir são apresentados os operadores de reprodução, maturação, seleção e “*receptor editing*” usados por esta ferramenta.

- Reprodução

De acordo com o algoritmo CLONALG, este operador tem como objetivo clonar os anticorpos que possuem maior afinidade em relação ao antígeno selecionado (cópias idênticas). Quanto maior a afinidade de um anticorpo, maior será o número de clones gerados por ele. Contudo, este princípio deve ser usado quando se trata de problemas que possuem uma representação explícita de seus antígenos, por exemplo, em problemas de reconhecimento de padrões. No caso do problema PET, cujo objetivo é identificar não somente a melhor, mas sim um conjunto de melhores seqüências, é interessante que todos os anticorpos sejam selecionados para a reprodução e que o número de clones gerados seja o mesmo para cada anticorpo, independentemente do valor de sua função objetivo. Como resultado, ao aplicar o processo de maturação, pode-se obter uma maior varredura do espaço do problema. Seja  $n_{Ab}$  o número de anticorpos (seqüências) da população e  $n_{clo}$  o número de

clones gerados por cada anticorpo  $S^k$ , ao final desta fase haverá  $G^{n_{Ab}}$  grupos compostos pelo anticorpo original  $S^k$  e suas respectivas cópias  $Cl^{k,u}$ :

$$\begin{aligned} G^k &= \{S^k, Cl^{k,u}\}, \text{ onde } Cl^{k,u} = S^k; \\ \forall k &\in \{1, 2, \dots, n_{Ab}\}; \quad \forall u \in \{1, 2, \dots, n_{clo}\}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

- Maturação

Este operador tem como finalidade aumentar a diversidade da população de clones e permitir que o processo de busca tenha uma melhoria na qualidade dos anticorpos após cada geração. De acordo com o algoritmo CLONALG, proposto em [CZ02], o processo de maturação é representado por um operador de mutação que pode ser aplicado a todos os anticorpos  $Cl^{k,u}$ , sendo o mesmo operador usado na metaheurística ES, representado por (2.24, 2.25 e 2.26).

- Seleção e “Receptor Editing”

Realizado o processo de maturação dos anticorpos, os operadores de seleção e “receptor editing” devem escolher aqueles que irão compor a população da próxima geração. A estratégia adotada pelo algoritmo proposto consiste em, inicialmente, selecionar os melhores anticorpos de cada grupo  $G^k$  (anticorpo original e seus respectivos clones) para criar um novo grupo  $G^*$ . É importante notar que se somente o melhor anticorpo de cada grupo é selecionado, todos os demais serão descartados e informações valiosas podem ser perdidas, como mencionado em [CZ02].

Evitando que haja uma explosão combinatória, todos anticorpos do grupo  $G^*$  são comparados. Este passo é nomeado de “receptor editing” o qual seleciona os melhores anticorpos do grupo  $G^*$  que minimizam a função objetivo (2.4). Além disso, não é permitida a seleção de anticorpos idênticos. Ao final, os melhores e distintos  $n_{ab}$  anticorpos evoluem para a próxima geração mantendo o mesmo tamanho da população inicial. Este processo é o mesmo adotado pela metaheurística ES. Assim, haverá garantia de que a população de anticorpos da próxima geração será de melhor qualidade e diversificada, uma vez que não existirão anticorpos semelhantes.

No algoritmo original CLONALG [CZ02], o operador “*receptor editing*” tem como função substituir anticorpos de menor afinidade por novos anticorpos. O objetivo é escapar de ótimos locais e permitir uma melhor exploração do espaço de busca. O algoritmo proposto neste trabalho alcança o mesmo objetivo ao selecionar anticorpos distintos para a próxima geração. Por este motivo, não há necessidade de que parte da população de anticorpos seja renovada após um determinado número de gerações. Este algoritmo modificado quando aplicado ao problema PET apresentou melhores resultados assim como foi mostrado em [RLH09a].

### **Algoritmo Proposto**

A seguir são apresentados os passos do algoritmo desenvolvido baseado na metaheurística AIS para a resolução do problema PET dinâmico:

- i) Criar uma população composta de  $n_{Ab}$  anticorpos (seqüências) usando o algoritmo de Inicialização Inteligente descrito na Seção 2.3, ou através de um mecanismo de construção aleatória e seguir para o passo (ii);
- ii) Selecionar a seqüência  $k$  da população de anticorpos e ir para o passo (iii);
- iii) Aplicar o operador de reprodução à seqüência selecionada no passo anterior de forma a obter o grupo  $G^k$  composto pela seqüência  $S^k$  e  $n_{clo}$  cópias idênticas desta seqüência  $C^{k,u} = S^k$  para  $u=1,2,\dots,n_{clo}$ , conforme descrito em (2.34). Seguir para o passo (iv);
- iv) Selecionar a seqüência  $C^{k,u}$  do grupo  $G^k$ , definido no passo anterior, e seguir para o passo (v);
- v) Selecionar o estágio  $t$  do horizonte de planejamento seguindo uma ordem descendente, iniciando do último estágio em direção ao ano base. Ir para o passo (vi);
- vi) Aplicar o processo de maturação (operador de mutação) para o estágio  $t$  do horizonte de planejamento, conforme as Equações (2.24, 2.25 e 2.26), respeitando as restrições impostas por (2.3). Executar um fluxo de potência ótimo DC com perdas de acordo com (2.5). Se o vetor solução é factível, ir para o passo (vii). Caso contrário, repetir este passo até que seja encontrado um vetor solução factível ou um número máximo de tentativas

$(n_{ten})$  seja alcançado. Nesta última hipótese, a seguinte atribuição deve ser feita: se  $t = y$ , então  $Cl_t^{k,u} = S_t^k$ , se  $t < y$ , então  $Cl_t^{k,u} = C_{t+1}^{k,u}$ ;

- vii) Se todos os estágios do horizonte de planejamento já foram analisados, armazenar o clone mutado e seguir para o passo (viii). Caso contrário, voltar ao passo (v);
- viii) Se todos os clones  $Cl_t^{k,u}$  do grupo  $G^k$  já foram mutados, seguir para o passo (ix). Caso contrário, voltar ao passo (iv);
- ix) Se todas as seqüências já foram selecionadas seguir para o passo (x). Senão, voltar ao passo (ii);
- x) Selecionar as  $n_b$  melhores seqüências de cada grupo  $G^k$  (seqüência original e respectivos clones) que minimizem a função objetivo definida em (2.4) de forma a obter o grupo  $G^*$ . Ir para o passo (xi);
- xi) Deste conjunto resultante, selecionar as  $n_{Ab}$  melhores seqüências distintas para a próxima geração através do operador “receptor editing”, também de acordo com (2.4). Ir para o passo (xii);
- xii) Se o número máximo de gerações ( $n_{ger}^{max}$ ) não for atingido, uma nova geração é iniciada, voltar ao passo (ii). Senão, o processo de busca é encerrado e as melhores seqüências analisadas são selecionadas.

Como no algoritmo proposto para a metaheurística ES, deve-se ter uma maior atenção ao passo (vi) na aplicação do operador de mutação. Neste passo, uma amplitude  $\sigma_1$  é aplicada a todos os ramos do último estágio do horizonte de planejamento, enquanto para os demais estágios, usa-se uma amplitude  $\sigma_2$ . Nestes estágios, o operador de mutação é aplicado somente aos ramos que possuem reforços no estágio imediatamente superior ao analisado. Os demais ramos neste estágio não podem receber reforços, de forma a manter a coordenação do plano de expansão.

Conforme já comentado no algoritmo proposto para a metaheurística ES, uma amplitude menor de mutação é usada no último estágio do horizonte de planejamento por existir uma maior probabilidade de alterações no número de

reforços neste estágio. Caso contrário, seqüências com grande quantidade de reforços poderiam ser formadas e, portanto, de pior qualidade. Nos demais estágios, uma amplitude maior de mutação é usada, já que a operação de mutação é aplicada a somente alguns ramos. Quanto menor a amplitude  $\sigma_2$ , maiores são as chances de não haver alteração no número de reforços em qualquer ramo do sistema, diminuindo, assim, a diversidade da população.

Por fim, este algoritmo também considera somente a formação de seqüências factíveis durante o processo de otimização. Assim, não há necessidade de se usar um fator de penalidade para eliminar seqüências não-factíveis.

## 2.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo, inicialmente foi dada ênfase a toda formulação matemática do problema PET com abordagem dinâmica, com a representação do problema pela matriz solução, a função objetivo considerada para a avaliação dos planos candidatos e o modelo de fluxo de potência DC que inclui o cálculo de perdas ôhmicas do sistema.

Em seqüência, uma técnica para a construção de planos de expansão iniciais também foi apresentada, nomeada de Inicialização Inteligente, cujo objetivo é melhorar a busca das metaheurísticas e contribuir para uma melhor qualidade do resultado final. Posteriormente, um maior destaque foi dado às ferramentas de otimização, baseadas em metaheurísticas, que têm sido utilizadas pela comunidade científica nos últimos anos. Uma descrição detalhada das ferramentas selecionadas neste trabalho foi apresentada (TS, PSO, ACO, ES, DE, AIS), incluindo tanto suas características bem como os algoritmos propostos para a resolução do problema PET.

O próximo capítulo, portanto, terá como objetivo demonstrar a eficiência e o desempenho das ferramentas selecionadas e então realizar um estudo comparativo na resolução do problema de expansão de dois sistemas de transmissão. Ademais, o benefício de se usar o mecanismo de Inicialização Inteligente também poderá ser comprovado.

## **CAPÍTULO 3**

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS METAHEURÍSTICAS**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

Nas próximas seções serão apresentadas as aplicações das metaheurísticas descritas no capítulo anterior para a resolução do problema PET considerando uma abordagem determinística e dinâmica. Nesta abordagem, a finalidade é suprir a demanda prevista, ao longo do horizonte de planejamento, e ao mesmo tempo minimizar os custos envolvidos na função objetivo. O desempenho das metaheurísticas é avaliado através de estudos comparativos observando um índice que mede a qualidade das seqüências encontradas e a porcentagem de vezes que a melhor seqüência conhecida para cada um dos sistemas estudados é capturada. Ademais, o esforço computacional exigido por cada ferramenta de otimização também é analisado. Entretanto, antes mesmo de apresentar este estudo de desempenho, uma seção será destinada a mensurar o benefício de se usar mecanismos de construção de seqüências iniciais de melhor qualidade, Inicialização Inteligente, ou que auxilie as buscas, no caso do ACO, como contribuição para uma melhoria do desempenho das metaheurísticas. Por fim, os melhores planos de expansão encontrados para o Sistema 6-Barras e o Sistema CEMIG serão apresentados.

### **3.2 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA ESTUDADOS**

#### **3.2.1 Sistema 6-Barras**

O Sistema 6-Barras possui 6 barras, 3 de geração e 3 de carga, e 11 circuitos duplos. A Figura 3.1 ilustra o diagrama unifilar do sistema. A capacidade instalada e a demanda máxima definida para o ano base são 260,0 MW e 210,0 MW, respectivamente. A potência base deste sistema é de 100,0 MVA.

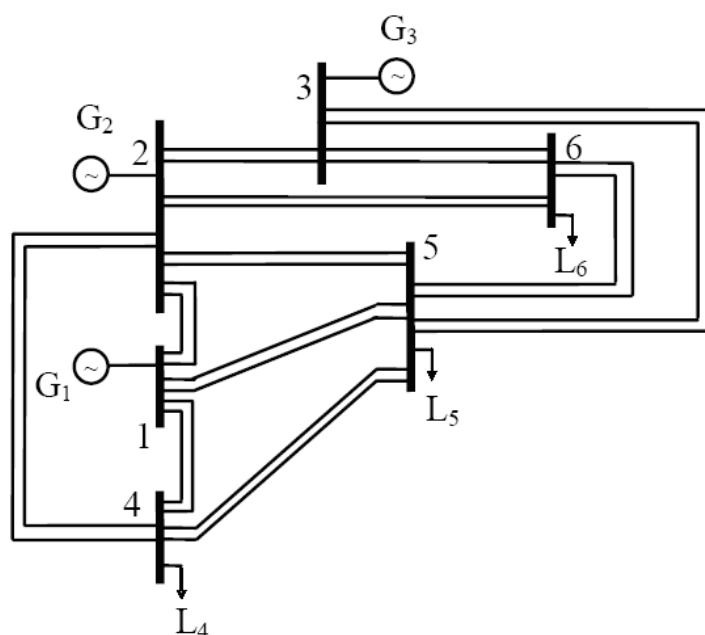


Figura 3-1: Sistema 6-Barras.

Os dados determinísticos para as barras e os circuitos são mostrados nas Tabelas 3.1 a 3.3. Na Tabela 3.1, são definidas as quantidades de unidades geradoras em cada barra, suas capacidades máximas para o ano base e seus respectivos custos de operação. Na Tabela 3.2, são apresentadas as cargas conectadas ao sistema no ano de referência e os seus custos de interrupção de energia. Caso deseja-se priorizar o corte de carga em uma determinada barra, diferentes custos de interrupção podem ser utilizados. Na Tabela 3.3, são mostrados os dados de circuitos com os seus respectivos valores de resistência, reatância, capacidade máxima de transmissão, custo de investimento e número máximo de reforços permitidos. Portanto, não é permitida a criação de novos ramos no planejamento de expansão deste sistema. Conforme mostrado na Figura 3.1, o sistema existente possui dois circuitos em cada ramo.

Tabela 3-1: Dados das Unidades Geradoras – Sistema 6-Barras.

Barras	Nº de Unidades	Capacidade Máxima por Unidade (MW)	Custo de Operação (R\$/MWh)
1	4	30,0	25,00
2	4	17,5	15,00
3	4	17,5	35,00



Tabela 3-2: Dados de Carga – Sistema 6-Barras.

Barras	Potência (MW)	Custo de Interrupção de Energia (R\$/MWh)
4	70,0	1500,00
5	70,0	1500,00
6	70,0	1500,00

Tabela 3-3: Dados de Circuitos – Sistema 6-Barras.

Barra $i$	Barra $j$	Ramo $l$	$r_{ij}$ (pu)	$x_{ij}$ (pu)	Cap. Max. (MW)	$C_{inv_l}$ ( $10^6$ R\$)	$N_l^{max}$
1	2	1	0,100	0,40	25,0	25,00	3
1	4	2	0,100	0,40	25,0	25,00	3
1	5	3	0,150	0,60	20,0	20,00	3
2	3	4	0,125	0,50	20,0	20,00	3
2	4	5	0,050	0,20	40,0	40,00	3
2	5	6	0,150	0,60	20,0	20,00	3
2	6	7	0,100	0,40	25,0	25,00	3
3	5	8	0,130	0,52	20,0	20,00	3
3	6	9	0,050	0,20	40,0	40,00	3
4	5	10	0,200	0,80	15,0	15,00	3
5	6	11	0,150	0,60	20,0	20,00	3

Observa-se que o custo de investimento utilizado é proporcional à capacidade máxima de cada circuito simples ( $10^6$  R\$/MW). No entanto, num sistema real, tal custo deve ser associado ao comprimento do circuito (R\$/km). Esta consideração será utilizada no estudo do Sistema CEMIG.

O plano de expansão a ser encontrado para este sistema deverá atender a um horizonte de estudo de 8 anos, onde cada ano corresponde a um estágio de planejamento. Durante este horizonte, a capacidade de geração e a carga aumentam 25% em relação ao ano de referência (65,0 MW e 52,5 MW, respectivamente) por ano. Portanto, a capacidade de geração e a carga serão de 780 MW e 630 MW, respectivamente, no final do período de análise, i.e. no 8º ano. Uma taxa de desconto de 10% foi considerada para o cálculo em valor

presente dos custos. Em relação ao cálculo do custo das perdas, foi adotada uma tarifa de compra de energia de 0,10 R\$/kWh e um fator de perdas de 0,6144, o qual corresponde ao fator de carga da curva horária do Sistema IEEE-RTS (*IEEE Reliability Test System*) [APM79]. As previsões da capacidade de geração e da carga estão apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 3-4: Previsão da Capacidade de Geração e da Carga do Sistema Teste.

Geração/Carga Prevista (MW)										
Barra		Ano								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Geração	120,0	150,0	180,0	210,0	240,0	270,0	300,0	330,0	360,0
2	Geração	70,0	87,5	105,0	122,5	140,0	157,5	175,0	192,5	210,0
3	Geração	70,0	87,5	105,0	122,5	140,0	157,5	175,0	192,5	210,0
4	Carga	70,0	87,5	105,0	122,5	140,0	157,5	175,0	192,5	210,0
5	Carga	70,0	87,5	105,0	122,5	140,0	157,5	175,0	192,5	210,0
6	Carga	70,0	87,5	105,0	122,5	140,0	157,5	175,0	192,5	210,0
Total	Geração	260,0	325,0	390,0	455,0	520,0	585,0	650,0	715,0	780,0
	Carga	210,0	262,5	315,0	367,5	420,0	472,5	525,0	577,5	630,0

### 3.2.2 Sistema CEMIG

Um sistema de sub-transmissão da CEMIG é utilizado como um segundo exemplo para análise de desempenho das metaheurísticas. Este sistema é composto por 12 barras, incluindo 6 barras de carga, 1 interconexão (fonte de geração) e 1 barra de geração. O pico de carga deste sistema é de 780,05 MW e a capacidade máxima de geração local é de 226,76 MW. O restante da carga é suprido pela barra de interconexão, a qual possui capacidade ilimitada. Para o despacho da geração, foram considerados custos de operação de 25,00 R\$/MWh e 40,00 R\$/MWh para a geração local e a interconexão, respectivamente. Existem 20 circuitos (transformadores e linhas de transmissão) operando nas tensões de 138 kV e 345 kV. A potência base é igual a 100,00 MVA. A Figura 3.2 apresenta o diagrama unifilar deste sistema.

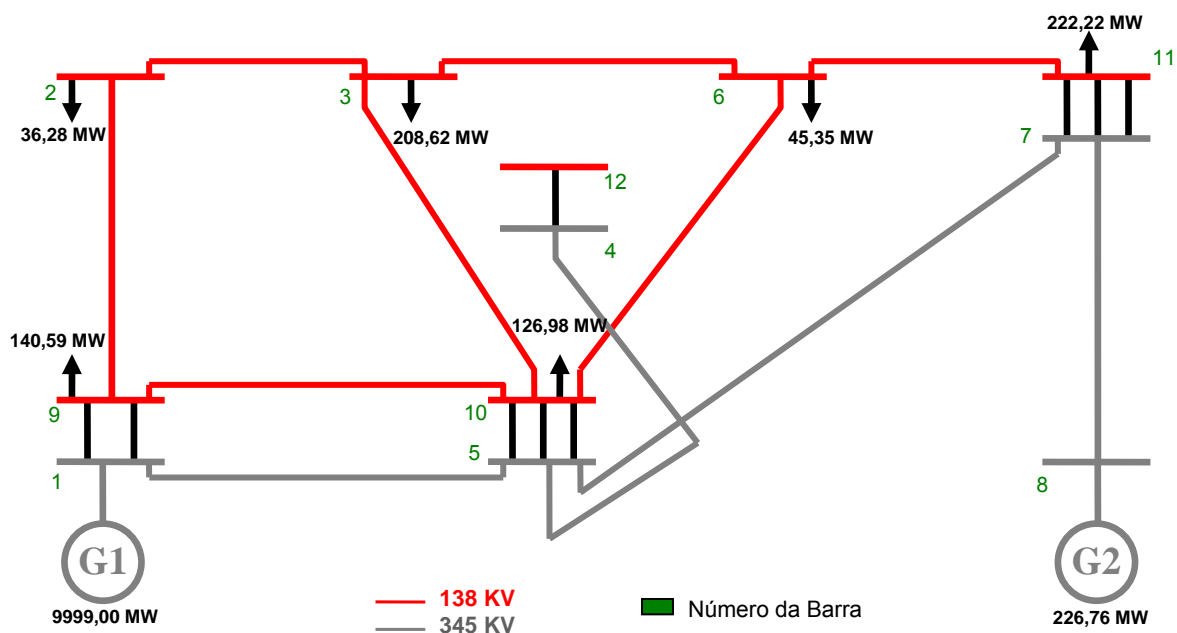


Figura 3-2: Sistema CEMIG.

Nas Tabelas 3.5 e 3.6 são apresentados os dados determinísticos das barras e dos circuitos existentes necessários ao estudo de planejamento deste sistema de sub-transmissão. Na Tabela 3.5 são mostrados os níveis de tensão das barras, suas respectivas coordenadas cartesianas, as capacidades máximas de geração para o ano base e as cargas pico instaladas.

Tabela 3-5: Dados das Barras – Sistema CEMIG.

Barras	Tensão (KV)	Coordenadas (Km)		Geração (MW)	Carga (MW)
		x	y		
1	345	0	0	9999,00	-
2	138	0	118	-	36,28
3	138	18	118	-	208,62
4	345	18	101	-	-
5	345	56	100	-	-
6	138	189	118	-	45,35
7	345	200	118	-	-
8	345	200	-42	226,76	-
9	138	0	0	-	140,59
10	138	56	100	-	126,98
11	138	200	118	-	222,22
12	138	18	101	-	-

Na Tabela 3.6 são apresentados os valores de resistência e reatância, as capacidades máximas de transmissão de cada circuito, bem como o tipo (LT – Linha de Transmissão; TR - Transformador) e a quantidade de circuitos existentes em cada interligação.

Tabela 3-6: Dados dos Circuitos Existentes – Sistema CEMIG.

Barra $i$	Barra $j$	Tipo de Circuito	$r_{ij}$ (pu)	$x_{ij}$ (pu)	Cap. Max. (MW)	Circuitos Existentes
1	5	LT	0,0031	0,0318	800,00	1
1	9	TR	0	0,0771	225,00	2
2	3	LT	0,0170	0,0439	125,00	1
2	9	LT	0,1233	0,3191	125,00	1
3	6	LT	0,1476	0,3963	125,00	1
3	10	LT	0,0578	0,0983	73,00	1
4	5	LT	0,0011	0,0111	800,00	1
4	12	TR	0	0,0436	225,00	1
5	7	LT	0,0047	0,0484	800,00	1
5	10	TR	0	0,0500	225,00	3
6	10	LT	0,0269	0,4216	125,00	1
6	11	LT	0,0095	0,0281	125,00	1
7	8	LT	0,0047	0,0502	800,00	1
7	11	TR	0	0,0500	225,00	3
9	10	LT	0,0863	0,2374	125,00	1

Neste sistema, todas as possíveis interligações em 138 kV são consideradas para a alocação de reforços. Além disso, é permitido que a capacidade de transformação entre as barras 4 e 12 seja aumentada (acréscimo de até 2 circuitos). Como resultado, 22 ramos (existentes e novos) podem ser considerados para a adição de reforços ao sistema original, sendo aceito apenas um total de 3 circuitos por ramo. Portanto, se um determinado ramo já possui 2 circuitos em paralelo, ele poderá receber somente um novo circuito.

A Tabela 3.7 apresenta os dados dos circuitos candidatos a reforços para o Sistema CEMIG. Nesta tabela, além do número máximo de adições para cada interligação, são apresentados os valores de resistência e reatância para os

novos circuitos, os quais foram obtidos a partir de um valor médio por quilômetro definido pelos circuitos já existentes ( $R_M = 7,6929 \times 10^{-4}$  pu/km e  $X_M = 0,0025$  pu/km). Todos os circuitos candidatos, relacionados a novas interligações de 138 kV, tiveram sua capacidade definida em 125,00 MW. Para os demais circuitos candidatos foram utilizadas as capacidades dos correspondentes circuitos existentes, de acordo com a Tabela 3.6. Para este sistema, considerou-se o valor de  $0,15 \times 10^6$  R\$/km para o custo de investimento.

Tabela 3-7: Dados dos Circuitos Candidatos a Reforços – Sistema CEMIG.

Barra i	Barra j	Ramo l	$r_{ij}$ (pu)	$x_{ij}$ (pu)	Cap. Max. (MW)	$C_{inv_l}$ ( $10^6$ R\$)	$N_l^{max}$
2	3	1	0,0170	0,0439	125,00	2,70	2
2	6	2	0,1454	0,4795	125,00	28,35	3
2	9	3	0,1233	0,3191	125,00	17,70	2
2	10	4	0,0453	0,1492	125,00	8,82	3
2	11	5	0,1539	0,5074	125,00	30,00	3
2	12	6	0,0190	0,0628	125,00	3,71	3
3	6	7	0,1476	0,3963	125,00	25,65	2
3	9	8	0,0918	0,3028	125,00	17,91	3
3	10	9	0,0578	0,0983	73,00	6,31	2
3	11	10	0,1400	0,4617	125,00	27,30	3
3	12	11	0,0131	0,0431	125,00	2,55	3
6	9	12	0,1714	0,5653	125,00	33,42	3
6	10	13	0,0269	0,4216	125,00	20,13	2
6	11	14	0,0095	0,0281	125,00	1,65	2
6	12	15	0,1322	0,4360	125,00	25,78	3
9	10	16	0,0863	0,2374	125,00	17,19	2
9	11	17	0,1786	0,5891	125,00	34,83	3
9	12	18	0,0789	0,2603	125,00	15,39	3
10	11	19	0,1116	0,3682	125,00	21,77	3
10	12	20	0,0292	0,0964	125,00	5,70	3
11	12	21	0,1406	0,4637	125,00	27,42	3
4	12	22	0	0,0436	225,00	11,25	2

Para este sistema, foi adotado um horizonte de planejamento de 10 anos, dividido em 6 estágios. Mesmo para este pequeno sistema de sub-transmissão, um total de  $3,29 \times 10^{38}$  seqüências cronológicas são, em princípio, elegíveis para

este problema PET. Neste período, a capacidade de geração e a carga do sistema crescem a uma taxa média de 5% ao ano. Uma taxa de desconto de 10% foi considerada para o cálculo em valor presente dos custos. Para o cálculo do custo de perdas, os valores para a tarifa de compra de energia e o fator de perdas correspondem, respectivamente, a 0,10 R\$/kWh e 0,5. As previsões da capacidade de geração e da carga estão apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 3-8: Previsão da Capacidade de Geração e da Carga do Sistema CEMIG.

Geração/Carga Prevista (MW)							
Barra		Ano					
		0	2	4	6	8	10
1	Geração*	9999,00	9999,00	9999,00	9999,00	9999,00	9999,00
2	Carga	36,28	40,00	44,10	48,62	53,60	59,10
3	Carga	208,62	230,00	253,58	279,57	308,22	339,81
6	Carga	45,35	50,00	55,13	60,78	67,00	73,87
8	Geração	226,76	250,00	275,63	303,88	335,02	369,36
9	Carga	140,59	155,00	170,89	188,40	207,71	229,01
10	Carga	126,98	140,00	154,35	170,17	187,61	206,84
11	Carga	222,22	245,00	270,11	297,80	328,32	361,98
Total	Geração	<b>10225,76</b>	<b>10249,00</b>	<b>10274,63</b>	<b>10302,88</b>	<b>10334,02</b>	<b>10368,36</b>
	Carga	<b>780,05</b>	<b>860,0</b>	<b>948,15</b>	<b>1045,34</b>	<b>1152,48</b>	<b>1270,61</b>

\* Deve ser lembrado que esta geração é representada por uma interconexão, cuja capacidade foi atribuída como ilimitada, sendo definido um valor de 9999,00 MW. Ademais, o despacho da geração prioriza a geração local, já que ela possui um menor custo de operação (25,00 R\$/MWh) do que a interconexão (40,00 R\$/MWh).

### 3.3 RESULTADOS

#### 3.3.1 Definição de Parâmetros das Metaheurísticas

Nesta seção serão apresentados os valores dos parâmetros das metaheurísticas selecionadas para a resolução do problema PET. Cabe ressaltar que a escolha dos parâmetros foi baseada em testes empíricos e que grande parte destes parâmetros são iguais para ambos os sistemas estudados,

o que demonstra robustez dos algoritmos desenvolvidos. Os parâmetros que por ventura forem diferentes terão seus valores adequadamente apresentados.

Com o objetivo de analisar o desempenho destas metaheurísticas, serão realizados estudos considerando várias dimensões de população (PSO, ACO, ES, DE e AIS) e diferentes valores para o número máximo de diversificações (TS), os quais serão definidos durante a análise de resultados.

### **3.3.1.1 Parâmetros TS**

De acordo com o algoritmo proposto na Seção 2.4.1, os seguintes parâmetros foram adotados utilizando a metaheurística TS: número máximo de intensificações,  $int_{max} = 50$ ; número de intensificações consecutivas sem melhora da melhor seqüência conhecida,  $int_{cons} = 20$ ; e comprimento da lista tabu,  $D_{list} = 5$ .

### **3.3.1.2 Parâmetros PSO**

Os seguintes parâmetros foram selecionados para a aplicação do algoritmo mostrado na Seção 2.4.2.1 utilizando a metaheurística PSO: valor mínimo e máximo permitidos para os elementos da matriz velocidade,  $v_{min} = -2$  e  $v_{max} = 2$ ; parâmetros relacionados às parcelas de memória da partícula e de cooperação entre as partículas,  $c_1$  e  $c_2 = 2$ ; amplitude de perturbação aplicada a uma das melhores posições já visitadas por todas as partículas,  $\sigma = 0,6$ ;  $P^g$  é escolhido entre o grupo das cinco melhores posições já visitadas por todas as partículas; número máximo de tentativas para se encontrar um vetor solução factível no estágio  $t$ ,  $n_{ten} = 20$ ; e número máximo de iterações do algoritmo,  $n_{iter}^{max} = 50$ .

### **3.3.1.3 Parâmetros ACO**

Em relação à metaheurística ACO, os seguintes parâmetros foram usados para o algoritmo proposto na Seção 2.4.2.2:  $q_0 = 0,2$ ;  $\beta = 0,7$ ;  $\varphi = 0,05$ ;  $\tau_0 = 1$ ;  $\rho = 0,55$ ,  $K_{pher} = 4V$ , onde  $V$  refere-se ao custo de investimento em valor presente encontrado por qualquer seqüência da primeira expedição e 4 é um fator multiplicativo; a busca local é aplicada às cinco melhores seqüências encontradas por cada expedição; e foi escolhido  $n_{exp}^{max} = 100$  e  $n_{iter}^{max} = 300$ .

como o número máximo de expedições para o sistema 6-barras e sistema CEMIG, respectivamente.

#### **3.3.1.4 Parâmetros ES**

Os seguintes valores foram atribuídos aos parâmetros da metaheurística ES de acordo com o algoritmo proposto na Seção 2.4.3.1: amplitude de mutação aplicada aos ramos do último estágio do horizonte de planejamento,  $\sigma_1 = 0,3$ ; amplitude de mutação dos demais estágios,  $\sigma_2 = 0,6$ ; número máximo de tentativas para se encontrar um vetor solução factível no estágio  $t$ ,  $n_{ten} = 200$ ; e número máximo de gerações,  $n_{ger}^{max} = 100$ .

#### **3.3.1.5 Parâmetros DE**

Quanto à metaheurística DE, os parâmetros a seguir foram usados pelo algoritmo proposto na Seção 2.4.3.2: fator de mutação,  $F = 0,8$ ; taxa de cruzamento,  $CR=0,9$ ; número máximo de tentativas para se encontrar um vetor solução factível no estágio  $t$ ,  $n_{ten} = 20$ ; e número máximo de gerações,  $n_{ger}^{max} = 100$ .

#### **3.3.1.6 Parâmetros AIS**

Mediante o algoritmo proposto na Seção 2.4.3.3, utilizando a metaheurística AIS, os seguintes valores foram atribuídos aos seus parâmetros: número de clones gerados por cada anticorpo,  $n_{clo} = 5$ ; número de melhores seqüências selecionadas de cada grupo  $G^k$ ,  $n_b = 2$ ; amplitude de mutação aplicada aos ramos do último estágio do horizonte de planejamento,  $\sigma_1 = 0,3$ ; amplitude de mutação dos demais estágios,  $\sigma_2 = 0,6$ ; número máximo de tentativas para se encontrar um vetor solução factível no estágio  $t$ ,  $n_{ten} = 200$ ; e número máximo de gerações,  $n_{ger}^{max} = 100$ .

### **3.3.2 Mecanismos de Construção da População Inicial**

Conforme já comentado na Seção 2.3, alguns trabalhos relatam a importância de se usar um mecanismo para a construção de seqüências iniciais de melhor qualidade, o qual contribui para um melhor desempenho das metaheurísticas



quanto à qualidade das seqüências encontradas e um menor esforço computacional. Uma vez que grande parte das referências apresentadas define sua população inicial de forma aleatória, Inicialização Aleatória, esta seção tem por objetivo comprovar o benefício de se utilizar uma Inicialização Inteligente, principalmente por se tratar do problema PET com abordagem dinâmica, cujo nível combinatório é bastante elevado.

Novamente, vale ressaltar que apesar da metaheurística TS não utilizar uma população, a Inicialização Inteligente é de grande utilidade no início de cada etapa de intensificação de suas buscas. Quanto à metaheurística ACO, apesar de ser uma técnica baseada em populações, a mesma possui uma característica de algoritmos construtivos. Desde modo, a Inicialização Inteligente não é usada para se definir uma população inicial. No entanto, a mesma função heurística, Equação (2.7), é utilizada para auxiliar o processo de construção das seqüências do ACO.

A seguir é apresentado um estudo comparativo do desempenho destas ferramentas ao utilizar este mecanismo de Inicialização Inteligente e um mecanismo de Inicialização Aleatória para a definição da população inicial. Os resultados apresentados correspondem à simulação de 10 casos cujas sementes iniciais<sup>2</sup> foram escolhidas aleatoriamente. A comparação é realizada mediante dois critérios: primeiro, através de um índice que mede a qualidade das melhores seqüências encontradas por cada metaheurística  $IQ(\%)$ ; segundo, a partir da identificação da porcentagem de casos simulados em que a melhor seqüência conhecida de cada sistema é capturada  $IS^{Best}(\%)$ . O índice de qualidade,  $IQ(\%)$ , dado em porcentagem, é calculado conforme mostrado a seguir:

$$IQ(\%) = \frac{1}{n_{best}} \sum_{b=1}^{n_{best}} \frac{f(S^b) - f(S^{best})}{f(S^{best})} \times 100 \quad (3.1)$$

---

<sup>2</sup> Sementes iniciais se referem a um valor numérico escolhido para a geração de uma seqüência de números pseudo-aleatórios seguindo uma determinada distribuição de probabilidades. De acordo com cada uma das metaheurísticas propostas, há a necessidade de se definir sementes iniciais para uma distribuição uniforme e/ou normal.

onde  $n_{best}$  corresponde ao número de melhores seqüências selecionadas ao final da busca das metaheurísticas;  $f()$  é a função dada pela Equação (2.4) que minimiza os custos envolvidos em valor presente;  $S^{best}$  se refere à melhor seqüência encontrada (menor custo) pelas metaheurísticas; e  $S^b$  indica uma das melhores seqüências selecionadas ao final do processo de otimização.

Nos resultados mostrados na figuras a seguir, o índice  $IQ(\%)$  corresponde a uma média dos índices encontrados para os casos simulados. Observa-se pela Equação (3.1) que quanto menor o valor deste índice, melhor o conjunto de seqüências encontradas pela metaheurística considerada, isto é, as melhores seqüências terão custos mais próximos da melhor seqüência conhecida.

