

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Raphael Paulo Braga Poubel**

**Planejamento Dinâmico da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia  
Elétrica**

Juiz de Fora  
2016

**Raphael Paulo Braga Poubel**

**Planejamento Dinâmico da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia  
Elétrica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Edimar José de Oliveira

Coorientador: Leonardo de Mello Honório

Juiz de Fora

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Poubel, Raphael.

Planejamento Dinâmico da Expansão de Sistemas de Transmissão de  
Energia Elétrica / Raphael Paulo Braga Poubel. – 2016.

80 f. : il.

Orientador: Edimar José de Oliveira

Coorientador: Leonardo de Mello Honório

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de  
Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

1. Planejamento da Expansão. 2. Acoplamento Temporal. 3. Coeficiente  
de Lagrange. 4. Algoritmo Heurístico. 5. Critérios de Confiabilidade. I.  
Oliveira, Edimar José de, orient. II. Honório, Leonardo de Mello, coorient.  
III. Título.

**Raphael Paulo Braga Poubel**

**Planejamento Dinâmico da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de Julho de 2016:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Edimar José de Oliveira - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Leonardo de Mello Honório - Coorientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Profa. Dra. Carmen Lucia Tancredo Borges  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Dr. Luiz Antônio da Fonseca Manso  
Universidade Federal de São João del-Rei

---

Prof. Dr. Ivo Chaves da Silva Júnior  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

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

## AGRADECIMENTOS

À toda minha família, em especial a minha mãe Elzaelena e minha irmã Laura, fontes inesgotáveis de amor.

À Elisa pelo carinho e compreensão ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus orientadores, professor Edimar José de Oliveira e professor Leonardo de Mello Honório, pela excelência na orientação, bem como pelos ensinamentos repassados, os quais foram essenciais tanto para a realização deste trabalho, como para minha formação profissional.

Aos amigos de doutorado, pelo companheirismo, incentivo, discussões técnicas e sugestões durante todo este período.

Ao LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica), pelo suporte técnico.

À CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

## RESUMO

O presente trabalho propõe um modelo não linear inteiro misto para o planejamento dinâmico da expansão da transmissão. Para a representação do modelo, se fez uso do fluxo de carga CC. As equações básicas do fluxo CC foram modificadas e expandidas de forma a incluir as variáveis de decisão e o acoplamento temporal entre os investimentos. Para a solução do modelo, de forma a mitigar as dificuldades inerentes à programação inteira, foram propostas técnicas de solução passo a passo. Em cada uma das técnicas as variáveis inteiras foram substituídas por uma função contínua de forma a se obter tempos computacionais viáveis. A discretização das variáveis inteiras se dá com o auxílio de índices de sensibilidade apropriados, calculados a partir do modelo acoplado. O trabalho também investiga metodologias para o planejamento dinâmico de linhas de transmissão, buscando um equilíbrio entre a economia e a confiabilidade no processo de decisão dos investimentos. O critério determinístico N-1 foi escolhido para garantir maior confiabilidade ao sistema.

Palavras-chave: Planejamento dinâmico da expansão. Fluxo de potência acoplado. Algoritmo heurístico. Multiplicadores de Lagrange.

## ABSTRACT

This work proposes a non-linear mixed integer model for dynamic transmission lines expansion planning. The DC load flow was used to represent the model. The basic equations of the DC load flow were modified and expanded to include the decision variables and the temporal coupling between investments. For the model solution, in order to mitigate the difficulties inherent of integer programming, step-by-step processes were proposed. In each of the techniques the integer variables have been replaced with a continuous function to obtain viable computational time. The discretization of the integer variables is made with the aid of appropriate sensitivity indexes, calculated from the coupled model. The work also suggests methods for dynamic transmission planning, seeking a balance between the economy and reliability in the investment decision process. The N-1 deterministic criteria was chosen to ensure system reliability.

Keywords: Dynamic expansion planning. Coupled power flow. Heuristic algorithms. Lagrange multipliers

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Função sigmoide para $x_{ij}^y(k)$ maior que zero. . . . .	31
Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo heurístico com base em lista dinâmica ( <i>DLHA</i> )	33
Figura 3.3 – Diagrama do Sistema Tutorial . . . . .	35
Figura 3.4 – Passos a serem modificados para a inclusão das restrições de segurança	37
Figura 3.5 – Sub-rotina do <i>DLHA</i> para inclusão das restrições de segurança . . . .	38
Figura 3.6 – Fluxograma do algoritmo heurístico de busca em árvore ( <i>TSHA</i> ) . . .	39
Figura 3.7 – Diagrama do Sistema Tutorial . . . . .	42
Figura 3.8 – Fluxograma de aplicação da técnica Algoritmos Genéticos . . . . .	44
Figura 4.1 – Diagrama do Sistema Seis Barras . . . . .	52
Figura 4.2 – Evolução dos custos do Sistema Seis barras obtidos pela técnica <i>TSHA</i>	56
Figura 4.3 – Diagrama do Sistema Garver . . . . .	57
Figura 4.4 – Evolução dos custos do Sistema Garver obtidos pela técnica <i>TSHA</i> . .	59
Figura 4.5 – Evolução dos custos do Sistema Sul obtidos pela técnica <i>TSHA</i> . . . .	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais dados para o sistema de 2 barramentos. . . . .	35
Tabela 3.2 – Dados de linhas para o sistema de 2 barramentos . . . . .	35
Tabela 3.3 – Valores de $ED_{ij(k)}^y$ para primeira solução do <i>CC-OPF</i> . . . . .	36
Tabela 3.4 – Índices para $yf = 1$ . . . . .	36
Tabela 3.5 – Resultados do <i>CC-OPF</i> com a linha $LT_2$ construída . . . . .	36
Tabela 3.6 – Resultado final para o sistema de 2 barramentos . . . . .	37
Tabela 3.7 – Valores de $ED_{ij(k)}^y$ para primeira solução do <i>CC-OPF</i> . . . . .	41
Tabela 3.8 – Índices para $yf = 1$ . . . . .	41
Tabela 3.9 – Resultados para a linha $LT_2$ . . . . .	41
Tabela 3.10–Resultados para a linha $LT_3$ . . . . .	41
Tabela 3.11–Resultados para a linha $LT_4$ . . . . .	42
Tabela 3.12–Resultado final para o Sistema Tutorial . . . . .	42
Tabela 3.13–Resumo das metodologias . . . . .	49
Tabela 4.1 – Valores de inicialização de $x_{ij(k)}^y$ . . . . .	52
Tabela 4.2 – Sequência de expansão para o Sistema Seis Barras: Técnica <i>DLHA</i> . .	53
Tabela 4.3 – Sequência de expansão para o Sistema Seis Barras com tolerância a sobrecarga . . . . .	54
Tabela 4.4 – Sequência de expansão para o Sistema Seis Barras sem tolerância a sobrecarga . . . . .	54
Tabela 4.5 – Estratégia de expansão para o Sistema Seis Barras: Técnica <i>TSHA</i> . .	55
Tabela 4.6 – Estratégia de expansão para o Sistema Seis Barras: Técnica <i>TSHA_AG</i>	57
Tabela 4.7 – Sequência de expansão para o Sistema Garver: Técnica <i>DLHA</i> . . . . .	58
Tabela 4.8 – Sequência de expansão para o Sistema Garver: Técnica <i>DLHA_RS</i> . .	58
Tabela 4.9 – Estratégia de expansão para o Sistema Garver: Técnica <i>TSHA</i> . . . . .	59
Tabela 4.10–Estratégia de expansão para o Sistema Garver: Técnica <i>TSHA_AG</i> . .	60
Tabela 4.11–Estratégia de expansão para o Sistema Garver: Técnica <i>TSHA_AG</i> . .	60
Tabela 4.12–Sequência de expansão para o Sistema Sul: Técnica <i>DLHA</i> . . . . .	61
Tabela 4.13–Sequência de expansão para o Sistema Sul: Técnica <i>DLHA_RS</i> . . . . .	62
Tabela 4.14–Estratégia de expansão para o Sistema Sul: Técnica <i>TSHA</i> . . . . .	62
Tabela 4.15–Estratégia de expansão para o Sistema Sul: Técnica <i>TSHA_AG</i> . . . . .	64
Tabela 4.16–Comparação entre tempos computacionais . . . . .	64
Tabela 4.17–Comparação entre tempos computacionais . . . . .	64
Tabela A.1–Dados de barra do Sistema Seis Barras . . . . .	75
Tabela A.2–Dados dos circuitos existentes no Sistema Seis Barras . . . . .	75
Tabela A.3–Dados dos circuitos candidatos do Sistema Seis Barras . . . . .	75
Tabela B.1–Dados de barra do Sistema Garver . . . . .	76
Tabela B.2–Dados dos circuitos existentes no Sistema Garver . . . . .	76
Tabela B.3–Dados dos circuitos candidatos do Sistema Garver . . . . .	76

Tabela C.1 – Dados de barra do sistema Sul Equivalente . . . . .	77
Tabela C.2 – Dados dos circuitos existentes do Sistema Sul Equivalente . . . . .	79
Tabela C.3 – Dados dos circuitos candidatos do Sistema Sul Equivalente . . . . .	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Continua
OPF	Optimal Power Flow (fluxo de potência ótimo)
IC-OPF	Integer Coupled Optimal Power Flow (fluxo de potência inteiro acoplado)
CC-OPF	Continuous Coupled Optimal Power Flow (fluxo de potência contínuo acoplado)
DLHA	Dynamic List Heuristic Algorithm (algoritmo heurístico com base em lista dinâmica)
TSHA	Tree Searching Heuristic Algorithm (algoritmo heurístico de busca em árvore)
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
PLS	Programação Linear Sucessiva
ML	Multiplicadores de Lagrange
AG	Algoritmo Genético
GRASP	Greedy Randomized Adaptative Search Procedure
BPSO	Binary Particle Swarm Optimization
DHBMO	Discrete Honey Bee Mating Optimization
DPSO	Discrete Particle Swarm Optimization
ACO	Ant Colony Optimization
LOLC	Loss of Load Cost
LOLE	Loss of Load Expectation
EENS	Expected Energy Not Supplied
DOL	Dynamic Ordered List (lista ordenada dinâmica)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>12</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	12
1.2	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO . . . . .	13
1.3	PUBLICAÇÕES RESULTANTE DO TRABALHO . . . . .	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	14
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE . . . . .</b>	<b>15</b>
2.1	INTRODUÇÃO . . . . .	15
2.2	PLANEJAMENTO ESTÁTICO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO . . . . .	15
2.3	PLANEJAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO . . . . .	19
2.4	PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO CONSIDERANDO A CONFIABILIDADE . . . . .	22
2.4.1	<b>Critérios de segurança . . . . .</b>	<b>22</b>
2.4.2	<b>Critérios de confiabilidade . . . . .</b>	<b>24</b>
2.5	CONCLUSÃO . . . . .	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA PARA O PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>27</b>
3.1	INTRODUÇÃO . . . . .	27
3.2	MODELAGEM PROPOSTA . . . . .	27
3.3	TÉCNICA DE SOLUÇÃO . . . . .	30
3.4	ALGORITMO HEURÍSTICO COM BASE EM LISTA DINÂMICA ( <i>DLHA</i> ) . . . . .	32
3.4.1	<b>Caso tutorial para a técnica <i>DLHA</i> . . . . .</b>	<b>35</b>
3.5	ALGORITMO HEURÍSTICO COM BASE EM LISTA DINÂMICA E RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA ( <i>DLHA_RS</i> ) . . . . .	36
3.6	ALGORITMO HEURÍSTICO DE BUSCA EM ÁRVORE ( <i>TSHA</i> ) . . . . .	39
3.6.1	<b>Caso tutorial para a técnica <i>TSHA</i> . . . . .</b>	<b>40</b>
3.7	PLANEJAMENTO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO ( <i>TSHA_AG</i> )	43
3.7.1	<b>Estrutura do cromossomo . . . . .</b>	<b>46</b>
3.7.2	<b>Seleção por torneio . . . . .</b>	<b>47</b>
3.7.3	<b>Operador de cruzamento . . . . .</b>	<b>47</b>
3.7.4	<b>Operador de mutação . . . . .</b>	<b>48</b>
3.7.5	<b>Estratégia elitista . . . . .</b>	<b>48</b>
3.8	SÍNTESE DOS MÉTODOS . . . . .	48
3.9	CONCLUSÃO . . . . .	49

<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASOS</b>	<b>51</b>
4.1	INTRODUÇÃO	51
4.2	INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DECISÃO	51
4.3	SISTEMA SEIS BARRAS	52
4.3.1	Resultados obtidos pela técnica <i>DLHA</i>	53
4.3.2	Resultados obtidos pela técnica <i>DLHA_RS</i>	54
4.3.3	Resultados obtidos pela técnica <i>TSHA</i>	55
4.3.4	Resultados obtidos pela técnica <i>TSHA_AG</i>	56
4.4	SISTEMA GARVER	57
4.4.1	Resultados obtidos pela técnica <i>DLHA</i>	58
4.4.2	Resultados obtidos pela técnica <i>DLHA_RS</i>	58
4.4.3	Resultados obtidos pela técnica <i>TSHA</i>	59
4.4.4	Resultados obtidos pela técnica <i>TSHA_AG</i>	60
4.5	SISTEMA SUL EQUIVALENTE BRASILEIRO	61
4.5.1	Resultados obtidos pela técnica <i>DLHA</i>	61
4.5.2	Resultados obtidos pela técnica <i>DLHA_RS</i>	61
4.5.3	Resultados obtidos pela técnica <i>TSHA</i>	62
4.5.4	Resultados obtidos pela técnica <i>TSHA_AG</i>	63
4.6	ASPECTOS COMPUTACIONAIS	64
4.7	CONCLUSÃO	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTUROS</b>	<b>66</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
5.2	TRABALHOS FUTUROS	67
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE A – Dados do Sistema Seis Barras</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE B – Dados do Sistema Garver</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE C – Dados do sistema Sul Equivalente</b>	<b>77</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Brasil, o setor elétrico se desenvolveu de uma maneira muito particular, enquanto nos países de vanguarda industrial a geração termoelétrica foi, e ainda é, o principal pilar de sustentação energética, a matriz energética brasileira foi determinada pela grande disponibilidade de bacias hidráulicas [1].

Apesar da matriz energética renovável a operação se tornou bastante complexa, haja vista o elevado número de variáveis de decisão, os recursos limitados, as inúmeras incertezas e a necessidade de contornar a sazonalidade dos períodos chuvoso e seco. Neste sentido, houve a necessidade de dividir o planejamento energético em planejamento de longo, médio e curto prazo. Em essência, os planejamentos de longo e médio prazo visam otimizar os fluxos anuais dos cursos de água do sistema, ao passo que o planejamento de curto prazo otimiza a operação do sistema.

Outro fator a ser considerado em sistemas elétricos com predominância hidráulica, é a distância existente entre as grandes usinas geradoras e os centros consumidores exigindo uma interligação elétrica adequada através do sistema de transmissão de energia elétrica. Tal aspecto torna necessário analisar as diferentes estratégias da expansão do sistema elétrico em relação à geração e à transmissão, a fim de garantir o atendimento aos consumidores com o menor custo possível.

Desta forma, surge o planejamento da expansão onde é estabelecido um programa de construção e instalação de novas unidades geradoras, reforços em linhas e subestações, definindo as diretrizes que constituem a base dos estudos de médio e longo prazo. No que diz respeito a inclusão de reforço em linhas de transmissão, os estudos de planejamento podem ser classificados em planejamento estático e dinâmico, de acordo com o horizonte de planejamento [2].

No planejamento estático, o objetivo é determinar onde e quais reforços deverão ser construídos de forma a atender uma previsão de demanda. Basicamente, o planejamento pode ser modelado como um problema de minimização de custos de investimentos sujeito a um conjunto de restrições econômicas, técnicas e de confiabilidade. Em sua modelagem, a grande maioria dos trabalhos faz uso do modelo de fluxo de carga CC, por ser uma boa aproximação e para evitar maiores dificuldades a um problema já complexo.

Por sua vez, o planejamento dinâmico consiste na minimização dos valores presentes de todos os investimentos ao longo do horizonte de planejamento [3]. Além das dificuldades existentes no modelo estático, no planejamento dinâmico é de interesse determinar quando cada reforço deve ser incorporado na rede; a consideração temporal faz o problema crescer de forma exponencial, levando os modelos dinâmicos a exigir grande esforço computacional.

O planejamento do sistema de transmissão, seja estático ou dinâmico, é realizado de forma a evitar a falta de energia elétrica ao consumidor final. Um dos grandes desafios do setor é encontrar um equilíbrio entre o menor custo de investimentos e a maior confiabilidade para seus usuários, visto que existe uma relação entre os investimentos aplicados na fase de planejamento da expansão e a probabilidade de ocorrerem falhas. Porém, investimentos altos acarretam em custos finais elevados e estes custos acabam por serem repassados ao consumidor final gerando altas tarifas.

Seguindo esta linha de pesquisa, este trabalho propõe métodos de solução para o planejamento dinâmico de linhas de transmissão, buscando um equilíbrio entre a economia e a confiabilidade no processo de decisão dos investimentos. Neste sentido, é desenvolvido um modelo em que o acoplamento temporal é realizado por meio de variáveis de decisão binárias (fluxo de potência ótimo acoplado e discreto). A questão da explosão combinatória é contornada pela transformação das variáveis binárias em contínuas (fluxo de potência acoplado contínuo). Para tal, é utilizada a função sigmoide. O retorno para o “mundo discreto” (a transformação das variáveis contínuas em discretas) é realizado via índices de sensibilidade e métodos heurísticos construtivos. A análise de segurança é incorporada aos métodos heurísticos através de listas de contingências. Os elementos presentes nas listas de contingências irão impactar nos reforços e em qual ano estes deverão ser adicionados ao sistema, de forma a evitar o não suprimento de energia em caso de emergência.

## 1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A visão estática de *quais* reforços e *onde* estes devem ser instalados não é o suficiente para o planejador, a visão multiestágio de *quando* estes reforços deverão ser alocados na rede traz uma resposta mais completa. Além disto, na hora de se planejar uma rede, deve-se levar em conta aspectos de segurança, ou seja, é necessário minimizar os custos de investimento mas também buscar meios de se ter uma rede confiável, com menor chance de falha.

No entanto, considerar o aspecto dinâmico e critérios de segurança na hora da seleção dos reforços, implica no aumento da complexidade e do tempo necessário para obter a solução, o qual se torna muitas vezes inviável em face da grande explosão combinatória.

A complexidade da análise e a necessidade de estudar sistemas reais de grande porte para horizontes de planejamento longos, tornam o tema oportuno para pesquisa.

Diante disto, este trabalho busca um modelo que permite tratar o planejamento considerando múltiplos estágios e análises de confiabilidade de forma a obter soluções de boa qualidade e com baixo esforço computacional para sistemas reais.

### 1.3 PUBLICAÇÕES RESULTANTE DO TRABALHO

I. M. Mendonça, R. P. B. Poubel, I. C. S. Junior, E. J. Oliveira, A.L. M. Marcato, L. Willer, *Static Transmission Network Expansion Planning of Electric Power Systems using the Firefly Optimization*, Power Tech (POWERTECH), 2013.

E. J. Oliveira, V. M. Crisafulli, R. P. B. Poubel, L. M. Honorio, A. L. Marcato, *Transmission Line Reinforcements Considering Security Constraints*, Power Tech (POWERTECH), 2015.

R. P. B. Poubel, E. J. Oliveira, L. M. Honório, L. W. Oliveira, I. C. S. Junior, *A Coupled Model to Multistage Transmission Expansion Planning*. Journal of Control, Automation and Electrical Systems , 2015.

R. P. B. Poubel, E. J. De Oliveira, L. A. F. Manso, L. M. Honório, L. W. Oliveira, *Tree Searching Heuristic Algorithm for Multi-stage Transmission Planning Considering Security Constraints via Genetic Algorithm*. Electric Power Systems Research Journal , 2016.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do atual, este trabalho é composto por mais quatro capítulos e um apêndice como discriminados a seguir:

No capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica com as principais publicações existentes na área de planejamento de redes de transmissão de energia elétrica. O capítulo é dividido em planejamento estático, planejamento dinâmico e planejamento de redes com critérios de segurança, sendo exposto, para cada tipo de planejamento, os principais métodos utilizados na solução do problema.

No capítulo 3 será apresentado o modelo não linear inteiro misto proposto para o problema do planejamento dinâmico de linhas de transmissão. Para solução do modelo, serão apresentadas as técnicas propostas nesta tese que permitem a resolução do problema de maneira eficiente.

Já o capítulo 4 é dedicado ao estudo de casos, onde será avaliado o planejamento multiestágio de alguns sistemas utilizados na literatura, as análises visam validar o método proposto e realizar um estudo comparativo entre as técnicas de solução propostas e soluções encontradas em outros trabalhos.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho e temas para a continuidade da pesquisa.

Os apêndices A, B e C tem por objetivo fornecer os dados elétricos de todos os sistemas simulados neste trabalho.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo irá abordar o planejamento da transmissão acompanhando a evolução das pesquisas na área, desde os primeiros estudos aos estudos mais recentes. O assunto será dividido em três categorias principais, as duas primeiras irão abordar o problema do planejamento quanto a considerar, ou não, a evolução temporal dos investimentos, já a terceira irá tratar o assunto dando ênfase aos trabalhos que adotaram critérios de segurança para a operação da rede.

### 2.2 PLANEJAMENTO ESTÁTICO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O planejamento da expansão do sistema de transmissão do ponto de vista estático é um problema com elevado grau de complexidade, apesar de várias simplificações serem realizadas no modelo, por exemplo, são desconsideradas as restrições referentes a magnitude da tensão e a evolução temporal dos reforços, ainda assim o problema permanece tendo característica inteira e não convexa.

Diante de um problema não convexo com elevado número de soluções ótimas locais, foram propostos na literatura diversos modelos que visam solucionar o problema encontrando soluções de qualidade com baixo tempo computacional.

Dentre os métodos de otimização utilizados, pode-se destacar a programação linear, a programação não linear, a programação inteira e técnicas de decomposição, como Benders.

Um exemplo do uso da programação linear para solução do problema do planejamento estático da transmissão pode ser encontrado em Garver [4]. Neste trabalho a seleção dos caminhos candidatos à construção é feita por um fluxo de potência ótimo e um algoritmo heurístico construtivo.

Villasana et al. [5] propôs um método que combina o uso do fluxo de carga linear e o modelo de transporte. A solução dos dois modelos juntos determina onde existe um déficit na capacidade, onde novos circuitos deverão ser adicionados e quanto de capacidade é necessário.

Outro trabalho que faz uso da programação linear pode ser visto em Berry et al. [6]. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo de despacho econômico de potência ativa, sujeito a limites de fluxo em linhas e restrições de contingência. As perdas na transmissão foram incorporadas por um processo iterativo, permitindo sua inclusão em um eficiente modelo linear.

Hashimoto et al. [7] propôs um método em que o problema linear é tratado por um problema equivalente, o processo de otimização se inicia apenas com uma restrição de

igualdade (a equação de fluxo de potência ativa) e algumas restrições de desigualdade e em cada passo do algoritmo a restrição mais violada é adicionada ao modelo. Para solução do problema linear é utilizada estratégias de relaxação e um algoritmo simplex dual.

Existem trabalhos que fizeram o uso de técnicas de otimização inteira para a solução da expansão de linhas de transmissão, respeitando assim a característica do problema. Um destes trabalhos foi formulado por Santos et al. [8], onde uma técnica de enumeração foi utilizada para tratar o modelo inteiro misto formulado para a síntese estática da rede de transmissão.

Um trabalho que fez uso da programação linear inteira mista é Bahiense et al. [9], neste trabalho foi utilizada uma técnica heurística de forma a obter os limites superiores, a serem utilizados no modelo inteiro, diminuindo desta forma a árvore de busca.

Em Lumbreras et al. [10] a decomposição de Benders foi utilizada na obtenção de planos ótimos de expansão da rede de transmissão com a consideração da estocasticidade da demanda, fluxos hídricos, preços dos combustíveis e da geração de energia renovável.

Outros exemplos de trabalhos que fizeram o uso da programação matemática para a síntese de redes de energia elétrica são encontrados em Pereira et al. [11], Oliveira et al. [12], Binato et al. [13] e Al-Hamouz et al. [14].

O maior impedimento à aplicação de técnicas de programação matemática é a dificuldade de se obter boas soluções em tempos computacionais viáveis, principalmente quando são utilizados modelos com maiores detalhes.

A necessidade de se obter soluções de boa qualidade para sistemas cada vez mais complexos e sobrecarregados, fez com que o uso das técnicas meta-heurísticas se intensificasse. Esta tendência se deve à facilidade advinda de se trabalhar com problemas não convexos e tratar incertezas.

A técnica meta-heurística mais difundida na área de síntese de redes são os algoritmos genéticos. Um exemplo do emprego desta técnica pode ser encontrado em Jingdong et al. [15]. Neste trabalho, se fez uso de uma aproximação multiobjetivo para tratar o planejamento da expansão. Os objetivos considerados foram minimizar o custo de investimento, aumentar a confiabilidade do sistema e diminuir o impacto para o ambiente.

Em Gallego et al. [16] foi formulado um algoritmo de planejamento da expansão em que a população inicial é obtida através de métodos clássicos de otimização e a mutação inspirada no processo de otimização conhecido como recozimento simulado. As melhorias implementadas no algoritmo genético permitiram obter soluções de boa qualidade para sistemas reais de grande porte.

Outro trabalho que fez uso dos algoritmos genéticos para planejamento da expansão foi proposto por Duan et al. [17]. Neste trabalho foi proposto um algoritmo genético

específico para o problema do planejamento da expansão. Em seu funcionamento o algoritmo busca ótimos globais a partir de ótimos locais ao invés de procurar a partir de soluções factíveis. Os ótimos locais são obtidos por um algoritmo linear, e desta forma de maneira eficiente. O modelo da rede foi melhorado de forma a tratar simultaneamente a alocação de linhas, subestações e novas unidades geradoras.

O trabalho de Romero et al. [18] é uma aproximação para o planejamento da expansão de linhas de transmissão de longo prazo através da técnica de recozimento simulado. A metodologia se mostrou eficiente em sistemas de pequeno porte, cujas soluções ótimas eram conhecidas, e promissora em um sistema de grande porte, obtendo uma família de soluções com custos inferiores as soluções anteriormente conhecidas.

A busca Tabu é outra técnica utilizada para tratar o problema. Wen et al. [19] propôs um modelo para o planejamento de redes em que as decisões (0 - 1) foram tomadas por uma aproximação baseada no método. A aproximação se mostrou eficiente na determinação de soluções de boa qualidade. De posse destas soluções, uma versão mais refinada do método é utilizada para encontrar múltiplas sequencias ótimas de expansão.

Gallego et al. [20] propôs um algoritmo de busca Tabu paralelo, o qual engloba características de outros métodos como recozimento simulado, algoritmo genético e busca heurística. Nos casos simulados foi considerada a possibilidade de conexão de novas unidades geradoras e cargas, o que tornou o problema mais complexo e de difícil solução devido o caráter combinatorial mais acentuado.

Outro trabalho que fez uso da busca Tabu para o planejamento de longo prazo dos sistemas de transmissão pode ser visto em Silva et al. [21]. Neste trabalho foi obtido soluções de boa qualidade para sistemas de grande porte, mostrando a robustez do método.

O método GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) é outra técnica aplicada ao planejamento de redes. Binato et al. [22] propôs um modelo dividido em duas fases. Na primeira fase, o algoritmo é responsável por determinar uma solução factível para o problema. Já na segunda fase é realizado um processo de busca local de forma a aprimorar as soluções obtidas pela primeira fase. A melhor solução obtida por todas as iterações é considerada como o resultado do problema.

O tratamento de incertezas contribui para a aplicação da teoria dos conjuntos Fuzzy. Kim et al. [23] utilizou esta técnica para tratar incertezas do planejamento da transmissão de longo prazo, como exemplo, a previsão de carga. A estratégia de expansão é obtida por um método *branch and bound* fuzzy e se mostrou eficiente na aplicação em sistemas reais.

Kimiyaghalam et al. [24] resolve o problema do planejamento estático da transmissão utilizando a técnica *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) considerando as perdas na rede, o nível de tensão e a incerteza da demanda. A eficácia da metodologia foi

avaliada através de um sistema real.

Shayeghi et al. [25] propõem um algoritmo baseado em *Discrete Honey Bee Mating Optimization* (DHBMO) para a solução do problema de planejamento estático da transmissão. Os resultados obtidos para o sistema Garver e o sistema iraniano são comparados com a técnica *Discrete Particle Swarm Optimization* (DPSO).

Rathatore et al. [26] propôs um modelo para solução do planejamento estático que faz uso de um algoritmo de busca populacional MOX. Neste trabalho, procurou-se minimizar o custo de investimento sem permitir o redespacho das unidades geradoras.

Em Mendonça et al. [27], foi utilizada uma técnica híbrida que associa um método heurístico a técnica meta-heurística *Firefly*, cumpre ressaltar que a parcela heurística é responsável por reduzir o espaço de buscas e assim aumentar a eficiência da técnica bio inspirada.

Um trabalho que fez uso da técnica enxame de partículas para resolver o problema do planejamento estático de linhas de transmissão foi Ledezma [28]. Neste trabalho, foi implementado um método de otimização por enxames de partículas com características binária. A função objetivo foi dividida entre os custos de investimento e também os custo de operação do sistema.

Sousa et al. [29] apresenta uma proposta para o planejamento estático da transmissão que tem por objetivo obter planos que garantam uma operação flexível ao sistema. Para isto, o modelo leva em conta diferentes cenários de despacho das unidades geradoras. O algoritmo evolutivo utilizado garante um conjunto de soluções que servirão de referência para o planejador.

Outros exemplos de trabalhos que fizeram o uso de técnicas meta-heurísticas para o planejamento de redes de energia elétrica são encontrados em Gil et al. [30], Gallego et al. [31], Silva et al. [32] e Torres et al. [33].

Face aos problemas encontrados ao se trabalhar com modelos clássicos de otimização matemática, foram propostos modelos alternativos em que a experiência do planejador é agregada ao problema. Os modelos heurísticos se caracterizam por, passo a passo, gerar, avaliar e selecionar investimentos até que se encontre uma boa solução para o problema.

Além de alguns modelos que fizeram uso de técnicas heurísticas citados no tópico referente aos métodos matemáticos de otimização, podemos destacar os seguintes trabalhos:

Em Serna et al. [34], pode-se encontrar um modelo composto por duas partes. Na primeira o algoritmo de Ford-Fulkerson é utilizado para calcular os fluxos na rede e o corte de carga devida à limitação da transmissão. Em uma segunda etapa é determinada a linha de maior interesse a ser adicionada a rede.

No trabalho proposto por Monticelli et al. [35] para o planejamento da rede, as

linhas candidatas foram ranqueadas tendo como base o critério de menor esforço e são selecionadas de acordo com seu custo/benefício à rede. A rede foi representada pelo modelo linear e barras isoladas ligadas ao sistema por linhas de baixa capacidade de transmissão.

Latorre-Bayona et al. [36] propôs um modelo para o planejamento da expansão de longo prazo. Uma técnica heurística é utilizada na determinação das estratégias de investimento e um segundo submodelo é utilizado para otimizar múltiplos cenários, a rede é representada por uma das quatro opções, fluxo de carga CC, modelo de transporte e dois modelos híbridos.

Oliveira et al. [37] propôs um fluxo de potência ótimo modelado através do algoritmo de pontos interiores para determinar as estratégias de expansão da rede. Em sua formulação, as decisões de expansão (0 ou 1) são mitigadas através da função sigmoide e adicionadas ao fluxo de potência ótimo por equações de fluxo de potência modificadas. As decisões de investimentos são tomadas tendo por base uma técnica heurística e índices de sensibilidade obtidos pela solução do fluxo de potência ótimo.

Outros trabalhos que fizeram o uso de técnicas heurísticas para a síntese de redes de energia elétrica são encontrados em Bennon et al. [38], Ekwue et al. [39], Romero et al. [40].

### 2.3 PLANEJAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O planejamento da expansão do sistema de transmissão é um problema de natureza dinâmica. A consideração do instante da instalação dos componentes fornece uma resposta mais completa, porém agrega dificuldades a um problema já complexo em sua formulação. O planejamento dinâmico da transmissão requer a consideração de muitas variáveis e restrições, demandando assim um enorme esforço computacional.

Por conta desta complexidade, a aplicação de técnicas matemáticas de otimização foram praticamente inviabilizadas. Quando utilizadas, foram em conjunto com uma técnica meta-heurística como pode ser encontrado em Dehham et al. [41] que propôs um modelo disjuntivo para solução do problema multiestágio da expansão de redes de transmissão, onde o algoritmo *differential evolution* é utilizado em associação a técnica de Benders no intuito de aliviar o custo computacional.

Outra situação em que ainda é possível encontrar a aplicação de técnicas matemáticas ao problema de planejamento dinâmico é quando o modelo pode ser dividido em problemas menores como apresentado na referência Gu et al. [42], onde uso da técnica de Benders foi utilizada para separar o problema do planejamento de linhas de transmissão em três problemas menores. O primeiro, e principal, toma as decisões de investimento, o segundo é responsável por avaliar a confiabilidade da rede ao passo que o terceiro cuida do desempenho econômico do sistema elétrico.

A dificuldade de se trabalhar com o planejamento da expansão considerando múltiplos estágios, fez com que pesquisadores optassem pela técnica meta-heurística ao representar seus problemas. De fácil aplicação, esta técnica vem trazendo bons resultados em tempos computacionais relativamente aceitáveis.