Para o estudo comparativo entre a Inicialização Inteligente e a Inicialização Aleatória, foram escolhidas duas dimensões para a população das metaheurísticas, definidas por Pop 1 e Pop 2. Como se pode notar nas Tabelas 3.9 e 3.10, estas dimensões são coincidentes ao utilizar ambos os mecanismos de construção da população inicial, menos para a análise usando a metaheurística DE. Estas dimensões foram escolhidas de forma a se obter um tempo computacional semelhante neste estudo comparativo, não privilegiando a busca envolvendo qualquer mecanismo de construção. Os demais parâmetros das metaheurísticas foram mantidos de acordo com os valores apresentados na seção anterior. As dimensões da população para o Sistema 6-Barras e o Sistema CEMIG são mostradas nas Tabelas 3.9 e 3.10, respectivamente.

Tabela 3-9: Dimensões da população – Sistema 6-Barras.

Metaheurísticas	Inicialização Inteligente		Inicialização Aleatória	
	Pop 1	Pop 2	Pop 1	Pop 2
ES	50	75	50	75
AIS	10	15	10	15
DE	100	200	50	100
PSO	50	100	50	100

Tabela 3-10: Dimensões da população – Sistema CEMIG.

Metaheurísticas	Inicialização Inteligente		Inicialização Aleatória	
	Pop 1	Pop 2	Pop 1	Pop 2
ES	50	75	50	75
AIS	10	15	10	15
DE	300	400	60	80
PSO	100	150	100	150

As dimensões da população da metaheurística DE não são as mesmas ao utilizar os dois mecanismos de construção pelo fato desta técnica possuir, em geral, uma convergência prematura para ótimos locais, principalmente quando é definida uma pequena dimensão para a sua população. Isto acontece devido ao método de seleção utilizado, o qual sempre seleciona as melhores seqüências para a próxima geração não eliminando as seqüências semelhantes, conforme foi explicado na Seção 2.4.3.2. Este método de seleção contribui para que se tenha rapidamente uma população constituída de indivíduos idênticos.

Se uma Inicialização Inteligente é utilizada, esta convergência é ainda mais acentuada, uma vez que as seqüências iniciais possuem uma menor quantidade de reforços do que aquelas que seriam obtidas por uma Inicialização Aleatória. Assim, para contornar este problema de rápida convergência, é atribuída uma dimensão maior para a população quando se utiliza o mecanismo de Inicialização Inteligente.

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram a comparação de desempenho das metaheurísticas ES, AIS, DE e PSO ao utilizar a Inicialização Inteligente e a Inicialização Aleatória para o Sistema 6-Barras e CEMIG, respectivamente. Nestas figuras, o índice de qualidade médio encontrado após a simulação de 10 casos é utilizado para esta comparação.

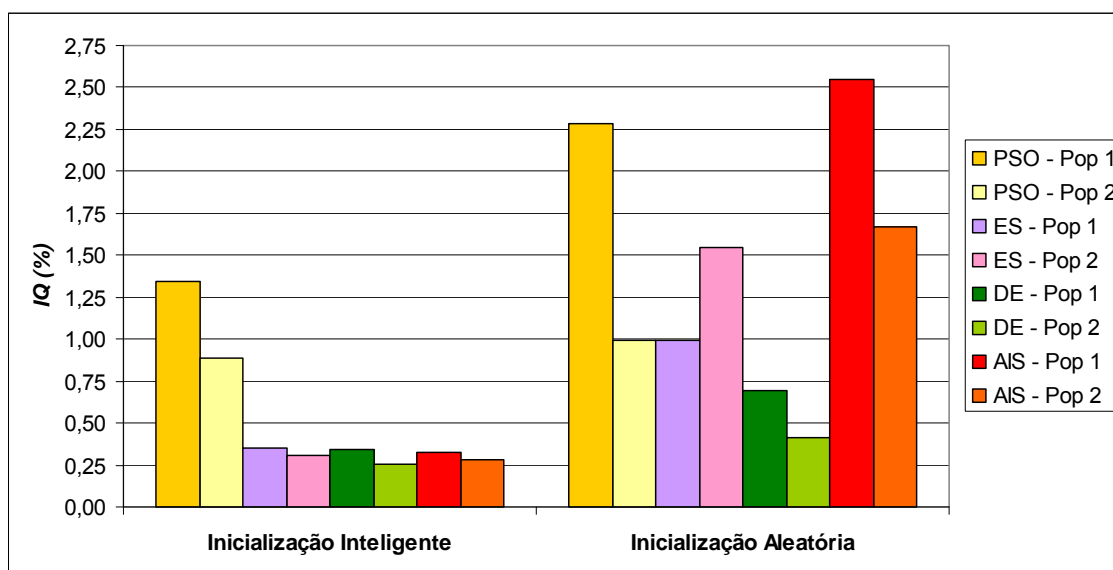


Figura 3-3: Inicialização Inteligente x Inicialização Aleatória – IQ (%) - Sistema 6-Barras.

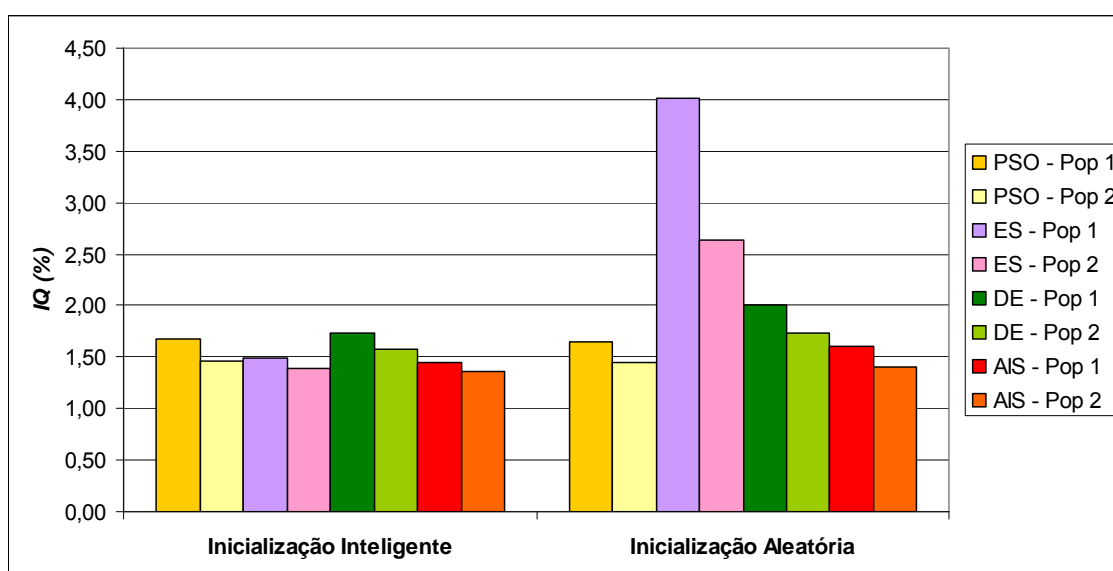


Figura 3-4: Inicialização Inteligente x Inicialização Aleatória – IQ (%) - Sistema CEMIG.

Para o Sistema 6-Barras, observa-se que há uma nítida melhora no índice  $IQ(\%)$  quando se utiliza o mecanismo de Inicialização Inteligente. Já para o Sistema CEMIG, o índice  $IQ(\%)$  é melhorado em maior intensidade somente para a metaheurística ES. No entanto, também se observa uma relativa melhora para as demais técnicas consideradas. As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam a comparação destas metaheurísticas em relação à porcentagem dos casos em que a melhor seqüência conhecida foi capturada  $IS^{best}(\%)$ , considerando o Sistema 6-Barras e o Sistema CEMIG, respectivamente.

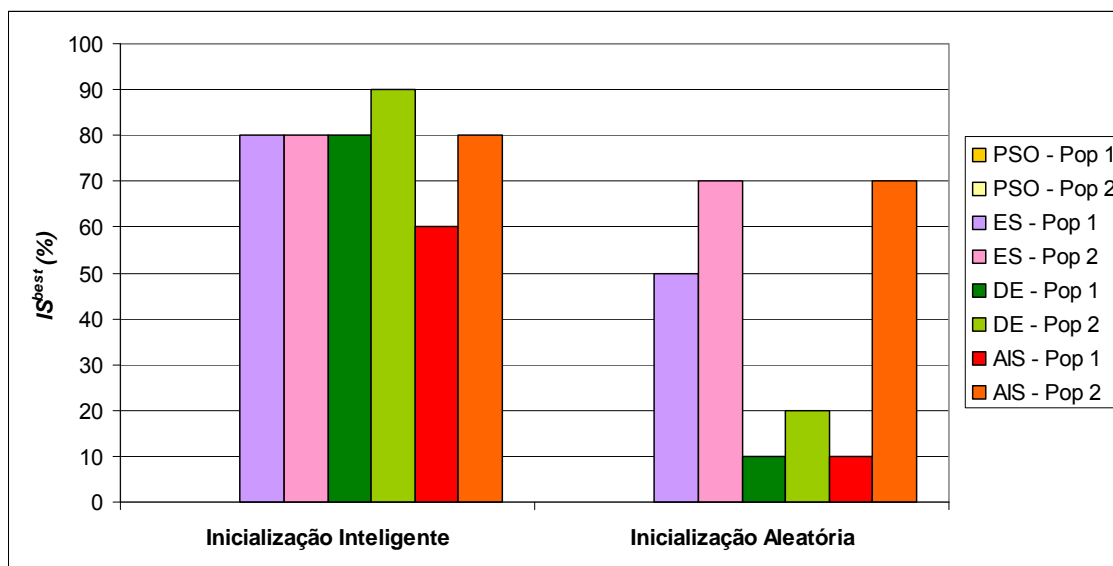


Figura 3-5: Inicialização Inteligente x Inicialização Aleatória –  $IS^{best}$  (%) - Sistema 6-Barras.

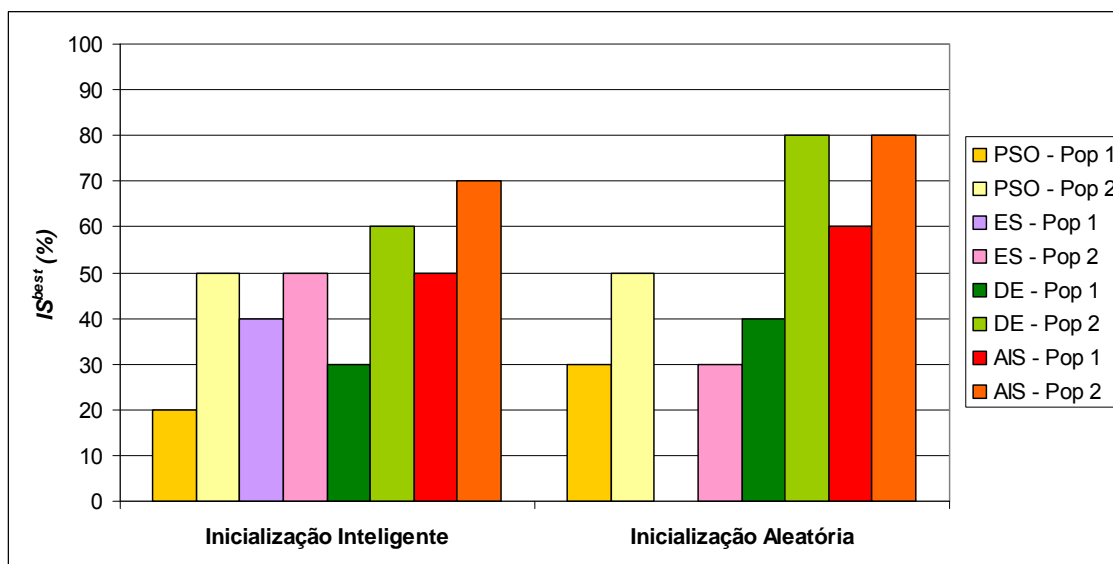


Figura 3-6: Inicialização Inteligente x Inicialização Aleatória –  $IS^{best}$  (%) - Sistema CEMIG.

Por este critério, observa-se, para o Sistema 6-Barras, que há uma maior probabilidade da melhor seqüência conhecida ser capturada quando o mecanismo de Inicialização Inteligente é utilizado. Cabe ressaltar ainda que, a melhor seqüência conhecida para este sistema não foi encontrada em nenhum dos casos simulados utilizando a metaheurística PSO. Este fato demonstra um desempenho inferior desta técnica em relação às demais, mesmo quando a Inicialização inteligente é usada, o que será comprovado na próxima seção. Já em relação ao Sistema CEMIG, a Inicialização

Inteligente proporcionou uma melhora significativa no resultado somente para a metaheurística ES. Contudo, observa-se que as chances de se capturar a melhor seqüência são praticamente as mesmas usando a Inicialização Inteligente ou a Inicialização Aleatória para as demais metaheurísticas.

Estudos semelhantes foram realizados para as metaheurísticas TS e ACO. Os resultados não foram apresentados nas figuras anteriores devido ao TS ter tido um desempenho muito inferior quando a Inicialização Aleatória foi considerada e o ACO possuir uma característica diferente, não baseada em construção de populações iniciais. A Tabela 3.11 apresenta estes resultados.

Tabela 3-11: Índices  $IQ$  (%) e  $IS^{best}$  (%) para as Metaheurísticas TS e ACO.

Índices	TS				ACO			
	$IQ$ (%)		$IS^{best}$ (%)		$IQ$ (%)		$IS^{best}$ (%)	
Sistemas	Inic. Intel.	Inic. Aleat.	Inic. Intel.	Inic. Aleat.	F1	F2	F1	F2
Sistema 6-Barras	0,61	52,24	80	0	0,30	0,42	100	70
Sistema CEMIG	1,43	529,98	70	0	2,15	1,51	100	100

Nota-se pelos índices que a metaheurística TS tem um péssimo desempenho quando se utiliza a Inicialização Aleatória, uma vez que muitos reforços são inseridos na seqüência inicial, e assim o número máximo de intensificações não é suficiente para eliminar a grande quantidade de reforços excedentes. Este resultado seria melhorado se o número máximo de intensificações fosse aumentado drasticamente, contudo o desempenho computacional seria comprometido. O número de diversificações foi escolhido de forma a se ter um esforço computacional semelhante em ambos os mecanismos de inicialização, enquanto os demais parâmetros foram mantidos conforme a Seção 3.3.1.1.

Quanto à metaheurística ACO, um breve comentário deve ser feito antes de se analisar os resultados, já que a mesma não utiliza um mecanismo de construção

de populações iniciais, e sim, uma função heurística que é utilizada para auxiliar na orientação de suas buscas. A correta definição desta função heurística é essencial para um melhor desempenho do ACO. A comparação de resultados mostrado na Tabela 3.11 envolve a seleção de duas funções heurísticas, F1 e F2. A função F1 corresponde à Equação (2.7), a mesma usada no mecanismo de Inicialização Inteligente, enquanto a função F2 considera somente a parcela de custos desta equação, fazendo-se o numerador igual a 1.

Para o Sistema 6-Barras, embora os valores dos índices não tenham sido tão discrepantes, o tempo computacional ao utilizar a função F2 foi de 151 minutos, enquanto que apenas 29 minutos foram gastos ao se usar a função F1. Estes resultados foram obtidos para uma população de 15 formigas e mantendo-se os demais parâmetros conforme os valores descritos na Seção 3.3.1.3. Neste sistema a função F2 tem uma maior dificuldade para orientar as buscas, uma vez que existem custos de adição de reforços semelhantes, conforme a Tabela 3.3.

Para o Sistema CEMIG, a função F2 proporcionou um desempenho um pouco superior, já que há uma evidente variação nos custos de adições de diferentes reforços neste sistema, conforme a Tabela 3.7. No entanto, a função F1 também teve um bom desempenho. Estes resultados foram obtidos considerando uma população de 10 formigas enquanto os demais parâmetros foram mantidos conforme os valores descritos na Seção 3.3.1.3.

Os resultados envolvendo a metaheurística ACO indicam que a função F1 deve ser utilizada, já que a mesma apresentou uma maior robustez no estudo de diferentes sistemas. Na referência [R06], um estudo sobre a escolha da melhor função heurística também já havia sido realizado, chegando-se à mesma conclusão aqui apresentada. Para as demais metaheurísticas, não resta dúvida de que o mecanismo de Inicialização Inteligente proporciona melhores resultados.

Portanto, este será o mecanismo escolhido para se realizar o estudo de desempenho das metaheurísticas na próxima seção, onde poderá ser verificada a relação existente entre esforço computacional e qualidade das seqüências encontradas por cada técnica e, assim, indicar aquelas de maior

eficiência na resolução do problema PET. Como o objetivo no problema PET é obter um conjunto de melhores soluções, e não somente o melhor plano, fica evidente que o índice  $IQ(\%)$  possui uma maior importância para se avaliar o desempenho das metaheurísticas estudadas.

### 3.3.3 Desempenho das Metaheurísticas

Para a avaliação do desempenho das metaheurísticas, várias dimensões de população (PSO, ACO, ES, DE e AIS) e de diversificações (TS) foram utilizadas. Para cada dimensão escolhida, foram realizadas simulações de 10 casos cujas sementes iniciais foram escolhidas aleatoriamente. Os índices de qualidade de melhores seqüências encontradas,  $IQ(\%)$ , e a porcentagem de casos que capturaram a melhor seqüência conhecida,  $IS^{best}(\%)$ , são calculados baseados nestas simulações. Para o cálculo do índice  $IQ(\%)$ , foi considerado  $n_{best} = 25$  para o Sistema 6-Barras e  $n_{best} = 30$  para o Sistema CEMIG. A Tabela 3.12 mostra os valores das dimensões consideradas para o estudo das metaheurísticas:

Tabela 3-12: Dimensões Escolhidas para a População das Metaheurísticas.

Metaheurísticas	Dimensões de População	
	Sistema 6-Barras	Sistema CEMIG
TS	100; 150; 200; 250; 300; 400	100; 200; 300; 400; 500; 700
PSO	25; 50; 75; 100; 125	50; 100; 150; 200; 250
ACO	5; 15; 25; 35; 45; 55	5; 10; 15; 20; 25; 30; 40
ES	25; 50; 75; 100; 125	25; 50; 75; 100; 125; 150
DE	50; 100; 150; 200	100; 200; 300; 400; 500
AIS	5; 10; 15; 20; 25	5; 10; 15; 20; 25; 30

Nas figuras que serão apresentadas a seguir, 3.7 a 3.10, cada ponto indica o resultado da simulação de 10 casos considerando uma determinada dimensão da população ou da diversificação.

As Figuras 3.7 e 3.8 mostram o desempenho das metaheurísticas considerando o índice  $IQ(\%)$  para o Sistema 6-Barras e CEMIG.



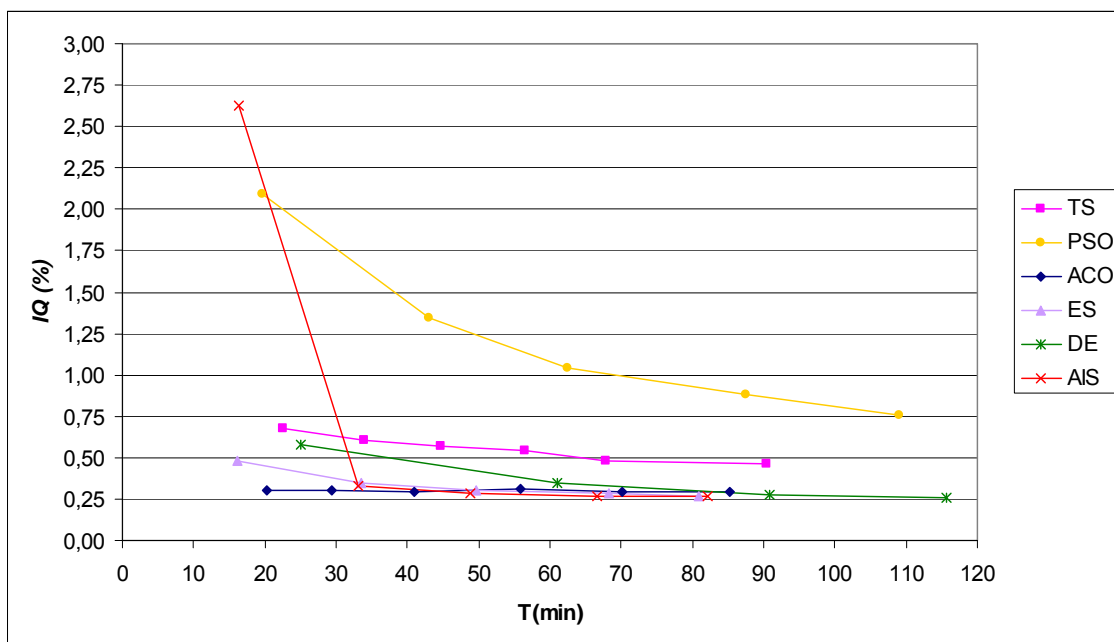


Figura 3-7: Desempenho das Metaheurísticas – IQ (%) – Sistema 6-Barras.

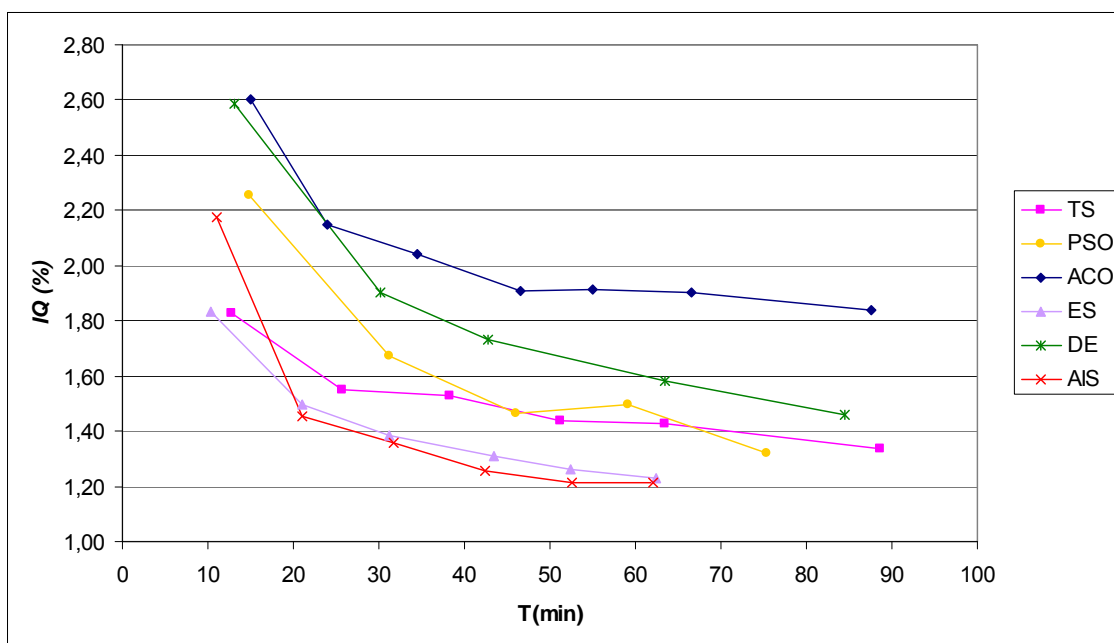


Figura 3-8: Desempenho das Metaheurísticas – IQ (%) – Sistema CEMIG.

Adicionalmente aos pontos que representam os casos simulados, uma aproximação linear foi aplicada de modo a ter uma perspectiva dos resultados dos índices das metaheurísticas em todo o intervalo de tempo. Esta aproximação linear é representada pelas linhas interligando os pontos dos casos analisados. Além disso é possível prever, de forma aproximada, as dimensões da população de cada metaheurística para um determinado valor na escala do tempo.

A partir destes resultados, nota-se claramente uma melhora na qualidade das seqüências encontradas pelas metaheurísticas, menor valor do índice  $IQ$  (%), com o aumento da dimensão da população e do número de diversificações.

Já as Figuras 3.9 e 3.10 apresentam o desempenho ao analisar o índice  $IS^{best}$  (%), também para os Sistemas 6-Barras e CEMIG, respectivamente.

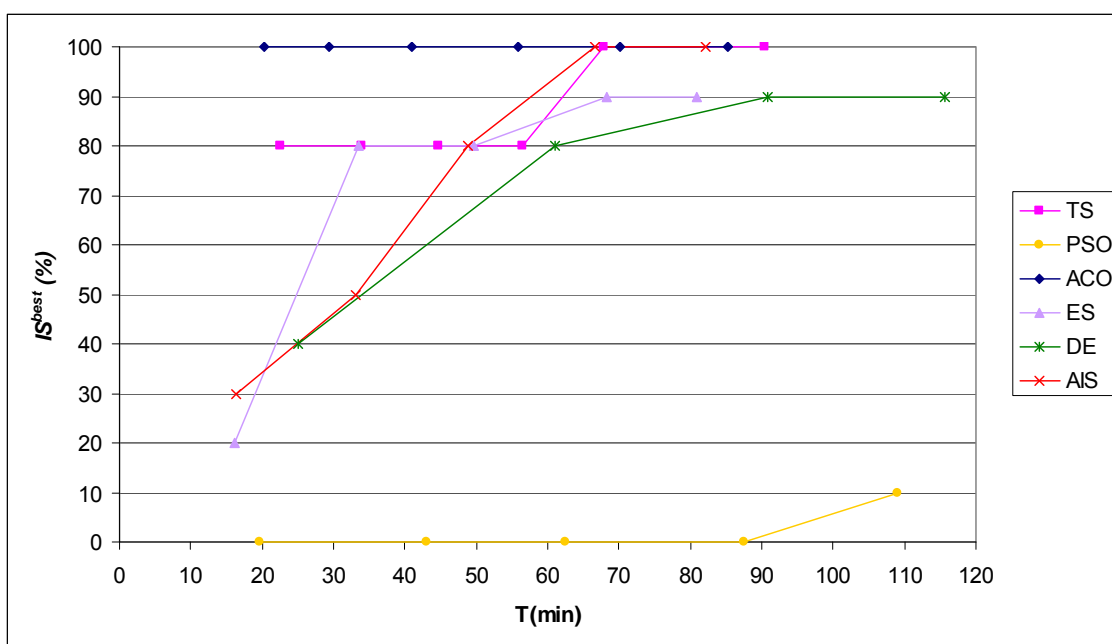


Figura 3-9: Desempenho das Metaheurísticas –  $IS^{best}$  (%) – Sistema 6-Barras.

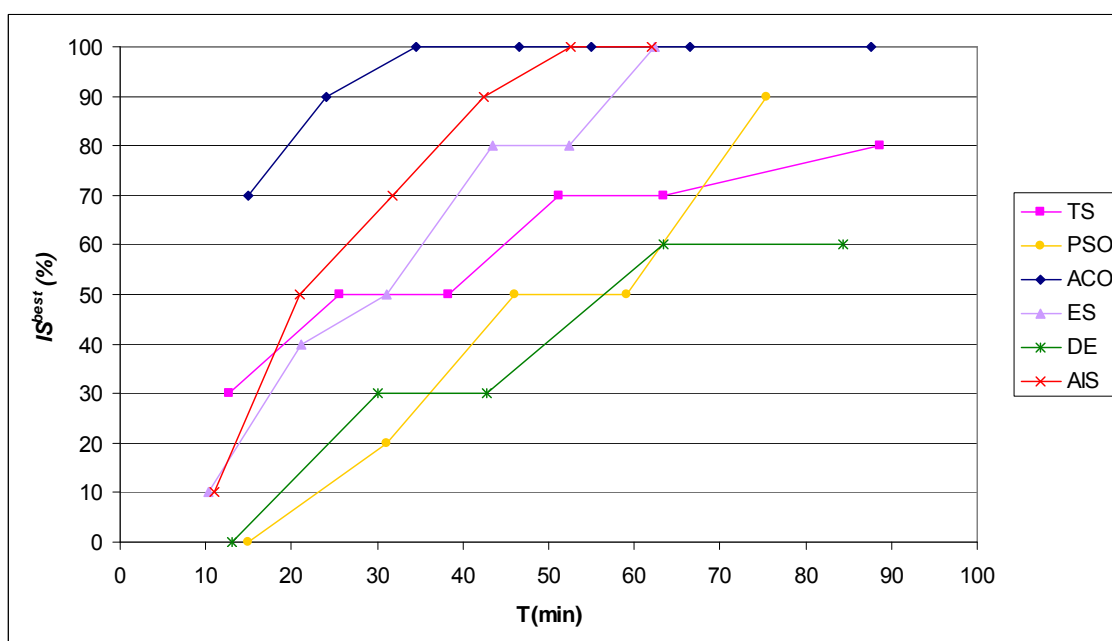


Figura 3-10: Desempenho das Metaheurísticas –  $IS^{best}$  (%) – Sistema CEMIG.

Nestas figuras, observa-se que a chance de se encontrar a melhor seqüência conhecida para cada sistema, índice  $IS^{best}$  (%), é aumentada à medida que também se eleva a dimensão da população e o número de diversificações. A partir dos resultados mostrados nas Figuras 3.7 a 3.10, as seguintes considerações são feitas quanto à aplicação das metaheurísticas.

Observa-se que a metaheurística ACO apresentou ótimos resultados no estudo do Sistema 6-Barras, sendo a primeira na escala do tempo a atingir o valor de saturação do índice de qualidade (Figura 3.7). Contudo, no sistema CEMIG (Figura 3.8), esta metaheurística apresentou o pior desempenho dentre as técnicas analisadas. A explicação pode ser creditada ao fato de que a função heurística utilizada se adapta melhor ao Sistema 6-Barras do que no Sistema CEMIG. Melhor resultado poderia ser alcançado se a função heurística considerasse somente a parcela de custos, conforme mostrado na Tabela 3.11. Por outro lado, o esforço computacional seria drasticamente aumentado no Sistema 6-Barras para alcançar o mesmo índice de qualidade mostrado na Figura 3.7. Ademais, de acordo com o índice  $IS^{best}$  (%), esta metaheurística proporciona as maiores chances de se encontrar a melhor solução conhecida para ambos os sistemas. No entanto, este fato somente, não qualifica a metaheurística ACO como a mais indicada para o problema PET, já que o objetivo não é unicamente identificar a melhor seqüência que minimiza a função objetivo, e sim um conjunto de seqüências de excelente qualidade que devem ser analisadas em estudos posteriores incluindo outros critérios e modelos mais completos.

Já a metaheurística PSO, apresentou o pior desempenho no estudo do Sistema 6-Barras (Figuras 3.7 e 3.9) para ambos os índices analisados. Destaque merece ser dado ao fato de que a melhor seqüência conhecida para este sistema foi encontrada em um único caso. No Sistema CEMIG (Figuras 3.8 e 3.10), o desempenho obtido também ficou a quem do esperado, apesar de ser bem melhor. Esta metaheurística possui a característica de a cada geração atualizar os valores da velocidade e posição das partículas para encontrar novas seqüências. Contudo, não há garantia de que as seqüências da próxima iteração serão melhores do que aquelas da iteração anterior,

mesmo considerando, na atualização da velocidade, informações da melhor posição de cada partícula e de toda a população. Portanto, esta técnica possui uma maior dificuldade para intensificar suas buscas numa determinada região, já que ao encontrar uma boa seqüência, a atualização pode levar a construção de uma de pior qualidade na próxima iteração. Esta dificuldade é ainda maior em sistemas que exigem uma maior quantidade de reforços ao longo do horizonte de planejamento, caso do Sistema 6-Barras.

Quanto à metaheurística DE, apesar de um ótimo índice de qualidade ser atingido para o Sistema 6-Barras (Figura 3.7), este resultado é superado pelas metaheurísticas ACO, ES e AIS, já que o esforço computacional é bem menor para se encontrar a mesma qualidade de seqüências. No geral, seus resultados, quanto ao índice de qualidade, foram melhores somente em relação ao TS e PSO no Sistema 6-Barras e em relação ao ACO no Sistema CEMIG (Figuras 3.7 e 3.8). Quanto ao índice  $IS^{best}$  (%), o DE possui melhor desempenho somente em relação ao PSO no Sistema 6-Barras e um desempenho semelhante no Sistema CEMIG (Figuras 3.9 e 3.10). Como esta técnica seleciona sempre as melhores seqüências para a próxima geração, não evitando que existam seqüências semelhantes dentro da população, a convergência é rapidamente alcançada. No entanto, muitas vezes esta convergência resulta em ótimos locais, já que a diversidade da população vai se reduzindo com a evolução das gerações. Portanto, para evitar uma convergência prematura, é necessária a definição de maiores dimensões para a população, o que acaba resultando em um maior esforço computacional para a obtenção de melhores índices de qualidade.

Em relação à metaheurística TS, embora a mesma tenha apresentado o segundo pior desempenho para o Sistema 6-Barras quanto ao índice  $IQ$  (%), este fato é amenizado devido aos índices encontrados não serem tão distantes se comparados aos melhores desempenhos das demais metaheurísticas (Figura 3.7) e também por proporcionar grandes chances da melhor seqüência conhecida ser encontrada (Figura 3.9). Já no Sistema CEMIG, um desempenho regular é observado para ambos os índices avaliados (Figuras 3.8 e 3.10). A

grande vantagem desta metaheurística se refere à busca exaustiva na vizinhança das seqüências encontradas. No entanto, cuidado deve ser tomado para que a vizinhança não seja demasiadamente grande em sistemas de maior porte. Um modelo híbrido incluindo a metaheurística OO já tem sido utilizado na tentativa de contornar este problema [MI07].

Por fim, pode-se dizer que as metaheurísticas ES e AIS são aquelas de maior robustez para a solução do problema PET, uma vez que as mesmas tiveram o melhor desempenho em ambos os sistemas estudados, para o índice  $IQ$  (%) (Figuras 3.7 e 3.8). Um excelente desempenho também é verificado em ambos os sistemas ao analisar o índice  $IS^{best}$  (%) (Figuras 3.9 e 3.10). Dentre elas, a metaheurística ES merece um destaque maior, pois mesmo para pequenas dimensões de população, os índices de qualidade encontrados foram excelentes. Ademais, os resultados destas metaheurísticas foram parecidos devido possuírem operadores de evolução bastante semelhantes. A diferença básica entre o ES e o AIS se encontra no processo de reprodução, o qual não existe no ES.

### 3.3.4 Planos de Expansão para o Sistema 6-Barras e Sistema CEMIG

Nesta seção, são apresentados os planos de expansão que minimizam a função objetivo, Equação (2.4), para os Sistemas 6-Barras e CEMIG. Contudo, vale lembrar que o resultado final de cada simulação das metaheurísticas indica as 25 e 30 melhores seqüências encontradas para os respectivos sistemas, as quais foram usadas para se calcular o índice  $IQ$  (%). É importante ressaltar que para o problema PET o interesse não está somente em identificar a melhor seqüência, e sim obter um conjunto de excelentes planos para que posteriormente possam ser analisados incluindo outros critérios e modelos.

De acordo com a nova política para a inclusão de perdas ôhmicas, conforme foi descrita na Seção 2.2, a qual é diferente daquela utilizada em outros trabalhos [R06, LMRR08, LSMRRS08], espera-se encontrar planos de expansão com uma redução dos custos envolvidos na função objetivo. As Tabelas 3.13 e 3.14 apresentam os planos de menor custo em valor presente para os Sistemas 6-Barras e CEMIG.