Uma das técnicas meta-heurísticas difundidas são os algoritmos genéticos. Youssef et al. [43] desenvolveu um modelo para o planejamento dinâmico onde as restrições de estabilidade (limites inferiores e superiores de tensão em barras e ângulos de referência) são incluídas. Para tal, a rede foi representada pelo seu modelo AC, em sua modelagem o planejamento dinâmico foi representado de maneira precisa e não por uma série de planejamentos estáticos.

Em Wang et al. [44] foi apresentado um algoritmo genético melhorado aplicado ao planejamento multiestágio da transmissão, em sua formulação a função aptidão é ajustada através de uma técnica de recozimento simulado e a operação de *crossover* é realizada dentro do gene, desta forma, a recombinação e o processo de busca do operador *crossover* é mais bem utilizado.

Outro trabalho que fez uso da técnica algoritmo genético é Escobar et al. [45], o qual propôs um modelo para o planejamento multiestágio da transmissão em que o algoritmo utilizado, apresenta uma série de operadores genéticos especializados e uma forma inteligente de gerar a população inicial. Conseguindo assim boas soluções para sistemas de variados portes.

Em Braga et al. [46] é possível encontrar um exemplo do uso da técnica de recozimento simulado para tratar o planejamento dinâmico da transmissão. Em sua modelagem, é considerado o custo do investimento, da operação e da energia não suprida, o algoritmo adota dois dos três critérios anteriores, transformando-os em restrições de acordo com o nível de aspiração, ao obter uma solução o tomador de decisão pode alterar o nível de aspiração e com isso obter novas soluções.

Já em Fu et al. [47] foi proposto um índice de monitoramento de congestionamento em linhas para o planejamento multiestágio da transmissão em um ambiente de mercado. O índice visa proporcionar um ambiente justo para os participantes do mercado de energia.

Outra técnica utilizada para tratar o planejamento dinâmico da transmissão é a busca Tabu. Leite da Silva et al. [48] aplicou a técnica ao problema e com o auxílio de outras heurísticas, conseguiu obter boas soluções, com tempo computacional aceitável. O Algoritmo visa minimizar os custos dos investimentos, da operação e da energia não suprida.

Em Sum-Im et al. [49] foi aplicada a técnica *differential evolution* (DE) no planejamento dinâmico da transmissão. A aplicação da técnica foi realizada diretamente em um modelo de fluxo de potência CC. O planejamento da expansão foi realizado

para sistemas, considerando e sem considerar o redespacho das unidades geradoras. Um estudo comparativo é realizado no final, entre a técnica proposta e um algoritmo genético convencional.

Já em Resende et al. [50] é possível encontrar um comparativo de desempenho entre duas técnicas meta-heurísticas no planejamento multiestágio da transmissão. As técnicas *differential evolution* (DE) e sistemas imunes artificiais, são utilizadas na busca da solução de menor custo, sendo os custos de investimento e operação levados em conta na modelagem.

Um trabalho bastante completo na área do planejamento multiestágio da transmissão, pode ser encontrado em Leite da Silva et al. [51]. Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre o desempenho de varias técnicas meta-heurísticas. As técnicas busca tabu, colônia de formiga, enxame de partículas, sistemas imunes artificiais, *differential evolution* e *evolution strategies* foram comparadas no que diz respeito ao tempo computacional e a qualidade das soluções obtidas em relação a melhor solução encontrada.

Em Aguadoa et al. [52] o problema do planejamento dinâmico da transmissão é formulado como um problema de programação linear inteira e mista. O modelo visa determina o plano de menor investimento e de menor custo de operação. A metodologia é aplicada a um sistema equivalente espanhol.

Sharan et al. [53] apresenta um modelo de planejamento da expansão que integra o planejamento da transmissão e a instalação de novas unidades geradoras. O modelo incorpora a disponibilidade de combustível, o limite máximo para o transporte de combustível e a capacidade de geração das unidades geradoras a serem instaladas. O modelo desenvolvido foi aplicado no planejamento da transmissão e geração de um sistema real.

Em Rocha et al. [54] o problema de planejamento dinâmico da transmissão é resolvido com o auxílio de um algoritmo de otimização por enxame de partículas discreto. Os resultados são validados utilizando o Sistema Garver e um sistema de 24 barras. Uma evolução do trabalho [54] pode ser encontrada em Rocha et al. et al. [55], onde uma versão aprimorada da meta-heurística enxame de partículas foi utilizada para a solução do problema de planejamento da transmissão, onde o objetivo é a minimização dos custos de investimento e também dos custos operacionais.

Já em Akbari et al. [56] foi apresenta uma metodologia para o planejamento dinâmico da transmissão utilizando um fluxo de potência ótimo CA (AC-OPF). O problema de planejamento da transmissão, originalmente não linear inteiro e misto, é transformado em um problema inteiro linear misto. A formulação é aplicada ao sistema Garver e a um sistema de 24 barramentos.

Outro exemplo de aplicação da técnica Enxame de Partículas foi proposta por Mortaz et al. [57], neste trabalho foi utilizada um método de interpolação multivariada para

calcular o custo de operação para o problema do planejamento dinâmico da transmissão, em que a demanda muda de hora em hora e o preço do combustível de dia para dia. Para solução do problema de otimização, fez-se uso da técnica enxame de partículas. O método foi aplicado ao sistema Garver e também ao sistema 24 barramentos.

Modelos heurísticos são conhecidos por obter boas soluções a um tempo computacional baixo. Por sua característica, é um tipo de técnica de otimização apropriada ao planejamento dinâmico de linhas de transmissão.

Apesar de sua característica apropriada, sua utilização ao problema ainda é pequena. Romero et al. [58] fez uso de técnicas heurísticas aplicado ao modelo de transporte. Partiu-se do algoritmo heurístico construtivo, proposto primeiramente por Garver, e se fez uma extensão para lidar com o planejamento multiestágio da transmissão.

Em Romero et al. [59] é analisado a aplicação de algoritmos heurísticos para o modelo híbrido linear, no planejamento multiestágio da transmissão. É feita uma avaliação da qualidade das soluções e a viabilidade desta modelagem da rede para lidar com o problema.

Por fim, Hinojosa et al. [60] propõem uma nova heurística construtiva baseada em um processo de busca local controlado. O processo de busca é capaz de mitigar a complexidade do problema e assim a heurística se torna capaz de resolver problemas reais.

## 2.4 PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO CONSIDERANDO A CONFIABILIDADE

Um dos maiores desafios do setor elétrico é encontrar um ponto de equilíbrio entre o que é investido na rede e a maior confiabilidade possível para seus usuários.

É neste cenário que surgem os estudos de planejamento, que além de procurar o menor investimento, buscam garantir a segurança da operação, seja por índices de confiabilidade ou por métodos que minimizam o corte de cargas em face a contingências.

As análises de segurança podem ser divididas em dois tipos principais como discriminados a seguir:

### 2.4.1 Critérios de segurança

Na literatura são poucos os estudos que consideram critérios de segurança determinísticos, isso se deve muitas vezes ao fato de tais considerações agregarem ainda mais dificuldades a um problema complexo. Normalmente estes modelos buscam minimizar o investimento e o corte de carga para a condição da rede intacta e mediante critérios conhecidos como  $N - 1$  ou  $N - 2$ .

Os trabalhos abordam o assunto de maneiras distintas: (i) Modelos que incluem o critério  $N - 1$  como parte do problema de otimização; (ii) Modelos que aplicam o critério

segundo uma lista de contingência.

Como exemplos de trabalhos que incluem os critérios determinísticos direto na modelagem podemos citar Rudnick et al. [61], o qual propõem um modelo para o planejamento multiestágio da transmissão em ambientes não regulamentados utilizando algoritmos genéticos.

Outro trabalho que trata os critérios de segurança no próprio modelo é Silva et al. [62], que modela matematicamente o problema do planejamento da transmissão. Para a solução do problema é utilizado o modelo CC de fluxo de carga associado a técnica de algoritmos genéticos.

Em Tor et al. [63] é possível encontrar uma técnica de decomposição de Benders para o planejamento de linhas de transmissão, o problema é dividido em dois sub problemas representando a operação ótima e a de segurança.

Já Seifu et al. [64] propôs um método para minimizar o custo de construção de linhas adicionais, de forma a tornar o sistema seguro a contingências simples, para solução do modelo fez-se uso de um algoritmo de programação linear inteira mista.

Existem trabalhos que fazem uso de listas de contingências pré definidas, estes trabalhos normalmente consideram apenas alguns equipamentos, uma vez que a consideração de todos torna-se inviável em sistemas reais, eles buscam colocar nas listas apenas os equipamentos críticos, porém esta é uma difícil tarefa uma vez que estes equipamentos tem a sua importância alterada com o estado da rede e de acordo com os planos candidatos.

A análise de confiabilidade segundo as listas é realizada nos melhores planos encontrados em uma primeira fase como é o exemplo de Yuehui et al. [65] o qual apresenta um modelo para o planejamento multiestágio e coordenado do sistema de transmissão utilizando um algoritmo de enxame de partículas para a solução do modelo.

Sepasian et al. [66] aborda o problema do planejamento dinâmico da expansão da geração e transmissão considerando restrições de segurança. Para a solução do problema é proposta uma abordagem heurística construtiva de modo que o problema possa ser facilmente resolvido. Para avaliar a capacidade da abordagem proposta são estudados o sistema Garver e também o sistema Iraniano.

Em Leite da Silva et al. [67] é apresentada uma discussão de como incluir critérios de segurança utilizando uma abordagem determinística e uma probabilística. Uma rede de transmissão real é usada como um exemplo da aplicação da metodologia proposta.

Zhang et al. [68] apresenta uma aproximação linear inteira e mista baseada em um fluxo de potência ótimo linear para solução do problema multi-estágio da transmissão. A aproximação considera os custo de geração, perdas e restrições de segurança. Os resultados são validados com o auxílio do sistema IEEE 118 barramentos.

Outro trabalho que utilizou critérios determinísticos no planejamento de redes é Kamyab et al. [69], neste trabalho se fez uso da técnica enxame de partículas para resolver o problema de planejamento dinâmico da transmissão. O modelo aborda diferentes cenários de demanda e critério de segurança  $N - 1$ . A proposta é aplicada ao sistema Garver e também a um sistema de 24 barramentos.

Já em Vinascoa et al. [70] é possível encontrar um modelo linear binário e misto para o problema de planejamento dinâmico da transmissão. Neste trabalho é avaliado as interconexões e os custos envolvidos na conexão da hidroelétrica de Ituango. O modelo também inclui análises de segurança de forma a garantir que o sistema elétrico colombiano permaneça em operação ainda que ocorra uma contingência em um elemento do sistema.

#### 2.4.2 Critérios de confiabilidade

Critérios de confiabilidade não determinísticos buscam minimizar os custos de investimentos para o atendimento de cargas futuras atendendo a certos índices de confiabilidade.

Como exemplo podemos citar o trabalho de Leite da Silva et al. [71] que fez uso de estratégias evolucionárias ao tratar o planejamento dinâmico da transmissão. Em sua modelagem, o algoritmo busca minimizar o custo dos investimentos e das interrupções.

Em Siddiqi et al. [72], pode-se encontrar um modelo que permite analisar de maneira eficiente, cenários e contingências. O impacto dos investimentos sobre as potências ativas e reativas é analisado através das equações do fluxo de potência AC.

Já em Fang et al. [73] foi proposto um modelo capaz de lidar com o planejamento da expansão em um ambiente de competição de mercado. A estratégia proposta considera a variação dos mercados ao passo que as decisões são analisadas e incorporadas de forma a minimizar os riscos do plano selecionado.

Outro exemplo pode ser encontrado em Buygi et al. [74], neste trabalho é introduzido um modelo probabilístico para calcular a densidade de probabilidade de preços nodais. Nele também é definido um novo modelo de mercado para o planejamento da transmissão em ambientes desregulados.

Em Choi et al. [75] é possível encontrar um modelo que fez uso de diversos índices de confiabilidade como LOLP (*Loss of Load Probability*), LOLE (*Loss of Load Expectation*) e EENS (*Expected Energy Not Supplied*), a metodologia propõe critérios probabilísticos de forma a minimizar o custo total esperado, o qual inclui o custo de construção e de interrupção.

Leite da Silva et al. [76] propõe uma metodologia para resolver o problema do planejamento da expansão da transmissão utilizando a técnica meta-heurística colônia de formigas (ACO). O foco do trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta para o

planejamento dinâmico e avaliar como aspectos de confiabilidade podem influenciar no processo de tomada de decisão. As aplicações da metodologia são ilustrados por meio de estudos de caso realizados em um sistema de seis barras e uma rede de subtransmissão real.

Em Orfanos et al. [77] foi proposta uma aproximação probabilística para o problema do planejamento da transmissão, a qual considera as incertezas referentes a carga e a potência gerada por unidade aerogeradoras. O modelo probabilístico é incorporado ao problema de planejamento da transmissão através da técnica de Benders em conjunto com a simulação de Monte Carlo. A técnica foi aplicada ao sistema Garver e a um sistema de 24 barramentos.

Já Fuerte-Ledezma et al. [78] resolve o problema do planejamento estático da transmissão utilizando a técnica *binary particle swarm optimization algorithm* (BPSO) em conjunto a um fluxo de potência CC. As incertezas são modeladas por demandas estocásticas em cada nó do sistema.

Por fim, Silva et al. [79] fez uso de estratégias evolucionárias ao tratar o planejamento dinâmico da transmissão. Em sua modelagem, o algoritmo busca minimizar o custo dos investimentos e das interrupções. O custo da falta de confiabilidade é representado por um índice LOLC (*Loss of Load Cost*).

Outros trabalhos que fizeram o uso de critérios de confiabilidade para o planejamento de redes de energia elétrica são: Manso et al. [80], Barros et al. [81], Manso et al. [82].

## 2.5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou a evolução temporal dos trabalhos na área de planejamento de linhas de transmissão, desde os primeiros trabalhos até os trabalhos mais recentes. Os estudos foram divididos quanto aos métodos de otimização, se utilizaram programação matemática, métodos meta-heurísticos ou métodos heurísticos. E também quanto a abordagem ao problema, se os problemas foram modelados para um único estágio (modelo estático), para vários estágios (modelo dinâmico) ou abordaram critérios de segurança.

Com essa visão abrangente sobre o problema, é possível tirar algumas conclusões e garantir uma boa direção para estudos futuros. Dentre os trabalhos, os que trouxeram uma visão mais completa e adequada a realidade do planejamento de linhas de transmissão, foram os trabalhos que consideram a característica de múltiplos estágios ao problema, e também os que fizeram uso dos critérios de segurança afim de garantir a continuidade no fornecimento de energia ao consumidor final. Porém a abordagem de segurança e de múltiplos estágios requer grande esforço computacional.

No intuito de atenuar o custo computacional, os métodos de otimização mais utilizados na área de planejamento de linhas de transmissão são os métodos heurísticos e

meta-heurísticos por garantirem tempos computacionais viáveis. Quanto a consideração dos critérios de confiança, tem-se feito uso dos métodos não-determinísticos ou determinísticos com auxílio de listas de contingências.

É importante destacar que os trabalhos existentes na literatura trabalham com sistemas de pequeno porte em horizontes de planejamento mais extensos, ou quando trabalham com sistemas reais, o horizonte de planejamento é dividido em pouco estágios. Desta maneira é importante buscar meios de se obter estratégias de expansão para sistemas reais com horizontes de planejamento mais extensos.

Em face a esse panorama, o presente trabalho apresentará modelos que fazem uso de métodos heurísticos construtivos e meta-heurísticos para o planejamento de linhas de transmissão. A garantia da confiabilidade no fornecimento será obtida por métodos determinísticos que utilizam listas de contingências. Busca-se assim, obter planos adequados ao problema de planejamento de linhas de transmissão com tempos computacionais viáveis em sistemas reais.

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA O PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia proposta para o planejamento dinâmico da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica, o modelo é formulado como um problema de programação não linear inteira mista com acoplamento temporal entre as decisões. Para a solução deste complexo problema, optou-se por tratar as variáveis discretas a partir de uma função contínua. Esta modificação permite a resolução do modelo com baixo custo computacional. Para a discretização destas variáveis foram postas técnicas, que através de um processo passo a passo, permitem determinar as sequências de expansão da rede de transmissão.

#### 3.2 MODELAGEM PROPOSTA

Tradicionalmente, o planejamento do sistema de transmissão é modelado através da formulação linear de fluxo de carga (fluxo de carga  $CC$ ). Nesta modelagem o fluxo de potência ativa ( $f_{ij(k)}$ ) na linha de transmissão (LT)  $ij(k)$  (i.e., na LT  $k$  do ramo entre as barras  $i$  e  $j$ ) é expresso por (3.1):

$$f_{ij(k)} = V_i^2 \cdot g_{ij(k)} - V_i \cdot V_j \cdot g_{ij(k)} \cdot \cos(\theta_{ij}) - V_i \cdot V_j \cdot \gamma_{ij(k)} \cdot \text{sen}(\theta_{ij}) \quad (3.1)$$

Onde  $k$  representa cada reforço que pode vir a ser adicionado no ramo  $i - j$ ,  $\gamma_{ij(k)}$  e  $g_{ij(k)}$  são a susceptância e a condutância da linha de transmissão  $i - j(k)$ , respectivamente.  $V_i$  é a tensão no barramento  $i$  assim como  $V_j$  é a tensão no barramento  $j$ . Finalmente,  $\theta_{ij}$  é a diferença angular entre os barramentos  $i - j$ .

Assumindo cada ano do horizonte de planejamento representado por  $y$ ,  $V_i = V_j = 1pu$ ,  $\cos(\theta_{ij}) = 1 - \frac{\theta_{ij}^2}{2}$  e  $\text{sen}(\theta_{ij}) = \theta_{ij}$  faz com que a equação (3.1) possa ser escrita como (3.2), onde o segundo termo representa metade das perdas de potência ativa na transmissão.

$$f_{ij(k)}^y = -\gamma_{ij(k)} \cdot \theta_{ij}^y + \frac{1}{2} \cdot g_{ij(k)} \cdot (\theta_{ij}^y)^2 \quad (3.2)$$

O fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão existente, considerando múltiplos estágios no horizonte de planejamento, é escrita por  $fE_{ij(k)}^y$  como a seguir:

$$fE_{ij(k)}^y = f_{ij(k)}^y \quad (3.3)$$

A decisão de construir, ou não, uma linha candidata em um ano  $y$  ou antes, requer uma modificação na equação (3.3), como é descrito na referência [83]. A modificação implica no surgimento da equação (3.4):

$$fC_{ij(k)}^y = \left( \sum_{z=1}^y ED_{ij(k)}^z \right) \cdot f_{ij(k)}^y \quad (3.4)$$

Onde,  $fC_{ij(k)}^y$  representa o fluxo de potência ativa na LT candidata  $ij(k)$  em um ano  $y$  e  $ED_{ij(k)}^z$  é uma variável binária (1 ou 0) em que  $\sum_{z=1}^y ED_{ij(k)}^z \leq 1$ .

Deve ser enfatizado que  $ED_{ij(k)}^z$  representa a decisão de construir ou não a linha de transmissão  $i - j(k)$  no ano  $z$ . Se  $ED_{ij(k)}^z$  é igual a 1, a linha de transmissão  $i - j(k)$  é construída no ano  $z$ . O oposto corre quando  $ED_{ij(k)}^z$  é igual a 0. Como consequência,  $ED_{ij(k)}^z$  é responsável por acoplar os vários estágios, onde uma decisão no ano  $z$  influencia todo o horizonte de planejamento.

Considerando as equações (3.3) e (3.4) o modelo de Fluxo de Potência *CC* Inteiro e Acoplado (*IC-OPF*) pode ser formulado como apresentado em [83]. Após algumas alterações o *IC-OPF* é reescrito como:

$$\text{Min} \sum_{y=1}^{ny} \left( \sum_{i=1}^{nb} (Gc_i^y \cdot PG_i^y + Fc_i^y \cdot PF_i^y) + \sum_{(i,j) \in C} \sum_{k=1}^{nr(ij)} (Ic_{ij(k)}^y \cdot ED_{ij(k)}^y) \right) \quad (3.5a)$$

Sujeito a:

$$PG_i^0 + PF_i^0 - \sum_{j \in \Omega_{E_i}} \sum_{k=1}^{ne(ij)} fE_{ij(k)}^0 = D_i^0 \quad (3.5b)$$

$$PG_i^y + PF_i^y - \sum_{j \in \Omega_{E_i}} \sum_{k=1}^{ne(ij)} fE_{ij(k)}^y - \sum_{j \in \Omega_{C_i}} \sum_{k=1}^{nr(ij)} fC_{ij(k)}^y = D_i^y \quad (3.5c)$$

$$|fE_{ij(k)}^y| \leq \overline{fE}_{ij(k)}, \forall (i, j) \in \mathbb{E} \quad (3.5d)$$

$$|fC_{ij(k)}^y| \leq \left( \sum_{z=1}^y ED_{ij(k)}^z \right) \cdot \overline{fC}_{ij(k)}, \forall (i, j) \in \mathbb{C}, k = 1, \dots, nr(ij) \quad (3.5e)$$

$$\underline{PG}_i^y \leq PG_i^y \leq \overline{PG}_i^y \quad (3.5f)$$

$$0 \leq PF_i^y \leq D_i^y \quad (3.5g)$$

$$ED_{ij(k)}^y \in \mathbf{I} | ED_{ij(k)}^y = [0, 1], \forall (i, j) \in \mathbb{C}, k = 1, \dots, nr(ij) \quad (3.5h)$$

$$\sum_{y=1}^{ny} ED_{ij(k)}^y \leq 1, \forall (i, j) \in \mathbb{C}, k = 1, \dots, nr(ij) \quad (3.5i)$$

$$ED_{ij(k+1)}^y \leq ED_{ij(k)}^y, \forall (i, j) \in \mathbb{C}, k = 1, \dots, nr(ij) \quad (3.5j)$$

$$Ic_{ij(k)}^y = \frac{Ic_{ij(k)}^0}{(1+r)^y}, \forall (i, j) \in \mathbb{C}, k = 1, \dots, nr(ij) \quad (3.5k)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, nb$$

$$y = 1, 2, 3, \dots, ny$$

Onde:

- $\mathbb{E}$  Conjunto dos ramos com linhas de transmissão existentes;
- $\mathbb{C}$  Conjunto dos ramos com linhas de transmissão candidatas;
- $\Omega_{E_i}$  Conjunto dos ramos com linhas de transmissão existentes conectadas ao barramento  $i$ ;
- $\Omega_{C_i}$  Conjunto dos ramos com linhas de transmissão candidatas conectadas ao barramento  $i$ ;
- $k$  Representa cada reforço que pode ser adicionado ao ramo  $i - j$ ;
- $ne(ij)$  Número de LTs existentes no ramo  $i - j$ , na configuração base;
- $nr(ij)$  Número de reforços que podem ser adicionados ao ramo  $i - j$ ;
- $n_b$  Número de barramentos no sistema;
- $ny$  Número de anos (ou estágios) do horizonte de planejamento;
- $PG_i^y$  Geração de potência ativa no barramento  $i$  no ano  $y$  (MW);
- $Gc_i^y$  Custo específico de geração no barramento  $i$  no ano  $y$  (US\$/MW);
- $PF_i^y$  Geração fictícia de potência ativa no barramento  $i$  no ano  $y$  (MW);
- $Fc_i^y$  Custo específico de geração fictícia no barramento  $i$  no ano  $y$  (US\$/MW);
- $\underline{PG}_i^y$  Limite inferior de  $PG_i$  no ano  $y$  (MW);
- $\overline{PG}_i^y$  Limite superior de  $PG_i$  no ano  $y$  (MW);
- $D_i^y$  Demanda do barramento  $i$  no ano  $y$  (MW);
- $D_i^0$  Demanda do barramento  $i$  no ano 0 (MW);
- $\overline{fE}_{ij(k)}$  Limite do fluxo de potência ativa da linha existente  $k$  no ramo  $i - j$  (MW);
- $\overline{fC}_{ij(k)}$  Limite do fluxo de potência ativa da linha candidata  $k$  no ramo  $i - j$  (MW);
- $Ic_{ij(k)}^0$  Custo de investimento da linha de transmissão candidata  $k$  no ramo  $i - j$  para o ano 0 (US\$);
- $Ic_{ij(k)}^y$  Custo de investimento da linha de transmissão candidata  $k$  no ramo  $i - j$  para o ano  $y$  (US\$);
- $r$  Indica a taxa de desconto.

O primeiro termo da função objetivo (3.5a) representa o custo de operação e o segundo termo representa o custo de investimento em linhas de transmissão para todos os anos do horizonte de planejamento. As Equações (3.5b) e (3.5c) correspondem as expressões acopladas do fluxo de potência  $CC$ .

Para este modelo, todas as linhas de transmissão candidatas a expansão são incluídas na estrutura da rede durante o processo de solução do  $IC-OPF$ . As equações são

acopladas pela variável de decisão ( $ED_{ij(k)}^y$ ). A formulação compreende todos os anos do horizonte de planejamento em um único problema *IC-OPF*.

As restrições (3.5d) e (3.5e) são relativas aos limites de fluxo de potência ativa nas linhas existentes e candidatas, respectivamente. A expressão (3.5f) representa o limite inferior e superior das unidades geradoras. Os limites inferiores e superiores das unidades geradoras fictícias é fornecido pela expressão (3.5g). A variável de decisão inteira é representada pela restrição (3.5h).

A equação (3.5i) é responsável pela correta operação do sistema garantindo que um certa linha candidatas seja construída apenas uma vez e em um certo ano do horizonte de planejamento. A restrição (3.5j) fornece uma ordem para adição de reforços, o reforço  $k + 1$  só pode ser construído após o reforço  $k$  pertencer ao conjunto de linhas construídas. A equação (3.5k) fornece o custo de investimento, em valor presente, para cada linha de transmissão candidata.

O *IC-OPF* aumenta a complexidade computacional por ampliar o porte da rede afim de representar todos os estágios de expansão por um único problema de Fluxo de Potência Ótimo (*OPF*). Existem ( $ny$ ) variáveis de decisão ( $ED_{ij(k)}^y$ ) para representar cada linha candidata no problema *IC-OPF*. Adicionalmente, o *IC-OPF* é também um problema não-linear inteiro e misto de otimização. Qualquer *toolbox* apropriada, advinda de um pacote de otimização pode ser utilizada para resolver diretamente o problema *IC-OPF*. Entretanto, estas *toolboxes* tem apresentado elevado tempo computacional para solução deste tipo de problema. De forma a superar estas dificuldades neste trabalho será desenvolvido métodos heurístico a fim de adequar o modelo a problemas reais com um longo período de planejamento.

### 3.3 TÉCNICA DE SOLUÇÃO

O modelo apresentado é um modelo não linear inteiro e misto de difícil solução, o problema é expandido de forma a representar em um único problema de otimização todos os estágios do horizonte de planejamento. Utilizar diretamente uma técnica inteira pode não ser a melhor opção principalmente ao lidar com sistemas elétricos reais, onde a complexidade e o grande número de variáveis inteiras geram dificuldades numéricas, assim, de forma a atenuar estas dificuldades buscou-se novos métodos para tratar a variável binária  $ED_{ij(k)}^y$ .

Do ponto de vista operacional, a modelagem ideal para representar a variável  $ED_{ij(k)}^y$  seria uma função degrau, uma vez que a função assume apenas os valores binários indicadores da não construção da linha ( $ED_{ij(k)}^y = 0$ ) ou construção ( $ED_{ij(k)}^y = 1$ ). Porém, por se tratar de uma função descontínua (não derivável em todo seu domínio) sua utilização se torna inviável.

A princípio, pode-se utilizar qualquer função contínua na representação do parâmetro de expansão. Para este trabalho optou-se por adequar a função sigmoide, utilizada em [37], ao problema de múltiplos estágios, dando origem a equação (3.6). A Figura 3.1 ilustra o comportamento da função no intervalo de interesse ( $x_{ij(k)}^y \geq 0$ ).

$$ED_{ij(k)}^y = \frac{e^{x_{ij(k)}^y} - 1}{e^{x_{ij(k)}^y} + 1} \quad (3.6)$$

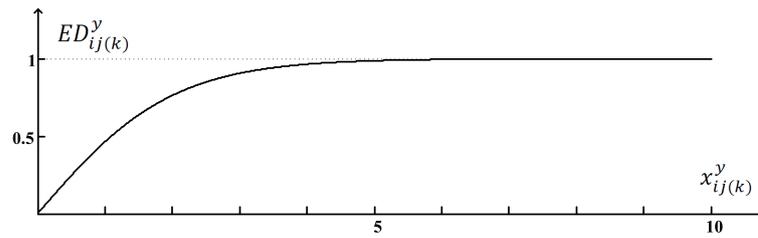


Figura 3.1 – Função sigmoide para  $x_{ij(k)}^y$  maior que zero.

A partir do comportamento da curva, foram adotados os seguintes critérios: (i) para os circuitos candidatos à expansão tem-se  $0 \leq x_{ij(k)}^y \leq 15$ , isto permite ao parâmetro de expansão assumir qualquer valor contínuo no intervalo  $[0,1]$ ; (ii) para os circuitos candidatos selecionados à expansão adota-se  $\underline{x_{ij(k)}^y} = 10$  (limite inferior de  $x_{ij(k)}^y$  igual a 10), com isso tem-se  $ED_{ij(k)}^y \cong 1$ ; (iii) para os circuitos candidatos não selecionados a expansão, adota-se  $\overline{x_{ij(k)}^y} = 0$  (limite superior de  $x_{ij(k)}^y$  igual a 0) resultando em  $ED_{ij(k)}^y = 0$ .

As variáveis inteiras presentes em (3.5h) são convertidas em variáveis contínuas ao permitir que  $ED_{ij(k)}^y$  varie no intervalo de 0 a 1, resultando em um Fluxo de Potência Ótimo Acoplado Contínuo (*CC-OPF-Continuous Coupled Optimal Power Flow*). Como consequência, o problema em lidar diretamente com um modelo não linear inteiro misto é resolvido, atenuando o problema da complexidade computacional. Assim, o *CC-OPF* pode ser resolvido diversas vezes com baixo esforço computacional. Para este trabalho o *CC-OPF* é resolvido utilizando o solver não linear contínuo do pacote de otimização Lingo, Copyright ©LINDO SYSTEMS INC.

Para otimização não-linear o Lingo utiliza prioritariamente o algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), no entanto, para ajudar a chegar a uma boa solução rapidamente, o LINGO também incorpora a Programação Linear Sucessiva (PLS).

Após a solução do *CC-OPF*, as seguintes informações podem ser extraídas:

- i) Caso algum valor de  $ED_{ij(k)}^y$  seja maior que zero, então é necessário reforçar a rede. Por outro lado, se todos os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  são iguais a zero o sistema não necessita de novas linhas de transmissão. Embora contínuos, os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  irão indicar os reforços mais atrativos e assim, podem ser utilizados como índices de sensibilidade.

Ou seja, após mudança de discreto para contínuo, o otimizador irá fornecer como resultado, para um dada linha de transmissão, um valor de  $ED_{ij(k)}^y$  de, por exemplo 0,21. O valor fornecido pelo otimizador não é aplicável, pois representa uma fração do reforço. Assim sendo, a alteração no tipo da variável também alterou seu significado. Ao invés de sua função original, a variável  $ED_{ij(k)}^y$  é agora um índice que indica as linhas candidatas mais qualificadas a entrarem em operação em um dado ano do planejamento [1]. Embora não seja possível garantir uma solução ótima apenas por usar as candidatas com bons índices, é uma boa suposição que o resultado usando esse conjunto de linhas seja de qualidade. A equação (3.7) mostra este primeiro índice.

$$SI1_{ij(k)}^y = ED_{ij(k)}^y, \forall (i, j) \in \mathbb{C}, k = 1, \dots, nr(ij) \quad (3.7)$$

- ii) Procurando um novo índice de forma a ampliar o grupo de boas candidatas, sem maiores gastos computacionais, a sensibilidade relacionada aos Multiplicadores de Lagrange (*ML*) foi utilizada. O *ML* fornece os custos marginais de uma dada restrição em relação a função objetivo. No *CC-OPF*, os *ML* associados aos barramentos do sistema fornecem a sensibilidade de como uma variação no balanço do fluxo de potência modifica os ângulos. Como a diferença angular entre dois barramentos tem uma forte relação com a necessidade de adição de novas linhas de transmissão, a diferença entre dois Multiplicadores de Lagrange pode também indicar o mesmo. Assim, o segundo índice, representado pela equação (3.8) avalia a sensibilidade normalizada pelo custo financeiro anualizado de construção do reforço  $k$  [1].

$$SI2_{ij(k)}^y = \frac{|\lambda_i^y - \lambda_j^y|}{IC_{ij(k)}^y}, \forall (i, j) \in \mathbb{C}, k = 1, \dots, nr(ij) \quad (3.8)$$

Onde  $\lambda_i^y$  e  $\lambda_j^y$  são os Multiplicadores de Lagrange associados as restrições de fluxo de potência para os barramentos  $i$  e  $j$  (ramo  $i - j$ ), respectivamente, relativo ao ano  $y$  do horizonte de planejamento equação (3.5c).

É importante enfatizar que ambos os índices incorporam o impacto das decisões de longo prazo, pois ambos são calculados a partir do problema acoplado. Essa característica garante um processo de busca eficiente.

### 3.4 ALGORITMO HEURÍSTICO COM BASE EM LISTA DINÂMICA (*DLHA*)

Essa seção descreve um algoritmo especializado que tem por base passos contínuos e discretos para determinar, iterativamente, a sequência de expansão ótima ao longo do horizonte de planejamento. Esse algoritmo heurístico faz uso dos índices  $SI1_{ij(k)}^y$  e  $SI2_{ij(k)}^y$ ,

associados a um processo passo a passo, de forma a mitigar a complexidade imposta pelas variáveis inteiras.