De acordo com a Tabela 3.13, percebe-se que a melhor seqüência para o Sistema 6-Barras possui um custo em valor presente de R\$ 217,82 milhões contra R\$ 228,79 milhões em comparação aos trabalhos [R06, LMRR08, LSMRRS08]. Para o Sistema CEMIG, a melhor seqüência encontrada, Tabela 3.14, possui um custo de R\$ 45,71 milhões contra 46,52 milhões nos trabalhos anteriores. A redução nos custos foi maior no Sistema 6-Barras devido o mesmo ser mais sobrecarregado do que o Sistema CEMIG, já que todos os circuitos tinham sua capacidade reduzida para 95% na política de inclusão de perdas anterior. Assim, havia necessidade de inserir uma maior quantidade de reforços.

Tabela 3-13: Melhor Plano de Expansão para o Sistema 6-Barras.

Ano	Reforços Adicionados							Custo Anual (10 <sup>6</sup> R\$)		
	1 – 4	1 – 5	2 – 4	2 – 5	2 – 6	3 – 5	3 – 6	Investimento	Perdas	Total
8	0	0	1	0	0	0	1	80,00	7,50	87,50
7	1	0	0	1	0	0	0	45,00	7,29	52,29
6	0	1	0	0	1	1	0	65,00	6,41	71,41
5	1	0	0	0	0	0	0	25,00	5,80	30,80
4	0	1	0	0	0	0	1	60,00	4,99	64,99
3	1	0	0	0	0	0	0	25,00	4,36	29,36
2	0	1	0	0	0	0	0	20,00	3,49	23,49
1	0	0	0	0	0	0	0	0,00	2,79	2,79
0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	2,34	2,34
<b>Valor Presente Total (10<sup>6</sup> R\$)</b>								<b>188,92</b>	<b>28,90</b>	<b>217,82</b>

Tabela 3-14: Melhor Plano de Expansão para o Sistema CEMIG.

Ano	Reforços Adicionados			Custo Anual (10 <sup>6</sup> R\$)		
	3 – 10	3 – 12	10 – 12	Investimento	Perdas	Total
10	0	0	1	5,70	13,33	19,03
8	0	0	0	0,00	11,29	11,29
6	0	0	0	0,00	9,29	9,29
4	1	0	0	6,31	7,64	13,95
2	0	1	0	2,55	6,56	9,11
0	0	2	0	5,10	5,71	10,81
<b>Valor Presente Total (10<sup>6</sup> R\$)</b>				<b>13,71</b>	<b>32,00</b>	<b>45,71</b>

### 3.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo, primeiramente foi discutida a importância de se utilizar um mecanismo de construção de seqüências iniciais de melhor qualidade, o qual contribuiu para um melhor desempenho das metaheurísticas estudadas. Posteriormente, foi realizada uma análise detalhada do desempenho das metaheurísticas, onde se pôde concluir que as mais indicadas para a resolução do problema PET são o ES e AIS. Este estudo proporcionou a publicação de vários trabalhos técnicos [LSMRRS08, RLM09, MRLR08, LRMR10, LRHM11, LRM11] incluindo periódicos internacionais e elaboração de capítulos de livro com grande contribuição para a comunidade científica ao se comparar o desempenho de diversas metaheurísticas através de uma análise criteriosa. Adicionalmente, pela primeira vez a metaheurística AIS é utilizada para a resolução do problema PET, cujo desempenho alcançado a qualifica como uma das técnicas mais eficientes ao lado do ES [RLH09a, RLH09b].

Ao final do capítulo os melhores planos de expansão para os Sistemas 6-Barras e CEMIG foram apresentados. De acordo com a nova política para a inclusão de perdas ôhmicas, planos de expansão foram obtidos com uma considerável redução nos custos em valor presente da função objetivo.

No próximo capítulo será discutida a adoção de critérios de segurança através do modelo determinístico “N-1” e índices de confiabilidade. Em seguida, é desenvolvida uma metodologia eficiente de análise de contingências e adoção de índices de desempenho para atendimento de critérios de segurança pelo modelo de otimização. O objetivo final é obter planos de expansão mais robustos para o problema PET.

# CAPÍTULO 4

## CRITÉRIOS DE SEGURANÇA

### 4.1 INTRODUÇÃO

Diferentemente do exposto nos dois últimos capítulos, o problema PET será visto a partir deste momento não somente com o objetivo de encontrar planos que minimizam custos de investimento e relacionados a perdas ôhmicas, mas também que atendam a algum critério de segurança de forma a garantir um melhor nível de qualidade de energia aos consumidores.

Conforme já comentado, principalmente no primeiro capítulo, embora o atendimento a critérios de segurança seja essencial em sistemas reais, grande parte dos trabalhos resolve o problema PET considerando somente o âmbito da rede intacta para a proposta dos planos de expansão. Modelos determinísticos como o “N-1” são abordados em poucas referências. Uma das estratégias consiste em aplicar o critério “N-1” somente aos melhores planos encontrados pela ferramenta de otimização que satisfaçam ao critério de rede intacta. Contudo, não se pode garantir que após a consideração de “N-1” os planos finais referem-se aos melhores. Outra estratégia é considerar o critério “N-1” como uma restrição durante o processo de otimização. Neste caso, os melhores planos encontrados pelo processo de otimização não têm somente que satisfazer o critério de rede intacta, mas também a remoção ou contingência de qualquer elemento de transmissão. Entretanto, um grande esforço computacional pode ser exigido na solução de sistemas de grande porte além de conduzir a grandes investimentos. Uma alternativa seria usar uma lista de contingência formada pelos circuitos mais importantes dentro das áreas ou zonas de interesse. Contudo, considerando a cronologia do problema PET, torna-se difícil criar uma única lista de contingência, uma vez que as condições do sistema podem ser completamente diferentes ao longo do horizonte de planejamento e, conseqüentemente, a importância dos circuitos para o sistema.



Critérios de segurança também podem ser atendidos através de modelos probabilísticos ao estimar índices de confiabilidade, os quais são capazes de medir a qualidade de um sistema de potência. Ao usar tais modelos, é possível incluir, por exemplo, custos relacionados à confiabilidade do sistema na função objetivo, conforme a Equação (2.12). Entretanto, possuem a desvantagem de exigir grande esforço computacional para se avaliar todos os planos de expansão candidatos durante o processo de otimização. Alguns trabalhos têm incluído a avaliação de índices de confiabilidade após o processo de otimização. Neste caso, embora os melhores planos selecionados resultem em menores custos de investimento, eles podem não atender quaisquer critérios de segurança. Ademais, não existe uma definição de quão confiável um sistema de potência deva ser baseado em índices como a LOLE, EPNS e LOLC, já que estes índices são dependentes do modelo de carga escolhido. Uma vez que as concessionárias de energia elétrica não têm alcançado um consenso sobre este assunto, as mesmas têm tido preferência pelos modelos determinísticos aos probabilísticos.

Na próxima seção, um estudo de caso envolvendo o sistema Garver é apresentado cujo objetivo é fazer uma comparação entre os melhores planos de expansão encontrados pelo processo de otimização incluindo ou não o modelo determinístico “N-1” como critério de segurança. A comparação inclui ainda a avaliação dos índices LOLE e LOLC o qual é inserido na função objetivo junto com os custos de investimento e perdas ôhmicas. Ao final desta seção, uma discussão sobre como atender critérios de segurança usando modelos determinísticos e probabilísticos é apresentada para a solução do problema PET. Conforme resultados apontados no Capítulo 3, a metaheurística ES é escolhida como a ferramenta de otimização a ser utilizada, a qual foi desenvolvida em MATLAB. Os índices LOLE e LOLC são obtidos através da simulação Monte Carlo pseudo-cronológica desenvolvida em FORTRAN. Os resultados referem-se a um processador *Pentium Core 2 Duo* (2,66 GHz).

## 4.2 ESTUDO DE CASO – SISTEMA GARVER

A configuração do sistema Garver antes da expansão é mostrada na Figura 4.1. O sistema possui seis barras e seis linhas de transmissão. Na Tabela 4.1 são apresentadas as capacidades de geração instaladas em cada barra, totalizando 1110 MW, bem como seus custos de operação. Também é mostrada a distribuição de cargas, a qual atinge 760 MW sendo os custos de interrupção de energia de 1500 US\$/MWh para todas as cargas do sistema. No ano de referência, o objetivo é conectar a barra de geração #6 ao sistema e satisfazer as restrições operacionais. O horizonte de expansão é dividido em seis anos onde, a cada ano, geração e carga são aumentadas em 5%. Portanto, a capacidade instalada e carga serão de aproximadamente 1416,7 MW e 970,0 MW, respectivamente, ao final do período de análise. As previsões da capacidade de geração e carga estão apresentadas na Tabela 4.2.

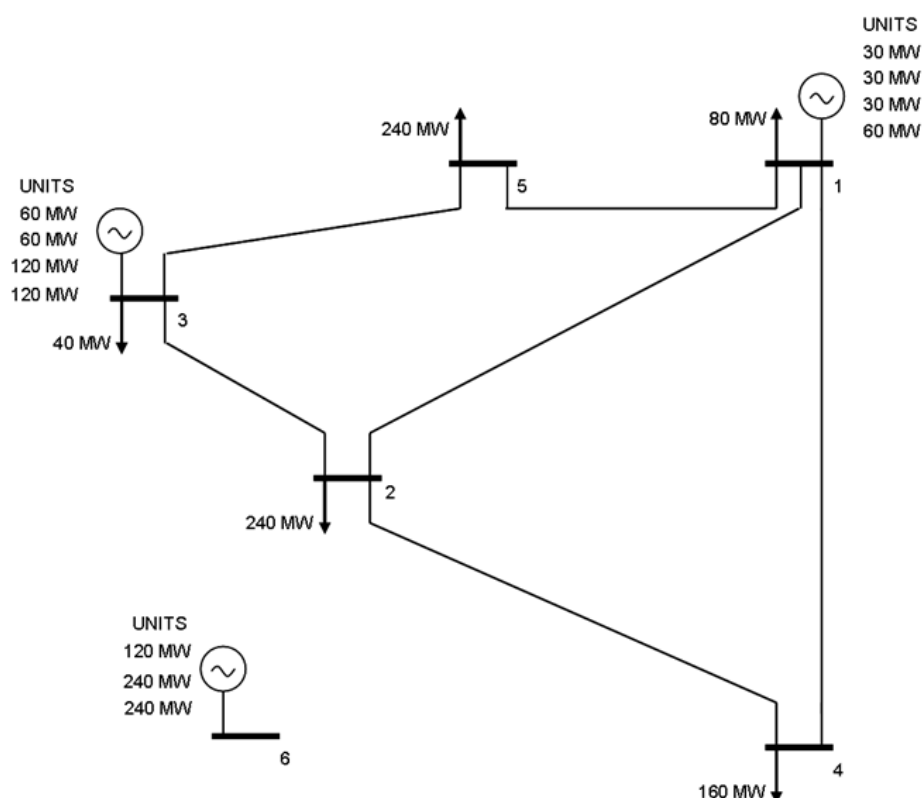


Figura 4-1: Sistema Garver

A conexão entre quaisquer duas barras é permitida com um limite de quatro linhas paralelas em cada ramo. Os dados das linhas de transmissão existentes e possíveis novas conexões estão mostrados na Tabela 4.3. Um custo de

investimento de  $1 \times 10^6$  US\$/milha é considerado para qualquer novo reforço adicionado ao sistema.

Tabela 4-1: Dados de Geração e Carga

Barras	Capacidade de Geração (MW)	Custo de Operação (US\$/MWh)	Carga (MW)	Custo de Interrupção de Energia (US\$/MWh)
1	150	35,00	80	1500,00
2	-	-	240	1500,00
3	360	25,00	40	1500,00
4	-	-	160	1500,00
5	-	-	240	1500,00
6	600	15,00	-	-
<b>Total</b>	<b>1110</b>		<b>760</b>	

Tabela 4-2: Previsão da Capacidade de Geração e Carga do Sistema Garver

		Geração/Carga Prevista (MW)					
Barra		Ano					
		0	1	2	3	4	5
1	Geração	150,0	157,5	165,4	173,6	182,3	191,4
3	Geração	360,0	378,0	396,9	416,7	437,6	459,5
6	Geração	600,0	630,0	661,5	694,6	729,3	765,8
1	Carga	80,0	84,0	88,2	92,6	97,2	102,1
2	Carga	240,0	252,0	264,6	277,8	291,7	306,3
3	Carga	40	42,0	44,1	46,3	48,6	51,1
4	Carga	160	168,0	176,4	185,2	194,5	204,2
5	Carga	240,0	252,0	264,6	277,8	291,7	306,3
<b>Total</b>	<b>Geração</b>	<b>1100,0</b>	<b>1165,5</b>	<b>1223,8</b>	<b>1285,0</b>	<b>1349,2</b>	<b>1416,7</b>
	<b>Carga</b>	<b>760,0</b>	<b>798,0</b>	<b>837,9</b>	<b>879,8</b>	<b>923,8</b>	<b>970,0</b>

De forma a obter o valor presente dos custos, uma taxa de desconto ( $e$ ) de 10% é usada. Em relação aos custos associados a perdas ôhmicas, os seguintes parâmetros são usados:  $C_{kWh} = 0,10$  US\$/kWh e  $FP = 0,6144$ . Uma vez que o interesse de estudo se encontra na expansão do sistema de transmissão, uma taxa de falha de 0,0781 por ano por milha e um tempo de

reparo de 10 horas são assumidos para as linhas de transmissão, enquanto as taxas de falha das unidades geradoras são consideradas nulas. A avaliação da confiabilidade da transmissão é realizada após a identificação das melhores seqüências pela metaheurística ES usando a simulação Monte Carlo pseudo-cronológica. Para obter o índice LOLC, são considerados um custo unitário de interrupção de energia de 1,50 US\$/kWh e o modelo de carga pico.

Tabela 4-3: Dados de Linhas de Transmissão

Barra $i$	Barra $j$	Ramo $l$	$r_{ij}$ (pu)	$x_{ij}$ (pu)	Cap. Max. (MW)	Comprimento (milhas)	$N_{l\max}$
1	2	1	0.10	0.40	100	40	3
1	3	2	0.09	0.38	100	38	4
1	4	3	0.15	0.60	80	60	3
1	5	4	0.05	0.20	100	20	3
1	6	5	0.17	0.68	70	68	4
2	3	6	0.05	0.20	100	20	3
2	4	7	0.10	0.40	100	40	3
2	5	8	0.08	0.31	100	31	4
2	6	9	0.08	0.30	100	30	4
3	4	10	0.15	0.59	82	59	4
3	5	11	0.05	0.20	100	20	3
3	6	12	0.12	0.48	100	48	4
4	5	13	0.16	0.63	75	63	4
4	6	14	0.08	0.30	100	30	4
5	6	15	0.15	0.61	78	61	4

#### 4.2.1 Modelo de Otimização

Dentre vários modelos de otimização apresentados no Capítulo 2 e mediante os resultados encontrados no Capítulo 3, a metaheurística ES foi escolhida para obter os 10 melhores planos de expansão que minimizam os custos de investimento e relacionados a perdas ôhmicas, Equação (2.4). Os seguintes parâmetros foram utilizados: população de progenitores de 50 indivíduos (seqüências),  $\mu = 50$ ; população descendente de 50 indivíduos,  $\lambda = 50$ ; amplitude de mutação aplicada aos ramos do último estágio do horizonte de planejamento,

$\sigma_1 = 0,3$ ; amplitude de mutação dos demais estágios,  $\sigma_2 = 0,6$ ; número máximo de tentativas para se encontrar um vetor solução factível no estágio  $t$ ,  $n_{ten} = 200$ ; e número máximo de gerações,  $n_{ger}^{max} = 100$ .

A metaheurística ES é aplicada para resolver o problema PET a multi-estágios considerando duas diferentes condições. Primeiro, os planos finais devem satisfazer somente ao critério da rede intacta. Na segunda condição, os planos finais devem também atender ao critério determinístico “N-1”. As 10 melhores seqüências encontradas para cada condição estão mostradas nas Tabelas 4.4 e 4.5, respectivamente. As seqüências estão ordenadas pelo valor presente dos custos de investimento e associados a perdas ôhmicas. Para cada condição, 10 casos foram simulados usando diferentes sementes escolhidas aleatoriamente. Em todos os casos simulados, a qualidade das seqüências encontradas foi aproximadamente a mesma, baseado em seus valores presentes. O tempo computacional médio gasto em cada caso considerando a primeira condição foi de 24,7 minutos. Em relação à segunda condição, cada caso gastou em média 224,7 minutos, o que representa um fator de 9,1 de esforço computacional extra. Isto acontece devido ao elevado número de análises adicionais necessárias de PL para avaliar se cada plano candidato atende ao critério de segurança “N-1” durante a busca da metaheurística ES.

Tabela 4-4: Valor Presente das 10 Melhores Seqüências sem o Modelo Determinístico “N-1”

Seqüência	Custos ( $10^6$ US\$)			
	Investimento	Perdas	LOLC	Total
A	156,53	-	43,25	199,78
B	158,18	1,91	35,31	195,41
C	160,00	3,76	29,50	193,26
D	171,56	-4,53	36,97	203,99
E	173,06	-5,55	35,00	202,51
F	171,56	-3,93	35,70	203,32
G	168,95	-1,23	39,07	206,79
H	170,19	-2,38	37,17	204,98
I	170,19	-2,33	35,51	203,37
J	168,95	-0,90	39,70	207,75

Tabela 4-5: Valor Presente das 10 Melhores Seqüências com o Modelo Determinístico “N-1”

Seqüência	Custos (10 <sup>6</sup> US\$)			
	Investimento	Perdas	LOLC	Total
K	232,98	11,18	0,08	244,23
L	234,79	9,53	0,06	244,39
M	242,79	2,27	0,14	245,20
N	264,52	-18,68	0,09	245,94
O	244,29	2,19	0,13	246,62
P	266,18	-18,64	0,09	247,63
Q	246,34	1,51	0,09	247,94
R	244,84	3,20	0,10	248,14
S	245,94	2,11	0,12	248,18
T	266,34	-18,25	0,09	248,18

Uma vez que custos referentes a perdas ôhmicas estão diretamente relacionados à carga do sistema e são similares para qualquer plano de expansão, um valor de referência foi adotado para todas as seqüências encontradas pela metaheurística ES. Este valor corresponde a US\$ 118,29x10<sup>6</sup> e foi obtido para a Seqüência A, mostrada na Tabela 4.4. Portanto, para todas as outras seqüências apresentadas nas Tabelas 4.4 e 4.5, os custos associados a perdas referem-se à diferença entre os valores encontrados para cada seqüência e o valor de referência. Por esta razão, estes custos são nulos para a Seqüência A e algumas seqüências apresentam um valor negativo, o que significa custo menor do que o valor de referência. Comparando os custos de investimento e perdas das seqüências entre as Tabelas 4.4 e 4.5 pode-se observar que, em média, um investimento adicional de US\$ 81,00x10<sup>6</sup> é necessário para atender o critério de segurança “N-1”.

#### 4.2.2 Estudo de Confiabilidade

Nesta seção, uma comparação entre as melhores seqüências mostradas nas Tabelas 4.4 e 4.5 é apresentada. O índice LOLC é também considerado, o qual é calculado em um laço externo pela simulação Monte Carlo pseudo-cronológica após o processo de otimização da metaheurística ES. Os índices LOLC referem-se à avaliação da confiabilidade do sistema de transmissão para a condição de

carga pico e estão mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5. O tempo computacional gasto para estimar os índices de confiabilidade das seqüências na Tabela 4.4 foi de 17 minutos. Com relação às seqüências na Tabela 4.5, foram necessários 415 minutos para estimar seus índices de confiabilidade. Uma vez que as seqüências mostradas na Tabela 4.5 atendem ao critério de segurança “N-1”, o qual corresponde a um sistema mais confiável, a simulação Monte Carlo necessita avaliar um número maior de estados para atingir a convergência dos índices de confiabilidade.

Considerando os resultados apresentados na Tabela 4.4, observa-se que se o objetivo é minimizar o custo em valor presente incluindo a LOLC, Equação (2.12), Seqüência C torna-se a vencedora com um custo total de US\$  $193,26 \times 10^6$ . Nesta condição, o índice LOLC é decisivo para classificar corretamente as seqüências, uma vez que ele representa em média 18,2% do custo total. Se o critério de segurança “N-1” é considerado, Tabela 4.5, o índice LOLC torna-se desprezível já que corresponde a somente 0,04% do custo total. Portanto, a Seqüência K continua sendo a vencedora mesmo levando em consideração o custo da LOLC. Com relação ao custo total, as seqüências na Tabela 4.5 possuem, em média, um custo adicional de US\$  $44,53 \times 10^6$  em relação às seqüências na Tabela 4.4 que somente atendem ao critério de rede intacta.

Outro importante índice de confiabilidade geralmente usado para medir a qualidade de um sistema é o índice LOLE. Uma comparação em termos de LOLE, entre as seqüências vencedoras C e K é apresentada na Tabela 4.6 considerando todos os estágios ao longo do horizonte de planejamento. Não há dúvida de que um nível adequado de qualidade de fornecimento de energia necessita ser garantido aos consumidores, mas deseja-se saber se a consideração do critério de segurança “N-1” é realmente a melhor alternativa. Comparando os índices LOLE entre as seqüências apresentadas na Tabela 4.6, certamente teremos uma resposta positiva para esta questão. É inaceitável ter, por exemplo, um sistema de transmissão com uma LOLE de 202,47 h/ano como pode ser visto no 5º estágio da Seqüência C ou até mesmo 47,82 h/ano no ano

referência. O índice LOLE é muito melhor para a Seqüência K ao longo do horizonte de planejamento. Embora não mostrado, a mesma conclusão pode ser feita comparando quaisquer seqüências entre as Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4-6: Comparação do Índice LOLE

Estágios	Seqüência C	Seqüência K
	LOLE (h/ano)	LOLE (h/ano)
5	202,47	0,63
4	157,04	0,38
3	143,21	0,38
2	95,28	0,38
1	94,74	1,03
0	47,82	0,72

Entretanto, a avaliação de confiabilidade foi realizada considerando o modelo de carga pico durante todo o ano. Seria mais justo fazer tal comparação considerando um modelo de carga horária. Com este propósito, a curva horária do sistema IEEE-RTS [APM79] é adotada e os novos índices das seqüências na Tabela 4.4 são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4-7: Valor Presente das 10 Melhores Seqüências sem o Modelo Determinístico “N-1”  
Modelo de Carga Horária

Seqüência	Custos (10 <sup>6</sup> US\$)			
	Investimento	Perdas	LOLC	Total
A	156,53	-	0,56	157,08
B	158,18	1,91	0,41	160,50
C	160,00	3,76	0,33	164,10
D	171,56	-4,53	0,49	167,52
E	173,06	-5,55	0,46	167,97
F	171,56	-3,93	0,46	168,09
G	168,95	-1,23	0,40	168,12
H	170,19	-2,38	0,48	168,28
I	170,19	-2,33	0,32	168,18
J	168,95	-0,90	0,51	168,55



Uma vez que os valores para os índices LOLC são reduzidos para todas as seqüências na Tabela 4.5, modelo de carga pico, ao considerar o modelo de carga horária, os índices de confiabilidade tornam-se ainda mais insignificantes. Por exemplo, os índices LOLE da Seqüência K são reduzidos para menos do que 1 min./ano. Por esta razão, os resultados considerando as seqüências que atendem ao critério de segurança “N-1” não são mostrados sob o modelo de curva horária.

Considerando o modelo de carga horária, os índices LOLC das seqüências que atendem somente ao critério da rede intacta são reduzidos drasticamente. Os novos valores representam em média 1,2% dos índices calculados para o modelo de carga pico. Na Tabela 4.8, o plano de expansão e os novos índices LOLE para a Seqüência vencedora A são apresentados, considerando todos os estágios do horizonte de planejamento. Os reforços adicionados e os custos em um dado estágio particular do horizonte de planejamento são também mostrados. Como esta seqüência é a referência para os custos de perdas ôhmicas, seus valores são nulos.

Tabela 4-8: Plano de Expansão – Seqüência A

Estágio	Reforços Adicionados			LOLE (h/ano)	Invest. (10 <sup>6</sup> US\$)	LOLC (10 <sup>6</sup> US\$)
	2-6	3-5	4-6			
5	-	-	-	10,24	-	0,29
4	-	-	-	5,83	-	0,13
3	-	-	-	2,62	-	0,05
2	-	1	-	1,04	20,00	0,02
1	-	-	-	6,65	-	0,18
0	2	1	2	3,39	140,00	0,08
<b>Custo em Valor Presente (10<sup>6</sup> US\$)</b>					<b>156,53</b>	<b>0,56</b>

Ao adotar uma situação mais real, i.e. um modelo de carga horária, os índices LOLE das seqüências que atendem somente o critério da rede intacta são mais aceitáveis, como mostrado na Tabela 4.8 para a Seqüência A. A pior situação, uma LOLE de 10,24 h/ano, aparece no estágio 5. Assim, ao adotar este modelo

de carga, não é óbvia a escolha do critério de segurança “N-1” como a melhor alternativa para o problema PET.

Geralmente, uma tarifa é usada para recuperar todos os custos envolvidos no planejamento da expansão da transmissão tais como investimentos, custos associados a perdas e possíveis estornos aos consumidores devido a interrupções de energia. Considerando a Seqüência A, Tabela 4.8, a tarifa relacionada aos custos de interrupção (LOLC) representa somente 0,36% do custo total a ser recuperado. Esta quantidade pode ser interpretada como um tipo de seguro de energia. Embora todas as seqüências que garantem o critério de segurança “N-1” não necessitem recuperar uma tarifa relacionada a interrupções de carga, já que o índice LOLC é quase nulo considerando o modelo de carga horária, em média, há um custo de investimento adicional de US\$  $81,00 \times 10^6$  que necessita ser recuperado pela tarifa. Portanto, deseja-se saber se seria melhor pagar somente US\$  $0,56 \times 10^6$  relacionados aos custos de interrupção de energia e descartar o critério de segurança “N-1”. Companhias elétricas ainda não chegaram a um consenso sobre valores de índices de confiabilidade que representam um nível de qualidade aceitável para seus sistemas de potência. Embora pareça que o critério de segurança “N-1” não seja a melhor escolha, já que há uma elevada tarifa a ser recuperada, esta tem sido a estratégia adotada pela maioria das companhias ao redor do mundo.

Uma alternativa ao modelo determinístico “N-1” seria o uso de um modelo probabilístico durante o processo de otimização, onde algum critério baseado em índices de confiabilidade, por exemplo, LOLE, poderia ser considerado para selecionar as melhores seqüências. Isto garantiria um índice LOLE aceitável e um menor custo de investimento do que aqueles obtidos pelo modelo determinístico “N-1”. Entretanto, como já mencionado, isto pode ser impraticável devido ao elevado esforço computacional exigido.

Portanto, até o momento a melhor estratégia parece ser a aceitação do critério de segurança “N-1”, mas desde que atendido somente nas áreas mais vitais do sistema. Estas áreas necessitam ser definidas com cuidado em sistemas reais

sendo, em geral, aquelas com maiores níveis de tensão, principais ramos e interconexões, equipamentos especiais, etc. Um elevado investimento seria necessário se todo o sistema tivesse que atender a este critério de segurança, conforme foi mostrado nesta seção. Após o processo de otimização, um modelo probabilístico poderia ser usado para avaliar as melhores seqüências considerando custos de interrupção e um modelo de carga horária.

Nas próximas seções é apresentada uma metodologia eficiente para avaliação de contingências sendo possível obter uma classificação das mesmas através de índices de desempenho. A vantagem de se levantar tais índices, relacionados ao impacto de diferentes contingências, é a possibilidade de se adotar um novo critério de segurança a ser atendido pelos planos de expansão na solução do problema PET.

### **4.3 CLASSIFICAÇÃO DE CONTINGÊNCIAS DE TRANSMISSÃO**

#### **4.3.1 Estado da Arte**

A identificação de contingências que resultam em maiores impactos em sistemas de potência tem sido discutida ao longo de muitos anos através de vários modelos [SAA85, AFPB03, SFCM05]. A Seleção Automática de Contingências (SAC) tem tido importantes aplicações em planejamento da transmissão, operação de sistemas de potência e análise de confiabilidade. Nestes estudos, deseja-se encontrar de forma eficiente uma lista de contingências, devido, por exemplo, a mudanças de configurações do sistema (saída de linhas de transmissão, transformadores e unidades de geração) e variações de injeções de potência. Além disso, é essencial avaliar a segurança de sistemas de potência para diferentes pontos de operação, o que pode exigir grande esforço computacional.

Uma maneira de se obter tal lista de contingências é através de algum índice de desempenho (*Performance Index – PI*), o qual corresponde a uma função escalar de variáveis da rede para descrever alguma característica do estado de operação do sistema. O objetivo é calcular rapidamente, a partir de um

algoritmo, os valores PI para cada alteração do caso base de um dado sistema. Como resultado deste estudo, índices com maiores valores devem indicar as contingências que causam as piores condições de operação para o sistema.

Geralmente, estes algoritmos são baseados em modelos de fluxo de potência linearizados, que apesar de não serem exatos, já que não consideram a influência do fluxo reativo, são rápidos e confiáveis para a classificação de contingências, particularmente para redes de extra-alta tensão.

De forma a obter listas com classificação de contingências, o maior obstáculo encontra-se na avaliação de um elevado número de casos. Se somente o critério “N-1” é considerado, o número de casos a serem avaliados é igual ao número de ramos (circuitos) do sistema de transmissão. Por outro lado, se a análise também inclui os critérios “N-2” e “N-3”, o número de casos cresce consideravelmente devido ao elevado número de combinações de contingências.

Com a finalidade de superar as dificuldades impostas pelo elevado nível combinatório, exige-se a utilização de técnicas de armazenamento de informações de forma esparsa além de uma manipulação inteligente das operações matriciais para minimizar o esforço computacional. Além disso, de forma a lidar com um número explosivo de combinações incluindo contingências de 2ª e 3ª ordens, alguma técnica ou estratégia inteligente deve ser usada para analisar somente uma parte destas contingências e ainda assim identificar aquelas de maior severidade para o sistema.

Inicialmente, vários trabalhos usaram os conceitos expostos no artigo [SAA85], o qual se baseia na obtenção de índices PI cujos valores representam a proximidade do estado de operação em exceder seus limites estáticos. Primeiramente, o caso-base é avaliado, onde são definidas as injeções de potência de todas as barras assim como a configuração da rede. Mediante um modelo eficiente para lidar com o problema de esparsidade das matrizes

envolvidas, os valores PI são avaliados para cada contingência através de um fluxo de potência DC.

Os índices são calculados para cada contingência a partir do somatório da taxa de carregamento ao quadrado dos fluxos de potência ativa de todos os circuitos em operação (i.e. taxa entre o fluxo calculado e o limite de capacidade de cada circuito). Este procedimento pode não capturar o real entendimento de especialistas em relação ao nível de carregamento dos circuitos e a violação de seus limites operacionais escondendo, assim, o real impacto das contingências, principalmente sobrecargas locais. Em consequência, algumas contingências podem ser mal classificadas recebendo pouca ou nenhuma atenção pelos planejadores e operadores do sistema.

A seguir é apresentado um estudo comparativo para mostrar a ineficiência deste índice para se obter uma classificação de contingências. A comparação é feita usando um novo índice onde a taxa de carregamento dos fluxos de potência é elevada a sexta ordem e não ao quadrado. Deste modo, circuitos com grandes sobrecargas irão contribuir significativamente para os valores do índice PI enquanto circuitos dentro de seus limites e com pequenas sobrecargas terão menor importância para o índice de desempenho. Cabe ressaltar que embora mais eficiente para classificar contingências, este índice de sexta ordem não pode ser calculado pelo modelo proposto em [SAA85] já que o mesmo é válido somente para cálculo de índices quadráticos.

A Tabela 4.9 apresenta duas listas com 20 contingências. A primeira lista (identificada como  $PI^2$ ) foi obtida pelo modelo proposto em [SAA85] cujos valores PI se referem ao somatório da taxa ao quadrado dos fluxos de potência ativa para todos os circuitos. A segunda lista (identificada por  $PI^6$ ) foi obtida resolvendo explicitamente um fluxo de potência DC para calcular todos os fluxos no sistema para cada contingência cujos valores PI tiveram seu expoente alterado de 2 para 6, ou seja, o índice representa o somatório da taxa elevada a sexta potência dos fluxos de potência ativa para todos os circuitos. Também é

apresentado o número de violações, i.e. circuitos sobrecarregados, para cada contingência o que ajuda a mostrar o erro de classificação usando o índice  $PI^2$ .

Estas listas apresentam somente as piores contingências de primeira ordem do sistema IEEE-RTS, o qual possui 24 barras e 38 circuitos. Este sistema é uma modificação do original [APM79] onde as capacidades de geração e cargas são duplicadas com o objetivo de estressar o sistema de transmissão. Figura 4.2 ilustra o sistema IEEE-RTS com a identificação de suas barras e circuitos, maiores detalhes podem ser encontrados em [APM79].

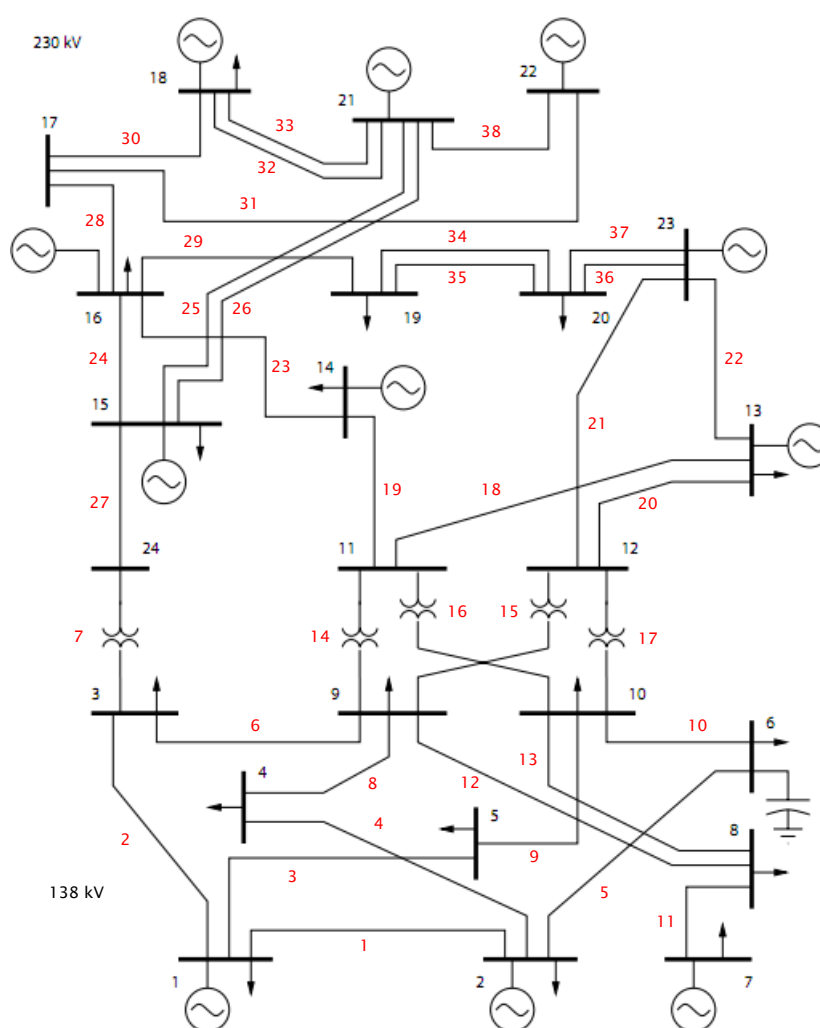


Figura 4-2: Sistema IEEE-RTS

Os resultados mostrados na Tabela 4.9 apontam algumas contingências mal classificadas ao se usar o índice  $PI^2$ . Nota-se que a 14ª contingência (circuito #4) classificada apresenta nenhuma violação de capacidade em qualquer

circuito do sistema. Por outro lado, a 18ª contingência (circuito #14) exibe duas violações (circuitos #15 e #10). A explicação se deve ao fato de que estas duas violações ou sobrecargas devido à saída do circuito #14 podem ser consideradas pequenas quando comparadas ao carregamento dos circuitos quando o circuito #4 está sob contingência. Portanto, um expoente quadrático não é capaz de capturar esta particularidade ao passo que aumentando-se o expoente para 6, este erro de classificação desaparece como pode ser visto na classificação pelo índice  $PI^6$ . Entretanto, mesmo listas criadas usando este índice podem apresentar erros de classificação.