O fluxograma do *DLHA* desenvolvido para a solução do *CC-OPF* é apresentado na Figura 3.2. Os comentários a seguir ajudarão no entendimento do algoritmo:

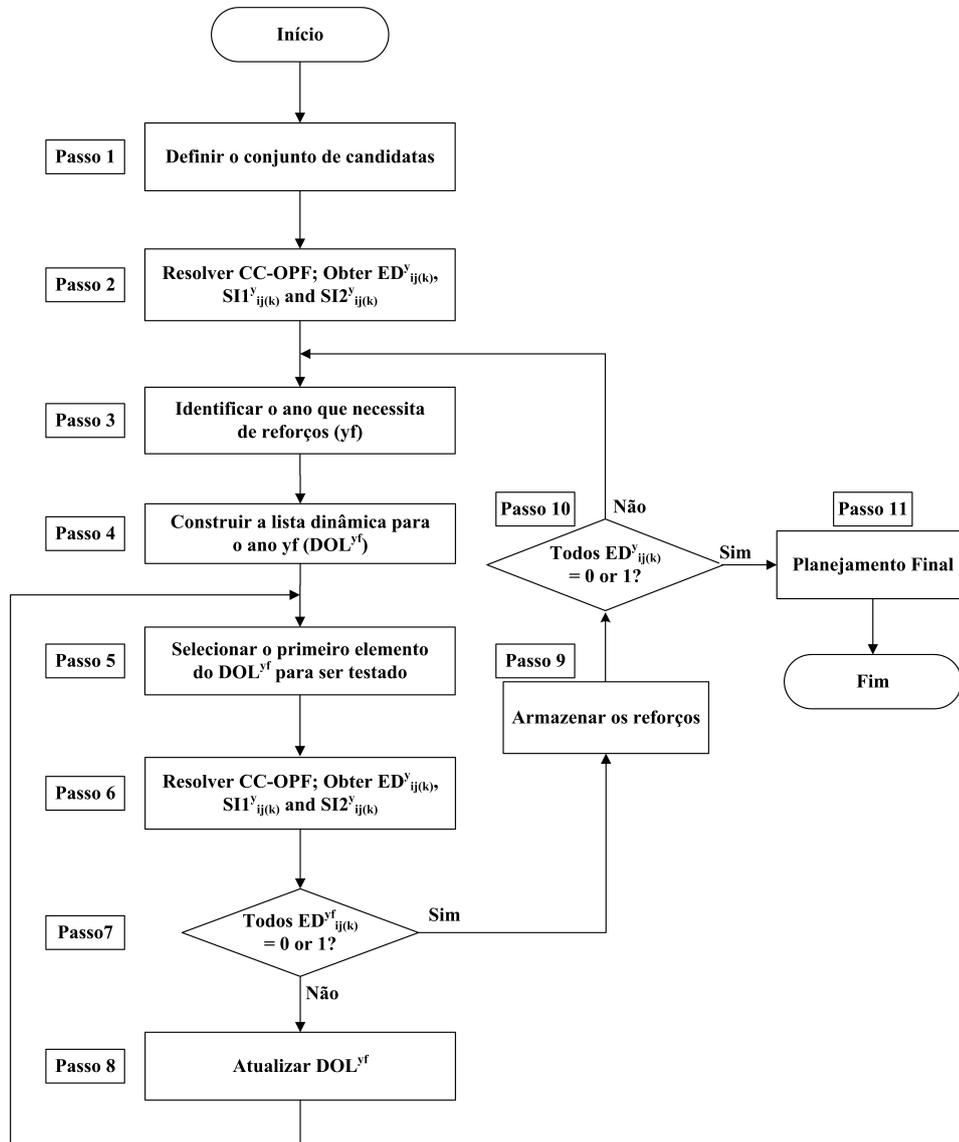


Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo heurístico com base em lista dinâmica (*DLHA*)

**Passo 1:** É neste passo que os dados de geração, demanda, bem como os dados de rede são carregados. É também neste passo que ocorre a inicialização de  $RE^y$ , responsável por armazenar os reforços para cada estágio  $y$  do planejamento.

**Passo 2:** Responsável por resolver o *CC-OPF*, para solução é utilizado uma *toolbox* de otimização contínua não-linear. Como resultados, são obtidos os parâmetros de expansão  $ED^y_{ij(k)}$  e também os custos marginais  $\lambda^y_i$ , estes dados são utilizados para determinar quais linhas formarão, ou serão incorporadas, a Lista Ordenada Dinâmica ( $DOL^{yf}$ ).

**Passo 3:** Responsável por determinar o primeiro ano que necessita da adição de reforços. Para encontrar o ano, é realizada uma busca pelo primeiro estágio em que  $ED_{ij(k)}^y$  é diferente de 0 ou 1 ( $0 < ED_{ij(k)}^y < 1$ ). A presença de um parâmetro contínuo indica que uma fração de uma LT candidata foi utilizada para a convergência do problema, e assim, a rede deve ser reforçada de forma a garantir a correta operação. Se por exemplo, o primeiro estágio a aparecer parâmetros diferentes de 0 ou 1 for o estágio  $y = 2$ , isto significa que no estágio  $y = 1$  as linhas existentes no sistema são suficientes para a operação do mesmo, já no estágio  $y = 2$  existe a necessidade de reforços e este ano será analisado, sendo assim, é feito  $yf = 2$ .

**Passo 4:** Este passo analisa o ano  $yf$  que necessita reforços. Para isto, é construído a  $DOL^{yf}$  tendo por base os índices de sensibilidade  $SI1_{ij(k)}^{yf}$  e  $SI2_{ij(k)}^{yf}$ . Os dois maiores elementos de cada índice indicam as candidatas que irão compor a lista  $DOL^{yf}$ . Por fim, os elementos da lista  $DOL^{yf}$  são ranqueados em ordem crescente de investimento  $IC_{ij(k)}^y$ . Caso dois ou mais elementos do  $DOL^{yf}$  acabem empatados, o desempate é realizado levando-se em conta os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  das respectivas linhas.

**Passo 5:** O primeiro elemento do  $DOL^{yf}$  representa o reforço de menor investimento e será escolhido para ser testado como opção. O teste é realizado fixando o respectivo  $ED_{ij(k)}^{yf}$  em um ( $ED_{ij(k)}^{yf} = 1$ ) na formulação do  $CC-OPF$ . Considerando, por exemplo,  $DOL^{yf} = \{TL_1, TL_5, TL_2, TL_9\}$ , resulta em  $ED_{LT_1}^{yf} = 1$ .

**Passo 6:** Resolve o  $CC-OPF$  para a sugestão de reforço proposta no passo anterior. Com o primeiro elemento do  $DOL^{yf}$  discretizado, o  $CC-OPF$  fornece novos valores de  $SI1_{ij(k)}^y$ ,  $SI2_{ij(k)}^y$  e  $ED_{ij(k)}^y$  para todos os anos do horizonte de planejamento. Duas situações podem ocorrer no próximo passo.

**Passo 7:** Na primeira situação todos os valores de  $ED_{ij(k)}^{yf}$  se tornaram discretos, o que significa que a sugestão de reforço é suficiente para a correta operação do sistema no ano  $yf$ . Assim, este reforço é armazenado no Passo 9, e ali permanece até a convergência do algoritmo. O processo segue para o Passo 10 responsável por verificar se todos os anos do horizonte de planejamento foram analisados, se sim o algoritmo segue para o Passo 11 o qual irá indicar a sequência final de expansão. Já na segunda situação pelo menos um  $ED_{ij(k)}^{yf}$  é maior que zero e menor que um, o que significa que o reforço proposto pelo Passo 5 não é suficiente para operar o ano  $yf$ . Assim, uma nova opção de reforço deve ser investigada.

**Passo 8:** Este passo é responsável por atualizar o  $DOL^{yf}$  de forma a melhorar as opções de investimento. Para isto, são utilizados os índices  $SI1_{ij(k)}^y$  e  $SI2_{ij(k)}^y$  para selecionar novas linhas que irão fortalecer a opção de investimento anterior, a qual foi incapaz de operar o sistema, como descrito no Passo 7. A partir deste ponto o algoritmo retorna ao Passo 5.

### 3.4.1 Caso tutorial para a técnica *DLHA*

Figura 3.3 mostra o diagrama de um sistema de dois barramentos, onde as linhas tracejadas são candidatas ao problema de planejamento multiestágio da expansão. Este sistema apresenta uma barra de geração e uma barra de carga conectadas por uma linha existente no caso base ( $LT_{(1)}$ ). Para este sistema, existe a possibilidade de construção de até três linhas candidatas ao longo do horizonte de planejamento de quatro anos.

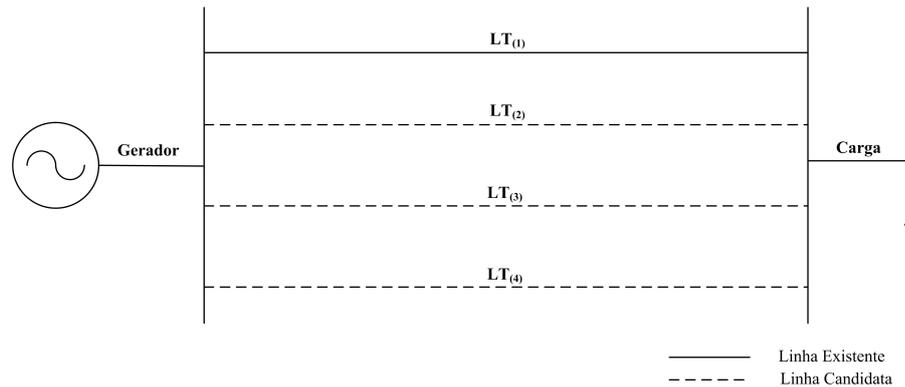


Figura 3.3 – Diagrama do Sistema Tutorial

A Tabela 3.1 mostra os valores de demanda e geração para cada ano do planejamento. A geração é ilimitada ao passo que a demanda apresenta um crescimento linear partindo de um valor inicial de 20MW no ano 0 e alcançando um valor final de 200MW para o ano 3 (demanda = 20, 80, 140, 200MW). Adicionalmente, a Tabela 3.2 apresenta os dados dos circuitos existente e candidatos a expansão.

Tabela 3.1 – Principais dados para o sistema de 2 barramentos.

Barramento	$D_i^0$ (MW)	$D_i^1$ (MW)	$D_i^2$ (MW)	$D_i^3$ (MW)	$\overline{PG}_i^y$ (MW)
01	-	-	-	-	Ilimitado
02	20	80	140	200	-

Tabela 3.2 – Dados de linhas para o sistema de 2 barramentos

Circuitos	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	$Ic_{ij}^0$ ( $10^6$ US\$)	Capacidade (MW)
$LT_1$	0,00	10,0	-	60
$LT_2$	0,00	10,0	60	60
$LT_3$	0,00	7,5	90	90
$LT_4$	0,00	5,0	120	120

Após os dados do sistema serem carregados e o conjunto de candidatas definido no Passo 1, o fluxograma dá continuidade para o Passo 2 onde o *CC-OPF* será resolvido e os índices de sensibilidade determinados. A Tabela 3.3 mostra os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  para a primeira simulação.

No Passo 3 o primeiro ano do horizonte de planejamento que possui valores contínuos de  $ED_{ij(k)}^y$  é identificado. De acordo com a Tabela 3.3 o primeiro ano é  $yf = 1$  e é a partir deste ano que se iniciará a análise.

Tabela 3.3 – Valores de  $ED_{ij(k)}^y$  para primeira solução do  $CC-OPF$ 

Ano	$ED_{LT(2)}^y$	$ED_{LT(3)}^y$	$ED_{LT(4)}^y$
0	0,00	0,00	0,00
1	0,04	0,00	0,14
2	0,87	0,00	0,06
3	0,04	0,00	0,48

O Passo 4 ordena, em ordem crescente de custo, as linhas candidatas selecionadas pelos índices de sensibilidade calculados no Passo 2. As linhas ordenadas formarão o  $DOL^{yf=1}$ . De acordo com a Tabela 3.4 as três linhas candidatas irão compor a lista.

Tabela 3.4 – Índices para  $yf = 1$ 

Índice	$LT_2$	$LT_3$	$LT_4$
$SI1_{(k)}^1$	<b>0,04</b>	0,00	<b>0,14</b>
$SI2_{(k)}^1$	<b>0,15</b>	<b>0,10</b>	0,07

O Passo 5 seleciona o primeiro elemento pertencente ao  $DOL^{yf=1}$  para teste, como as linhas estão ordenadas em ordem crescente de custo a primeira linha a ser testada será a  $LT_2$ . No Passo 6 o  $CC-OPF$  é novamente resolvido, porém desta vez, com a  $LT_2$  incorporada ao conjunto das linhas construídas, os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultados do  $CC-OPF$  com a linha  $LT_2$  construída

Ano	$LT_2$	$LT_3$	$LT_4$
1	<b>1,00</b>	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,17
3	0,00	0,00	0,50

No Passo 7 é feito uma verificação se existem valores contínuos de  $ED_{ij(k)}^y$ , pela Tabela 3.5 é fácil observar que no ano  $y = 1$  todos os valores são binários e assim o programa segue para o Passo 9 onde o reforço será armazenado. Caso ainda existissem valores contínuos no ano  $y = 1$ , o  $DOL^{yf=1}$  seria incrementado no Passo 8 e a linha candidata  $LT_2$  passaria a formar pares com novas linhas determinadas pelos índices.

No Passo 10 é verificado que ainda existem anos cuja análise é necessária e desta maneira o algoritmo segue para o Passo 3 dando início assim a segunda iteração. Apenas quando todos os anos forem analisados e todos os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  forem binários o fluxograma seguirá para o Passo 11, onde será conhecida a sequência de expansão final. Para este caso a sequência de expansão é apresentada na Tabela 3.6.

### 3.5 ALGORITMO HEURÍSTICO COM BASE EM LISTA DINÂMICA E RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA ( $DLHA_{RS}$ )

Para a inclusão da análise de segurança na técnica  $DLHA$ , o fluxograma da Figura 3.2 precisa ser alterado. A alteração consiste em modificar os passos em destaque na

Tabela 3.6 – Resultado final para o sistema de 2 barramentos

Ano	Reforços Adicionados	Investimento ( $10^6$ US\$)
0	-	0,00
1	$LT_2$	54,54
2	$LT_3$	74,38
3	-	0,00
Total de investimento em valor presente		128,925

Figura 3.4.

Cada alteração será detalhadamente explicada para melhor compreensão da metodologia. Ressalta-se que os passos não destacados permanecem inalterados e seus comentários serão suprimidos, visto já terem sido apresentados na Seção 3.4.

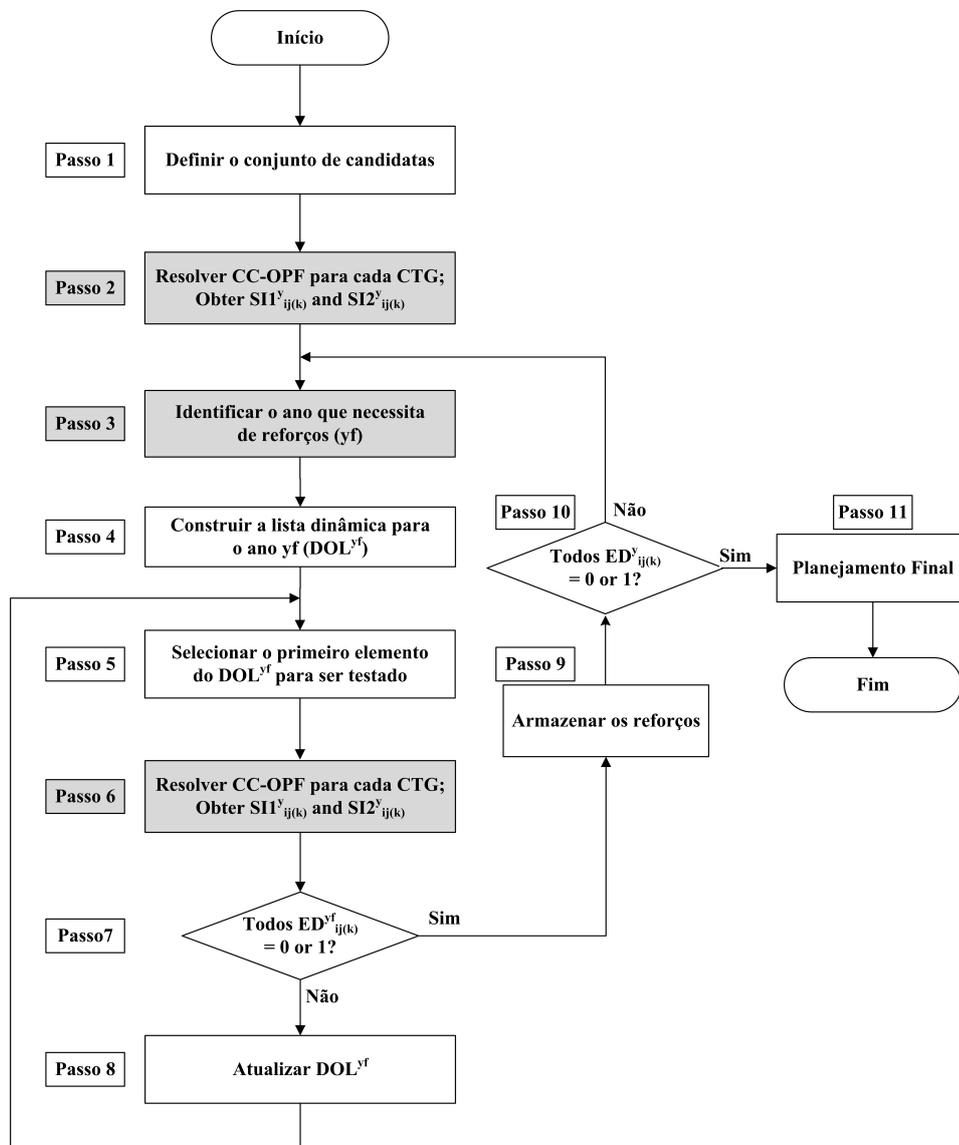


Figura 3.4 – Passos a serem modificados para a inclusão das restrições de segurança

Os primeiros passos que exigem atenção são os Passos 2 e 6. Basicamente correspondem a mesma sub-rotina do algoritmo, chamada em momentos diferentes. Estes passos

podem ser divididos em etapas de acordo com a Figura 3.5.

A primeira etapa seleciona uma contingência para a análise. A linha referente a contingência é removida do conjunto das linhas existentes ( $\mathbb{E}$ ) e o algoritmo segue para a Etapa 2.

Na Etapa 2 o  $CC-OPF$  é resolvido para o novo estado da rede. Os índices de sensibilidade ( $SI1_{ij(k)}^y$  e  $SI2_{ij(k)}^y$ ) e o ano  $yf$  são armazenados na Etapa 3. Deve-se salientar que cada contingência poderá fornecer um conjunto de linhas candidatas e desta maneira, todas estas candidatas serão incluídas ao  $DOL^{yf}$ .

Cabe à Etapa 4 verificar se todas as contingências foram analisadas. Caso tenham sido analisadas o algoritmo segue para o próximo Passo, caso contrário o algoritmo retorna para a Etapa 1.

É importante ressaltar que o caso base (sistema operando sob condições normais) é tratado como uma contingência. Com isto, evita-se que nas situações em que forem toleradas sobrecargas para os circuitos remanescentes, o algoritmo determine uma rede que atenda a operação em caso de emergência, mas que não atenda o caso base em regime permanente.

O último passo que necessita de atenção é o Passo 3. Para o algoritmo  $DLHA$  original, apenas o caso base precisa ser atendido, deste modo, apenas irá existir um ano  $yf$ . Na análise de segurança, cada contingência poderá implicar em um ano  $yf$  diferente, assim, no Passo 3 é escolhido o menor dos anos  $yf$  para se iniciar a análise.

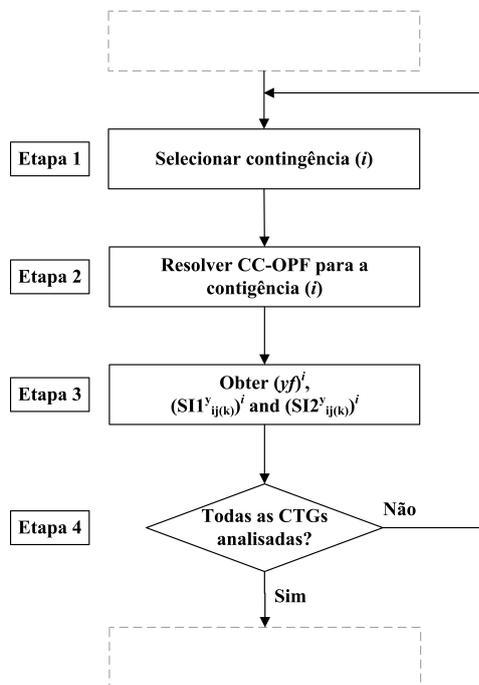


Figura 3.5 – Sub-rotina do  $DLHA$  para inclusão das restrições de segurança

### 3.6 ALGORITMO HEURÍSTICO DE BUSCA EM ÁRVORE (*TSHA*)

Esta seção descreve um algoritmo especializado que faz uso dos custos globais contínuos da construção dos investimentos para determinar, a sequência de expansão ótima ao longo do horizonte de planejamento. Esse algoritmo heurístico utiliza índices de sensibilidade associado a um processo passo a passo de formar a mitigar as variáveis inteiras.

O fluxograma do *TSHA* desenvolvido para a solução do *CC-OPF* é apresentado na Figura 3.6. Os comentários a seguir ajudarão no entendimento do algoritmo:

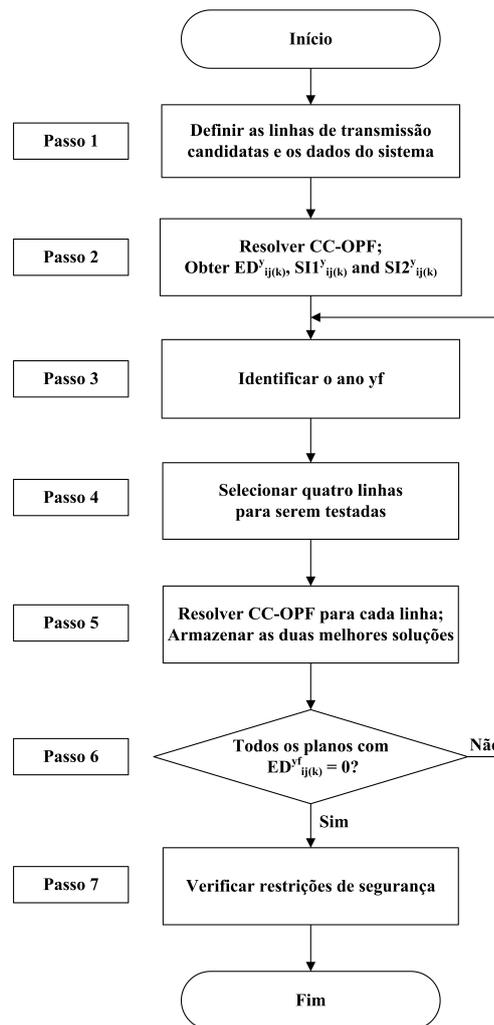


Figura 3.6 – Fluxograma do algoritmo heurístico de busca em árvore (*TSHA*)

**Passo 1:** Responsável por carregar os dados das linhas de transmissão candidatas, assim como os outros dados da rede.

**Passo 2:** Resolve o *CC-OPF* determinando os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  para todas as linhas candidatas e  $\lambda_i^y$  para todas as barras do sistema.

**Passo 3:** Utilizando os valores de  $ED_{ij(k)}^y$ , identifica-se o primeiro ano do planeja-

mento ( $y_f$ ) que necessita de reforços. Caso pelo menos um  $ED_{ij(k)}^{y_f}$  seja maior que zero, o sistema deve ser reforçado. É enfatizado que a única maneira possível de aparecer valores de  $ED_{ij(k)}^{y_f}$  contínuos é, se de nenhuma outra maneira, a rede corrente for capaz de operar o sistema sem cortes de carga.

**Passo 4:** Seleciona quatro linhas de transmissão para formar o grupo de candidatas que será testado. Duas linhas indicadas pelos maiores valores de  $SI1_{ij(k)}^y$  e  $SI2_{ij(k)}^y$ , para o ano  $y_f$ , devem ser incluídas neste grupo.

**Passo 5:** Para cada linha escolhida no Passo 4, faça o correspondente  $ED_{ij(k)}^{y_f} = 1$  e resolva o *CC-OPF* de forma a obter o valor da função objetivo para cada linha incorporada individualmente no sistema. São armazenadas as duas linhas que resultaram em menores valores de função objetivo (3.5a) como raízes da árvore de decisão. Esta estratégia resulta em duas novas oportunidades de planejamento para cada decisão tomada. O resultado final é um conjunto de boas sequências de planejamento da expansão.

**Passo 6:** Verifica se todos os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  são binários em todas opções de planejamento. Caso não sejam, o processo retoma o Passo 3, sendo binários, o algoritmo segue para o Passo 7.

**Passo 7:** Neste passo o algoritmo verifica o critério de segurança  $N - 1$  para todas os planos de expansão propostos. O Resultado final é composto por dois grupos de sequências de planejamento; o grupo que atende ao critério de segurança  $N - 1$  sem cortes de carga e o outro que garante a operação do sistema desde que não ocorram contingências. Após o Passo 7 o algoritmo é finalizado.

Por fim, a técnica de solução *TSHA* fornece o cronograma de reforços no sistema para cada planejamento proposto, indicando quando cada elemento deverá entrar em operação de forma a garantir a correta operação da rede elétrica.

### 3.6.1 Caso tutorial para a técnica *TSHA*

O sistema tutorial da Figura 3.3 será utilizado para esclarecer os principais pontos da metodologia proposta. As condições de simulação serão as mesmas utilizadas na Seção 3.4.1.

Dando início ao processo, após os dados de simulação serem carregados no Passo 1, o Passo 2 resolve o *CC-OPF* obtendo valores contínuos de  $ED_{ij(k)}^y$  para todos os anos do horizonte de planejamento, de acordo com a Tabela 3.7.

Pela Tabela 3.7 é possível observar que todos os valores de  $ED_{ij(k)}^y$  são nulos para o ano 0, o que significa que a linha de transmissão existente ( $LT_1$ ), é suficiente para a correta operação do sistema neste ano. Entretanto, para o ano 1 existem valores não nulos de  $ED_{ij(k)}^y$  indicando que o sistema deve ser reforçado. Assim, o Passo 3 identifica  $y_f = 1$ .

Tabela 3.7 – Valores de  $ED_{ij(k)}^y$  para primeira solução do *CC-OPF*

Ano	$ED_{LT(2)}^y$	$ED_{LT(3)}^y$	$ED_{LT(4)}^y$
0	0,00	0,00	0,00
1	0,04	0,00	0,14
2	0,87	0,00	0,06
3	0,04	0,00	0,48

O Passo 4 é responsável pela definição das linhas de transmissão a serem testadas. A Tabela 3.8 mostra os índices de sensibilidade para o ano  $y_f = 1$ , os quais irão determinar os possíveis reforços utilizando os dois maiores valores dos índices de sensibilidade  $SI1_{(k)}^1$  e  $SI2_{(k)}^1$ , calculados a partir das equações (3.7) e (3.8), respectivamente. Pode-se observar que o índice  $SI1_{(k)}^1$  indica as linhas  $LT_2$  e  $LT_4$  ao passo que o índice  $SI2_{(k)}^1$  indica as linhas  $LT_2$  e  $LT_3$  para dar início as árvores de busca.

Tabela 3.8 – Índices para  $y_f = 1$ 

Índice	$LT_2$	$LT_3$	$LT_4$
$SI1_{(k)}^1$	<b>0,04</b>	0,00	<b>0,14</b>
$SI2_{(k)}^1$	<b>0,15</b>	<b>0,10</b>	0,07

No Passo 5 a lista composta pelas linhas  $LT_2$ ,  $LT_3$  e  $LT_4$ , selecionadas no Passo 4, devem ser testadas como um possível reforço para o ano  $y_f = 1$ . Portanto a abordagem proposta define cada  $ED$  desta lista igual a 1, um de cada vez, enquanto os outros  $EDs$  podem variar durante a execução do *CC-OPF*.

A Tabela 3.9 mostra o resultado obtido quando a adição da  $LT_2$  é realizada no ano 1. Como mostrado na quarta coluna da Tabela 3.9, esta decisão exige, ainda, 17% de investimento na linha  $LT_4$  no ano 2 e 50% de investimento na linha  $LT_4$  no ano 3, o que resulta em um custo de investimento de  $116.153(10^6\text{US}\$)$ .

Tabela 3.9 – Resultados para a linha  $LT_2$ 

Ano	$ED_{LT_2}$	$ED_{LT_3}$	$ED_{LT_4}$
1	<b>1,00</b>	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,17
3	0,00	0,00	0,50

O mesmo procedimento é realizado para a linha candidata  $LT_3$  e o resultado é apresentado na Tabela 3.10. Pode-se observar que esta opção de investimento exigirá 17% de investimento na linha  $LT_2$  no ano 3 e 42% de investimento na linha  $LT_4$  no mesmo ano, resultando em um investimento total de  $126.897(10^6\text{US}\$)$

Tabela 3.10 – Resultados para a linha  $LT_3$ 

Ano	$ED_{LT_2}$	$ED_{LT_3}$	$ED_{LT_4}$
1	0,00	<b>1,00</b>	0,00
2	0,00	0,00	0,00
3	0,17	0,00	0,42

Já os resultados do teste da linha candidata  $LT_4$  estão apresentados na Tabela 3.11. Pode ser observado que a construção da linha  $LT_4$  exige 33% de investimento na linha  $LT_2$  no ano 3, resultando em um investimento total de 124.117(10<sup>6</sup>US\$).

Tabela 3.11 – Resultados para a linha  $LT_4$

Ano	$ED_{LT_2}$	$ED_{LT_3}$	$ED_{LT_4}$
1	0,00	0,00	<b>1,00</b>
2	0,00	0,00	0,00
3	0,33	0,00	0,00

A construção da linha  $LT_2$  e da linha  $LT_4$  fornecem os menores valores da função objetivo (3.5a). Assim,  $LT_2$  e  $LT_4$  serão armazenadas e utilizadas no processo como as raízes das árvores de busca. Este processo de busca em árvore continua até que todos os valores de  $EDs$  se tornem zero para todas as opções de planejamento, como descrito no Passo 6.

Seguindo para o fim deste processo, quatro opções de investimento são obtidas neste caso tutorial, as quais são apresentadas através da Figura 3.7.

A Tabela 3.12 mostra o custo de investimento para cada um destes planos de expansão. Apesar do *Planejamento – 1* apresentar o menor custo de investimento em transmissão, ele não é capaz de suportar a contingência da linha existente ( $LT_1$ ) no ano 3. Assim, o *Planejamento – 4* é selecionado no Passo 7. Os demais planos de expansão retratados na Tabela 3.12 representam boas alternativas de planejamento, porém incapazes de suportar as restrições de segurança.

Tabela 3.12 – Resultado final para o Sistema Tutorial

Ano	<i>Planejamento – 1</i>	<i>Planejamento – 2</i>	<i>Planejamento – 3</i>	<i>Planejamento – 4</i>
1	$LT_2$	$LT_2$	$LT_4$	$LT_4$
2	$LT_3$	$LT_4$	-	-
3	-	-	$LT_2$	$LT_3$
Custo Total (10 <sup>6</sup> US\$)	128,925	153,719	154,170	176,709

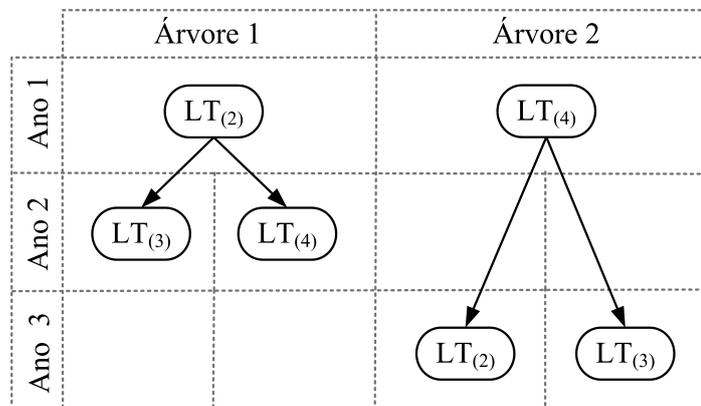


Figura 3.7 – Diagrama do Sistema Tutorial

### 3.7 PLANEJAMENTO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO (*TSHA\_AG*)

Devido à natureza do problema de planejamento dinâmico da transmissão, ao grande número de soluções ótimas locais e também a incerteza inerente ao processo, nos últimos anos a utilização de técnicas inteligentes vem crescendo e se tornando uma das principais ferramentas na busca de pontos ótimos no planejamento e operação de sistemas elétricos.

Estas técnicas são apropriadas ao problema e sua utilização pode se dar de forma direta, como apresentado em Leite da Silva et al. [51], porém como comprovado em Mendonça et al. [84] a inclusão de informações adicionais permite um aprimoramento na performance destas metodologias.