Tabela 4-9: Influência de Índices PI na Criação de Listas de Contingências

Posição	Listas de Contingências – 1ª Ordem					
	Classificação $PI^2$			Classificação $PI^6$		
	Índice	Circuito	Violações	Índice	Circuito	Violações
1	16,3442	18	4	20,2034	5	1
2	15,8599	7	3	19,7521	18	4
3	15,8599	27	3	18,9480	10	1
4	15,6188	17	4	16,8448	36	2
5	15,1630	21	1	16,8448	37	2
6	14,8803	5	1	15,6389	17	4
7	14,7264	15	3	14,6824	7	3
8	14,4331	10	1	14,6824	27	3
9	14,0703	23	2	13,3981	23	2
10	13,9629	16	1	12,7677	15	3
11	13,7995	37	2	12,4311	20	1
12	13,6517	31	1	10,2907	16	1
13	13,6489	20	1	8,5337	21	1
14	13,5777	4	0	7,3855	29	2
15	13,4888	3	0	7,1443	38	1
16	13,4359	12	0	7,0958	14	2
17	13,4283	22	0	7,0151	31	1
18	13,4216	14	2	6,4379	8	1
19	13,3639	28	0	6,4305	34	1
20	13,3410	25	0	6,4305	35	1

De acordo com a referência [SAA85], o modelo proposto para o cálculo do índice  $PF^2$  é justificado por apresentar uma estrutura eficiente ao usar técnicas de esparsidade. No entanto, nada impede que estas mesmas técnicas juntamente com artifícios matemáticos sejam também aplicadas para classificar contingências através do uso explícito de equações do fluxo de potência DC, como será mostrado na próxima seção. A vantagem neste caso é que todos os fluxos ativos podem ser mensurados explicitamente (o que não ocorre no modelo em [SAA85] já que o índice é obtido diretamente) e, assim, violações ou sobrecargas podem ser apontadas facilmente para cada contingência. Ademais, esta informação pode ser usada para selecionar somente uma parte de contingências de 2ª e 3ª ordens a serem avaliadas e ainda assim identificar aquelas de maior severidade para o sistema.

Novos índices PI para a classificação de contingências serão discutidos e apresentados na próxima seção onde será demonstrada sua maior eficiência, uma vez que os mesmos permitem decidir o que é mais importante a ser avaliado: maior magnitude de sobrecarga, quantidade total de sobrecarga, e número de violações ou sobrecargas visando sua utilização como critério de segurança a ser adotado na solução de problemas PET. No caso de não haver circuitos com sobrecarga, outro índice PI será usado para medir o nível de carregamento do sistema de transmissão. Além disso, baseado nestes novos índices e principalmente para o estudo de sistemas de grande porte, será apresentada uma estratégia eficiente para a redução no número de contingências de 2ª e 3ª ordens a serem analisadas, as quais normalmente são ignoradas pelas metodologias propostas até então na literatura. Artigos mais recentes [AFPB03, SFCM05] discutem novas metodologias e índices de desempenho para lidar com modelos AC. Entretanto, nenhuma contribuição é observada para lidar com o extenso número de combinações ao se avaliar contingências de 2ª e 3ª ordens.

#### 4.3.2 Metodologia Proposta

Baseado no modelo de fluxo de potência linear, para uma dada contingência envolvendo  $m$  saídas simultâneas de circuitos, o vetor de ângulos pós-



contingência  $\theta$  ( $n \times 1$ ) pode ser expresso como função dos ângulos do caso-base  $\theta^0$  ( $n \times 1$ ) e do vetor  $\Delta\theta$  ( $n \times 1$ ) que indica as alterações no vetor de ângulos das barras devido à contingência:

$$\theta = \theta^0 + \Delta\theta \quad (4.1)$$

Reescrevendo esta última equação e considerando o método de compensação clássico para solução de modificações em redes [AST83], temos:

$$\theta = - \left[ B^{-1} - B^{-1} M c M^t B^{-1} \right] P \quad (4.2)$$

onde  $B$  ( $n \times n$ ) refere-se à matriz de susceptância nodal,  $P$  ( $n \times 1$ ) representa o vetor injeções de potência ativa nas barras,  $M$  ( $n \times m$ ) é uma matriz de conexão para os  $m$  circuitos sob contingência,  $n$  é o número de barras do sistema excluindo a barra de referência e  $c$  é dado por:

$$c = \left( \delta_b^{-1} + M^t B^{-1} M \right)^{-1} \quad (4.3)$$

onde  $\delta_b$  ( $m \times m$ ) corresponde a uma matriz diagonal com as susceptâncias dos circuitos sob contingência.

O fluxo de potência ativa pós-contingência pode ser escrito como:

$$F = F^0 + \Delta F \Leftrightarrow DC\theta = DC[\theta^0 + \Delta\theta] \quad (4.4)$$

onde  $F^0$  ( $k \times 1$ ) é o vetor de fluxo de potência ativa para o caso-base,  $\Delta F$  ( $k \times 1$ ) refere-se ao vetor com a variação de fluxos ativos devido à contingência,  $D$  ( $k \times k$ ) é uma matriz diagonal representando as susceptâncias de todos os circuitos  $k$ ;  $C$  ( $k \times n$ ) é uma matriz conexão para toda a rede com valores nulos exceto para duas posições (+1 e -1) associadas às barras dos circuitos correspondentes e  $k$  corresponde ao número total de circuitos do sistema de transmissão.

Substituindo as Equações (4.2) e (4.3) em (4.4) temos:

$$F = DC \left[ -B^{-1}P + B^{-1}M \left( \delta_b^{-1} + M^t B^{-1}M \right)^{-1} M^t B^{-1}P \right] \quad (4.5)$$

A Equação (4.5) representa o vetor de fluxos de potência ativa ( $k \times 1$ ) resultante para o sistema de transmissão. Como pode ser visto,  $B^{-1}P$  corresponde à solução do caso-base  $\theta^0$ , a qual é usada para a avaliação de todas as contingências. Como a matriz  $B$  é altamente esparsa, todas as avaliações envolvendo sua inversa  $B^{-1}$  devem ser devidamente tratadas usando técnicas de esparsidade. Neste trabalho, técnicas de bi-fatoração [Z71, BAH77, D77] são usadas no desenvolvimento da ferramenta computacional. Este método é baseado em encontrar as matrizes fatores associadas a  $B^{-1}$ . Uma vez encontrados estes fatores, os mesmos também devem ser aproveitados para avaliar o termo  $B^{-1}M$ , o qual aparece duas vezes nesta equação. O uso desta técnica aumenta substancialmente a eficiência computacional para avaliação de sistemas de grande porte.

#### 4.3.2.1 *Novos Índices de Desempenho para Classificação de Contingências*

Baseado nos problemas de classificação de contingências encontrados com os índices quadráticos  $PI^2$ , novos índices de desempenho são propostos com o objetivo de fornecer uma lista de contingências mais confiável e flexível. A flexibilidade vem do fato de que o usuário pode decidir o que deve ser medido e usado na classificação em seu estudo particular. É possível acessar, para cada contingência analisada, informações quanto ao total de violações  $PI_T$  (i.e. o somatório dos fluxos dos circuitos com sobrecargas); a máxima violação  $PI_M$  (i.e. o máximo fluxo dos circuitos com sobrecargas); e o número de violações  $PI_N$  (i.e. o número de circuitos com sobrecargas). As equações a seguir apresentam os três novos índices PI:

$$PI_T = \sum_{i \in V} \left( \left| \frac{f_i}{\bar{f}_i} \right| - 1 \right) \quad (4.6)$$

$$PI_M = \max_{i \in V} \left( \left| \frac{f_i}{\bar{f}_i} \right| - 1 \right) \quad (4.7)$$

$$PI_N = n^\circ \text{ de circuitos } \in V \quad (4.8)$$

onde  $f_i$  e  $\bar{f}_i$  são o fluxo de potência ativa e o correspondente limite de capacidade do circuito  $i$  para a contingência  $j$ ,  $V$  corresponde ao conjunto de circuitos cuja capacidade de transmissão foi violada,  $max$  é uma função que retorna o valor máximo entre os valores pertencentes ao conjunto  $V$ .

Eventualmente, diferentes contingências podem apresentar o mesmo índice, principalmente no caso do índice  $PI_N$ . Nestas situações, outro índice  $PI_T$  ou  $PI_M$  pode ser usado para melhor classificar estas contingências. Se não há sobrecargas no sistema para uma dada contingência, todos os índices anteriores serão nulos, e, portanto, não será possível obter uma classificação. Contudo, o nível de carregamento do sistema de transmissão pode ser medido. Para tais casos, o seguinte índice de desempenho é proposto:

$$PI_W = \sum_{i=1}^k \left| \frac{f_i}{\bar{f}_i} \right| \quad (4.9)$$

onde  $k$  já foi definido em (4.4) e  $PI_W$  corresponde ao somatório da razão entre fluxos e capacidades de todos os circuitos do sistema.

A Tabela 4.10 apresenta listas de contingências de 1ª ordem classificadas pelos índices PI propostos nas Equações (4.6–4.9) para o mesmo sistema IEEE–RTS mostrado na Seção 4.3.1. Como pode ser visto, uma classificação baseada somente em medidas do carregamento total do sistema de transmissão  $PI_W$ , não é suficiente para garantir uma correta classificação (assim como no caso do índice  $PI^2$ , Tabela 4.9). Quanto aos outros índices, é possível melhor classificar as contingências dentro de cada critério especificado.

Tabela 4-10: Listas de Contingências Classificadas pelos Índices Propostos

Pos.	Listas de Contingências – 1ª Ordem							
	Classificação $PI_W$		Classificação $PI_T$		Classificação $PI_M$		Classificação $PI_N$	
	Índice	Circuito	Índice	Circuito	Índice	Circuito	Índice	Circuito
1	21,3887	27	0,9475	18	0,5723	5	4	18
2	21,3781	7	0,6983	17	0,5723	10	4	17
3	20,8539	21	0,5894	5	0,4865	36	3	23
4	20,6704	18	0,5886	27	0,4865	37	3	27
5	20,4379	17	0,5839	7	0,3947	23	3	7
6	20,4270	5	0,5723	10	0,3921	20	3	15
7	20,2243	15	0,5496	15	0,3263	16	2	5
8	20,1916	10	0,5156	36	0,3096	18	2	36
9	20,1420	3	0,5156	37	0,2980	27	2	37
10	20,1182	25	0,4677	23	0,2947	7	2	29
11	20,1182	26	0,3921	20	0,2810	17	2	21
12	20,1175	4	0,3263	16	0,2241	15	2	14
13	20,0715	31	0,1674	29	0,1562	29	1	10
14	19,9515	28	0,1375	14	0,0932	31	1	20
15	19,9281	38	0,1087	21	0,0932	38	1	16
16	19,7970	8	0,0932	31	0,0844	8	1	31
17	19,7785	22	0,0932	38	0,0838	21	1	38
18	19,6535	2	0,0844	8	0,0701	14	1	8
19	19,6155	9	0,0373	34	0,0373	34	1	34
20	19,6110	12	0,0373	35	0,0373	35	1	35
21	19,5892	23	0,0254	13	0,0254	13	1	13
22	19,5706	16	0,0213	9	0,0213	9	1	9
23	19,5694	13	0	3	0	3	0	3
24	19,5613	1	0	25	0	25	0	25
25	19,5539	14	0	26	0	26	0	26
26	19,5487	6	0	4	0	4	0	4
27	19,4611	32	0	28	0	28	0	28
28	19,4611	33	0	22	0	22	0	22
29	19,4025	19	0	2	0	2	0	2
30	19,3786	36	0	12	0	12	0	12
31	19,3786	37	0	1	0	1	0	1
32	19,3640	34	0	6	0	6	0	6
33	19,3640	35	0	32	0	32	0	32
34	19,2446	24	0	33	0	33	0	33
35	19,2365	30	0	19	0	19	0	19
36	19,1528	29	0	24	0	24	0	24
37	19,1313	20	0	30	0	30	0	30

Observa-se que entre as primeiras 22 posições há classificações incorretas somente pelo índice  $PI_W$ , identificadas em vermelho. Conforme comentado, este índice é útil para classificar somente contingências que não resultam em sobrecargas, o que ocorre a partir da 23ª posição das demais listas. Somente a partir deste ponto é indicado o uso do índice  $PI_W$  para uma correta classificação.

#### **4.3.2.2 Isolação de Barras e Sistemas**

Durante a avaliação de contingências a saída de um ou mais circuitos pode provocar a isolação de barra(s) resultando até mesmo na formação de subsistemas. Nestas situações não é possível avaliar quaisquer índices PI devido ao mal-condicionamento do termo  $(\delta_b^{-1} + M^T B^{-1} M)$  na Equação (4.5). A solução nestes casos exigiria um redespacho das unidades geradoras. Esta não é uma situação desejável, pois o principal objetivo nestes estudos é classificar as contingências condicionadas a um determinado nível de injeção de potência nas barras. Entretanto, estas contingências não podem simplesmente serem descartadas do estudo já que indicam severos pontos de operação da rede cuja solução normalmente envolve cortes de carga no sistema. Portanto, é importante que tais situações sejam identificadas e uma lista seja criada separadamente incluindo os casos de isolação de barras e sistemas ilhados.

De forma a identificar contingências que resultam nestes casos, deve-se avaliar o determinante deste termo. Assim, foram estabelecidos alguns valores padrões para o resultado dos determinantes: se o valor for menor do que  $1 \times 10^{-12}$ , então trata-se de um caso com isolação ou formação de ilha(s); caso o valor seja maior do que  $1 \times 10^{-4}$ , é um indicativo de que o sistema permanece todo interligado. No entanto, se o determinante resultar em um valor entre este intervalo, do ponto de vista numérico, não se pode chegar a uma conclusão. Neste caso, deve-se verificar a topologia do sistema identificando se todos os pontos estão conectados. Claramente, esta avaliação da topologia poderia ser feita para qualquer contingência, porém isto elevaria o tempo computacional de análise e, portanto, somente é usada em casos onde não há uma conclusão ao usar o método numérico. Os valores padrão escolhidos têm sido adequados para todos os sistemas estudados neste trabalho.

### 4.3.2.3 *Classificação de Contingências de 2ª e 3ª Ordens*

De uma forma geral, obter uma lista de contingências de 1ª ordem, i.e. associada ao critério “N-1”, não se trata de uma tarefa difícil, pois o número de avaliações a ser realizada é no máximo igual ao número de circuitos do sistema de transmissão,  $k$ . Entretanto, quando se deseja avaliar contingências observando os critérios “N-2” e “N-3”, a dificuldade computacional aumenta substancialmente. O problema não está relacionado ao cálculo dos índices de desempenho uma vez que o conjunto de equações descrito nas seções anteriores é capaz de avaliar qualquer ordem de contingências.

A real dificuldade está ligada ao número de possíveis combinações de contingências de 2ª e 3ª ordens,  ${}_kC_2$  e  ${}_kC_3$ , respectivamente. Por exemplo, considerando um sistema com 100 circuitos, há 4950 e 161700 contingências de 2ª e 3ª ordens, respectivamente. Já um sistema com 1000 circuitos teria 499500 e 166167000 contingências de 2ª e 3ª ordens. Portanto, alguma estratégia tem de ser adotada para selecionar as contingências mais relevantes que irão trazer maior impacto ao sistema de transmissão. Com o objetivo de reduzir o número de combinações a serem avaliadas sem perder a qualidade na obtenção de uma lista de contingências, é proposta uma estratégia de redução cuja eficiência será provada nos estudos de alguns sistemas na próxima seção.

Primeiramente, todas as contingências de 1ª ordem devem ser avaliadas e classificadas de acordo com algum dos índices de desempenho citados na Seção 4.3.2.1. O próximo passo é analisar as contingências de 2ª ordem. A fim de reduzir o número de avaliações, somente são consideradas as combinações entre as contingências de 1ª ordem melhor classificadas e seus respectivos circuitos com os maiores carregamentos. Na Tabela 4.10, por exemplo, considerando o índice  $PI_T$ , a contingência do circuito #18 está no topo da lista de 1ª ordem. Nesta situação o sistema aponta os circuitos #20, #17 e #23 como os pontos de maior carregamento do sistema. De acordo com a estratégia proposta, as seguintes contingências de 2ª ordem serão analisadas: #18 e #20, #18 e #17, #18 e #23. Para isto, devem ser definidos os valores de  $\eta_{rank}$  e  $\eta_{circ}$  que correspondem ao número de contingências de 1ª ordem melhor classificadas e o

número de circuitos com os maiores carregamentos associados a estas contingências de 1ª ordem. O mesmo deve ser feito para limitar as combinações de contingências de 3ª ordem a serem analisadas. Neste caso,  $\eta_{rank}$  deve indicar as contingências de 2ª ordem melhor classificadas e  $\eta_{circ}$  os circuitos com os maiores carregamentos associados a estas contingências de 2ª ordem.

Esta estratégia de redução é baseada no fato de que contingências melhor classificadas quando combinadas com os seus respectivos circuitos de maiores carregamentos apontam, normalmente, as piores contingências de ordem posterior. Vale ressaltar que contingências classificadas em posições intermediárias combinadas com seus circuitos de maiores carregamentos também poderiam ser consideradas para a análise de contingências. Contudo, deve-se fazer um balanço entre o tempo computacional que se dispõe e os benefícios em termos de uma melhor classificação tendo em mente a dimensão do sistema a ser estudado. O objetivo é sempre obter o melhor conjunto de contingências classificadas incluindo 1ª, 2ª e 3ª ordens ao menor esforço computacional. Na próxima seção são mostrados e discutidos os resultados da metodologia proposta neste trabalho incluindo a estratégia de redução de combinações a serem avaliadas.

### 4.3.3 Resultados

Os resultados obtidos com a metodologia proposta para a classificação de contingências são apresentados considerando três sistemas: IEEE-RTS 24 barras [APM79], IEEE-RTS 72 barras [APM99] e IEEE 118 barras [PSTCA]. Os sistemas IEEE-RTS 24 e 72 barras correspondem tiveram as capacidades de geração e cargas duplicadas com o objetivo de estressar o sistema de transmissão.

Listas de contingências são obtidas para os três sistemas, considerando classificações de 1ª, 2ª e 3ª ordens. Três diferentes critérios de índices PI são usados na classificação das contingências: " $PI_M PI_T$ ", " $PI_T PI_M$ " e " $PI_N PI_T$ ". Isto significa que, por exemplo, para o critério " $PI_M PI_T$ ", as contingências são

classificadas de acordo com o índice  $PI_M$  e no caso de duas ou mais contingências terem o mesmo valor para este índice, o índice  $PI_T$  é usado como critério de desempate para uma correta classificação.

Definido o critério, a classificação de contingências de 1ª ordem é facilmente obtida uma vez que todas são avaliadas. Contudo, uma maior atenção será dada à classificação de contingências de 2ª e 3ª ordens com o objetivo de se avaliar a eficiência da estratégia de redução do número de combinações a serem avaliadas, baseada nos valores  $\eta_{rank}$  e  $\eta_{circ}$ . Esta avaliação é possível devido os sistemas estudados terem uma dimensão não muito grande, o que permite a avaliação de todas as contingências de 2ª e 3ª ordens. Em sistemas de grande porte não seria possível a avaliação desta eficiência devido ao esforço computacional para se avaliar todas as combinações.

#### **4.3.3.1 IEEE-RTS 24 Barras**

Este sistema é composto por 24 barras e 38 circuitos, tendo uma geração total de 6810 MW e uma demanda de 5700 MW. O número de contingências a ser analisado é: 38 de 1ª ordem, 703 de 2ª ordem e 8436 de 3ª ordem. Portanto, a análise completa até 3ª ordem deve avaliar 9177 contingências.

Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os resultados para a classificação de contingências de 2ª ordem. Seis diferentes estratégias de redução são consideradas. Por exemplo,  $\eta_{rank} = 5$   $\eta_{circ} = 20$  significa que as cinco primeiras contingências classificadas de 1ª ordem são combinadas com os correspondentes 20 circuitos mais carregados totalizando 100 contingências de 2ª ordem. Isto representaria  $100/703 = 14,22\%$  de todas as contingências de 2ª ordem. Entretanto, como se vê na Tabela 4.11, somente 12,75% do número total de contingências está sendo coberto. Na verdade, algumas combinações são repetidas e/ou há casos com isolamento de barras ou sistemas ilhados, os quais são tratados separadamente. Interpretações similares podem ser feitas para os demais casos. O termo “Acertos em 10” é usado para indicar o número de classificações corretas de contingências de 2ª ordem dentro das 10 primeiras posições. A mesma interpretação pode ser feita para o termo “Acerto



em 50”. Em vermelho estão destacados os piores percentuais e em azul os melhores. Além disso, estão indicados os percentuais do número de contingências avaliadas e as médias para os casos analisados.

Tabela 4-11: Sistema IEEE–RTS 24 Barras – Contingências de 2ª Ordem (10,89%)

		Estratégia de Redução	Acertos em 10	Acertos em 50	Contingências Analisadas
Índices de Classificação	$PI_M PI_T$	$\eta_{rank} = 5 \ \eta_{circ} = 20$	20%	56%	12,75%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 5$	80%	60%	9,41%
		$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 10$	70%	74%	10,77%
	$PI_T PI_M$	$\eta_{rank} = 5 \ \eta_{circ} = 20$	70%	64%	12,90%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 5$	100%	64%	9,41%
		$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 10$	100%	82%	9,71%
	$PI_N PI_T$	$\eta_{rank} = 5 \ \eta_{circ} = 20$	70%	80%	13,05%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 5$	90%	62%	9,41%
		$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 10$	80%	66%	10,62%
		<b>Média</b>	<b>75,56%</b>	<b>67,56%</b>	<b>10,89%</b>

Nota-se na Tabela 4.11 que o valor médio de acertos das 10 e 50 primeiras contingências de 2ª ordem foi de 75,56% e 67,56%, respectivamente. Em média somente 10,89% do total de contingências de 2ª ordem foram analisadas para este sistema.

Tabela 4-12: Sistema IEEE–RTS 24 Barras – Contingências de 2ª Ordem (41,71%)

		Estratégia de Redução	Acertos em 10	Acertos em 50	Contingências Analisadas
Índices de Classificação	$PI_M PI_T$	$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 40$	90%	92%	46,43%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 10$	90%	92%	40,97%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 20$	100%	96%	37,63%
	$PI_T PI_M$	$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 40$	100%	98%	46,43%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 10$	100%	98%	40,97%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 20$	100%	100%	37,63%
	$PI_N PI_T$	$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 40$	80%	96%	46,74%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 10$	100%	80%	40,97%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 20$	100%	98%	37,63%
		<b>Média</b>	<b>95,56%</b>	<b>94,44%</b>	<b>41,71%</b>

Tabela 4.12 mostra os resultados para três novas estratégias de redução as quais avaliam, em média, 41,71% do total do número de contingências. Claramente, nota-se que o número de acertos aumenta para 95,56% e 94,44% para as 10 e 50 primeiras contingências de 2ª ordem, respectivamente.

Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam os resultados para a classificação das contingências de 3ª ordem.

Tabela 4-13: Sistema IEEE–RTS 24 Barras – Contingências de 3ª Ordem (1,90%)

		Estratégia de Redução	Acertos em 10	Acertos em 50	Contingências Analisadas
Índices de Classificação	$PI_M PI_T$	$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 20$	<b>20%</b>	<b>36%</b>	2,25%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 5$	80%	60%	1,52%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 10$	<b>90%</b>	<b>80%</b>	1,81%
	$PI_T PI_M$	$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 20$	60%	54%	2,20%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 5$	70%	48%	1,65%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 10$	<b>90%</b>	50%	1,77%
	$PI_N PI_T$	$\eta_{rank} = 10 \ \eta_{circ} = 20$	60%	64%	2,31%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 5$	50%	50%	1,79%
		$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 10$	80%	50%	1,79%
		<b>Média</b>	<b>66,67%</b>	<b>54,67%</b>	<b>1,90%</b>

Tabela 4-14: Sistema IEEE–RTS 24 Barras – Contingências de 3ª Ordem (7,52%)

		Estratégia de Redução	Acertos em 10	Acertos em 50	Contingências Analisadas
Índices de Classificação	$PI_M PI_T$	$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 40$	90%	86%	8,61%
		$\eta_{rank} = 80 \ \eta_{circ} = 10$	<b>100%</b>	86%	6,41%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 20$	90%	<b>92%</b>	8,10%
	$PI_T PI_M$	$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 40$	90%	90%	8,26%
		$\eta_{rank} = 80 \ \eta_{circ} = 10$	<b>100%</b>	<b>68%</b>	6,04%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 20$	<b>100%</b>	74%	7,49%
	$PI_N PI_T$	$\eta_{rank} = 20 \ \eta_{circ} = 40$	<b>70%</b>	88%	8,34%
		$\eta_{rank} = 80 \ \eta_{circ} = 10$	<b>100%</b>	78%	6,54%
		$\eta_{rank} = 40 \ \eta_{circ} = 20$	<b>100%</b>	78%	7,85%
		<b>Média</b>	<b>93,33%</b>	<b>82,22%</b>	<b>7,52%</b>

De acordo com a Tabela 4.13, analisando um percentual de 1,90% do total de contingências de 3ª ordem, foi possível obter uma média de acertos de 66,67%

e 54,67% para as 10 e 50 primeiras contingências, respectivamente. No entanto, para um percentual médio de 7,52% de contingências analisadas (Tabela 4.14), foram encontradas médias de acertos para as 10 e 50 primeiras contingências de 93,33% e 82,22%.

Como esperado, quanto maior o número de combinações (contingências) coberto pela estratégia de redução, melhor classificada é a lista de contingências. Por exemplo, mesmo cobrindo 2% de todas as contingências de 3ª ordem, esta metodologia acerta em média 7 das 10 contingências de maior relevância, enquanto que se 8% das contingências são analisadas, em média 9 das 10 primeiras contingências de maior impacto são identificadas.

De forma a classificar todas as contingências de 1ª, 2ª e 3ª ordens, são gastos aproximadamente 2 segundos. Considerando a utilização das estratégias de redução nas Tabelas 4.11 e 4.13 (associando as correspondentes estratégias de cada linha das tabelas), são necessários somente 0,02 segundos. Já em relação às estratégias das Tabelas 4.12 e 4.14, o programa desenvolvido precisou de apenas 0,05 segundos. Estes valores tornarão mais significantes para os demais sistemas que possuem maiores dimensões.

#### **4.3.3.2 IEEE-RTS 72 Barras**

O sistema IEEE-RTS 72 barras corresponde à interligação de três sistemas IEEE-RTS 24 barras. O sistema original IEEE-RTS 72 barras é descrito na referência [APM99]. Assim como para o sistema IEEE-RTS 24 barras, as injeções de potência foram duplicadas em relação aos dados originais de forma a estressar o sistema de transmissão. Esta alteração tem como objetivo melhor observar a eficiência da metodologia de classificação de contingências através dos diferentes índices de desempenho e estratégias de redução. Uma vez que o sistema original possui grande folga no sistema de transmissão, os resultados seriam muito similares para diferentes critérios de classificação.

Este sistema é composto por 72 barras e 120 circuitos de transmissão, com uma geração total de 20430 MW e demanda de 17100 MW. O número total de

contingências corresponde a: 120 de 1ª ordem, 7140 de 2ª ordem e 280840 de 3ª ordem, totalizando 288100 combinações a serem analisadas. As Tabelas 4.15 e 4.16 mostram os resultados obtidos pela metodologia proposta considerando os mesmos três critérios anteriores para os índices PI e três estratégias de redução de combinações de 2ª e 3ª ordens.

Tabela 4-15: Sistema IEEE–RTS 72 Barras – Contingências de 2ª Ordem (10,05%)

		Estratégia de Redução	Acertos em 10	Acertos em 50	Contingências Analisadas
Índices de Classificação	$PI_M PI_T$	$\eta_{rank} = 15 \ \eta_{circ} = 60$	20%	60%	11,11%
		$\eta_{rank} = 60 \ \eta_{circ} = 15$	70%	88%	9,54%
		$\eta_{rank} = 30 \ \eta_{circ} = 30$	90%	86%	10,20%
	$PI_T PI_M$	$\eta_{rank} = 15 \ \eta_{circ} = 60$	70%	86%	11,21%
		$\eta_{rank} = 60 \ \eta_{circ} = 15$	100%	88%	9,54%
		$\eta_{rank} = 30 \ \eta_{circ} = 30$	100%	76%	8,88%
	$PI_N PI_T$	$\eta_{rank} = 15 \ \eta_{circ} = 60$	100%	78%	11,25%
		$\eta_{rank} = 60 \ \eta_{circ} = 15$	100%	80%	9,57%
		$\eta_{rank} = 30 \ \eta_{circ} = 30$	90%	66%	9,16%
		<b>Média</b>	<b>82,22%</b>	<b>78,67%</b>	<b>10,05%</b>

Tabela 4-16: Sistema IEEE–RTS 72 Barras – Contingências de 3ª Ordem (0,49%)

		Estratégia de Redução	Acertos em 10	Acertos em 50	Contingências Analisadas
Índices de Classificação	$PI_M PI_T$	$\eta_{rank} = 30 \ \eta_{circ} = 60$	40%	46%	0,56%
		$\eta_{rank} = 120 \ \eta_{circ} = 15$	90%	78%	0,45%
		$\eta_{rank} = 60 \ \eta_{circ} = 30$	50%	68%	0,49%
	$PI_T PI_M$	$\eta_{rank} = 30 \ \eta_{circ} = 60$	20%	34%	0,51%
		$\eta_{rank} = 120 \ \eta_{circ} = 15$	100%	86%	0,45%
		$\eta_{rank} = 60 \ \eta_{circ} = 30$	100%	74%	0,47%
	$PI_N PI_T$	$\eta_{rank} = 30 \ \eta_{circ} = 60$	80%	82%	0,51%
		$\eta_{rank} = 120 \ \eta_{circ} = 15$	90%	86%	0,48%
		$\eta_{rank} = 60 \ \eta_{circ} = 30$	90%	86%	0,47%
		<b>Média</b>	<b>73,33%</b>	<b>71,11%</b>	<b>0,49%</b>

Quanto aos resultados de classificação de contingências de 2ª ordem, ao analisar-se um percentual médio de 10,05% do total de combinações, obteve-

se uma média de acertos de 82,22% e 78,67% para as 10 e 50 primeiras contingências, respectivamente.

Para a análise de 3ª ordem, o número médio de acertos é de 73,33% e 71,11% para as 10 e 50 primeiras contingências classificadas, respectivamente. Neste caso, o percentual médio de combinações analisadas foi de somente 0,49%, i.e. 1376 contingências. Claramente, trata-se de um excelente desempenho com relação à identificação das contingências mais severas ao analisar um número tão reduzido de combinações.

Na avaliação dos casos nas Tabelas 4.15 e 4.16 (associando as correspondentes estratégias de cada linha das tabelas) foram necessários em média apenas 0,23 segundos. Caso todas as 288100 contingências fossem avaliadas, seria necessário um tempo computacional de quase 12 minutos para a criação de uma lista completa de contingências.

Destes resultados pode-se concluir que a metodologia proposta foi capaz de classificar corretamente 100% das contingências de 1ª ordem, quase 80% de 2ª ordem e superior a 70% das contingências de 3ª ordem (considerando os acertos entre as 50 contingências de maior severidade) com um ganho computacional maior do que 3000 vezes (i.e.  $12 \times 60 / 0.23 \cong 3130$ ).

#### **4.3.3.3 IEEE 118 Barras**

Este sistema é composto por 118 barras e 186 circuitos de transmissão, sendo 19 barras de geração com capacidade de 4860 MW e 99 barras de carga com demanda de 4242MW. O número total de contingências a ser analisadas é de 186 de 1ª ordem, 17205 de 2ª ordem e 1055240 de 3ª ordem, totalizando 1072631 combinações a serem classificadas.

Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam os resultados considerando diferentes critérios de índices PI para a classificação das contingências de 2ª e 3ª ordens, juntamente a algumas estratégias para a redução de combinações.

Para a classificação de contingências de 2ª ordem, em média 9,79% do número total de combinações foram avaliadas pela metodologia proposta a partir da seleção das estratégias de redução. Observa-se que em média 87,78% e 75,56% de acertos foram encontrados para as 10 e 50 primeiras contingências, respectivamente. Na análise de 3ª ordem, a lista encontrada apresentou um percentual médio de acertos de 93,33% e 73,56% para as 10 e 50 primeiras contingências classificadas, respectivamente. Neste caso, o percentual médio de combinações analisadas foi de somente 0,32%.

Tabela 4-17: Sistema IEEE 118 Barras – Contingências de 2ª Ordem (9,79%)

		Estratégia de Redução	Acertos em 10	Acertos em 50	Contingências Analisadas
Índices de Classificação	$PI_M PI_T$	$\eta_{rank} = 20 \quad \eta_{circ} = 100$	100%	92%	11,03%
		$\eta_{rank} = 100 \quad \eta_{circ} = 20$	80%	54%	10,07%
		$\eta_{rank} = 45 \quad \eta_{circ} = 45$	90%	70%	8,26%
	$PI_T PI_M$	$\eta_{rank} = 20 \quad \eta_{circ} = 100$	100%	94%	11,03%
		$\eta_{rank} = 100 \quad \eta_{circ} = 20$	80%	58%	10,07%
		$\eta_{rank} = 45 \quad \eta_{circ} = 45$	90%	74%	8,26%
	$PI_N PI_T$	$\eta_{rank} = 20 \quad \eta_{circ} = 100$	100%	96%	11,03%
		$\eta_{rank} = 100 \quad \eta_{circ} = 20$	60%	62%	10,07%
		$\eta_{rank} = 45 \quad \eta_{circ} = 45$	90%	80%	8,26%
		<b>Média</b>	<b>87,78%</b>	<b>75,56%</b>	<b>9,79%</b>

Tabela 4-18: Sistema IEEE 118 Barras – Contingências de 3ª Ordem (0,32%)

		Estratégia de Redução	Acertos em 10	Acertos em 50	Contingências Analisadas
Índices de Classificação	$PI_M PI_T$	$\eta_{rank} = 40 \quad \eta_{circ} = 100$	80%	76%	0,33%
		$\eta_{rank} = 200 \quad \eta_{circ} = 20$	90%	50%	0,36%
		$\eta_{rank} = 90 \quad \eta_{circ} = 45$	80%	58%	0,27%
	$PI_T PI_M$	$\eta_{rank} = 40 \quad \eta_{circ} = 100$	100%	98%	0,34%
		$\eta_{rank} = 200 \quad \eta_{circ} = 20$	100%	76%	0,35%
		$\eta_{rank} = 90 \quad \eta_{circ} = 45$	100%	86%	0,28%
	$PI_N PI_T$	$\eta_{rank} = 40 \quad \eta_{circ} = 100$	90%	86%	0,35%
		$\eta_{rank} = 200 \quad \eta_{circ} = 20$	100%	60%	0,33%
		$\eta_{rank} = 90 \quad \eta_{circ} = 45$	100%	72%	0,29%
		<b>Média</b>	<b>93,33%</b>	<b>73,56%</b>	<b>0,32%</b>

É interessante observar que embora um número muito pequeno de contingências de 3ª ordem tenha sido analisado pela metodologia proposta, obteve-se mais do que 90% de classificações corretas entre as 10 contingências mais críticas e acima de 70% entre as 50 mais severas. Conforme explicado, estas contingências de 3ª ordem foram obtidas combinando-se as contingências de 2ª ordem de maior impacto para o sistema com os correspondentes circuitos de maiores carregamentos.

A partir da metodologia desenvolvida, foi necessário em média 0,73 segundos para avaliar todos os casos apontados nas Tabelas 4.17 e 4.18 (associando as correspondentes estratégias de cada linha das tabelas). Na hipótese de se avaliar todas as 1072631 contingências, seriam necessárias 2 horas e 22 minutos. Pode-se concluir que 100% das contingências de 1ª ordem, 88% de 2ª ordem e 93% de 3ª ordem foram corretamente classificadas dentro das 10 contingências de maior impacto. Considerando as 50 contingências de maior severidade: 100%, 76% e 74% foram os percentuais médios de acertos para classificação das contingências de 1ª, 2ª e 3ª ordens, respectivamente. Um ganho computacional maior do que 10000 vezes foi alcançado ( $144 \times 60 / 0,73 \cong 11671$ ) o que demonstra a eficiência da metodologia ao classificar contingências, inclusive, para sistemas de maiores dimensões.

Claramente, estes resultados podem ser melhorados na medida em que se aumenta o número de contingências cobertas (i.e. aumento dos valores de  $\eta_{rank}$  e  $\eta_{circ}$ ). O usuário deve sempre decidir sobre a definição destes parâmetros considerando o tempo computacional disponível. Tendo um tempo de análise de 5 segundos, a seguinte estratégia de redução pode ser especificada: contingências de 2ª ordem  $\Rightarrow \eta_{rank} = 100$  e  $\eta_{circ} = 100$ ; contingências de 3ª ordem  $\Rightarrow \eta_{rank} = 200$  e  $\eta_{circ} = 100$ . Neste caso, 44% das contingências de 2ª ordem são analisadas com 100% e 96% de acerto entre as 10 e 50 contingências mais críticas para o sistema. Para contingências de 3ª ordem, 1,4% são avaliadas com 93% e 91% de acerto entre as 10 e 50 contingências mais severas para o sistema de transmissão.

Mediante os novos índices PI propostos, é possível classificar contingências corretamente, obtendo uma lista cujas primeiras posições se encontram as contingências que provocam as maiores violações ou sobrecargas e posteriormente aquelas que não trazem problemas para o sistema. Estas últimas podem ainda ser classificadas utilizando-se um índice relacionado ao carregamento total do sistema ( $PI_w$ ), que neste caso é o mais indicado.

Conclui-se desta forma que a avaliação de contingências de ordens superiores a 1 para sistemas de grandes dimensões se torna inviável sem uma estratégia de redução devido ao elevado tempo computacional exigido. Ademais, comprova-se que um número reduzido de avaliações de contingências selecionadas de forma eficiente proporciona altos índices de acertos, favorecendo a utilização da metodologia proposta para classificação de contingências de 2ª e 3ª ordens ou superiores. De uma forma geral, piores resultados foram encontrados ao usar valores pequenos para  $\eta_{rank}$ . Portanto, é interessante que ao se usar uma estratégia de redução, uma amostra maior de contingências da ordem anterior seja combinada com os seus respectivos circuitos de maiores carregamentos para uma melhor classificação de contingências de ordem superior.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Inicialmente é discutido neste capítulo a adoção de critérios de segurança na solução do problema PET tendo resultado na publicação dos seguintes trabalhos [LRMA10, RLM10]. Um estudo é apresentado incluindo ou não o critério determinístico “N-1” como uma restrição a ser atendida pelo sistema de transmissão. Após levantamento de índices de confiabilidade para ambas condições, observa-se que redes que atendem ao critério de segurança “N-1” possuem um elevado investimento, embora apresentem excelentes índices de confiabilidade. Quando somente o critério da rede intacta é atendido, menores investimentos são necessários e ainda assim é possível encontrar bons índices de confiabilidade, principalmente quando se adota um modelo de curva horária para a representação da demanda. Embora tais índices possam mensurar o



nível de confiabilidade de um sistema, companhias do setor elétrico não possuem um consenso sobre quais valores destes índices indicam um sistema de potência com uma qualidade aceitável.

Embora pareça que o critério de segurança “N-1” não seja a melhor escolha, já que há uma elevada tarifa a ser recuperada, esta tem sido a estratégia adotada pela maioria das companhias ao redor do mundo. Contudo, de forma a evitar um elevado investimento, o critério de segurança “N-1” deve ser atendido somente nas áreas mais vitais do sistema, as quais necessitam ser definidas com cuidado principalmente em sistemas reais de grande porte.

Na Seção 4.3 é apresentada uma nova metodologia de classificação de contingências de sistemas de transmissão baseada em novos índices de desempenho ( $PI_T$ ,  $PI_M$ ,  $PI_N$ ,  $PI_W$ ) que traduzem o real impacto de contingências quanto a sobrecargas e em estratégias de redução do número de avaliações de 2ª e 3ª ordens. Além das vantagens de poder classificar as contingências mais severas em um menor tempo computacional sem comprometer a qualidade das listas e permitir uma classificação baseada em índices de desempenho que indicam realmente os pontos com maiores sobrecargas e violações do sistema, esta metodologia pode ser usada para a adoção de um novo critério de segurança a ser atendido na solução do problema PET.

Por exemplo, o critério de segurança “N-1” pode ser substituído por um critério um pouco menos rigoroso: garantir que os planos de expansão atendam a um índice  $PI_M < 0,2$  para contingências de 1ª ordem. Isto significa que é aceitável que o sistema de transmissão sob planejamento tenha sobrecargas de até 20% considerando contingências de 1ª ordem dentro da área ou zona de interesse para o planejamento. Neste caso, um menor investimento é exigido e mesmo assim é possível encontrar planos de expansão com uma boa qualidade de fornecimento de energia. Ao adotar o critério de segurança “N-1”, é necessário em alguns casos a adição de inúmeros circuitos para resolver problemas de sobrecargas locais de pequena intensidade, i.e. até 5%. Um critério de, por exemplo, 20% é aceitável já que estados de operação com este nível de

sobrecarga são acomodados pelos limites estáticos do sistema durante um determinado intervalo de tempo. Geralmente os circuitos de transmissão possuem diferentes níveis de capacidade para as condições de operação normal e de emergência. Outro fato é que o sistema enfrenta condições de carga pico durante pequenos intervalos de tempo, sendo muito cautelosa a adoção do critério de segurança “N-1”.

No próximo capítulo é apresentada a metodologia final para a solução de problemas PET incluindo a adoção de critério de segurança através de índices de desempenho. Adicionalmente, estes índices também auxiliam a criação da lista de ramos (circuitos) elegíveis para receberem reforços durante o planejamento da expansão da transmissão. Estudos são apresentados considerando o sistema Garver modificado (caso-base com todas as barras interconectadas) e um sistema real composto por aproximadamente 2000 circuitos de transmissão.

# CAPÍTULO 5

## PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE GRANDE PORTE

### 5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como principal objetivo mostrar a aplicação da metodologia proposta neste trabalho de tese em um sistema real de grande porte. Com esta finalidade, o programa computacional *PLANNER* foi desenvolvido o qual inclui as ferramentas *TRANK*, responsável pela classificação de contingências de transmissão através de índices de desempenho conforme discutido no Capítulo 4, e *TEPOP* que executa o planejamento da expansão da transmissão através de otimização baseada na metaheurística ES. Assim, a ferramenta *TRANK* é responsável por apontar os pontos do sistema de potência com as condições de operação mais estressantes que correspondem aos ramos mais indicados para receberem possíveis reforços ao usar a ferramenta *TEPOP* que, por sua vez, irá fornecer os melhores planos de expansão incluindo o atendimento a critérios de segurança baseado em índices de desempenho.

Inicialmente, as ferramentas *TRANK* e *TEPOP* são apresentadas para o estudo de um sistema de pequeno porte (*GARVER* modificado) de forma a melhor compreender suas funcionalidades. Posteriormente um estudo de planejamento é realizado considerando um sistema real de grande dimensão. Por se tratar de uma aplicação em um sistema composto de aproximadamente 2000 circuitos de transmissão, a ferramenta *TEPOP* foi desenvolvida para a solução do problema PET considerando uma abordagem estática, ou seja, neste capítulo não será abordado o problema PET com cronologia de reforços. A maior dificuldade em se considerar uma abordagem dinâmica diz respeito às inúmeras avaliações de PL necessárias para que o sistema atenda ao critério de segurança baseado nos índices de desempenho propostos. Um estudo cujo critério seja atender somente a rede intacta implica em uma grande redução do

esforço computacional, contudo os planos de expansão apontados podem não resultar em um sistema com a qualidade de fornecimento de energia esperada.

## 5.2 AMBIENTE PLANNER

Nesta seção o programa *PLANNER* é apresentado destacando as principais interfaces com o usuário e as funcionalidades de suas ferramentas *TRANK* e *TEPOP*. O programa foi desenvolvido a partir de um projeto de pesquisa e desenvolvimento. A Figura 5.1 mostra a janela inicial.

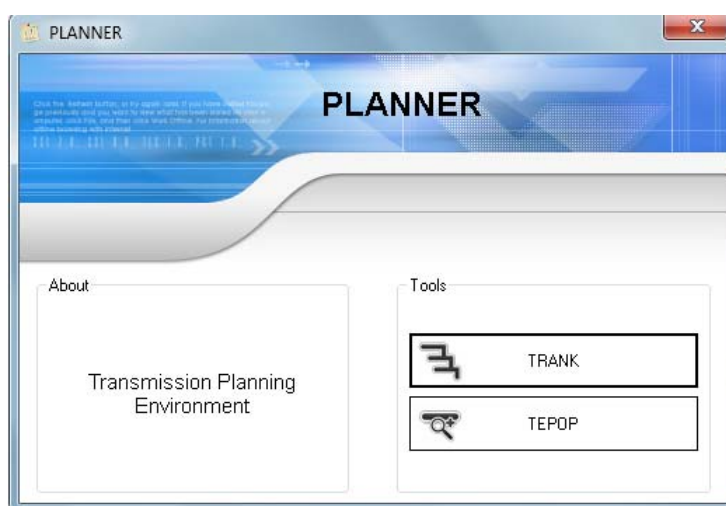


Figura 5-1: Programa PLANNER

Será mostrada uma aplicação considerando uma versão modificada do sistema GARVER, a qual inclui uma conexão entre as barras 4 e 6 em relação ao sistema original apresentado na Seção 4.2. Os parâmetros desta conexão correspondem àqueles definidos na Tabela 4.3. A adição deste circuito ao sistema se fez necessária uma vez que na classificação de contingências pela ferramenta *TRANK* não podem haver barras ou subsistemas ilhados no caso base. Os dados de geração e carga são os mesmos conforme informado para o ano de referência na Tabela 4.1.

### 5.2.1 Classificação de Contingências de Transmissão – *TRANK*

Ao escolher a ferramenta *TRANK*, o usuário tem a opção de carregar o arquivo, o qual pode estar no formato das versões PSS/E-26 ou PSS/E-30 usadas no programa de análise de sistemas de potência da *Siemens Power Technologies International* – PTI. Ao clicar no botão “Load” e selecionar o arquivo de dados, o mesmo é carregado e apresentado conforme Figura 5.2.

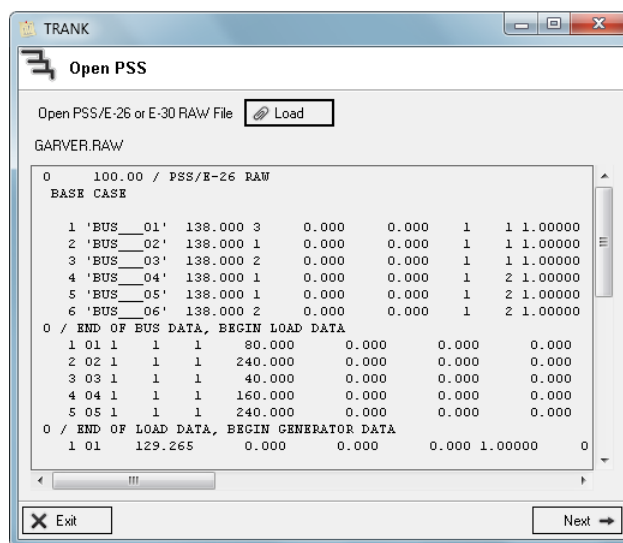


Figura 5-2: Arquivo de Dados – Ferramenta *TRANK*

No próximo passo deve-se definir as informações a serem usadas pela ferramenta *TRANK* assim como especificar as zonas de interesse do sistema a serem estudadas. Estas etapas são acessadas pressionando o botão “Next”. Primeiramente, o usuário faz a opção por realizar uma classificação de contingências de 1ª, ou 1ª e 2ª, ou 1ª, 2ª e 3ª ordens em “Contingency Order Evaluation”. As informações definidas em “Parameters” e “Number of Contingencies to be Printed” devem ser ajustadas de acordo com a opção escolhida em “Contingency Order Evaluation”. Ao selecionar uma análise de contingências de 1ª ordem, o usuário precisa definir somente o número de contingências de 1ª ordem que será impresso, embora todas serão avaliadas. Por outro lado, ao escolher uma análise de 1ª e 2ª ordens, os parâmetros  $\eta_{rank1}$  e  $\eta_{circ1}$ , os quais indicam as contingências de 1ª ordem de maior severidade e seus respectivos circuitos com maiores carregamentos, devem ser definidos juntamente com o número de contingências de 1ª e 2ª ordens a serem impressas. O usuário

precisa fornecer os valores para  $\eta_{rank1}$ ,  $\eta_{circ1}$ ,  $\eta_{rank2}$  e  $\eta_{circ2}$ , onde os dois últimos referem-se as contingências de 2ª ordem de maior severidade e seus circuitos com maiores carregamentos, e o número de contingências a serem impressas de 1ª, 2ª e 3ª ordens somente para o caso onde se deseja fazer um estudo de classificação de contingências de 1ª, 2ª e 3ª ordens.

O usuário deve também escolher como classificar as contingências em “Contingency Classification Criteria” através dos índices de desempenho  $PI_T$  “summation of overloads”,  $PI_N$  “number of overloads” e  $PI_M$  “maximum overload” conforme definido na Seção 4.3.2.1. Vale lembrar que o índice de desempenho  $PI_W$  é usado como critério para classificar contingências que não proporcionam qualquer violação nas capacidades dos demais circuitos do sistema de transmissão. No item “Capacity”, são definidos os níveis para as capacidades das linhas e transformadores do sistema de acordo com o padrão adotado pela PTI (A, B ou C). Diferentes capacidades podem ser definidas para um único circuito indicando diferentes regimes de operação do sistema, por exemplo, normal, emergência, etc. O usuário também tem a opção por escolher o maior valor entre as capacidades A, B ou C. Finalmente, através do item “Optimization Option”, o usuário pode decidir sobre usar ou não um programa de otimização linear para ajustar o caso-base em caso de violações no sistema de transmissão devido ao despacho proposto para as unidades de geração.

Figura 5.3 apresenta os valores escolhidos para o sistema Garver modificado. Nota-se que os parâmetros  $\eta_{rank1}$ ,  $\eta_{circ1}$ ,  $\eta_{rank2}$  e  $\eta_{circ2}$  foram escolhidos de forma a avaliar todas as contingências de 1ª, 2ª e 3ª ordens. Por exemplo, para o sistema Garver modificado, o qual possui sete circuitos, temos  ${}^7C_2 = 21$  contingências de 2ª ordem. Ao definir-se  $\eta_{rank1} = 7$  e  $\eta_{circ1} = 6$ , 42 combinações seriam analisadas, i.e. cada contingência de 2ª ordem seria analisada duas vezes, no entanto a ferramenta *TRANK* verifica a cada combinação se a mesma já foi analisada evitando assim repetições. A mesma interpretação pode ser feita para  $\eta_{rank2}$  e  $\eta_{circ2}$ .

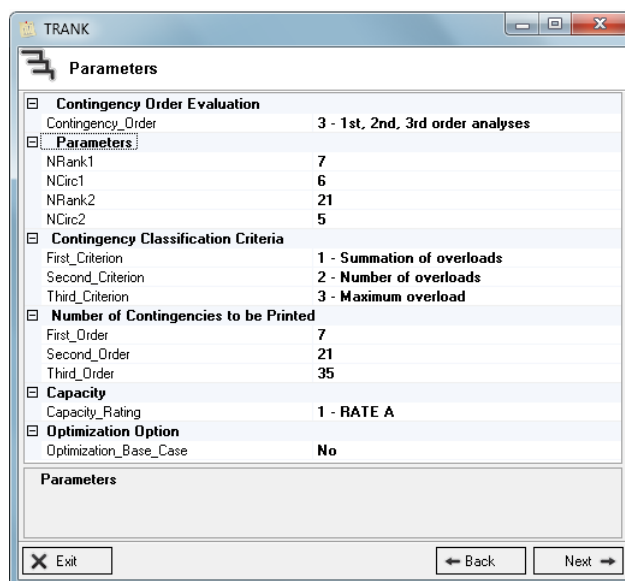


Figura 5-3: Definição de Parâmetros – Ferramenta *TRANK*

No próximo passo, o usuário pode escolher algumas contingências de 2ª e 3ª ordens extras que ele ache importante serem avaliadas. A finalidade é obrigar a análise destas combinações uma vez que nem todas contingências de 2ª e 3ª ordens são analisadas a depender da estratégia de redução definida pelos parâmetros  $\eta_{rank1}$ ,  $\eta_{circ1}$ ,  $\eta_{rank2}$  e  $\eta_{circ2}$  (como todas contingências serão analisadas para este sistema, não justifica incluir contingências adicionais a serem avaliadas).

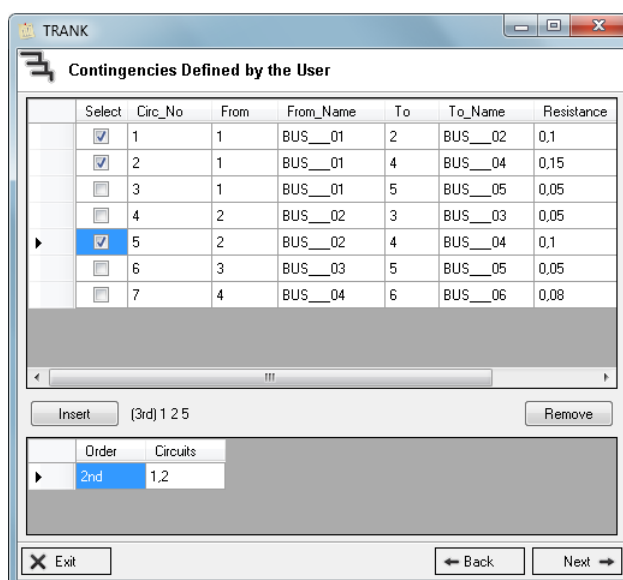


Figura 5-4: Contingências Definidas pelo Usuário – Ferramenta *TRANK*

A Figura 5.4 mostra esta etapa, onde todos os circuitos são apresentados. Ao marcar dois ou três circuitos na coluna “Select”, é permitido ao usuário inserir esta contingência a partir do botão “Insert”.

Ao clicar no botão “Next”, o usuário deve escolher as zonas de interesse para a avaliação das contingências, como mostrado na Figura 5.5. Somente as contingências e carregamentos dos circuitos dentro da zona de interesse são monitorados e avaliados pela ferramenta *TRANK*. Como se trata de um sistema de pequena dimensão, todas as zonas são escolhidas para análise. Terminado estes passos, a ferramenta *TRANK* está pronta para iniciar a classificação de contingências através do botão “Next”.

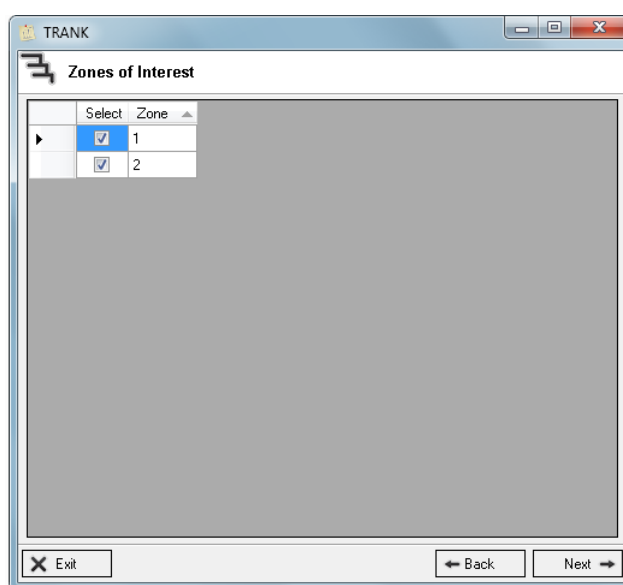


Figura 5-5: Zonas de Interesse – Ferramenta *TRANK*

Ao final da avaliação feita pela ferramenta *TRANK*, o usuário pode acessar cinco arquivos conforme descrito a seguir: “Ranking List of Contingencies” contém as contingências classificadas de acordo com o critério escolhido pelos índices de desempenho; “Island Contingencies List” aponta as contingências que resultam em isolamento de barras e sistemas; “Base Case” apresenta o resultado do caso-base; “DC Power Flow Results” indica o resultado do fluxo de potência DC com e sem perdas para o caso-base (se não é permitido redespacho para solução do caso-base, os arquivos “Base Case” e “DC Power Flow Results” possuem o mesmo resultado); e “Messages” contém demais mensagens sobre a execução da ferramenta *TRANK*.



### 5.2.2 Planejamento da Expansão da Transmissão – *TEPOP*

Ao escolher a ferramenta *TEPOP*, novamente o usuário tem a opção de carregar um arquivo de dados, o qual deve estar no formato da versão PSS/E-26 ou PSS/E-30 do programa de análise de potência da PTI. Após carregar o arquivo, é necessário primeiramente definir as zonas de interesse para a solução do problema PET, assim como mostrado na Figura 5.5. Ramos elegíveis a receber reforços serão considerados somente nestas zonas.

Uma das principais etapas quanto à solução do problema PET é a definição dos ramos elegíveis a receber reforços, uma vez que o processo de otimização irá encontrar os melhores planos de expansão de acordo com a definição destes ramos. Definir todas as possíveis conexões entre as barras como ramos elegíveis pode se tornar uma estratégia inviável devido ao esforço computacional que será exigido durante as buscas. Como solução a este problema, é proposto a utilização da ferramenta *TRANK* que através da solução do caso-base e da classificação de contingências de 1ª ordem pode ser extremamente útil para indicar estes ramos. A partir da definição da configuração da rede e das condições de geração e carga para o horizonte de planejamento, é possível criar um conjunto de ramos elegíveis composto pelos circuitos que exibem violações de carregamento no caso-base e as contingências de 1ª ordem que resultam em um número de violações maior que o caso-base. Assim, a ferramenta *TRANK* é automaticamente executada considerando somente a análise de contingências de 1ª ordem antes que a ferramenta *TEPOP* inicie a busca pelos melhores planos de expansão.

Aliada a esta estratégia para a definição dos ramos elegíveis, se desejado, o usuário pode, durante a definição das informações para a execução da ferramenta *TEPOP*, definir novas conexões informando os valores de resistência, reatância, capacidades destas conexões, etc. para cada novo ramo elegível a receber reforços.

Durante o processo de otimização, os planos são avaliados através de uma análise seguindo uma programação linear (PL) baseada em fluxo de potência

DC de forma a minimizar o corte de carga, Equação 2.5. A cada execução do PL, é permitido um redespacho das unidades geradoras. Considerando a atividade de planejamento nas companhias elétricas, trata-se de uma ação comum, uma vez que novos reforços estão sendo adicionados na rede. Enquanto planos de expansão com corte de carga são encontrados pelo processo de otimização, a função heurística dada pela Equação 2.7 é usada para orientar a adição de reforços dentro do conjunto de ramos elegíveis definidos para o sistema. Se um plano de expansão sem corte de carga é encontrado pelo processo de otimização, este plano também deve ser avaliado para atender ao critério de segurança não sendo permitido o redespacho de geração. Nesta etapa, caso o plano de expansão não atenda ao critério de segurança, o índice de desempenho calculado para cada contingência de 1ª ordem é usado como função heurística para a adição de novos reforços: quanto maior o índice de uma contingência, maior a chance deste ponto ser reforçado.

Ao usar esta metodologia, surge um problema: o despacho original usado para selecionar os ramos elegíveis a receber reforços é diferente do novo despacho quando o plano de expansão é avaliado para atender ao critério de segurança. Como as condições de operação da rede são diferentes, as conexões com maiores carregamentos também podem ser diferentes e os ramos elegíveis a receber reforços podem não ser suficientes para atender ao critério de segurança definido pelo índice de desempenho, por exemplo  $PI_M$ . Este problema é resolvido adicionando todas as contingências que violam o critério  $PI_M$  que não foram previamente incluídas na lista de ramos elegíveis criada pela ferramenta *TRANK* e as opções informadas pelo usuário. A definição da lista de ramos elegíveis consiste, portanto, de um processo dinâmico que também ocorre durante a otimização do problema PET.

Após definida as zonas de interesse, deve-se selecionar a ordem de mérito para o despacho de geração dentro destas zonas, conforme Figura 5.6. As unidades de geração pertencentes a zonas externas têm seu despacho mantido constante. Trata-se de uma importante característica da ferramenta *TEPOP* uma vez que diferentes ordens de mérito para o despacho conduzem a planos de

expansão com diferentes pontos a serem reforçados. Esta ordem de mérito é definida usando números entre 1 e 9, onde 1 indica que a barra de geração tem prioridade para ser despachada, por exemplo, devido a um menor custo operacional. Barras de geração associadas ao número 9, unidades com alto custo de operação, serão solicitadas a despacharem somente se as demais unidades não forem suficientes para atender a demanda.

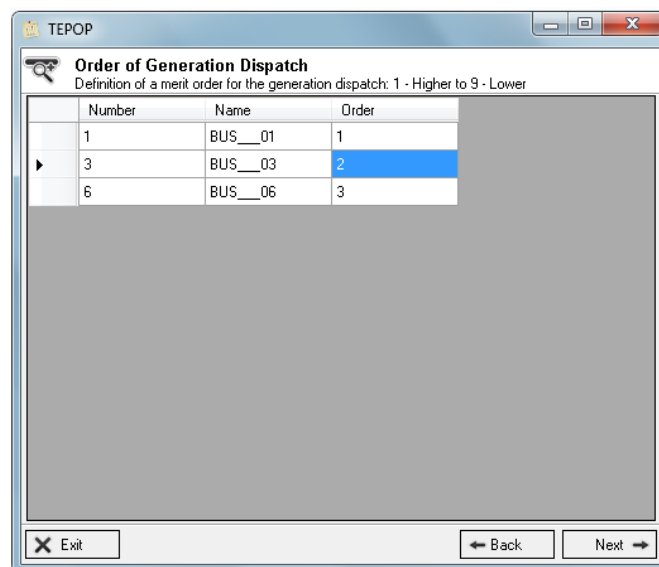


Figura 5-6: Ordem de Despacho de Geração – Ferramenta *TEPOP*

Ao definir uma ordem de despacho procura-se representar os custos operacionais envolvidos com o fornecimento de energia pelas unidades geradoras. A cada avaliação dos planos de expansão são incluídas prioridades para o despacho e embora os custos operacionais com o despacho pudessem ser incluídos na função objetivo, equações 2.4 e 2.12, como o planejamento da expansão do sistema é feito para a carga pico, haveria uma dificuldade para representar os gastos anuais envolvidos com cada alternativa de expansão. Nos custos relacionados a perdas ôhmicas é utilizada uma mesma tarifa de compra de energia em qualquer ponto do sistema, equações 2.8 e 2.9, sendo possível obter um valor associado a curva de carga do sistema. Os custos operacionais de geração do sistema, por outro lado, dependem muito do nível de demanda ao longo do ano. Em um momento de menor demanda, as gerações de menor custo seriam solicitadas a despacharem o máximo possível, contudo o despacho sempre ficará condicionado aos limites de

transmissão do sistema. Portanto, é difícil prever o custo operacional anual uma vez que seria necessário avaliar todas as condições de demanda ao longo do ano para cada configuração de expansão durante o processo de otimização.

Quanto aos custos relacionados a perdas ôhmicas, diferentemente dos capítulos anteriores, os mesmos não serão incluídos na função objetivo dos estudos apresentados a seguir, embora o modelo de avaliação baseado em fluxo DC inclua o cálculo de perdas ôhmicas para o sistema, as quais são atribuídas adequadamente nas barras  $i$  e  $j$ . Esta consideração advém do estudo do sistema de grande porte que apresentou uma limitação para a inclusão dos custos relacionados a perdas ôhmicas. Como será comentado mais adiante, houve necessidade de se reduzir o sistema de grande porte para a zona de interesse de estudo. Esta redução foi feita utilizando uma ferramenta do programa da PTI para obtenção de sistemas equivalentes baseada em reduções de *Ward* [W49].

Ao usar esta metodologia de redução, grande parte das barras pertencentes às regiões externas à de interesse são eliminadas e são criadas novas conexões na região de fronteira além de impedâncias shunts. Estes elementos são criados de forma a representar toda a condição de fluxo externo à região de interesse. Como resultado, surgem várias conexões com valores de resistências negativas que não fazem sentido para o cálculo do custo relacionado a perdas ôhmicas. Embora estas perdas ôhmicas negativas possam ser representadas como geração, e isto é feito adequadamente pela metodologia desenvolvida, informações dos valores reais de resistência da região externa são perdidos com a redução e conseqüentemente a avaliação dos custos de perdas ôhmicas do sistema é prejudicada durante o processo de otimização. Portanto, a metodologia adotada neste capítulo tem como objetivo minimizar somente os custos de investimento do sistema de transmissão e inserir um critério de despacho que minimize os custos operacionais de geração olhando a situação de carga pico. Diferentemente de pequenos sistemas, onde os custos das perdas ôhmicas podem ser determinantes para a definição dos melhores planos de expansão, em sistemas de grande porte, o

montante de perdas é pouco alterado para diferentes configurações não sendo essencial para uma correta classificação dos planos de expansão.

Caso se deseja incluir os custos de perdas na função objetivo, uma alternativa é considerar os custos envolvidos somente com as perdas da região de interesse representadas por ramos com resistências de valor positivo. Contudo ao obter o sistema equivalente, na fronteira entre a região de interesse e externa podem ser criadas conexões com resistências positivas trazendo também incertezas nos cálculos de custos relacionados a perdas ôhmicas.

No próximo passo, Figura 5.7, é possível definir os custos para inserção de novas linhas de transmissão. Os custos por milha são atribuídos de acordo com o nível de tensão. Se uma linha a ser adicionada possuir um nível de tensão não definido pelo usuário, o custo de expansão a ser usado corresponderá ao nível de tensão imediatamente superior.

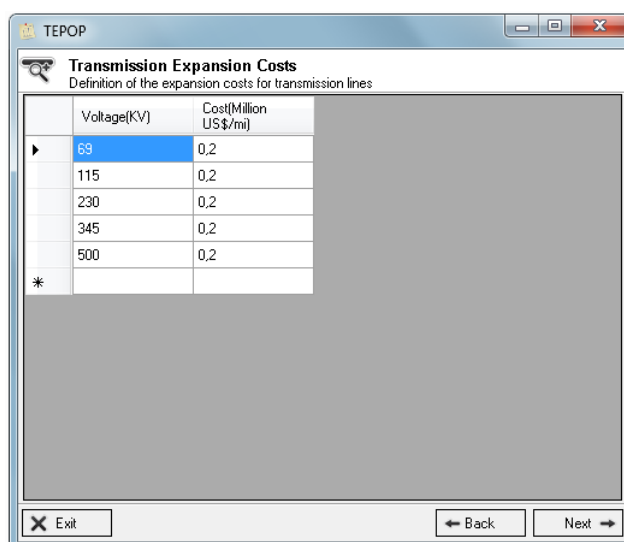
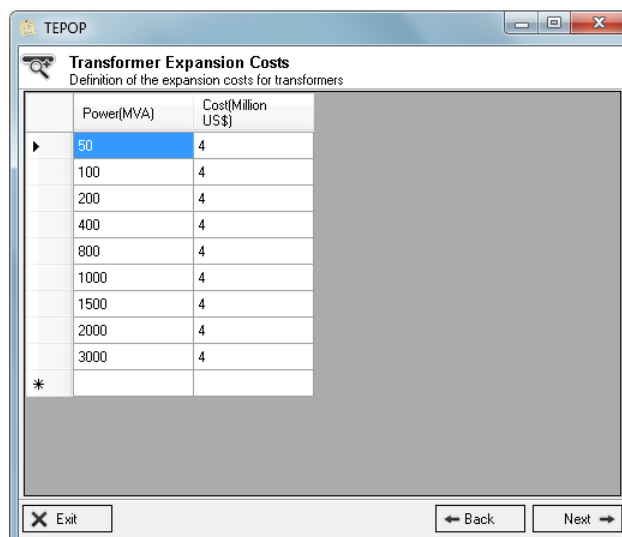


Figura 5-7: Custos de Expansão de Linhas de Transmissão – Ferramenta *TEPOP*

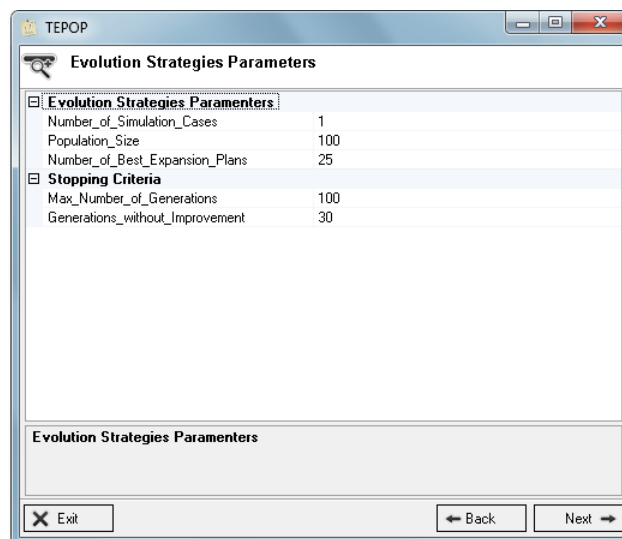
Os custos de investimento para novos transformadores são definidos no próximo passo de acordo com o seu nível de potência em MVA, conforme Figura 5.8. Transformadores com níveis de potência diferente daqueles informados pelo usuário têm seu custo associado ao nível de potência superior mais próximo.