As técnicas inteligentes são dependentes do conjunto inicial e também do tamanho do espaço de busca, quanto menor o espaço de busca e melhor o conjunto inicial que será submetido a evolução, melhor o desempenho computacional e a qualidade das soluções. São estes aspectos que a metodologia proposta vai procurar trabalhar de forma a aprimorar a busca e permitir obter boas soluções para problemas mais complexos e de maior porte, para isto será feito uso dos resultados obtidos pela metodologia *TSHA*, apresentada na Seção 3.6.

Uma das grandes vantagens da técnica *TSHA* é a possibilidade da determinação de um grande número de planos de expansão factíveis, estes planos podem ser utilizadas diretamente, ou podem fornecer informações para outras metodologias. A partir dos resultados obtidos pela técnica *TSHA* três informações podem ser extraídas, são elas: (i) O conjunto de sequências de expansão; (ii) As linhas candidatas de maior incidência nas sequências de expansão e (iii) O “*formato*” da solução.

A primeira informação a ser utilizada consiste no conjunto de sequências de expansão. A técnica *TSHA* permite obter um grande número de soluções, as quais poderão servir de população inicial para métodos inteligentes, permitindo ao problema partir de um conjunto factível e de boa qualidade. Caberá a técnica refinar estas soluções a procura de planos melhores.

A segunda informação que pode ser obtida a partir dos resultados da técnica *TSHA* é referente as linhas candidatas de maior importância ao sistema, para o patamar de carga considerado. Foi constatado que ao término da simulação algumas linhas não foram utilizadas em nenhuma sequência de planejamento, por mais diversificados que os planos obtidos sejam, indicando que estas linhas não são boas alternativas a expansão do sistema e desta maneira podem ser suprimidas das novas análises.

A terceira informação obtida é o “*formato*” da solução, este dado permite uma grande melhoria no desempenho da técnica meta-heurística no planejamento dinâmico da transmissão.

De forma a exemplificar este conceito, considere o estudo de um sistema elétrico em que o horizonte de planeamento fora dividido em 4 estágios. Após a análise pela técnica *TSHA*, é observado que, dos planos encontrados, o plano que possui o maior número de reforços adicionados no Ano 3, por exemplo, teve 2 linhas de transmissão construídas, ou seja, o Ano 3 do horizonte de planeamento sempre foi atendido com até 2 linhas. Esta informação dá condições para que a técnica escolhida sorteie sempre 2 linhas ou menos, evitando assim que novos indivíduos se distanciem da solução real.

Além disto, é comum que os primeiros anos do horizonte de planeamento dispensem investimentos. Se em todos os planos o Ano 1 não teve linhas adicionadas, isto indica que aquele ano não necessita de reforços, o que evita análises desnecessárias.

As informações obtidas a partir da técnica *TSHA* podem ser utilizadas em diversos métodos meta-heurísticos. Para este trabalho optou-se por utilizar a técnica Algoritmos Genéticos (AG). A escolha se deve pela robustez, por ser uma técnica largamente difundida e validada nos estudos de planeamento de linhas de transmissão. O fluxograma de aplicação da técnica algoritmos genéticos está apresentado na Figura 3.8. Para a melhor compreensão da metodologia os Passos do fluxograma serão comentados.

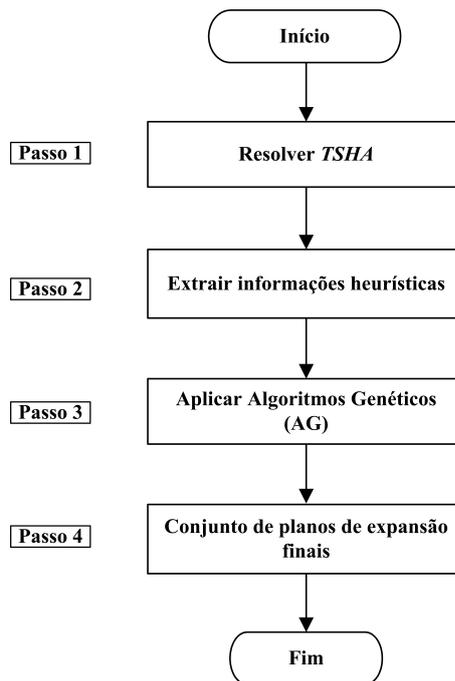


Figura 3.8 – Fluxograma de aplicação da técnica Algoritmos Genéticos

**Passo 1:** O primeiro passo do fluxograma consiste na solução do método *TSHA* apresentado na Seção 3.6. Por ser uma técnica cuja característica é fornecer diversos planos factíveis e de boa qualidade, estes planos servirão de ponto inicial para a busca inteligente, além de fornecer informações heurísticas adicionais que auxiliarão no processo de busca. Caso o número de planos obtidos através da técnica *TSHA* sejam insuficientes

para formar uma população, serão gerados planos de forma aleatória e repetindo as informações heurísticas extraídas no Passo 2.

**Passo 2:** A partir dos planos obtidos no Passo 1, o Passo 2 extrai as informações referentes às linhas de maior importância, os anos que elas aparecem com maior frequência além de o número aproximado de linhas candidatas construídas em cada ano.

**Passo 3:** No Passo 3 a população encontrada no Passo 1 é submetida a evolução através de um Algoritmo Genético, neste algoritmo será considerado elitismo, em que os melhores indivíduos farão parte da nova geração. Será considerado um *Crossover* de um único ponto, ou seja, dois indivíduos serão divididos em um mesmo ponto e suas partes combinadas formando dois descendentes. As novas populações serão submetidas a mutações. Por último, o processo de seleção será por torneio, em que uma amostra da população é escolhida aleatoriamente e os melhores indivíduos desta sub-população são submetidos a cruzamento. Esperasse que desta maneira a população fornecida pela técnica *TSHA* possa ser aprimorada dando origem a indivíduos mais aptos e que melhor atendam ao problema de planejamento da expansão. Os novos indivíduos são apresentados no Passo 4.

A aptidão dos indivíduos será avaliada em duas vertentes. A primeira irá avaliar o caráter econômico dos investimento e o atendimento a carga. Não será previsto neste momento a possibilidade de ocorrerem falhas no sistema, ou seja, esta primeira vertente não avaliará critérios de segurança na seleção dos indivíduos. A função de aptidão, para esta vertente, está apresentada na equação 3.9.

$$Aptidão = \frac{k}{FOB_1} \quad (3.9)$$

Onde:

$$FOB_1 = \sum_{y=1}^{ny} \left( \sum_{i=1}^{nb} (FC_i^y \cdot PF_i^y) + \sum_{(i,j) \in C} \sum_{k=1}^{nr(ij)} (IC_{ij(k)}^y \cdot ED_{ij(k)}^y) \right).$$

*k* Constante utilizada para ponderar a função de aptidão.

O intuito de ponderar a função de aptidão por uma constante *k* é de evitar que, para valores elevados no denominador, soluções ruins sejam aproximadas de soluções boas, uma vez que os valores de aptidão ficariam próximos de zero.

Já o denominador da Equação 3.9 é composto por duas parcelas, a primeira é referente ao custo da energia não suprida nas barras do sistema, ao passo que a segunda parcela é referente aos custos dos investimentos em reforços.

A segunda vertente irá avaliar não só o caráter econômico dos indivíduos e a operação em condição normal, mas também irá penalizar os indivíduos que sejam incapazes de operar o sistema quando da ocorrência de uma falta simples. Para mensurar o indivíduo, o

custo da energia não suprida, na condição de falta, será incorporado na função de aptidão, como apresentado na Equação 3.10.

$$Aptidão = \frac{k}{FOB_2} \quad (3.10)$$

Onde:

$$FOB_2 = \sum_{c=1}^{nctg} \left( \sum_{y=1}^{ny} \left( \sum_{i=1}^{nb} (F c_i^y \cdot P F_i^y) \right) \right) + \sum_{y=1}^{ny} \left( \sum_{(i,j) \in C} \sum_{k=1}^{nr(ij)} (I c_{ij(k)}^y \cdot E D_{ij(k)}^y) \right);$$

*nctg* É o número de elementos presentes na lista de contingências.

O numerador da função é composto pela mesma constante  $k$  utilizada na função 3.9. Seu objetivo é evitar que situações em que o denominador assuma valores elevados, os valores de aptidão fiquem próximos a zero aproximando soluções ruins de soluções boas.

Já o denominador da Equação 3.10 é composto por duas parcelas, a primeira é referente ao custo da energia não suprida nas barras do sistema para cada uma das possíveis situações de falhas, ao passo que a segunda parcela é referente aos custos dos investimentos em reforços.

A seguir será discutido com mais detalhes a estrutura do cromossomo e também os operadores utilizados neste trabalho.

### 3.7.1 Estrutura do cromossomo

O cromossomo nada mais é que uma matriz que representa a solução do problema de planejamento de linhas de transmissão. Em sua formação, ela é composta por diversos genes que indicam se uma linha candidata foi construída ( $ED_{ij(k)}^y = 1$ ) ou não ( $ED_{ij(k)}^y = 0$ ) em um determinado ano do planejamento. A Equação 3.11 ilustra a estrutura de um cromossomo.

$$Chr = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ ED_{ij(k)}^1 & \dots & ED_{ij(k)}^2 & \dots & ED_{ij(k)}^y & \dots & ED_{ij(k)}^{ny} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Cada linha da matriz é referente a um circuito  $(1, 2, \dots, k)$  ao passo que cada coluna da matriz representa um ano  $(1, 2, \dots, ny)$  do planejamento. Desta forma, se tivermos  $ED_{ij(1)}^2 = 1$  significa que o circuito 1 do ramo  $ij$  foi construído no ano  $y = 2$  do horizonte de planejamento.

### 3.7.2 Seleção por torneio

É importante definir quais dos indivíduos presentes na população terão a oportunidade de gerar descendentes. Para esta definição será utilizado o processo de seleção por torneio.

Neste método são selecionados um número  $n$  de indivíduos da população total. Cada indivíduo apresenta a mesma probabilidade de serem escolhidos. De posse dos  $n$  indivíduos, são selecionados os dois mais aptos e estes são submetidos a cruzamento de acordo com a Seção 3.7.3. Este processo é repetido até que a nova geração tenha o número de indivíduos desejado.

Para este trabalho optou-se por selecionar, de forma aleatória, 30% dos indivíduos da população total. Por exemplo, caso a população seja formada por 20 indivíduos, 6 destes indivíduos serão aleatoriamente selecionados para participarem do torneio. Os dois indivíduos mais aptos são submetidos a cruzamento dando origem a dois novos indivíduos. Para outro cruzamento, um novo conjunto de 6 indivíduos é sorteado da população total.

### 3.7.3 Operador de cruzamento

O cruzamento é a ferramenta responsável por gerar os novos indivíduos. Neste trabalho, dois indivíduos (pais) são recombinados de forma a gerar dois novos indivíduos (filhos), ou seja, o cruzamento permite a obtenção de novos indivíduos a partir de estruturas já existentes.

O processo de cruzamento escolhido é o *cruzamento por um único ponto*. Para o entendimento do processo considere dois indivíduos:  $S_1 = \{\mathbf{10101011}\}$  e  $S_2 = \{10000110\}$ . Primeiramente é necessário obter o ponto de cruzamento dos cromossomos, para este exemplo os cromossomos tem oito genes e desta maneira, deve ser sorteado um número no intervalo [1 - 7] de forma a garantir descendentes diferentes dos pais.

Considere que o ponto de cruzamento sorteado seja o “3”, isto significa que os indivíduos serão seccionados na posição 3, como se segue:  $S_1 = \{\mathbf{101|01011}\}$  e  $S_2 = \{100|00110\}$ , onde “|” indica a posição em que os cromossomos serão divididos.

Com os cromossomos divididos as partes do cromossomo  $S_1$  ( $Parte_{1-S_1} = \{\mathbf{101}\}$  e  $Parte_{2-S_1} = \{\mathbf{01011}\}$ ) serão combinadas com as partes do cromossomo  $S_2$  ( $Parte_{1-S_2} = \{100\}$  e  $Parte_{2-S_2} = \{00110\}$ ), dando origem aos novos indivíduos  $S_3 = \{100\mathbf{01011}\}$  e  $S_4 = \{\mathbf{101}00110\}$ .

Este processo é realizado para todos os pares de indivíduos obtidos pelo processo de seleção por torneio apresentado na Seção 3.7.2.

Para todas as simulações realizadas neste trabalho, a população foi fixada em 20 indivíduos e 50 gerações. Caso o *TSHA* seja incapaz de encontrar 20 indivíduos, alguns

planos serão criados de forma aleatória para complementar a população inicial.

#### 3.7.4 Operador de mutação

O operador mutação tem a finalidade de introduzir mudança aleatórias nos genes dos cromossomos. Estas mudanças visam aumentar a diversidade dos indivíduos e assim reduzir a possibilidade de uma convergência prematura.

Para este trabalho foi escolhida uma taxa de mutação constante, e igual a 1% do número de genes dos indivíduos, ou seja, um indivíduo com 100 genes teria 1 gene modificado.

Sempre que uma nova população for gerada e avaliada, metade de seus indivíduos terão a chance de sofrerem mutações antes de um novo cruzamento. A probabilidade de ocorrerem modificações genéticas é de 30%.

O intuito de realizar mutação em boa parte dos indivíduos é de atenuar o fato de a população inicial ser bastante homogênea, formada por vários ótimos e sub-ótimos.

De forma a não perder as boas características da população o trabalho utiliza a estratégia elitista que será melhor detalhada na Seção 3.7.5.

#### 3.7.5 Estratégia elitista

Para o trabalho foi considerado o elitismo nas gerações, ou seja, caso os melhores indivíduos da população atual não estejam presentes na nova geração, estes indivíduos são incluídos de qualquer forma.

O princípio desta estratégia é garantir que os melhores planos de expansão não se percam a medida que novas gerações são obtidas. A estratégia permite também que os melhores indivíduos participem de um número maior de cruzamentos, uma vez que eles sempre estarão presentes na população.

Nas simulações realizadas neste trabalho, foi adotado um elitismo de 10%, ou seja, em uma população de 20 indivíduos, os 2 indivíduos mais aptos irão obrigatoriamente compor a próxima geração.

### 3.8 SÍNTESE DOS MÉTODOS

Esta seção tem por objetivo fornecer uma síntese do métodos descritos neste capítulo, conforme mostra a Tabela 3.13.

A metodologia *DLHA* é capaz de obter apenas um plano de expansão e sem a inclusão de restrições de segurança, atendendo apenas a operação do sistema sob condição normal. A técnica *DLHA\_RS* complementa a técnica *DLHA* permitindo a inclusão das

Tabela 3.13 – Resumo das metodologias

Metodologia	Várias Soluções	Operação segura
<i>DLHA</i>	NÃO	NÃO
<i>DLHA_RS</i>	NÃO	SIM
<i>TSHA</i>	SIM	SIM
<i>TSHA_AG</i>	SIM	SIM

restrições de segurança a priori no problema, porém, permanece sendo capaz de obter apenas uma estratégia de expansão.

A técnica *TSHA* permite obter várias estratégias de expansão obtendo planos que atendem a operação sob condição normal. Como o número de planos obtidos é muito grande, acaba que alguns planos serão capazes de atender também a operação segura, porém a análise de segurança é realizada a posteriori.

Por fim, a técnica *TSHA\_AG* permite obter diversas estratégias de expansão para planos que contemplam ou não a operação segura do sistema. É importante ressaltar que a solução obtida pela técnica *TSHA* é utilizada como população inicial para o algoritmo genético.

### 3.9 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi proposto um modelo acoplado para o planejamento dinâmico do sistema de transmissão de energia elétrica. O modelo proposto se trata de um problema de programação não linear inteiro e misto de difícil solução. Assim, de forma a atenuar as dificuldades intrínsecas a este tipo de formulação, foram propostas técnicas na qual as variáveis binárias são tratadas como variáveis contínuas.

É de conhecimento que uma variável contínua é incapaz de representar uma variável inteira com fidelidade. Desta maneira, se fez uso de índices de sensibilidade para determinar quais destas variáveis contínuas deverão se tornar discretas para a correta operação do sistema e representação do problema real de planejamento de linhas de transmissão.

Para auxiliar no processo de discretização das variáveis contínuas, foram propostas técnicas de solução. Cada técnica proposta apresenta sua peculiaridade.

Na Seção 3.4 foi proposta a técnica *DLHA* que busca atender a demanda de construção de linhas de transmissão em um determinado ano através de uma lista de reforços, esta é uma técnica que apresenta uma excelente visão sobre o ano que está sendo analisado, a visão global é obtida com o auxílio do índices de sensibilidade obtidos do modelo acoplado. Uma de suas características é fornecer apenas uma sequência de expansão por análise do algoritmo.

Já a Seção 3.5 foi apresentada uma evolução da técnica *DLHA*. Esta evolução permite ao algoritmo heurístico com base em lista dinâmica obter planos que atendam

ao critério de segurança  $N - 1$  de acordo com uma lista de contingências, respeitando as demais características originais da metodologia.