Power(MVA)	Cost(Million US\$)
50	4
100	4
200	4
400	4
800	4
1000	4
1500	4
2000	4
3000	4
*	

Figura 5-8: Custo de Expansão de Transformadores – Ferramenta *TEPOP*

Em seguida deve-se escolher os parâmetros do processo de otimização referente à metaheurística ES, conforme mostrado na Figura 5.9. O parâmetro “Number of Simulation Cases” refere-se ao número de vezes que o processo de busca da metaheurística ES é reiniciado; “Population Size” indica o número de planos de expansão considerados para evoluírem durante o processo de otimização; e “Number of Best Expansion Plans” refere-se ao número de melhores planos de expansão que serão mostrados ao final do programa.



Evolution Strategies Parameters	
Evolution Strategies Parameters	
Number_of_Simulation_Cases	1
Population_Size	100
Number_of_Best_Expansion_Plans	25
Stopping Criteria	
Max_Number_of_Generations	100
Generations_without_Improvement	30

Figura 5-9: Parâmetros da Metaheurística Estratégias de Evolução – Ferramenta *TEPOP*

Adicionalmente, deve-se informar os critérios de interrupção do processo de otimização, ou seja, o número máximo de gerações “Max Number of

Generations” e o número de gerações consecutivas sem que um melhor plano de expansão seja encontrado “Generations Without Improvement”.

No próximo passo, Figura 5.10, deve-se definir os demais parâmetros de planejamento como as capacidades das linhas de transmissão e transformadores “Capacity Rating”, o número máximo de reforços permitidos em cada ramo elegível “Limit for the Reinforcements” e o critério de segurança a ser atendido durante o processo de otimização “Max Violation  $PI_M$ ”. Entre os índices de desempenho propostos no Capítulo 4, o índice  $PI_M$  foi selecionado como o critério de segurança a ser respeitado pela ferramenta *TEPOP* na avaliação de contingências de 1ª ordem. Entretanto, todos os demais índices poderiam ter sido escolhidos, embora o índice  $PI_M$  seja o mais adequado com relação ao problema PET. O objetivo é encontrar planos de expansão com menores investimentos mas que atendam a um critério de segurança mais flexível do que o “N-1”. É importante observar que quanto menor o índice  $PI_M$ , maiores serão os investimentos. Conseqüentemente, se desejado, o critério de segurança “N-1” pode ser atendido bastando atribuir o valor zero para este índice.

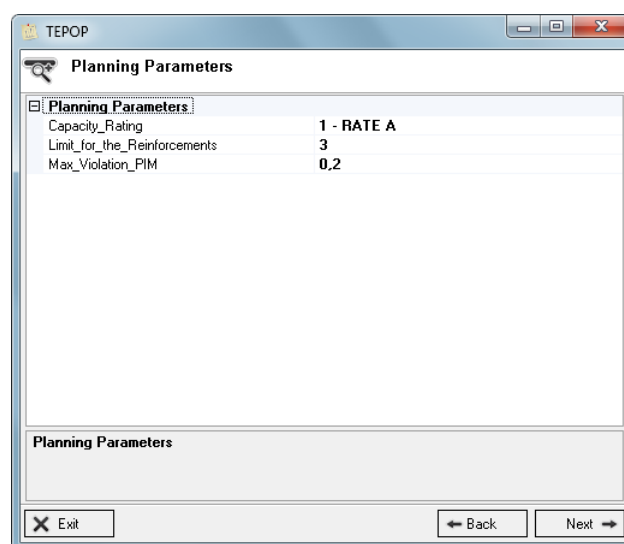


Figura 5-10: Parâmetros de Planejamento – Ferramenta *TEPOP*

Na próxima fase, Figura 5.11, o usuário pode manualmente inserir, dentro das zonas de interesse previamente escolhidas, novos ramos elegíveis a receberem reforços durante o processo de otimização. Estes ramos irão compor o conjunto de ramos elegíveis indicados automaticamente pela ferramenta *TRANK* e pelo

processo dinâmico durante a execução da ferramenta *TEPOP*, conforme explicado no início desta seção. Os dados a serem definidos seguem o padrão do programa da PTI, entretanto, como a ferramenta *TEPOP* realiza análises de fluxo DC, somente é necessário preencher os dados de identificação das barras: “BUS I”, “BUS J”; identificação dos ramos: “CKT”; parâmetros de resistência e reatância: “R”, “X”; capacidades: “RATEA” (“RATEB” e/ou “RATEC” podem ser necessários informando capacidades para diferentes condições de operação do sistema); e comprimento dos ramos: “LEN”.

Bus I	Bus J	CKT	R	X	B	RATEA	RATEB	RATEC	RATIO	ANGLE	GI	BI	GJ	BJ	ST	LEN	O1	F1	O2	F2	O3	F3	O4	F4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0

Figura 5-11: Ramos Elegíveis para Expansão Definidos pelo Usuário – Ferramenta *TEPOP*

Terminado estes passos, a ferramenta *TEPOP* está pronta para iniciar o processo de otimização sendo que no final desta análise, nove arquivos de saída podem ser acessados: “Ranking List of Contingencies”, “Island Contingencies List”, “Base Case”, “DC Power Flow Results”, e “Messages Ranking” referem-se aos resultados da ferramenta *TRANK* usada para obter os ramos elegíveis a receberem reforços durante o processo de otimização, os quais são apontados no arquivo “Eligible Branches to Receive Reinforcements”. Os arquivos restantes correspondem à ferramenta *TEPOP*: “Messages Planning” possui mensagens de acompanhamento de execução do *TEPOP*, “Best Expansion Plans” indica os melhores planos de expansão encontrados pela metaheurística ES e “Generation Dispatches” corresponde aos despachos de geração de cada plano de expansão encontrado pelo ES.

De acordo com as informações desde a Figura 5.6 até 5.11, obtém-se o arquivo “Best Expansion Plans” onde parte do mesmo é mostrado na Figura 5.12, correspondendo ao CASO 1. O arquivo apresenta os melhores planos de expansão obtidos pela ferramenta *TEPOP*, onde o número de reforços em cada ramo é identificado pelo nome e número das barras “FROM” e “TO” e pela identificação do circuito “CKT”. Os respectivos despachos de geração para



cada plano são apresentados no arquivo “Generation Dispatches”, como mostra a Figura 5.13.

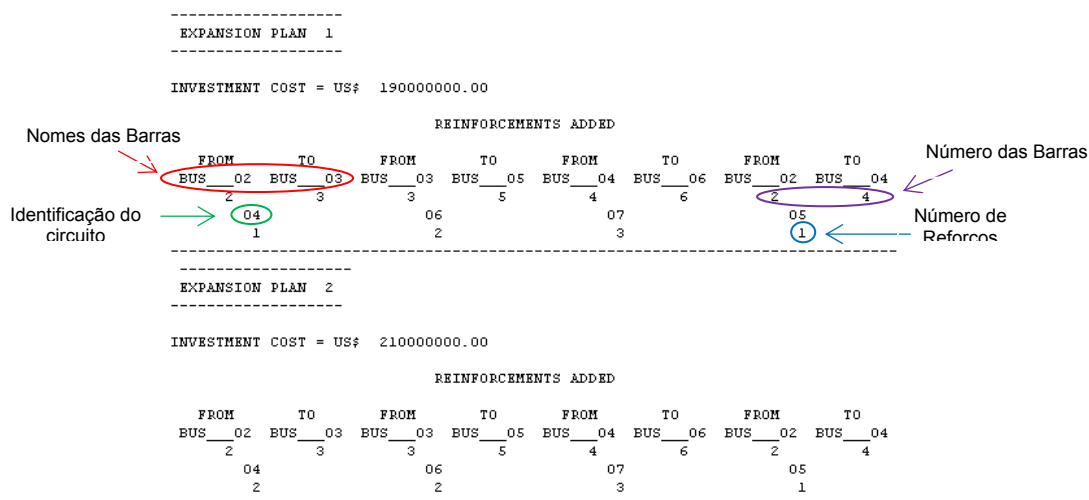


Figura 5-12: Arquivo “Best Expansion Plans” – CASO 1

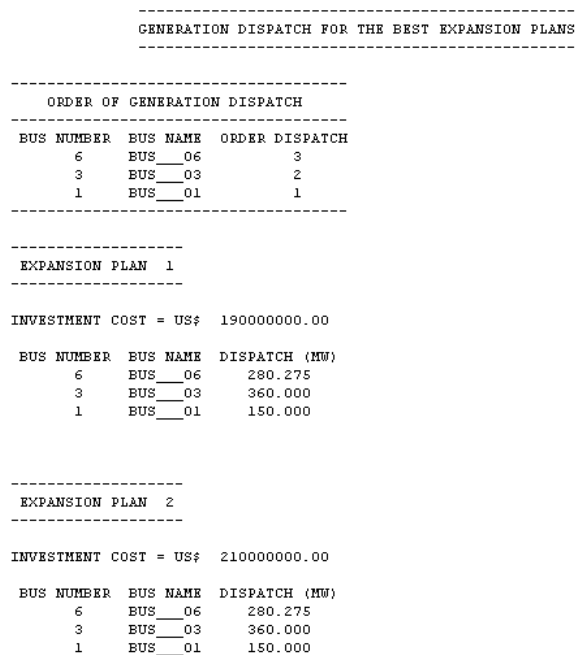


Figura 5-13: Arquivo “Generation Dispatches” – CASO 1

Os resultados do CASO 1, Figuras 5.12 e 5.13, referem-se à ordem de mérito definida na Figura 5.6. onde a geração nas barras 1, 3 e 6 receberam os fatores 1 (menor custo), 2 e 3 (maior custo), respectivamente. Alterando esta ordem de mérito para 3, 1 e 2, a ferramenta *TEPOP* não é capaz de encontrar planos de expansão que atendam ao critério de segurança  $PI_M = 20\%$  tendo como limite máximo a adição de 3 reforços em cada ramo elegível. Nesta

situação, uma das opções é aumentar o número máximo de reforços permitidos a serem adicionados em cada ramo para 4 (CASO 2). Entretanto, como pode ser visto na Figura 5.14, os planos de expansão possuem maiores custos do que aqueles encontrados considerando as ordens de mérito para despacho de geração no CASO 1. Nota-se, portanto, que diferentes planos podem ser obtidos de acordo com a estratégia de despacho da geração.

```

-----
EXPANSION PLAN 1
-----
INVESTMENT COST = US$ 260000000.00

REINFORCEMENTS ADDED

FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
BUS__02  BUS__03  BUS__03  BUS__05  BUS__04  BUS__06  BUS__02  BUS__04
  2         3         3         5         4         6         2         4
   04      06      07      05
   1         2         4         2
-----
EXPANSION PLAN 2
-----
INVESTMENT COST = US$ 260000000.00

REINFORCEMENTS ADDED

FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
BUS__03  BUS__05  BUS__04  BUS__06  BUS__02  BUS__04
  3         5         4         6         2         4
   06      07      05
   3         4         2
-----

```

Figura 5-14: Arquivo “Best Expansion Plans” – CASO 2

```

-----
GENERATION DISPATCH FOR THE BEST EXPANSION PLANS
-----

ORDER OF GENERATION DISPATCH

BUS NUMBER  BUS NAME  ORDER DISPATCH
    6     BUS__06      2
    3     BUS__03      1
    1     BUS__01      3
-----

EXPANSION PLAN 1
-----
INVESTMENT COST = US$ 260000000.00

BUS NUMBER  BUS NAME  DISPATCH (MW)
    6     BUS__06      430.275
    3     BUS__03      360.000
    1     BUS__01       0.000
-----

EXPANSION PLAN 2
-----
INVESTMENT COST = US$ 260000000.00

BUS NUMBER  BUS NAME  DISPATCH (MW)
    6     BUS__06      430.275
    3     BUS__03      360.000
    1     BUS__01       0.000
-----

```

Figura 5-15: Arquivo “Generation Dispatches” – CASO 2

Observando os despachos de geração para o CASO 2, mostrados na Figura 5.15, nota-se que esta ordem de mérito resultou em planos de expansão cuja

demanda foi totalmente atendida pela geração das barras 3 e 6 uma vez que a geração na barra 1 recebeu o maior fator da ordem de mérito para despacho, i.e. geração com maior custo.

Uma alternativa ao aumento do número máximo de reforços permitidos a serem adicionados em cada ramo é inserir novas conexões como ramos elegíveis para receber reforços. Retornando o limite de reforços em cada ramo para 3, o CASO 3 é definido ao adicionar um novo ramo como mostrado na Figura 5.16.

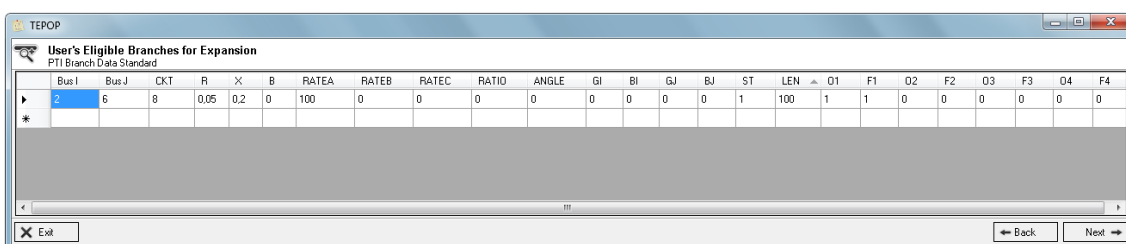


Figura 5-16: Ramos Elegíveis para Expansão Definidos pelo Usuário – CASO 3

O ramo proposto conecta as barras 2 e 6, o qual não existe no caso-base. Considerando esta nova opção, o *TEPOP* é capaz de encontrar planos de expansão que atendem ao critério de segurança escolhido, Figura 5.17. Como a adição de reforços neste novo ponto tem um menor custo, os planos de expansão possuem custos menores do que aqueles encontrados nos CASOS 1 e 2.

```

-----
EXPANSION PLAN 1
-----
INVESTMENT COST = US$ 180000000.00

REINFORCEMENTS ADDED

FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
BUS__03  BUS__05  BUS__04  BUS__06  BUS__02  BUS__06
 3         5         4         6         2         6
 06       07       08
 3         2         3

-----
EXPANSION PLAN 2
-----
INVESTMENT COST = US$ 200000000.00

REINFORCEMENTS ADDED

FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
BUS__02  BUS__03  BUS__03  BUS__05  BUS__04  BUS__06  BUS__02  BUS__06
 2         3         3         5         4         6         2         6
 04       06       07       08
 1         3         2         3

```

Figura 5-17: Arquivo “Best Expansion Plans” – CASO 3

Na próxima seção, é apresentado um estudo considerando um sistema real de grande porte, onde poderão ser comprovadas a funcionalidade e aplicabilidade do programa *PLANNER* para solução de problemas PET.

### 5.3 ESTUDO DE CASO – SISTEMA DE GRANDE PORTE

O sistema é formado por aproximadamente 6700 circuitos, incluindo linhas de transmissão e transformadores, e 3700 barras. O cenário proposto para o horizonte de planejamento de expansão da transmissão corresponde ao desligamento de duas estações de geração à carvão em Ontário: Nanticoke e Lambton correspondendo a um total de 4370 MW, o que é suposto acontecer em 2014. Este montante de geração será realocado em Darlington como geração nuclear. As novas unidades de geração são distribuídas entre quatro barras com capacidade individual de 1092,5 MW.

Embora a ferramenta *TRANK* seja capaz de lidar com um sistema desta dimensão, a ferramenta *TEPOP* possui maiores limitações uma vez que o processo de otimização necessitaria de um enorme esforço computacional para avaliar os planos candidatos, principalmente devido ao crescente número de análises para atender ao critério de segurança. Como Nanticoke, Lambton e Darlington são as regiões de interesse, o programa de sistemas de potência da PTI foi usado para obter um sistema equivalente de menor dimensão. Neste caso, ao usar reduções de *Ward* [W49], foram preservadas as zonas 6, 8, 10 e 11 sendo que todas as barras PQ abaixo de 210 KV foram excluídas. O sistema resultante é formado por 1869 ramos e 925 barras, o qual será usado como estudo de caso pelo programa *PLANNER*.

Antes de se avaliar o cenário para o horizonte de planejamento usando a ferramenta *TEPOP*, é importante analisar o caso-base do sistema através da ferramenta *TRANK*. Esta análise é relevante para informar o nível do índice de desempenho  $PI_M$  para contingências de 1ª ordem antes da transferência de geração. Baseado nesta avaliação, será possível definir um critério de segurança mais apropriado a ser atendido pelos planos de expansão para o horizonte de

planejamento. A Figura 5.18 apresenta parte das contingências de 1ª ordem classificadas pelo índice  $PI_M$ . Somente contingências incluídas nas zonas 6, 8, 10 e 11 foram analisadas por serem de interesse no estudo de planejamento.

```

-----
RANKING LIST OF CONTINGENCIES
-----
PARAMETERS
Nrank1 = 1869
Ncirc1 = 1
Nrank2 = 0
Ncirc2 = 0
Print1 = 1869
Print2 = 0
Print3 = 0
-----

1st ORDER CONTINGENCIES
-----
RANKING: 1 - MAXIMUM VIOLATION
         2 - TOTAL AMOUNT OF VIOLATION
         3 - NUMBER OF VIOLATIONS
-----

```

FROM	CTG1	TO	CKT	PIM	PIT	PIN	PIW
DOW CH A	DOW CHM2	T2		0.8906	1.9034	3	333.6225
TRANSALT	DOW CHM2	T2		0.8787	1.8796	3	333.5994
BURL J23	BURL Q23	1		0.8490	2.0983	5	333.9778
BURL Q23	BURL BY	16		0.7910	1.2802	4	333.5611
BURL Q23	BURL JQ	16		0.6218	1.1110	4	333.5268
HOMERCY	HOMERC2	1		0.5667	1.0559	4	333.2244
HOMERCY	HOMERC2	2		0.5249	1.0141	4	333.1826
PLEASR19	PLEAS EZ	T5		0.5154	1.0046	4	333.2154
PLEASR21	PLEAS EZ	T6		0.5154	1.0046	4	333.2105
DOW CH B	TRANSALT	T1		0.5129	0.8512	3	333.1412
DOW CH A	TRANSALT	T1		0.5129	0.8512	3	333.1412
BERMDC17	BERMDY Y	T3		0.4693	0.9585	4	333.2049
OXFORD J	TALETW36	1		0.4640	1.3671	5	333.2399
DUNDAS J	TALETW37	1		0.4578	1.3674	5	333.2533
BERMDC14	BERMDY Y	T4		0.4577	0.9469	4	333.2031
GOREWJ76	CORPHJ76	1		0.4457	1.1044	5	334.0769
GOREWJ76	CORPHJ76	1		0.4455	1.1041	5	334.0763
GOREWJ76	CLAIRV76	1		0.4433	1.0996	5	334.0655
BUCHANAN	OXFORD J	1		0.4370	1.6941	6	333.3022
GREYJB5V	ORANGVIL	1		0.4300	0.9192	4	333.5665
BUCHANAN	DUNDAS J	1		0.4120	1.6849	6	333.3717
GREYJB4V	ORANGVIL	1		0.3861	0.8753	4	333.6047
TALETW36	TALETW12	T4		0.3752	0.8644	4	333.2032
GOREWJ76	GOREWJ B	T6		0.3659	0.8551	4	333.2045

Figura 5-18: Lista de Contingências de 1ª Ordem – RATEA

De acordo com a Figura 5.18, percebe-se que a contingência classificada na primeira posição tem um índice  $PI_M$  de 0,8906. Além disso, cinco contingências estão acima de um critério de 60% significando que o sistema não atende um critério de segurança para sua configuração base. Portanto, a adoção de um rigoroso critério de 20% para o índice  $PI_M$ , assim como foi usado para o sistema Garver, é inapropriado para o cenário a ser planejado uma vez que inúmeros reforços seriam adicionados para atender ao critério de segurança e não devido à transferência de geração. Por esta razão, é escolhido um índice  $PI_M = 0,6$  como critério de segurança a ser atendido pelo processo de otimização.

É importante mencionar que este resultado refere-se ao limite de capacidade dos circuitos definido por RATEA. Por exemplo, se o maior limite de capacidade fosse escolhido, i.e. o maior valor entre RATE A, B ou C, somente quatro contingências resultariam em sobrecargas no sistema, como mostrado na Figura 5.19. Nesta situação, um índice  $PI_M = 0,2$  seria mais indicado para realizar o estudo considerando o cenário proposto de planejamento.

```

-----
RANKING LIST OF CONTINGENCIES
-----
PARAMETERS
-----
Nrank1 = 1869
Ncircl = 1
Nrank2 = 0
Ncircl2 = 0
Print1 = 1869
Print2 = 0
Print3 = 0
-----
1st ORDER CONTINGENCIES
-----
RANKING: 1 - MAXIMUM VIOLATION
         2 - TOTAL AMOUNT OF VIOLATION
         3 - NUMBER OF VIOLATIONS
-----

```

FROM	CTGL	TO	CKT	PIM	PIT	PIN	PIW
HOMERCY	HOMERC2	1	0.3899	0.3899	1	218.6235	
HOMERCY	HOMERC2	2	0.3482	0.3482	1	218.5817	
DOW CH A	DOW CHM2	T2	0.0503	0.1006	2	218.8273	
TRANSALT	DOW CHM2	T2	0.0437	0.0875	2	218.8144	
MILTON	WILCJ561	1	0.0000	0.0000	0	222.0878	
MEYPS60W	WILCJ560	1	0.0000	0.0000	0	221.5903	
CLAIRVIL	MEYPS60W	1	0.0000	0.0000	0	221.5052	
CHERYDK1	FCHLDC18	1	0.0000	0.0000	0	219.8951	
MILTON	TRAFAL73	1	0.0000	0.0000	0	219.8445	
TRAFAL73	TRAFALGA	15	0.0000	0.0000	0	219.8414	
MILTON	TRAFAL72	1	0.0000	0.0000	0	219.8225	
TRAFAL72	TRAFALGA	14	0.0000	0.0000	0	219.8196	
MILTON	MIDD8185	1	0.0000	0.0000	0	219.7275	
CHERYDK1	COLUMJ24	1	0.0000	0.0000	0	219.7040	
CLAIRVIL	CLAIRVIL	14	0.0000	0.0000	0	219.6844	
CLAIRVIL	CLAIRVIL	15	0.0000	0.0000	0	219.6766	
LONGWOOD	LONGJL26	1	0.0000	0.0000	0	219.6741	
LONGWOOD	LONGJL24	1	0.0000	0.0000	0	219.6740	
CLAIRVIL	CLAIRVIL	13	0.0000	0.0000	0	219.6650	
CLAIRVIL	CLAIRV74	1	0.0000	0.0000	0	219.6635	
MEYPS86W	MIDD8086	1	0.0000	0.0000	0	219.6430	
CLAIRVIL	MEYPS86W	1	0.0000	0.0000	0	219.6394	
COLUMJ24	LASCJH24	1	0.0000	0.0000	0	219.6277	
MIDD8185	NANTICOK	1	0.0000	0.0000	0	219.6109	
CLAIRVIL	CLAIRVIL	16	0.0000	0.0000	0	219.5772	

Figura 5-19: Lista de Contingências de 1ª Ordem – Maior RATE

A seguir são apresentadas as etapas para o estudo de planejamento através da ferramenta *TEPOP* de forma a obter os melhores planos de expansão para o sistema considerando a transferência de geração de Nanticoke e Lambton para Darlington. Primeiramente, atenção será destinada ao Caso 1 (RATEA e  $PI_M = 0,6$ ) e posteriormente ao Caso 2 (Maior RATE e  $PI_M = 0,2$ ).

### 5.3.1 Planejamento de Expansão – CASO 1

Após carregar o arquivo de dados do sistema equivalente com o cenário a ser estudado e definir as zonas de interesse 6, 8, 10 e 11, deve-se informar a

ordem de mérito para o despacho de geração, conforme Figura 5.20. A estratégia adotada para a escolha da ordem de mérito foi atribuir uma maior prioridade para as unidades localizadas em Darlington e uma ordem aleatória para as demais gerações localizadas dentro das zonas de interesse.

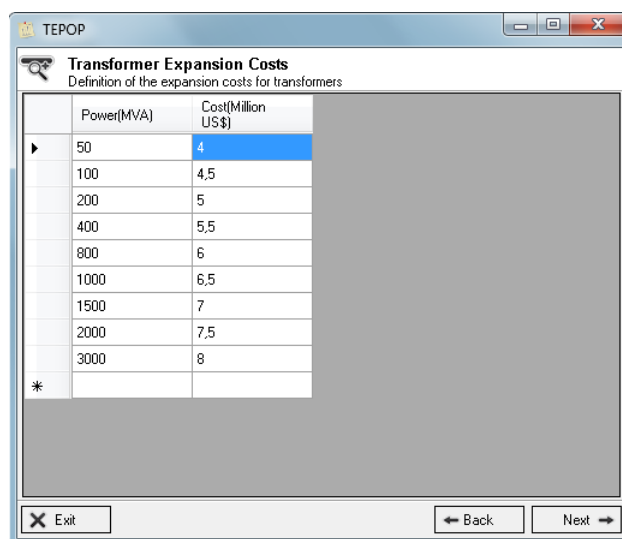
Number	Name	Order
2656	CHERY BY	3
2901	DARL G1	1
2902	DARL G2	1
2903	DARL G3	1
2904	DARL G4	1
2936	PIC A G4	2
2962	PIC B G5	2
2963	PIC B G6	2
2964	PIC B G7	2
2965	PIC B G8	2
2990	WHITBYGS	2
4610	BRAMA EZ	4
4611	BRAMA JQ	4
40211	DUBOIS1	9
7633	DOW CH A	5
7954	TRANS861	7
7955	TRANS871	7
7956	TRANS881	7
7957	TRANS891	7
7960	BRIGHSG1	7
7961	BRIGH G2	7
40424	SHAWWL1	8
40602	HOMERC2	8
9900	ATIKOKAN	6

Figura 5-20: Ordem de Despacho de Geração

Voltage(KV)	Cost(Million US\$/mi)
69	0.2
115	0.24
230	0.3
345	0.4
500	0.5
*	

Figura 5-21: Custos de Expansão de Linhas de Transmissão

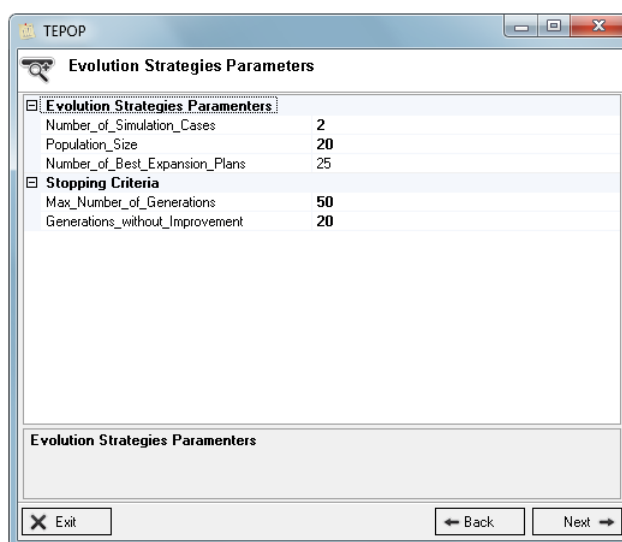
Os custos de adição de linhas de transmissão e transformadores são mostrados nas Figuras 5.21 e 5.22. Muito cuidado deve ser tomado para a definição da ordem de mérito de despacho, a qual é decisiva para indicar os planos de expansão pela ferramenta *TEPOP*.



Power(MVA)	Cost(Million US\$)
50	4
100	4,5
200	5
400	5,5
800	6
1000	6,5
1500	7
2000	7,5
3000	8
*	

Figura 5-22: Custos de Expansão de Transformadores

Os parâmetros escolhidos para a otimização através da metaheurística ES e para o estudo de planejamento são mostrados nas Figuras 5.23 e 5.24.



Parameter	Value
Number_of_Simulation_Cases	2
Population_Size	20
Number_of_Best_Expansion_Plans	25
Max_Number_of_Generations	50
Generations_without_Improvement	20

Figura 5-23: Parâmetros da Metaheurística Estratégias de Evolução

Como o sistema é composto por 925 barras e 1869 circuitos, deve-se ter atenção ao escolher os parâmetros da metaheurística ES já que influenciarão diretamente no esforço computacional da ferramenta *TEPOP*. Por esta razão, os parâmetros dimensão da população, número máximo de gerações e número de gerações sem



melhoria de solução são reduzidos quando comparados aos valores usados para o sistema Garver modificado. Com relação aos parâmetros de planejamento, primeiramente será considerado o Caso 1, i.e.  $PI_M = 0,6$  como o critério de segurança a ser atendido e RATEA como limite de capacidade dos circuitos.

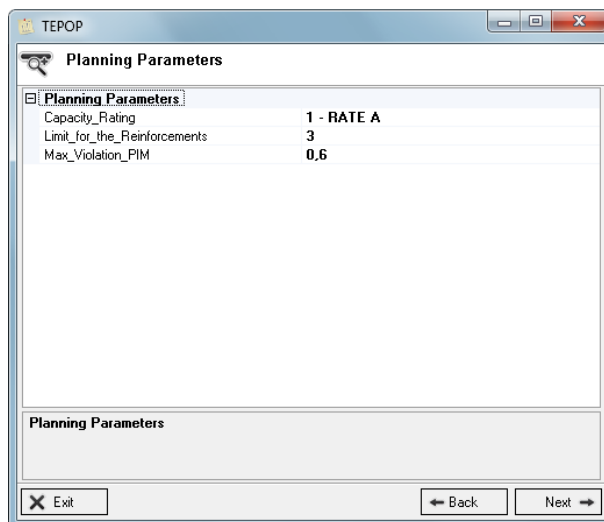


Figura 5-24: Parâmetros de Planejamento

Com relação os ramos elegíveis para expansão, os mesmos são definidos pela ferramenta *TRANK* e pelo processo dinâmico da ferramenta *TEPOP*. Parte dos arquivos com os dois melhores planos de expansão e seus respectivos despachos de geração são mostrados nas Figuras 5.25 e 5.26.

```

-----
EXPANSION PLAN 1
-----
INVESTMENT COST = US$ 60530000.00

REINFORCEMENTS ADDED

FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
DARL LG1  DARL G1  DARL LG2  DARL G2  DARL LG3  DARL G3  DARL LG4  DARL G4
2003      2901    2004      2902    2005      2903    2006      2904
          T1          T2          T3          T4
          2          2          2          2
-----
FROM      TO      FROM      TO
BURL J23  BURL Q23  BURL Q23  BURL BY
5290      5292      5292      5956
          1          16
          1          1
-----

EXPANSION PLAN 2
-----
INVESTMENT COST = US$ 60650000.00

REINFORCEMENTS ADDED

FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
DARL LG1  DARL G1  DARL LG2  DARL G2  DARL LG3  DARL G3  DARL LG4  DARL G4
2003      2901    2004      2902    2005      2903    2006      2904
          T1          T2          T3          T4
          2          2          2          2
-----
FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
BURL J23  BURL Q23  SCHEIFD7  SCHF JD7  OW SMDT5  OWEN SWJ  BURL Q23  BURL BY
5290      5292      5257      5381      6562      6564      5292      5956
          1          1          1          1          16
          1          1          1          1
-----
    
```

Figura 5-25: Melhores Planos de Expansão – Caso 1

```

-----
EXPANSION PLAN 1
-----
INVESTMENT COST = US$ 60530000.00

BUS NUMBER  BUS NAME  DISPATCH (MW)
2656        CHERY BY   31.800
2901        DARL G1   2028.500
2902        DARL G2   2028.500
2903        DARL G3   2028.500
2904        DARL G4   2028.500
2936        PIC A G4   542.000
2962        PIC B G5   542.000
2963        PIC B G6   542.000
2964        PIC B G7   542.000
2965        PIC B G8   542.000
2990        WHITBYGS  59.700
4610        BRAMA EZ   83.900
4611        BRAMA JQ   51.700
7633        DOW CH A  134.315
7954        TRANS861  140.000
7955        TRANS871  140.000
7956        TRANS881  140.000
7957        TRANS891  140.000
7960        BRIGHSG1  216.000
7961        BRIGH G2  155.000
9900        ATIKOKAN  227.000
40424       SHAWVLL1  62.000
40602       HOMERC2   800.014

-----
EXPANSION PLAN 2
-----
INVESTMENT COST = US$ 60650000.00

BUS NUMBER  BUS NAME  DISPATCH (MW)
2656        CHERY BY   31.800
2901        DARL G1   2028.500
2902        DARL G2   2028.500
2903        DARL G3   2028.500
2904        DARL G4   2028.500
2936        PIC A G4   542.000
2962        PIC B G5   542.000
2963        PIC B G6   542.000
2964        PIC B G7   542.000
2965        PIC B G8   542.000
2990        WHITBYGS  59.700
4610        BRAMA EZ   83.900
4611        BRAMA JQ   51.700
7633        DOW CH A  134.315
7954        TRANS861  140.000
7955        TRANS871  140.000
7956        TRANS881  140.000
7957        TRANS891  140.000
7960        BRIGHSG1  216.000
7961        BRIGH G2  155.000
9900        ATIKOKAN  227.000
40424       SHAWVLL1  122.000
40602       HOMERC2   740.014

```

Figura 5-26: Despachos de Geração – Caso 1

De acordo com os parâmetros definidos nas Figuras 5.23 e 5.24, a ferramenta *TEPOP* precisou de aproximadamente 5 horas e 42 minutos para encontrar os melhores planos de expansão usando um processador *Core 2 Duo* 2,66 GHz. Deste tempo, 3 horas e 34 minutos foram gastos para avaliar os planos candidatos através de programação linear baseada em fluxo de potência DC.

A qualidade dos planos de expansão pode ser melhorada ao atribuir maiores valores aos parâmetros na Figura 5.23, entretanto, o tempo computacional também será aumentado. Por exemplo, se os parâmetros dimensão da população, número máximo de gerações e número de gerações sem melhoria de solução são alterados para 50, 60 e 30 respectivamente, a ferramenta *TEPOP* necessita de aproximadamente 17 horas e 9 minutos para encontrar os melhores

planos de expansão. Neste caso, o 25º melhor plano de expansão encontrado possui um investimento de US\$ 66,35 milhões. Considerando os parâmetros da Figura 5.23, o 25º melhor plano de expansão corresponde a um investimento de US\$ 67,82 milhões. Embora tenha tido uma melhoria quanto a qualidade dos planos de expansão encontrados, não houve alterações nas primeiras posições de ambas as listas. Portanto, ao escolher os parâmetros, deve-se avaliar a relação entre o esforço computacional e a possibilidade de obtenção de planos de expansão de melhor qualidade.

O plano de expansão 1, Figura 5.25, indica a adição de 10 reforços no sistema de transmissão: dois transformadores conectando cada barra de geração em Darlington ao sistema totalizando oito transformadores, uma linha de transmissão conectando as barras 5290 e 5292, e um transformador conectando as barras 5292 e 5956, o que representa um investimento de US\$ 60,53 milhões. A partir do arquivo com os despachos de geração, Figura 5.26, nota-se que toda a capacidade de geração é despachada nas barras em Darlington o que era esperado uma vez que elas receberam a maior prioridade, Figura 5.20.

Com relação ao plano de expansão 2, além dos 10 reforços indicados no plano de expansão 1, são adicionadas duas linhas de transmissão conectando as barras 5257 e 5381 e as barras 6562 e 6564. Portanto, este plano de expansão é uma extensão do plano 1. Estas linhas, na verdade, são representações de *jumpers* uma vez que seus comprimentos são de 0,1 e 0,3 milhas respectivamente. *Juniper* pode ser definido como uma importante interligação de pequena extensão entre barramentos. Uma desvantagem para sistemas compostos por um elevado número de *jumpers* é que os melhores planos de expansão indicados pela ferramenta *TEPOP* podem ser diferentes somente pelo número de reforços adicionados nestes pontos uma vez que o custo é menor quando comparado a outras linhas prejudicando a diversidade dos planos de expansão indicados.

Adicionalmente à existência de inúmeros *jumpers* neste sistema, a principal razão para a pequena diversidade nos planos indicados pela ferramenta *TEPOP* pode ser atribuída à pequena margem de reserva de geração para as

barras do sistema. Assim, o único meio de se atender a demanda é despachar praticamente quase todos os 4,37 GW nas barras em Darlington. Em consequência, considerando o RATEA como o limite de capacidade para os circuitos, é necessária a adição de um transformador conectando cada barra de geração em Darlington ao sistema de maneira a encontrar um plano de expansão factível que atenda a rede intacta. Como o plano de expansão também precisa atender ao critério de segurança definido pelo índice  $PI_M$  e o redespacho não é permitido, os planos de expansão informados pela ferramenta *TEPOP* podem se tornar bastante similares com o mesmo grupo de reforços apresentado pelo plano de expansão 1. Sistemas com maiores margens de reserva de geração devem permitir uma maior diversidade de planos de expansão para o problema PET.

Em relação à definição dos ramos elegíveis a receber reforços, inicialmente ao executar a ferramenta *TEPOP*, 100 ramos foram indicados automaticamente pela ferramenta *TRANK*, onde deste total, sete foram listados devido a violações de capacidade no caso-base e 93 ao avaliar as contingências de 1ª ordem, conforme a metodologia descrita na Seção 5.2.2.

Durante o processo de otimização realizado pela ferramenta *TEPOP*, como já mencionado, o redespacho de geração não foi suficiente para atender a demanda para a rede intacta considerando a transferência de geração para Darlington. Assim, um reforço (transformador) teve que ser adicionado a cada conexão Darlington – sistema, de forma a encontrar um plano factível. Além disso, mais um reforço foi adicionado a estes pontos para atender ao critério de segurança definido pelo índice  $PI_M$ , totalizando 2 reforços a cada conexão, como mostrado na Figura 5.25.

As Figuras 5.27 até 5.30 mostram os diagramas unifilares na vizinhança das cinco contingências que violam o índice  $PI_M = 0,6$  conforme indicado na Figura 5.18 antes do estudo de planejamento. Nestas figuras está representada a solução do fluxo de potência AC usando o programa PTI. Uma discussão sobre o fluxo de potência ativo é apresentada para ambas as situações: antes e após

a adição de reforços e os novos despachos de geração apontados pelo plano de expansão 1. As Figuras 5.27 e 5.28 mostram a vizinhança das duas primeiras contingências listadas na Figura 5.18.

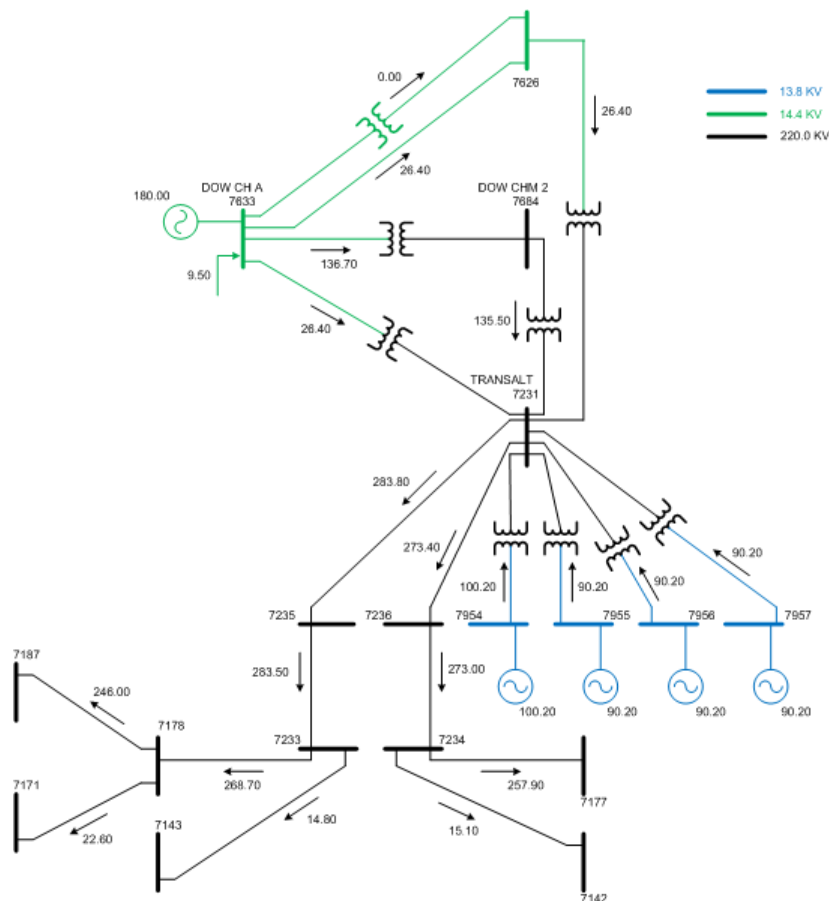


Figura 5-27: Diagrama Unifilar da Vizinhança 7000 Antes do Planejamento

De acordo com a Figura 5.18, a contingência conectando as barras 7633 e 7684, “DOW CH A” e “DOW CHM2”, resulta em um índice  $PI_M$  de 0,8906 indicado pela ferramenta *TRANK*. Observando a Figura 5.27, há um fluxo de potência ativo de 136,70 MW através do transformador entre estas barras. Na contingência deste transformador, o fluxo de potência no transformador entre as barras 7633 e 7231 é aumentado de 26,40 MW para 94,75 MW. O mesmo acontece com o transformador conectando as barras 7626 e 7231. Uma vez que estes transformadores têm uma capacidade de 50 MW (RATEA), então uma violação de 89% aparece sobre os mesmos. Um resultado semelhante acontece na contingência conectando as barras 7231 e 7684, “TRANSALT” e “DOW CHM2”, já que corresponde a um transformador em série com a contingência anterior.

Após o planejamento e definição de um novo despacho para as unidades de geração indicados pelo plano de expansão 1, Figuras 5.25 e 5.26, o fluxo de potência ativo no transformador conectando as barras 7633 e 7684, “DOW CH A” e “DOW CHM2”, é reduzido de 136,70 MW para 103,70 MW. Agora, a contingência deste transformador resulta em um fluxo de potência ativo no transformador conectando as barras 7633 e 7231 de 72,00 MW. Novamente, o transformador conectando as barras 7626 e 7231 sofre o mesmo impacto. Este fluxo representa uma violação de 44%, a qual é menor do que o critério de segurança imposto pelo índice  $PI_M$ . Portanto, o não atendimento ao critério de segurança antes do planejamento foi resolvido pelo redespacho das gerações nas barras 7633, 7954 até 7957, conforme pode ser visto comparando as Figuras 5.27 e 5.28.

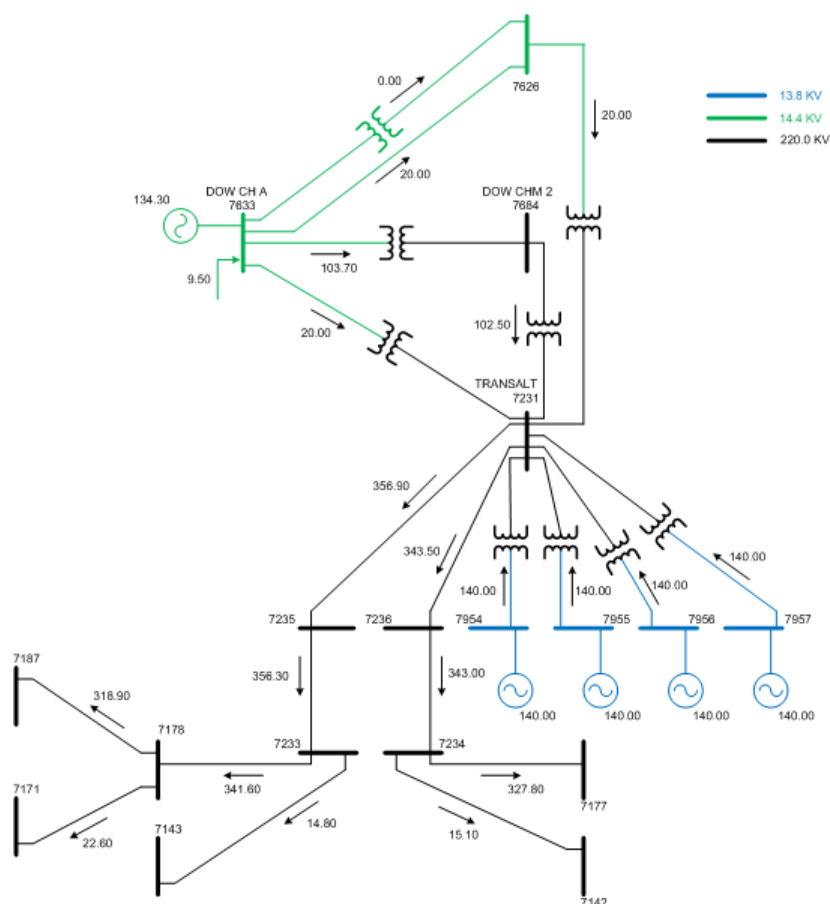


Figura 5-28: Diagrama Unifilar da Vizinhança 7000 Após o Planejamento – CASO 1

Nas Figuras 5.29 e 5.30 será dada atenção à vizinhança das três contingências restantes que violaram o índice  $PI_M$ , indicadas pela ferramenta *TRANK* antes do planejamento. De acordo com a Figura 5.18, a contingência conectando as

barras 5290 e 5292, “BURL J23” e “BURL Q23”, resulta em um índice  $PI_M$  de 0,8490. Figura 5.29 aponta um fluxo de potência ativo de 69 MW nesta linha de transmissão, o qual é necessário para atender a demanda nas barras 5956 e 5957, “BURL BY” e “BURL JQ” respectivamente. Sob contingência, o fluxo de potência através do transformador conectando as barras 5293 e 5956 é aumentado de 35,80 MW para 70,30 MW. Um resultado semelhante acontece com o transformador conectando as barras 5293 e 5957 onde o fluxo aumenta de 32,50 MW para 67,20 MW. Uma vez que estes transformadores têm um limite de capacidade de 38,00 MW (RATEA), então uma violação de 85,0% e 76,8% aparece sobre os mesmos.

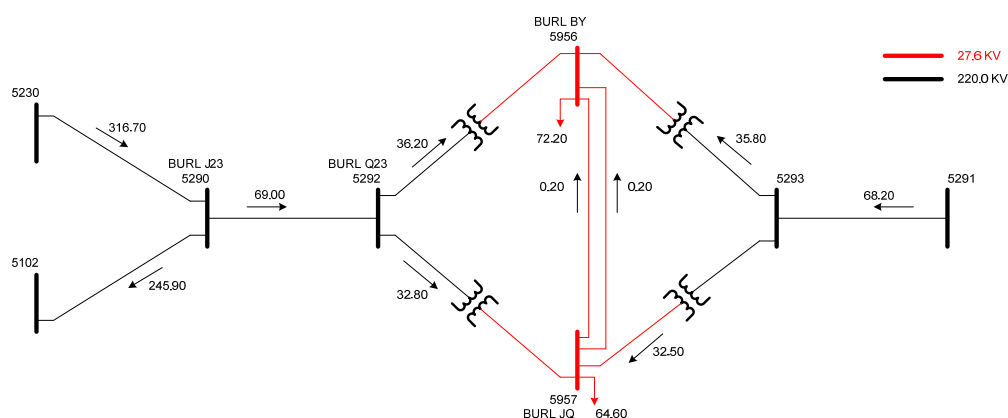


Figura 5-29: Diagrama Unifilar da Vizinhança 5000 Antes do Planejamento

A contingência conectando as barras 5292 e 5956, “BURL Q23” e “BURL BY”, resulta em um índice  $PI_M$  de 0,7910. De fato, sob esta contingência, o fluxo de potência ativo sobre o transformador conectando as barras 5293 e 5956 é aumentado de 35,80 MW para 68,00 MW resultando em uma violação de 78,9%. Em relação à contingência conectando as barras 5292 e 5957, “BURL Q23” e “BURL JQ”, observa-se um índice  $PI_M$  de 0,6218. De fato, sob esta contingência, o fluxo de potência ativo no transformador conectando as barras 5293 e 5957 é aumentado de 32,50 MW para 61,70 MW correspondendo a uma violação de 62,4%.

O Plano de expansão 1, Figuras 5.25 e 5.26, indica dois reforços nesta vizinhança: uma linha de transmissão conectando as barras 5290 e 5292,

“BURL J23” e “BURL Q23”, e um transformador conectando as barras 5292 e 5956, “BURL Q23” e “BURL BY”, como pode ser visto na Figura 5.30

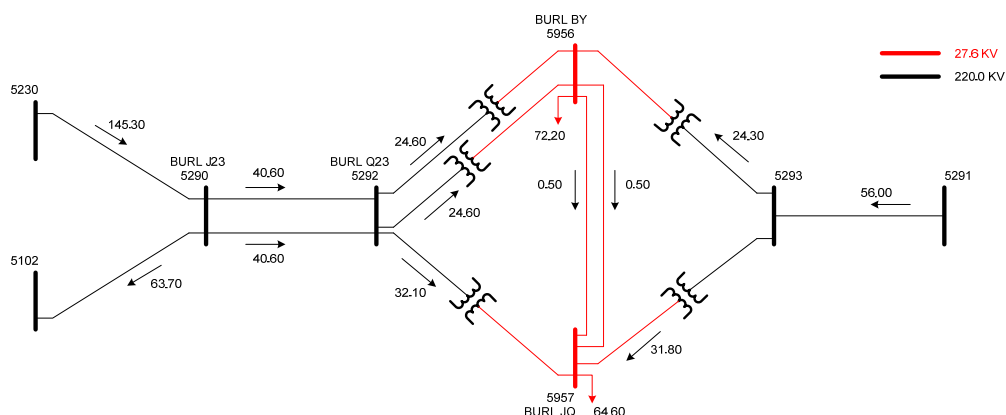


Figura 5-30: Diagrama Unifilar da Vizinhança 5000 Após o Planejamento – CASO 1

Incluindo estes reforços, o fluxo ativo é redistribuído nesta vizinhança. Agora, cada linha de transmissão conectando as barras 5290 e 5292, “BURL J23” e “BURL Q23”, conduz um fluxo ativo de 40,60 MW e os dois transformadores conectando as barras 5292 e 5956, “BURL Q23” e “BURL BY”, conduzem um fluxo ativo de 24,60 MW cada um. Em consequência, as três contingências que antes do planejamento apontavam violações no índice  $PI_M$ , agora atendem a este critério de segurança. O pior caso refere-se a contingência conectando as barras 5292 e 5957, “BURL Q23” e “BURL JQ”, que resulta em um fluxo ativo de 60,30 MW sobre o transformador conectando as barras 5293 e 5957, i.e. um índice  $PI_M$  de 58,7%, o qual está abaixo do critério de segurança especificado.

### 5.3.2 Planejamento de Expansão – CASO 2

Como mostrado na Figura 5.19, ao selecionar o maior limite para as capacidades dos circuitos, Caso 2, um índice  $PI_M$  de 0,2 é mais adequado ao estudo de planejamento, uma vez que somente quatro contingências resultam em violações no caso-base antes da transferência de geração. Portanto, ao adotar esta condição e mantendo os demais parâmetros nas Figuras 5.23 e 5.24 inalterados, os dois melhores planos de expansão e seus respectivos despachos de geração encontrados pela ferramenta *TEPOP* são mostrados nas Figuras 5.31 e 5.32.



```

-----
EXPANSION PLAN 1
-----
INVESTMENT COST = US$ 7640000.00

REINFORCEMENTS ADDED

FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
HOMERCY   HOMERC2  TRANSALT  TRANIJN7  TRALTJN7  TRANIJN7
40479     40602    7231      7236      7234      7236
      1      1      1      1      1
      1      1      1      1
-----
EXPANSION PLAN 2
-----
INVESTMENT COST = US$ 7640000.00

REINFORCEMENTS ADDED

FROM      TO      FROM      TO      FROM      TO
HOMERCY   HOMERC2  TRANSALT  TRALIJN6  TRALTJN6  TRALIJN6
40479     40602    7231      7235      7233      7235
      1      1      1      1      1
      1      1      1      1
-----

```

Figura 5-31: Melhores Planos de Expansão – Caso 2

```

-----
EXPANSION PLAN 1
-----
INVESTMENT COST = US$ 7640000.00

BUS NUMBER  BUS NAME  DISPATCH (MW)
2656        CHERY BY  31.800
2901        DARL G1   1881.038
2902        DARL G2   1880.971
2903        DARL G3   1881.043
2904        DARL G4   1881.127
2936        PIC A G4  542.000
2962        PIC B G5  542.000
2963        PIC B G6  542.000
2964        PIC B G7  542.000
2965        PIC B G8  542.000
2990        WHITBYCS  59.700
4610        BRAMA E2  83.900
4611        BRAMA JQ  51.700
7633        DOW CH A  195.000
7954        TRANS861 140.000
7955        TRANS871 140.000
7956        TRANS881 140.000
7957        TRANS891 140.000
7960        BRIGHSG1 216.000
7961        BRIGH G2  155.000
9900        ATIKOKAN 227.000
40424       SHAWVLL1 122.000
40602       HOMERC2   1257.950
-----
EXPANSION PLAN 2
-----
INVESTMENT COST = US$ 7640000.00

BUS NUMBER  BUS NAME  DISPATCH (MW)
2656        CHERY BY  31.800
2901        DARL G1   1881.038
2902        DARL G2   1880.971
2903        DARL G3   1881.043
2904        DARL G4   1881.127
2936        PIC A G4  542.000
2962        PIC B G5  542.000
2963        PIC B G6  542.000
2964        PIC B G7  542.000
2965        PIC B G8  542.000
2990        WHITBYCS  59.700
4610        BRAMA E2  83.900
4611        BRAMA JQ  51.700
7633        DOW CH A  195.000
7954        TRANS861 140.000
7955        TRANS871 140.000
7956        TRANS881 140.000
7957        TRANS891 140.000
7960        BRIGHSG1 216.000
7961        BRIGH G2  155.000
9900        ATIKOKAN 227.000
40424       SHAWVLL1 115.950
40602       HOMERC2   1264.000
-----

```

Figura 5-32: Despachos de Geração – Caso 2

Nesta nova condição, três reforços são adicionados à rede pelo plano de expansão 1, sendo a adição de um transformador entre as barras 40479 e 40602, uma linha de transmissão entre as barras 7231 e 7236, e outra linha conectando as barras 7234 e 7236 totalizando um investimento de US\$ 7,64 milhões. Observa-se que embora as barras em Darlington (2901 a 2904) tenham recebido a maior prioridade de despacho, os transformadores conectando estas barras ao sistema não permitem a transferência total de energia devido suas limitações de capacidade. Para o Caso 2, 10 ramos elegíveis são indicados automaticamente pela ferramenta *TRANK* ao executar a ferramenta *TEPOP*, 4 devido a violações no caso-base e 6 ao avaliar as contingências de 1ª ordem. A ferramenta *TEPOP* necessitou de aproximadamente 3 horas e 46 minutos para apontar os melhores planos de expansão, sendo 2 horas e 15 minutos gastos para avaliar os planos candidatos através do PL baseado em fluxo de potência DC.

Comparando ao melhor plano de expansão no Caso 1, Figura 5.25, as conexões entre as barras em Darlington com a rede não necessitam ser reforçadas já que o redespacho de geração juntamente com a definição do maior limite de capacidade para os circuitos são suficientes para atender à demanda considerando a rede intacta. Em consequência, como estes pontos não precisam ser reforçados, ao se verificar o atendimento destes planos ao critério de segurança definido pelo índice  $PI_M$ , contingências nestas conexões resultam em isolamentos de barra que correspondem a situações onde o índice  $PI_M$  não pode ser avaliado pela ferramenta *TEPOP*.

Vale ressaltar que os melhores planos de expansão indicados pela ferramenta *TEPOP* atendem ao critério de segurança mas não evitam que o sistema apresente situações de isolamento de barras ou formação de ilhas sob contingências. Prevenir sistemas destas situações seria inviável uma vez que os sistemas são formados por conexões radiais em inúmeros pontos e, assim, seriam necessários vários reforços para atender estas situações. Como solução, a ferramenta *TEPOP* pode ser melhorada não permitindo, sob contingência, o isolamento de barras importantes que tenham grandes capacidades de geração ou grande demanda.

Alguns comentários em relação ao fluxo de potência AC usando o programa da PTI são apresentados a seguir considerando o sistema antes e depois da adição de reforços e redespacho de geração para o plano de expansão 1 – CASO 2.

Primeiramente, o reforço conectando as barras 40479 e 40602, “HOMERCY” e “HOMERC2” é adicionado para resolver a violação no índice  $PI_M$  quando ocorre uma contingência neste ramo conforme Figura 5.19. Os diagramas unifilares nas Figuras 5.27 e 5.33 referem-se à vizinhança onde os outros dois reforços foram adicionados ao sistema. Embora antes da transferência de geração não houvesse violação devido a contingências nesta vizinhança, algumas violações apareceram quando as gerações foram redespachadas pela ferramenta *TEPOP*.

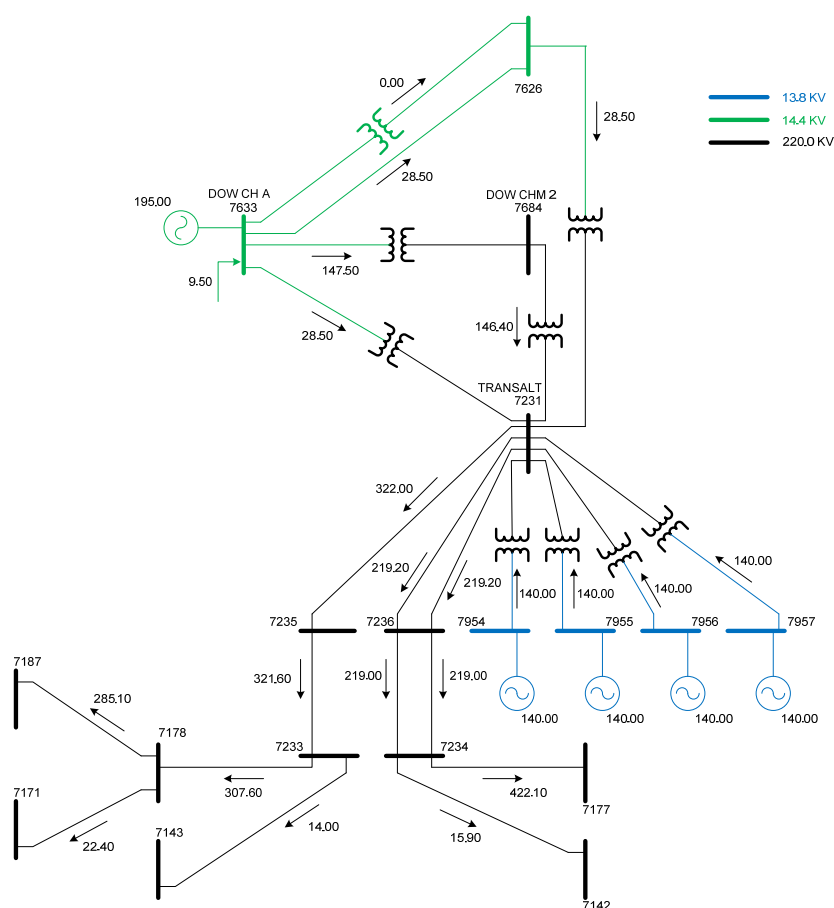


Figura 5-33: Diagrama Unifilar da Vizinhança 7000 Após o Planejamento – Caso 2

Comparando as Figuras 5.27 e 5.33, observa-se que um reforço foi adicionado entre as barras 7231 e 7236 e outro conectando as barras 7234 e 7236, conforme informado pelo plano de expansão 1, Figura 5.31. Os despachos de geração nas barras 7633 e 7954 até 7957 também foram alterados, conforme Figura 5.33.

Antes da expansão, Figura 5.27, considerando a contingência da linha de transmissão conectando a barras 7231 e 7236, o fluxo ativo na linha de transmissão conectando as barras 7233 e 7235 aumenta de 283,50 MW para 555,80 MW. Como o maior limite de capacidade deste ramo é 624,39 MW, nenhuma violação é observada.

Contudo, considerando o plano de expansão 1, se esta mesma linha de transmissão não é reforçada e uma contingência acontece sob este ramo, a linha de transmissão conectando as barras 7233 e 7235 tem seu fluxo de potência ativo aumentado e 321,60 MW para 757,90 MW correspondendo a uma violação de 21,4%, a qual não atende ao critério de segurança definido pelo índice  $PI_M = 0,2$ . Portanto, isto prova a necessidade de se reforçar este ponto do sistema. Uma situação semelhante acontece em relação ao reforço conectando as barras 7234 e 7236 uma vez que o mesmo corresponde a uma linha de transmissão em série com o ramo anterior.

#### 5.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento do software *PLANNER* para o estudo de planejamento para sistemas de grande porte. O software desenvolvido possui duas ferramentas: *TRANK*, responsável por apontar os pontos do sistema de potência com as condições de operação mais estressantes que correspondem aos ramos mais indicados a receber possíveis reforços, e *TEPOP* que, por sua vez, fornece os melhores planos de expansão incluindo o atendimento a critérios de segurança baseado em índices de desempenho através de otimização baseada na metaheurística ES.

Em relação ao atendimento a critérios de segurança, definido pelo índice de desempenho  $PI_M$ , cabe ressaltar que são necessárias análises adicionais durante o processo de otimização para se avaliar os planos de expansão resultando em um maior esforço computacional do que quando o objetivo é somente atender a demanda do sistema para uma rede intacta. Por este motivo foi realizado neste capítulo somente um estudo com abordagem estática sem a

consideração da cronologia de reforços, embora a abordagem dinâmica pudesse ser aplicada ao estudo de sistemas de grande porte com o viés de maior esforço computacional. Ademais, foi dada maior prioridade a uma modelagem adequada do sistema estudado o qual possui transformadores defasadores, transformadores com correção de impedância a partir da posição do tap ou do ângulo de defasagem, elementos resultantes da obtenção do sistema equivalente, além da correta interpretação da estrutura do arquivo de dados preparado para o programa da PTI. Estas características foram adequadamente consideradas no desenvolvimento do software e para sua validação os resultados do fluxo DC foram comparados com o resultado do programa de fluxo de potência do programa da PTI.

Em relação à definição do índice de desempenho  $PI_M$  a ser considerado como critério de segurança, deve-se avaliar primeiramente a condição atual de operação do sistema pela ferramenta *TRANK*. A partir desta análise é possível definir um critério de segurança a ser atendido no horizonte de planejamento parecido com a situação atual de operação ou até mesmo avaliar se vale a pena adotar um critério mais exigente. Conforme foi mostrado neste capítulo, o sistema de grande porte em sua configuração atual já apresentava contingências resultando em violações máximas de até 89% nas capacidades de transmissão dos circuitos. Embora um critério aceitável seja de 20%, situação coberta pela capacidade emergencial do sistema de transmissão, a adoção deste critério resultaria em inúmeros reforços para resolver uma condição existente da rede e não devido somente às condições do horizonte de planejamento. Uma vez que se tinha o conhecimento da situação atual de carregamento do sistema para condições de contingência, foi adotado um critério de 60% para o estudo de planejamento.

Uma importante característica da ferramenta *TEPOP* consiste na definição da ordem de mérito para o despacho das unidades geradoras que influencia diretamente na obtenção dos planos de expansão. O objetivo da atribuição de uma ordem para o despacho é representar, a partir de restrições no PL, os custos de fornecimento de energia pelas unidades geradoras. Embora se tenha

pensado em incluir tais custos na função objetivo, sua inclusão se torna difícil, pois o planejamento da expansão do sistema é feito para a carga pico e neste caso seria necessário avaliar todas as condições de demanda ao longo do ano para cada plano candidato durante o processo de otimização.

Quanto aos custos relacionados a perdas ôhmicas, embora os mesmos não sejam incluídos na função objetivo como nos capítulos anteriores, o modelo de avaliação baseado em fluxo DC continua incluindo o cálculo de perdas ôhmicas para o sistema. A não consideração destes custos deve-se ao surgimento de novas conexões na zona de fronteira que podem possuir valores de resistência negativos provenientes da obtenção do sistema equivalente. Embora estas resistências não façam sentido para o cálculo do custo de perdas ôhmicas, elas são representadas adequadamente como geração pela ferramenta *TEPOP*. Além disso, as informações dos valores reais de resistência da região externa são perdidos com a redução e conseqüentemente os custos podem ser avaliados incorretamente. Portanto, embora a metodologia apresentada no Capítulo 2 tenha incluído custos de perdas ôhmicas na função objetivo, ao analisar sistemas de grande porte, a melhor estratégia consiste em minimizar através da função objetivo somente os custos de investimento do sistema de transmissão e inserir um critério de despacho para a situação de carga pico.

Em relação aos resultados encontrados, cabe destacar que a pequena diversidade nos planos de expansão pode ser atribuída principalmente à pequena margem de reserva das unidades geradoras. Em praticamente todas as situações é demandado que o sistema despache a capacidade total das novas unidades instaladas em Darlington. O grande número de *jumpers* também acaba restringindo a diversidade dos planos de expansão apontados pela ferramenta *TEPOP* já que reforçar os mesmos implica em investimentos muito menores do que reforços em linhas de transmissão de grandes comprimentos e transformadores.

Em relação à aplicabilidade da ferramenta *TEPOP*, observa-se através dos fluxos de potência ativo obtidos pelo programa da PTI usando o modelo AC

que a ferramenta *TEPOP* é capaz de tratar corretamente os problemas de fluxo de potência ativo no sistema atendendo ao critério de segurança exigido. Contudo, não se espera que os planos de expansão encontrados pela ferramenta *TEPOP* atendam aos requisitos de fluxo de potência reativo do sistema. O Objetivo final do ambiente *PLANNER*, ferramentas *TRANK* e *TEPOP*, é consistir de um passo inicial para o planejamento da expansão de sistemas de potência. A partir dos melhores planos encontrados por estas ferramentas é possível prosseguir com o intuito de avaliar os fluxos reativos e níveis de tensão. Para isto é necessário o desenvolvimento de uma ferramenta de otimização baseada em fluxo AC para alocação de reativos no sistema, a qual não faz parte do desenvolvimento desta tese sendo uma das sugestões de continuidade de trabalho.

Em relação aos principais pontos a serem melhorados no ambiente *PLANNER*, primeiramente, a ferramenta *TEPOP* poderia ser desenvolvida para realizar estudos de planejamento de abordagem dinâmica, conforme metodologia apresentada no Capítulo 2 e aplicada nos Capítulos 3 e 4. Outro aspecto é não permitir que os planos indicados permitam o isolamento de barras importantes (grandes unidades geradoras ou grandes centros de carga) ou subsistemas em condições de contingência de 1ª ordem do sistema. Estas conexões também devem ser consideradas como pontos importantes a receber reforços pelo processo de otimização na solução do problema PET.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES

A presente tese de doutorado primeiramente fez um levantamento histórico dos principais trabalhos encontrados na literatura para a solução do problema PET. Várias abordagens são adotadas por diversos autores envolvendo análises estáticas e dinâmicas, estudos determinísticos e não-determinísticos com a consideração da influência de incertezas internas e externas. As limitações e principais dificuldades de cada abordagem bem como suas principais vantagens foram apresentadas e discutidas resultando em uma importante base de conhecimento e direcionador de estudos para a comunidade científica.

Posteriormente, no Capítulo 2, foi apresentada a formulação matemática do problema PET considerando uma análise dinâmica. Nesta abordagem todos os estágios ao longo do horizonte de planejamento foram representados por uma matriz solução e a avaliação dos planos candidatos foi baseada em um modelo de fluxo de potência DC incluindo o cálculo das perdas ôhmicas do sistema.

Em seqüência, foi apresentada a adequação de várias técnicas de otimização, baseadas em metaheurísticas, para a resolução do problema PET considerando uma abordagem dinâmica e determinística. Uma descrição detalhada das ferramentas TS, PSO, ACO, ES, DE e AIS foi apresentada incluindo suas características e os algoritmos propostos para a resolução do problema PET. Adicionalmente, foi destacada a importância da técnica de construção de planos de expansão iniciais, nomeada de Inicialização Inteligente, cujo objetivo é melhorar a busca das metaheurísticas e contribuir para uma melhor qualidade do resultado final.

No Capítulo 3, primeiramente foi demonstrada a importância de se utilizar a Inicialização Inteligente para a construção de seqüências iniciais de melhor qualidade, a qual notadamente contribuiu para um melhor desempenho das



metaheurísticas estudadas. Posteriormente, foi realizado um estudo comparativo das ferramentas de otimização sendo destacados os desempenhos destas técnicas em relação à qualidade dos planos de expansão encontrados e seus respectivos esforços computacionais. Esta análise comparativa corresponde a uma das principais contribuições deste trabalho tendo resultado em publicação de trabalhos técnicos [LSMRRS08, RLM09, MRLR09, LRMR10, LRHM11, LRM11] incluindo periódicos internacionais e capítulos de livros. Adicionalmente, pela primeira vez, a metaheurística AIS foi utilizada para a resolução do problema PET cujo desempenho alcançado a qualifica como uma das técnicas mais eficientes ao lado da ES [RLH09a, RLH09b].

O Capítulo 4 destinou-se primeiramente à discussão sobre adoção de critérios de segurança através do modelo determinístico “N-1” e métodos probabilísticos baseados em índices de confiabilidade. Um estudo foi apresentado incluindo ou não o critério determinístico “N-1” como uma restrição a ser atendida pelo sistema de transmissão. Após a avaliação dos índices de confiabilidade para ambas condições, pôde-se observar que as redes que atendem ao critério de segurança “N-1” possuem um elevado investimento, embora apresentem excelentes índices de confiabilidade. Por outro lado, quando somente o critério da rede intacta é atendido, menores investimentos são necessários e ainda assim é possível encontrar bons índices de confiabilidade, principalmente ao adotar um modelo de curva horária para a representação da demanda.

Embora o critério de segurança “N-1” pareça não ser a melhor opção, já que há uma elevada tarifa a ser recuperada, esta tem sido a estratégia adotada pela maioria das companhias ao redor do mundo já que as mesmas não possuem um consenso sobre quais valores de índices de confiabilidade indicam um sistema de potência com uma qualidade aceitável.

Ainda neste mesmo capítulo foi apresentada, como alternativa em relação à adoção do critério de segurança “N-1”, uma nova metodologia de classificação de contingências de sistemas de transmissão baseada em índices de

desempenho os quais traduzem o real impacto de contingências quanto a sobrecargas no sistema além da adoção de estratégias eficientes para a redução do número de avaliações, menor esforço computacional, para classificação de contingências de 2ª e 3ª ordens.

Tais índices de desempenho podem ser usados como critérios de segurança a ser atendidos pelo modelo de otimização em problemas PET. Assim, o critério de segurança “N-1” pode ser substituído por um critério menos rigoroso, por exemplo, garantir que os planos de expansão atendam a um índice  $PI_M < 0,2$  para contingências de 1ª ordem, ou seja, é aceitável que o sistema de transmissão sob planejamento tenha sobrecargas de até 20% considerando contingências de 1ª ordem dentro da área ou zona de interesse de planejamento. Deste modo, um menor investimento é exigido e mesmo assim é possível encontrar planos de expansão com uma boa qualidade de fornecimento de energia. Ao adotar o critério de segurança “N-1”, é necessário em alguns casos a adição de inúmeros circuitos para resolver pequenos problemas de sobrecargas locais conhecidos e aceitáveis para o sistema. Outro fato é que o sistema enfrenta condições de carga pico durante pequenos intervalos de tempo, sendo cautelosa a adoção do critério de segurança “N-1”. Adicionalmente, os índices de desempenho podem, em uma fase preliminar e durante a avaliação dos planos candidatos, auxiliar na criação da lista de ramos (circuitos) elegíveis a receber reforços nos estudos de planejamento. Vários sistemas foram usados para demonstrar a metodologia de classificação eficiente de contingências baseada em índices de desempenho.

No Capítulo 5 foi apresentado o software *PLANNER*, desenvolvido para o estudo de planejamento de sistemas de grande porte. O mesmo é composto pelas ferramentas *TRANK*, responsável pela classificação de contingências e apontar os ramos mais indicados a receber reforços, e *TEPOP*, o qual é destinado a fornecer os melhores planos de expansão através da metaheurística ES incluindo o atendimento a critérios de segurança baseado em índices de desempenho.

Embora a abordagem dinâmica pudesse ter sido implementada com o viés de grande esforço computacional devido à avaliação de análises adicionais referentes ao atendimento a critérios de segurança, o software *Planner* e suas ferramentas foram desenvolvidos para um estudo com abordagem estática. Prioridade foi destinada a correta modelagem do sistema de grande porte, o qual possui transformadores defasadores, elementos resultantes da obtenção de sistemas equivalentes, transformadores com alteração de impedâncias de acordo com posição de taps e ângulos de defasagem, entre outros. Tais particularidades, foram adequadamente consideradas no desenvolvimento do software o qual foi validado ao comparar os resultados do fluxo DC com resultados do fluxo de potência do programa da PTI.

Como premissa para o estudo de planejamento pela ferramenta *TEPOP*, foi destacada a importância da definição do índice de desempenho a ser considerado como critério de segurança. Primeiramente, a partir da ferramenta *TRANK*, deve-se conhecer a condição atual de operação do sistema e então definir o critério de segurança a ser atendido no horizonte de planejamento. Adotar um critério de segurança mais exigente que a situação atual pode resultar em inúmeros reforços para resolver uma condição existente da rede e não devido somente às condições do horizonte de planejamento.

Conforme pôde ser visto, é possível através da ferramenta *TEPOP* definir ordens de mérito para o despacho das unidades geradoras, as quais definitivamente influenciam na obtenção dos planos de expansão. O objetivo em definir uma ordem para o despacho é representar na programação linear os custos de fornecimento de energia das unidades geradoras. A inclusão de tais custos na função objetivo se tornaria difícil pois o planejamento da expansão do sistema é feito para a carga pico e neste caso seria necessário avaliar todas as condições de demanda ao longo do ano para cada plano candidato durante o processo de otimização.

Em relação aos custos de perdas ôhmicas, os mesmos não foram considerados na função objetivo, embora o modelo de avaliação baseado em

fluxo DC incluía o cálculo de perdas para o sistema. Devido a necessidade em se obter um sistema equivalente para o estudo do sistema de grande porte, novas conexões na zona de fronteira são criadas podendo inclusive possuir valores de resistência negativos. Além disso, as informações dos valores reais de resistência da região externa são perdidos com a redução e conseqüentemente os custos podem ser avaliados incorretamente. Portanto, embora a metodologia apresentada no Capítulo 2 tenha incluído custos de perdas ôhmicas na função objetivo, ao analisar sistemas de grande porte, Capítulo 5, somente os custos de investimento do sistema de transmissão foram minimizados através da função objetivo. De forma a incluir também os custos de perdas ôhmicas, poderia ter sido adotada a estratégia de avaliá-los somente dentro da região de interesse excluindo as conexões com as barras de fronteira.

Ao comparar os fluxos de potência ativo obtidos pelo *TEPOP* e o programa da PTI usando o modelo AC, nota-se que a ferramenta desenvolvida foi capaz de tratar corretamente os problemas de fluxo de potência ativo no sistema atendendo ao critério de segurança exigido. Contudo, não se espera que os planos de expansão encontrados atendam aos requisitos de fluxos reativos e níveis de tensão do sistema. O objetivo final do ambiente *PLANNER* foi desenvolver as ferramentas *TRANK* e *TEPOP* como sendo um passo inicial para o planejamento da expansão de sistemas de potência. A partir dos melhores planos encontrados por estas ferramentas é possível prosseguir com o desenvolvimento de uma ferramenta de otimização baseada em fluxo AC para alocação de reativos no sistema.

Dentre os principais pontos a serem melhorados no ambiente *PLANNER* podem ser citados capacitar a ferramenta *TEPOP* em realizar estudos de planejamento de abordagem dinâmica e não permitir o isolamento de barras importantes (grandes unidades geradoras ou grandes centros de carga) ou subsistemas em condições de contingência de 1ª ordem nos planos indicados. Estas conexões também devem ser consideradas como pontos importantes a receber reforços pelo processo de otimização na solução do problema PET.

Portanto, como principais contribuições desta tese para a comunidade científica, podem ser citadas:

- ✓ Análise criteriosa de desempenho de várias metaheurísticas para a resolução do problema PET considerando uma abordagem determinística e dinâmica;
- ✓ Primeira aplicação da metaheurística de Sistemas Imunológicos Artificiais (*Artificial Immune Systems – AIS*) ao problema PET, tendo apresentado um dos melhores desempenhos ao lado da metaheurística de Estratégias de Evolução (*Evolution Strategies – ES*);
- ✓ Desenvolvimento de uma metodologia para classificação de contingências baseada em índices de desempenho incluindo estratégias de redução no número de análises de contingências de 2ª e 3ª ordens sem comprometer a qualidade das listas criadas;
- ✓ Definição de novos critérios de segurança a ser atendidos pelos planos de expansão baseados em índices de desempenho em alternativa ao atendimento do critério “N-1”;
- ✓ Proposição de uma ferramenta computacional para o estudo inicial de planejamento de sistemas de grande porte considerando uma abordagem estática e usando o modelo de fluxo de potência DC com inclusão de perdas ôhmicas.

Assim, mediante o trabalho desenvolvido é possível apontar as seguintes propostas de continuidade de estudos desta tese de doutorado:

- ✓ Desenvolver uma ferramenta de otimização baseada em análises de fluxo de potência AC para alocação de reativos, numa etapa posterior, para que os melhores planos encontrados sejam avaliados de forma

- mais completa observando as condições dos níveis de tensão e comportamento dos fluxos reativos;
- ✓ Desenvolver uma ferramenta capaz de trabalhar com processamento distribuído, cujo objetivo é reduzir o tempo computacional necessário para se obter os melhores planos de expansão durante a fase de otimização, principalmente ao considerarmos a análise de sistemas de grande porte;
  - ✓ Desenvolver uma nova metodologia que considere a presença de incertezas externas, como indefinições de taxas de interesse e projeções de mercado (demanda e energia), no estudo de planejamento do sistema. O objetivo é obter planos mais flexíveis ou robustos, capazes de suportar os diferentes cenários futuros produzindo uma melhor estratégia de expansão para o sistema;
  - ✓ Desenvolver uma nova ferramenta de otimização que inclua as melhores características das metaheurísticas estudadas neste trabalho, com o objetivo de melhorar ainda mais a qualidade das seqüências encontradas;
  - ✓ Desenvolver uma metodologia capaz de incluir de forma eficiente a avaliação de confiabilidade, expressa pelo índice LOLC, no processo de minimização dos custos de investimentos e operação. Recentemente, este conceito recebeu atenção especial em aplicações em sistemas elétricos de potência de pequeno porte [A11].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [A11] P.E. Abreu, “Planejamento da Expansão de Redes de Energia Elétrica Considerando o Custo da Confiabilidade”, Dissertação de Mestrado, UFSJ/CEFET-MG, São João del Rei, MG, 2011.
- [ADP07] A. Ahuja, S. Das, A. Pahwa, “An AIS-ACO Hybrid Approach for Multi-Objective Distribution System Reconfiguration”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 22, No. 3, pp. 1101 – 1111, Aug. 2007.
- [AFPB03] C.I.F. Agreira, C.M.M. Ferreira, J.A.D. Pinto, F.P.M. Barbosa, “Contingency Screening and Ranking Algorithm Using Two Different Sets of Security Performance Indices”, *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, Vol. 4, June 2003.
- [AMC03] N. Alguacil, A.L. Motto, A.J. Conejo, “Transmission Expansion Planning: A Mixed-Integer LP Approach”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 18, pp.1070 – 1077, Aug. 2003.
- [APM79] IEEE Reliability Test system Task force of the Application of Probability Methods Subcommittee, “IEEE Reliability Test System”, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-98, pp. 2047-2054, Nov./Dec. 1979.
- [AST83] O. Alsac, B. Stott, W.F. Tinney, “Sparsity-Oriented Compensation Methods for Modified Network Solutions”, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 102, No. 5, pp. 1050–1060 , May 1983.
- [APM99] IEEE APM Subcommittee, “IEEE Reliability Test System – 1996”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 14, No. 3, pp. 1010–1020 , Aug. 1999.
- [B04] J.R.P. Barros, “Planejamento da Expansão da Transmissão Baseada em Custos Marginais de Confiabilidade”, Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, Ago. 2004.
- [BAH77] A. Brameller, R.N. Allan, Y.M. Hamam, “Sparsity – Its Practical Application to System Analysis”, Pitman Pub., 1977.
- [BBSS04] M.O. Buygi, G. Balzer, H.M. Shanechi, M. Shahidehpour, “Market-Based Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 19, No. 4, pp. 2060 – 2067, Nov. 2004.
- [BCFL03] P. Bresesti, A. Capasso, M. C. Falvo, S. Lauria, “Power System Planning Under Uncertainty Conditions. Criteria for Transmission Network Flexibility Evaluation”, *IEEE Bologna Power Tech*, paper 201, Italy, Jun. 2003.

- [BOA01] S. Binato, G.C. Oliveira, J.L. Araújo, “A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 16, pp. 247–253, May 2001.
- [BOPG01] L. Bahiense, G.C. Oliveira, M.V.F. Pereira, S. Granville, “A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 16, pp. 560–565, Aug. 2001.
- [BPG01] S. Binato, M.V.F. Pereira, S. Granville, “A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 16, pp. 235–240, May 2001.
- [BS03] A.S. Braga, J.T. Saraiva, “Transmission Expansion Planning and Long Term Marginal Prices Calculation Using Simulated Annealing”, *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, June 2006.
- [BS05] A.S. Braga, J.T. Saraiva, “A Multiyear Dynamic Approach for Transmission Expansion Planning and Long-Term Marginal Costs Computation”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 20, No. 3, pp. 1631 – 1639, Aug. 2005.
- [BSBSP06] M.O. Buygi, H.M. Shanechi, G. Balzer, M. Shahidehpour, N. Pariz, “Network Planning in Unbundled Power Systems”, *IEEE Trans. on PWRs.*, Vol. 21, No. 3, pp.1379 – 1387, Aug. 2006.
- [BSS88] O. Bertoldi, L. Salvaderi, S. Scalcino, “Monte Carlo Approach in Planning Studies: an application to IEEE RTS”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 3 pp. 1146-1154, 1988.
- [BSZ95a] M.L. Baughman, S.N. Siddiqi, J.W. Zarnikau, “Integrating transmission into IRP – Part I: Analytical approach”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 10, pp. 1652-1659, 1995.
- [BSZ95b] M.L. Baughman, S.N. Siddiqi, J.W. Zarnikau, “Integrating transmission into IRP – Part II: Case study results”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 10, pp. 1660-1666, 1995.
- [CCS04] J.P. Chiou, C.F. Chang, C.T. Su, “Ant Direction Hybrid Differential Evolution for Solving Large Capacitor Placement Problems”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 19, No. 4, pp. 1794 – 1800, Nov. 2004.
- [CGTNC07] E.G. Carrano, F.G. Guimarães, R.H.C. Takahashi, O.M. Neto, F. Campelo, “Electric Distribution Network Expansion under Load-Evolution Uncertainty Using an Immune System Inspired Algorithm”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 22, No. 2, pp. 851 – 861, May 2007.



- [CIGRE93] CIGRE Working Group 37.10, "Dealing with Uncertainty in System Planning – Has Flexibility Proved to be an Adequate Answer?", *ELECTRA*, No. 151, pp. 53 – 65, 1993.
- [CIGRE95] CIGRE Working Group 37.10, "Methods for Planning under Uncertainty – Towards Flexibility in Power System Development", *ELECTRA*, No. 161, pp. 143 – 164, 1995.
- [CN99] J.L. Ceciliano, R. Nieva, "Transmission Network Planning Using Evolutionary Programming", *Proc. of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, Vol. 3, pp. 1796 – 1803, 1999.
- [CSNT08] E.G. Carrano, B.B. Souza, O.M. Neto, R.H.C. Takahashi, "An Immune Inspired Memetic Algorithm for Power Distribution System Design under Load Evolution Uncertainties", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 3252 – 3258, June 2008.
- [CZ02] L.N. Castro, F.J. Von Zuben, "Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle", *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 3, pp. 239–251, June 2002.
- [D77] I.S. Duff, "A Survey of Sparse Matrix Research", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 65, No. 4, April 1977.
- [DE73] Y.P. Dusonchet, A.H. El-Abiad, "Transmission Planning Using Discrete Dynamic Optimization", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-92, pp. 1358–1371, July 1973.
- [DG97] M. Dorigo, L. M. Gambardella, "Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem", *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 53 – 66, 1997.
- [DLLW06] Z.Y. Dong, M. Lu, Z. Lu, K.P. Wong, "A Differential Evolution Based Method for Power System Planning", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2699 – 2706, Vancouver, Canada, July 2006.
- [DS04] M. Dorigo, T. Stützle, "Ant Colony Optimization", The MIT Press, A Bradford Book, England, 2004.
- [DY02] G. Duan, Y. Yu, "Problem-Specific Genetic Algorithm for Power Transmission System Planning", *Electric Power Systems Research*, Vol. 61, No. 1, pp. 41-50, Feb. 2002.
- [EGR04] A.H. Escobar, R.A. Gallego, R. Romero, "Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems", *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 19, No. 2, pp. 735-744, May 2004.

- [ELZ05] A.A.A. Esmín, G. Lambert-Torres, A.C. Zambroni de Souza, “A Hybrid Particle Swarm Optimization Applied to Loss Power Minimization”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 20, No. 2, pp. 859 – 866, May 2005.
- [F94] D.B. Fogel, “An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization”, *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 5, No.1, pp. 3 – 14, Jan. 1994.
- [FBRF05] H. Faria Jr., S. Binato, M.G.C. Resende, D.M. Falcão, “Power Transmission Network Design by Greedy Randomized Adaptive Path Relinking ”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 20, No. 1, pp. 43-49, Feb. 2005.
- [FH03] R. Fang, D.J. Hill, “A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 18, No 1, pp. 374 – 380, Feb. 2003.
- [G70] L.L. Garver, “Transmission Network Estimation Using Linear Programming”, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-89, No. 7, Sep. 1970.
- [G89] F. Glover, “Tabu Search – Part I”, *ORSA J. Comput.*, Vol. 1, No. 3, pp. 190 – 206, 1989.
- [G90] F. Glover, “Tabu Search – Part II”, *ORSA J. Comput.*, Vol. 2, No. 1, pp. 4 – 32, 1990.
- [GAMR97] R.A. Gallego, A.B. Alves, A. Monticelli, R. Romero, “Parallel Simulated Annealing Applied to Long Term Transmission Network Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 12, pp. 181-188, 1997.
- [GCCP93] B.G. Gorenstin, N.M. Campodonico, J.P. Costa, M.V.F. Pereira, “Power System Expansion Planning Under Uncertainty”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 8, pp. 129-136, 1993.
- [GKOOYVU04] J.F. Gomez, H.M. Khodr, P.M. De Oliveira, L. Ocque, J.M. Yusta, R. Villasana, A.J. Urdaneta, “Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 19, No. 2, pp. 996 – 1004, May 2004.
- [GLTW93] F. Glover, M. Laguna, E. Taillard, D. Werra (eds.), “Tabu Search”, Science Publishers, Basel, Switzerland, 1993.
- [GMR98a] R.A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero, “Transmission Expansion Planning by Extended Genetic Algorithm”, *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 145, No. 3, pp. 329–335, May 1998.
- [GMR98b] R.A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero, “Comparative studies on nonconvex optimization methods for transmission network

- expansion planning”, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 13, pp. 822–828, Aug. 1998.
- [GRM00] R.A. Gallego, R. Romero, A.J. Monticelli, “Tabu search Algorithm for Network Synthesis”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 15, pp. 490–495, May 2000.
- [GS01] H.A. Gil, E.L. da Silva, “A Reliable Approach for Solving the Transmission Network Expansion Planning Problem Using Genetic Algorithms”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 58, No. 1, pp. 45-51, May 2001.
- [HG90] E. Hirst, C. Goldman, “Key issues in integrated resource planning for electric utilities”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 5, pp. 1105-1111, 1990.
- [HLB07] L.M. Honório, A.M. Leite da Silva, D.A. Barbosa, “A Gradient-Based Artificial Immune System Applied to Optimal Power Flow Problems”, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Berlin, Vol. 4628, pp. 1 -12, Aug. 2007.
- [JCYZ07] Y.X. Jin, H.Z. Cheng, J.Y. Yan, L. Zhang, “New Discrete Method for Particle Swarm Optimization and Its Application in Transmission Network Expansion Planning”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, pp. 227 – 233, 2007.
- [KE95] J. Kennedy, R.Eberhart, “Particle Swarm Optimization”, *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, pp. 1942 – 1948, Dec. 1995.
- [KSBM07] S. Kannan, S.M.R. Slochanal, S. Baskar, P. Murugan, “Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning in the Partially Deregulated Environment”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 1, No. 1, pp. 111 – 118, Jan. 2007.
- [KSP05] S. Kannan, S.M.R. Slochanal, N.P. Padhy, “Application and Comparison of Metaheuristics Techniques to Generation Expansion Planning Problem”, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, No. 1, pp. 466–475, Feb. 2005.
- [L06] G.C. Liao, “Application of an Immune Algorithm to the Short-term Unit Commitment Problem in Power System Operation”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 153, No. 3, pp. 309 – 302, May 2006.
- [LCAV03] G. Latorre, R.D. Cruz, J.M. Areiza, A. Villegas, “Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 18, 2, pp. 938 – 946, May 2003.
- [LCWD07] C.H. Liang, C.Y. Chung, K.P. Wong, X.Z. Duan, “Parallel Optimal Reactive Power Flow Based on Cooperative Co-

- evolutionary Differential Evolution and Power System Decomposition”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 22, No. 1, pp. 249 – 257; 2007.
- [LMMB00] A.M. Leite da Silva, L.A.F. Manso, J.C.O. Mello, R. Billinton, “Pseudo-chronological simulation for composite reliability analysis with time varying loads”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 15, No. 1, pp. 73-80, Feb. 2000.
- [LMRR08] A.M. Leite da Silva, L.A.F. Manso, L.C. Resende, L.S. Rezende, “Tabu Search Applied to Transmission Expansion Planning Considering Losses and Interruption Costs”, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> PMAPS*, Rincón, Puerto Rico, May 2008.
- [LRHM11] A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.M. Honório, L.A.F. Manso, “Performance Comparison of Metaheuristics to Solve the Multi-Stage Transmission Expansion Planning Problem”, *IET Gener., Transm. & Distrib.*, Vol. 5, No. 3, pp. 360 – 367, March 2011.
- [LRM11] A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.A.F. Manso, “Transmission Expansion Planning: A Methodology to Include Security Criteria and Uncertainties Using Optimization Techniques”, Chapter 6, In G.J. Anders, A. Vaccaro, *Innovations in Power Systems Reliability*, Springer-London, pp. 191 – 220, 2011.
- [LRMA10] A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.A.F. Manso, G.J. Anders, “Transmission Expansion Planning: A Discussion on Reliability and “N-1” Security Criteria”, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> PMAPS*, Singapore, June 2010.
- [LRMR10] A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.A.F. Manso, L.C. Resende, “Reliability Worth Applied to Transmission Expansion Planning Based on Ant Colony System”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, No. 10, pp. 1077 – 1084, Dec. 2010.
- [LSMRRS08] A.M. Leite da Silva, C.E. Sacramento, L.A.F. Manso, L.S. Rezende, L.C. Resende, W.S. Sales, “Metaheuristic-Based Optimization Methods for Transmission Expansion Planning Considering Unreliability Costs”, Chapter 4, In E.D. Castronuovo, *Optimization Advances in Electric Power Systems*, Nova Publishers, USA, pp 59 – 86, 2008.
- [LSRMSR06] A.M. Leite da Silva, W.S. Sales, L.C. Resende, L.A.F. Manso, C.E. Sacramento, L.S. Rezende, “Evolution Strategies to Transmission Expansion Planning Considering Unreliability Costs”, *Proc. of the 9<sup>th</sup> PMAPS – Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Stockholm, Sweden, 11-15/Jun 2006.
- [LY98] K.Y. Lee, F.F. Yang, “Optimal Reactive Power Planning Using Evolutionary Algorithms: A Comparative Study for Evolutionary

- Programming, Evolutionary Strategy, Genetic Algorithm, and Linear Programming”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 13, No. 1, pp. 101 – 108, Feb. 1998.
- [M83] A. J. Monticelli, “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, Edgard Blücher, São Paulo, 1983.
- [MF02] V. Miranda, N. Fonseca, “EPSO-Evolutionary Particle Swarm Optimization, a New Algorithm with Applications in Power Systems”, *Proc. IEEE/PES Trans. and Distrib. Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*, Vol. 2, pp. 745 – 750, Oct. 2002.
- [MI07] H. Mori, Y. Iimura, “Transmission Network Expansion Planning with a Hybrid Meta-heuristic Method of Parallel Tabu Search and Ordinal Optimization”, *International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*, Vol. 5, No. 8, pp. 1 – 6, Nov. 2007.
- [ML04] L.A.F. Manso, A. M. Leite da Silva, “Probabilistic Criteria for Power System Expansion Planning”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 69, No. 1, pp. 51-58, April 2004.
- [MLSRR09] L.A.F. Manso, A.M. Leite da Silva, C.E. Sacramento, L.C. Resende, L.S. Rezende, “Planejamento da Expansão da Transmissão sob Incertezas Internas e Externas”, *XX SNTPEE*, Recife, PE, 2009.
- [MRLR08] L.A.F. Manso, L.C. Resende, A.M. Leite da Silva, L.S. Rezende, “Expansão da Transmissão via Busca Tabu Considerando Custos de Interrupção e Perdas”, *SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Belo Horizonte, MG, 2008.
- [MS01] H. Mori, Y. Sone, “A Parallel Tabu Search Based Approach to Transmission Network Expansion Planning”, *IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, 2001.
- [MS07] H. Mori, K. Shimomugi, “Transmission Network Expansion Planning with Scatter Search”, *IEEE International Conference on Syst. Man and Cyber.*, pp. 3749–3754, Canada, Oct. 2007.
- [MSLRSR07] L.A.F. Manso, C.E. Sacramento, A.M. Leite da Silva, L.C. Resende, W.S. Sales e L.S. Rezende, “Planejamento da Expansão da Transmissão via Estratégias de Evolução Considerando o Valor da Confiabilidade e os Custos de Perdas”, *XIX SNTPEE*, Grupo VII, GPL/026, RJ, 2007.
- [MSPCPP82] A. Monticelli, A. Santos Jr., M.V.F. Pereira, S.H.F. Cunha, B.J. Parker, J.C.G. Praça, “Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion”, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-101 pp. 3919-3925, 1982.

- [NADRV07] J.A.D. Navarro, J.L.B. Agustín, A. Diaz, D. Requena, E.P. Vargas, “Optimal Parameters of FACTS Devices in Electric Power Systems Applying Evolutionary Strategies”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 29, pp. 83-90, 2007.
- [OSPC05] E.J. de Oliveira, I.C. da Silva Jr., J.L.R. Pereira, S. Carneiro Jr., “Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 20, No. 3, pp. 1616-1621, Aug. 2005.
- [PLSL05] J.B. Park, K.S. Lee, J.R. Shin, K.Y. Lee, “A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 20, No. 1, pp. 34 – 42, Feb. 2005.
- [PP85] M.V.F. Pereira, L.M.V.G. Pinto, “Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-104, pp. 381–389, Feb. 1985.
- [PPCO85] M.V.F. Pereira, L.M.V.G. Pinto, S.H.F. Cunha, G.C. Oliveira, “A Decomposition Approach to Automated Generation /Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-104, pp. 3074-3083, 1985.
- [PSTCA] “Power Systems Test Case Archive: 118 Bus Power Flow Test Case” *Department of Electrical Engineering*, University of Washington, <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>.
- [R06] L.S. Rezende, “Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Através de Otimização por Colônia de Formigas”, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, 2006.
- [RGM96] R. Romero, R.A. Gallego, A. Monticelli, “Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 11, pp. 364–369, Feb. 1996.
- [RGR07] M.J. Rider, A.V. Garcia, R. Romero, “Power System Transmission Network Expansion Planning Using AC Model”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 1, No. 5, pp. 731 – 742, Sep. 2007.
- [RLH09a] L.S. Rezende, A.M. Leite da Silva, L.M. Honório, “Artificial Immune System Applied to the Multi-stage Transmission Expansion Planning”, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Vol. 5666, pp. 178 – 191, Aug. 2009.
- [RLH09b] L.S. Rezende, A.M. Leite da Silva, L.M. Honório, “Artificial Immune Systems and Differential Evolution Based

- Approaches Applied to Multi-stage Transmission Expansion Planning”, *Proc. of the 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Intelligent System Applications to Power Systems*, Curitiba, PR, Nov. 2009.
- [RLM08] L.S. Rezende, A.M. Leite da Silva e L.A.F. Manso, “Aplicação de Colônia de Formigas ao Planejamento Cronológico da Expansão da Transmissão Considerando Restrições de Confiabilidade”, *XVII CBA – Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora, MG, Set. 2008.
- [RLM09] L.S. Rezende, A.M. Leite da Silva e L.A.F. Manso, “Colônia de Formigas Aplicada ao Planejamento da Expansão da Transmissão Considerando Custos de Interrupção”, *XI SEPOPE*, Belém, PA, 2009.
- [RLM10] L.S. Rezende, A.M. Leite da Silva e L.A.F. Manso, “Planejamento da Expansão da Transmissão: Uma Discussão sobre Confiabilidade e o Critério de Segurança”, *XVIII CBA – Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito, MS, 2010.
- [RLMSR06] L.S. Rezende, A.M. Leite da Silva, L.A.F. Manso, W.S. Sales e L.C. Resende, “Planejamento da Expansão da Transmissão Utilizando Colônia de Formigas”, *XVI CBA – Congresso Brasileiro de Automática*, Salvador, BA, Out. 2006.
- [RM94] R. Romero, A. Monticelli, “A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 9 pp. 373-380, 1994.
- [RMGH02] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, S. Haffner, “Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 149, No. 1, pp. 27 – 36, Jan. 2002.
- [RPCS96] H. Rudnick, R. Palma, E. Cura,, C. Silva, “Economically Adapted Transmission Systems in Open Access Schemes – Application of Genetic Algorithms”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 1427–1440, Aug. 1996.
- [RRMM03] R. Romero, C. Rocha, M. Mantovani, J.R.S. Mantovani, “Analysis of Heuristic Algorithms for the Transportation Model in Static and Multistage Planning in Network Expansion Systems”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 150, No. 5, pp. 521 – 526, Sep. 2003.
- [RRMS05] R. Romero, C. Rocha, J.R.S. Mantovani, I.G. Sánchez, “Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model in Network Transmission Expansion Planning”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 152, No. 2, pp. 277 – 282, March 2005.
- [RRS07] R. Romero, M.J. Rider, I.J. Silva, “A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power*

- Syst.*, Vol. 22, No. 4, pp. 2289 – 2291, Nov. 2007.
- [RSM06] T.K.A.Rahman, S.I. Suliman, I. Musirin, “Artificial Immune-Based Optimization Technique for Solving Economic Dispatch in Power System”, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Berlin, Vol. 3931, pp. 338 – 345, March 2006.
- [S07] C.E. Sacramento, “Planejamento Dinâmico da Expansão de Sistemas de Subtransmissão Através de Metaheurísticas”, Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, MG, Ago. 2007.
- [SAA85] B. Stott, O. Alsac, F.L. Alvarado, "Analytical and Computational Improvements in Performance-Index Ranking Algorithms for Networks", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 154 – 160, 1985.
- [SB95] S.N. Siddiqi, M.L. Baughman, “Value-Based Transmission Planning and the Effects of Network Models”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 10, No. 4, pp. 1835 – 1842, Nov. 1995.
- [SFCM05] G.K. Stefopoulos, Y. Fang, G.J. Cokkinides, A.P.S. Meliopoulos, “Advanced Contingency Selection Methodology”, *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*, pp. 67 – 73, Oct. 2005.
- [SOOB01] E.L. da Silva, J.M.A. Ortiz, G.C. de Oliveira, S. Binato, “Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 16, pp. 62–68, Feb. 2001.
- [SP95] R. Storn, K. Price, “Differential Evolution – A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces”, *Technical Report TR-95-012*, ICSI, March 1995.
- [SR95] H.P. Schwefel, G. Rudolph, “Contemporary Evolution Strategies”, in F. Morán, A. Moreno, J.J. Merelo, P. Chacón (eds.), “Advances in Artificial Life”, *3<sup>rd</sup> Int. Conference on Artificial Life*, Vol. 929 of Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, Berlin, pp. 893 – 907, 1995.
- [SRC02] P.S. Sensarma, M. Rahmani, A. Carvalho, “A Comprehensive Method for Optimal Expansion Planning Using Particle Swarm Optimization”, *IEEE Power Eng. Society Winter Meeting*, Vol. 2, pp. 1317 – 1322, 2002.
- [SRMR05] I.G. Sánchez, R. Romero, J.R.S. Mantovani, M.J. Rider, “Transmission-Expansion Planning Using the DC Model and Nonlinear-programming Technique”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 152, No. 6, pp. 763 – 769, Nov. 2006.
- [SRRGM05] I.J. Silva, M.J. Rider, R. Romero, A.V. Garcia, C.A. Murari,



- “Transmission Network Expansion Planning with Security Constraints”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 152, No. 6, pp. 828 – 836, Nov. 2005.
- [SSL89] A. Seifu, S. Salon, G. List, “Optimization of transmission line planning including security constraints”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 4, pp.1507 – 1513, 1989.
- [STIS07] T. Sum-Im, G.A. Taylor, M.R. Irving, Y.H. Song, “A Differential Evolution Algorithm for Multistage Transmission Expansion Planning”, *UPEC 2007*, pp. 357 – 364, Sep. 2007.
- [TGS08] O.B. Tor, A.N. Guven, M. Shahidehpour, “Congestion-Driven Transmission Planning Considering the Impact of Generator Expansion”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 23, pp. 781 – 789, May 2008.
- [VGS85] R. Villasana, L.L. Garver, S.J. Salon, “Transmission Network Planning Using Linear Programming”, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-104, pp. 349-356, 1985.
- [VHL05] J.G. Vlachogiannis, N.D. Hatziaargyriou, K.Y. Lee, “Ant Colony System-Based Algorithm for Constrained Load Flow Problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, No. 3, pp. 1241–1248, Aug. 2005.
- [VMRDW03] S. Vassena, P. Mack, P. Rousseaux, C. Druet, L. Wehenkel, “A probabilistic approach to power system network planning under uncertainties”, *IEEE Bologna Power Tech*, paper 271, Italy, Jun. 2003.
- [VS08] M. Varadarajan, K.S. Swarup, “Differential Evolutionary Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 30, pp. 435 – 441, 2008.
- [W49] J.B. Ward, “Equivalent Circuits for Power Flow Studies”, *AIEEE – Trans. on American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 98, pp. 498 – 508, 1949.
- [WB93] L. Wenyuan, R. Billinton, “A Minimum Cost Assessment Method for Composite Generation and Transmission System Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Reliability Syst.*, Vol. 8, No. 2, pp. 628-635, May 1993.
- [WC97] F. Wen, C.S. Chang, “Transmission Network Optimal Planning Using the Tabu Search Method”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 42, No. 2, pp. 153-163, Aug. 1997.
- [WGO04] X. Wang, X.Z. Gao, S.J. Ovaska, “Artificial Immune Optimization Methods and Applications – A Survey”, *IEEE International Conference on Syst. Man and Cyber.*, Vol. 4, pp. 3415 – 3420, Oct. 2004.

- [XDW06] Z. Xu, Z.Y. Dong, K.P. Wong, "Transmission Planning in a Deregulated Environment", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 153, No. 3, pp. 326 – 334, May 2006.
- [XZW07] M. Xie, J. Zhong, F.F. Wu, "Multiyear Transmission Expansion Planning Using Ordinal Optimization", *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 22, No. 4, pp. 1420 – 1428, Nov. 2007.
- [Y01] H.K.M. Youssef, "Dynamic Transmission Planning Using a Constrained Genetic Algorithm", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 23, pp. 857 – 862, 2001
- [YCZ07] B. Yang, Y. Chen, Z. Zhao, "Survey on Applications of Particle Swarm Optimization in Electric Power Systems", *Proc. IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 481 – 486, 2007.
- [YGD08] Q. Yu, J. Guo, X. Duan, "Dynamic Multi-stage Transmission Network Expansion Planning", *DRPT 2008*, pp. 635 – 640, April 2008.
- [YH89] H. K. Youssef, R. Hackam, "New Transmission Planning Model", *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 4, pp. 9–18, Feb. 1989.
- [YHJX05] C. Yuehui, C. Haiyan, C. Jinfu, D. Xianzhong, "An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Multistage and Coordinated Planning of Transmission Systems", *IEEE/PES Trans. Distrib. Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, pp. 1 – 6, 2005.
- [YKFTN01] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, Y. Nakanishi, "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment", *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 15, No.4, pp. 1232 – 1239, 2001.
- [Z71] K. Zollenkopf, "Bi-factorisation: Basic Computational Algorithm and Programming Techniques". *Large Sparse Sets of Linear Equations*, pp. 75-96, Academic Press, 1971.