Na Seção 3.6 é apresentado o algoritmo heurístico de busca em árvore *TSHA* que apresenta um foco menor no ano que está sendo analisado e um foco maior no horizonte de planejamento. A técnica consiste em testar todas as linhas que foram selecionadas por índices de sensibilidade e opta pela construção das linhas que irão proporcionar o menor impacto na função objetivo. Esta técnica apresenta uma vantagem em relação a técnica apresentada na Seção 3.4, que é proporcionar mais de uma sequência de expansão para o problema do planejamento da transmissão. O número de soluções depende do número de reforços que devem ser adicionados ao sistema, quanto mais reforços forem necessários, maior será o número de planos de expansão que poderão ser obtidos ao término do processo iterativo.

Por último, na Seção 3.7 é formulado um modelo que faz uso da técnica inteligente Algoritmo Genético (AG) para a solução do planejamento dinâmico de sistemas de transmissão de energia elétrica. De forma a diminuir o espaço de busca e melhorar a performance do AG, informações heurísticas são extraídas da técnica *TSHA*. A técnica é expandida de forma a obter soluções que atendam ou não ao critério de confiabilidade  $N - 1$ .

## 4 ESTUDO DE CASOS

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos para cada uma das técnicas apresentadas no capítulo anterior. Para validar as metodologias será simulado um sistema acadêmico, o sistema Garver e o sistema equivalente à região sul do Brasil. Os resultados serão comparados com trabalhos presentes na literatura e também com a solução direta do *IC-OPF* através do uso de *toolbox* de programação inteira mista.

Ao termino do capítulo é apresentado uma conclusão no intuito de destacar algumas vantagens e desvantagens do modelo proposto, além de uma comparação de desempenho entre as técnicas de solução. Os dados dos sistemas simulados neste capítulo estão disponíveis no Apêndice A.

Ressalta-se que em todos os casos simulados será considerada as perdas ôhmicas nos circuitos. A taxa de desconto adotada ( $r$ ) foi de 10% ao ano de acordo com Leite da Silva et al. [52].

### 4.2 INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DECISÃO

A solução de um problema de otimização não linear é dependente das condições iniciais de suas variáveis, tanto no que diz respeito aos tempos computacionais quanto ao ponto de convergência. Desta maneira, é pertinente avaliar a influência do ponto de partida na convergência do *CC-OPF*.

Após a transformação das variáveis de decisão  $ED_{ij(k)}^y$  em variáveis contínuas, elas se tornaram dependentes de  $x_{ij(k)}^y$ , de acordo com a equação (3.6). Para avaliar o impacto dos valores iniciais de  $x_{ij(k)}^y$  na solução final, o problema *CC-OPF* será resolvido para diversas condições iniciais de  $x_{ij(k)}^y$ .

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para os sistemas que serão estudados. A solução encontrada para  $x_{ij(k)}^y = 0$  será utilizada como base para o cálculo dos tempos em p.u., assim como para a determinação do maior desvio percentual de um bit de solução ( $\bar{\sigma}$ ). Neste estudo, foram admitidas cinco casas decimais na representação das variáveis  $ED_{ij(k)}^y$ .

Após a análise, é possível perceber que o *solver* de otimização do Lingo foi capaz de convergir para a mesma solução, independente da condição inicial das variáveis  $ED_{ij(k)}^y$ . Já o tempo gasto para a convergência do *CC-OPF* foi diferente, havendo um certo padrão para os sistemas testados. A inicialização de  $x_{ij(k)}^y = 15$  ( $ED_{ij(k)}^y = 1$ ) trouxe um ganho computacional e será utilizada nas simulações subsequentes.

Tabela 4.1 – Valores de inicialização de  $x_{ij}^y(k)$ 

Variáveis Inicializadas		Sistema Seis Barras		Sistema Garver		Sistema Sul	
$x_{ij}^y(k)$	$ED_{ij}^y(k)$	Tempo (p.u.)	$\bar{\sigma}$ (%)	Tempo (p.u.)	$\bar{\sigma}$ (%)	Tempo (p.u.)	$\bar{\sigma}$ (%)
0,0	0,00000	1,0000	0,00000	1,0000	0,00000	1,0000	0,00000
0,1	0,04995	1,0056	0,00000	1,0011	0,00000	1,0244	0,00000
0,2	0,09966	1,0110	0,00000	1,0005	0,00000	1,0165	0,00000
0,5	0,24491	0,9943	0,00000	1,0005	0,00000	0,9978	0,00000
1,0	0,46211	0,9996	0,00000	1,0203	0,00000	1,0016	0,00000
1,5	0,63514	1,0161	0,00000	0,9993	0,00000	1,0071	0,00000
2,0	0,76159	0,9998	0,00000	1,0111	0,00000	1,0116	0,00000
2,5	0,84828	0,9998	0,00000	0,9583	0,00000	0,9964	0,00000
5,0	0,98661	1,0052	0,00000	1,0003	0,00000	1,0291	0,00000
10,0	0,99990	0,9393	0,00000	1,0106	0,00000	0,9937	0,00000
15,0	0,99999	0,9339	0,00000	0,9604	0,00000	0,9937	0,00000

### 4.3 SISTEMA SEIS BARRAS

Este sistema é composto por 6 barras, 11 circuitos duplos no caso base e a possibilidade de acréscimo de mais 3 reforços para cada um destes circuitos. A Figura 4.1 representa esquematicamente este sistema, onde as linhas contínuas representam os caminhos existentes no caso base e as linhas tracejadas representam cada um dos ramos candidatos a expansão.

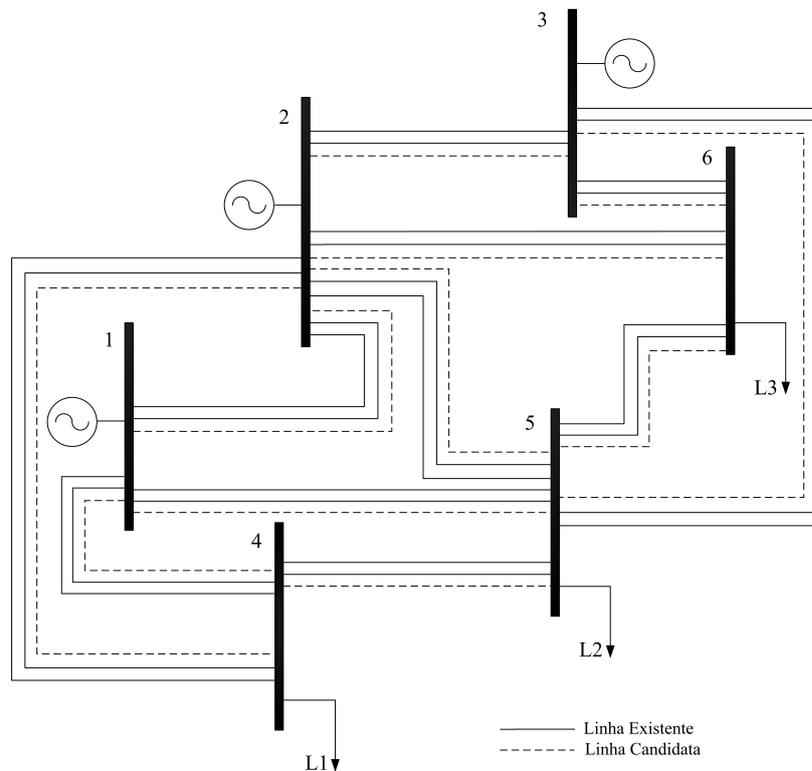


Figura 4.1 – Diagrama do Sistema Seis Barras

Este sistema, ainda que pequeno, é capaz de demonstrar a dificuldade de se resolver o problema do planejamento dinâmico de linhas de transmissão. Existem neste sistema onze ramos candidatos, cada um destes ramos pode receber até três reforços, além disto o

planejamento foi dividido em oito anos, existe um total de trinta e três variáveis binárias por ano e ao considerar todo o horizonte de planejamento, um total de duzentos e sessenta e quatro variáveis binárias.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para as técnicas propostas no Capítulo 3. Para esta simulação foi considerado um crescimento linear de 25% para a capacidade de geração e para a demanda.

#### 4.3.1 Resultados obtidos pela técnica *DLHA*

A principal característica da técnica *DLHA* é encontrar apenas uma sequência de expansão para cada análise do algoritmo. Normalmente a sequência encontrada tem excelente custo em valor presente, mas acaba dando pouca liberdade para o planejador na hora de escolher os reforços a serem instalados. Esta limitação da metodologia pode ser suprida se, para cada análise do algoritmo, forem utilizados vários índices ou combinações diferentes de índices na hora de montar a lista dinâmica.

A Tabela 4.2 apresenta o resultado do Sistema Seis Barras, obtido a partir da solução do *CC-OPF* utilizando a técnica *DLHA*. O resultado apresentado é o mesmo obtido por Leite da Silva et al. [51] e tido como o melhor resultado dentre as várias meta-heurísticas comparadas no trabalho. Enquanto Leite da Silva et al. [51] levou em torno de 23 minutos, a técnica *DLHA* precisou de 6 minutos para determinação da sequência de planejamento da expansão, indicando que a *DLHA* é viável para a análise de sistemas de maior porte.

Tabela 4.2 – Sequência de expansão para o Sistema Seis Barras: Técnica *DLHA*

Ano	Reforços	Custo (10 <sup>6</sup> US\$)
2	1-5	16,526
3	1-4	18,782
4	1-5 e 3-6	40,980
5	1-4	15,523
6	1-5, 2-6 e 3-5	36,689
7	1-4 e 2-5	23,091
8	2-4 e 3-6	37,320
Total de investimento em valor presente		188,911

Outras simulações foram realizadas com a técnica proposta, porém utilizando apenas um índice para formar o conjunto  $DOL^{yf}$ . A primeira simulação considerou apenas o índice  $SI1_{ij(k)}^y$  resultando em um planejamento de 191,16 milhões de dólares. Para o índice  $SI2_{ij(k)}^y$ , o custo de planejamento foi de 234,92 milhões. Embora de maiores custo que o planejamento apresentado na Tabela 4.2, estes planos são boas opções, pois permitem uma maior liberdade na hora da decisão de investimento.

Outra conclusão que pode ser obtida destas simulações é que os planos de expansão são dependentes dos índices de sensibilidade utilizados. Um número maior de índices de sensibilidade trabalhando juntos permitem obter soluções melhores para um universo

maior de sistemas. Para este trabalho foi verificado que a união dos índices  $SI1_{ij(k)}^y$  e  $SI2_{ij(k)}^y$  é suficiente para garantir soluções de baixo custo em tempo computacional viável.

#### 4.3.2 Resultados obtidos pela técnica *DLHA\_RS*

A técnica apresentada na Seção 3.5 é uma evolução da técnica *DLHA* a qual permite obter planos de expansão capazes de operar o sistema ainda que ocorra uma contingência simples.

Para este trabalho os estudos que irão considerar análises de segurança na síntese das sequências de expansão farão uso de listas de contingências. O objetivo de fazer o uso de listas é de minimizar o custo computacional de submeter todos os equipamentos do sistema a análise.

Para o Sistema Teste será considerada a lista de contingência composta pelas linhas {1-4, 1-5, 2-3, 2-6 e 3-5}. A análise será dividida em duas etapas: (i) A primeira etapa permitirá uma sobrecarga de até 10% nos circuitos remanescentes; (ii) Já na segunda etapa da análise os limites de fluxo de carga nos circuitos remanescentes serão respeitados.

O resultado obtido na primeira etapa está apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Sequência de expansão para o Sistema Seis Barras com tolerância a sobrecarga

Ano	Reforços	Custo (10 <sup>6</sup> US\$)
1	1-5	18,181
2	1-5	16,526
3	1-4	18,782
4	1-5, 3-6	40,980
5	1-4	15,523
6	1-4, 2-6, 3-5	42,335
7	2-6, 3-5	23,091
8	2-4, 3-6, 4-5	44,318
Total de investimento em valor presente		195,916

Este resultado é próximo ao obtido na Seção 4.3.1. Os investimentos em reforços são parecidos e a diferença entre as sequências de expansão é a inclusão da linha 4 – 5 no Ano 8 do planejamento.

O resultado obtido após a análise da segunda etapa é apresentado na tabela na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Sequência de expansão para o Sistema Seis Barras sem tolerância a sobrecarga

Ano	Reforços	Custo (10 <sup>6</sup> US\$)
1	1-5	16,526
2	1-5	16,526
3	1-4	18,782
4	1-5, 3-6	40,980
5	1-4	15,523
6	1-4, 2-6, 3-5	36,689
7	2-6, 3-5	23,091
8	2-4, 3-6, 4-5	37,320
Total de investimento em valor presente		216,920

Como pode ser observado, o resultado obtido para a segunda etapa é bem diferente do resultado obtido na Seção 4.3.1. Neste estudo houve a necessidade de antecipar investimentos e construir um número maior de linhas de transmissão.

As contingências por se tratarem de uma emergência, apenas um período temporário até que se restabeleça a condição normal, é razoável tolerar um sobrecarga nos circuitos remanescentes no sistema. Assim, evita-se um excesso de investimentos em equipamentos que só serão realmente necessário caso ocorra uma eventualidade.

### 4.3.3 Resultados obtidos pela técnica *TSHA*

A técnica *TSHA* permite obter vários planos factíveis, sendo que o número de planos ao término do algoritmo será tanto maior quanto forem o número de reforços a serem incorporados no sistema.

O Sistema Seis Barras é um sistema que exige muitos reforços para a correta operação. Em média são necessárias 14 linhas candidatas incorporada ao sistema para que a operação ocorra sem cortes de carga.

Este número elevado de reforços permite obter, aproximadamente,  $2^{14} = 16384$  planos de expansão. Para evitar uma explosão combinatória o algoritmo foi limitado a um máximo de cinquenta soluções, assim sendo, será mantido apenas os cinquenta ramos mais fortes (*Strong Branch* = 50) da árvore de busca.

As melhores soluções obtidas são apresentadas na Tabela 4.5. O Plano 1 é o planejamento de menor valor presente e é a mesma sequência apresentada pela heurística *DLHA*.

Tabela 4.5 – Estratégia de expansão para o Sistema Seis Barras: Técnica *TSHA*

Ano	Plano 1 Reforços	Plano 2 Reforços	Plano 3 Reforços	Plano 4 Reforços
2	1-5	1-4	1-5	1-5
3	1-4	1-5	1-4	1-4
4	1-5, 3-6	1-5, 3-6	1-5, 3-6	1-5, 3-6
5	1-4	1-4	1-4	1-4
6	1-5, 2-6, 3-5	1-5, 2-6, 3-5	1-4, 1-5, 2-5, 2-6	1-4, 1-5, 2-6, 3-5
7	1-4, 2-5	1-4, 2-5	3-5	2-5
8	2-4, 3-6	2-4, 3-6	2-4, 3-6	2-4, 3-6
Custo Total (10 <sup>6</sup> US\$)	188,911	189,28	190,20	190,20

Para ilustrar o comportamento das demais soluções, foi proposto o gráfico apresentado da Figura 4.2. Neste gráfico as 50 soluções foram colocadas em ordem crescente de custos.

É possível observar que as sequências de expansão ficaram restritas ao intervalo [188,911 - 234,520], tendo assim uma variação de até 24,14% em relação a melhor solução.

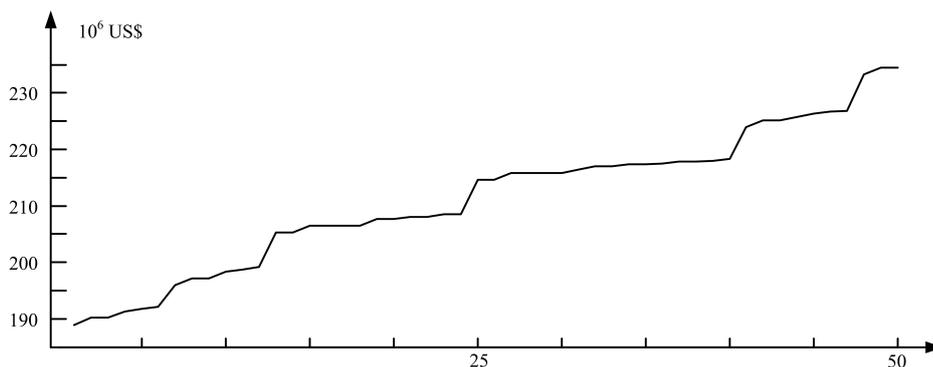


Figura 4.2 – Evolução dos custos do Sistema Seis barras obtidos pela técnica *TSHA*

#### 4.3.4 Resultados obtidos pela técnica *TSHA\_AG*

O Sistema Teste também será avaliado pela metodologia apresentada na Seção 3.7. Esta técnica irá partir do conjunto de soluções obtidas na Seção 4.3.3 e buscará aprimorar as seqüências de expansão já conhecidas.

Na primeira análise será considerado apenas a função de aptidão expressa pela Equação 3.9 (Equação que penaliza o custo de investimento e também a energia não suprida no sistema). Desta maneira, a técnica algoritmo genético buscará refinar as soluções obtidas pela técnica *TSHA* de forma a encontrar planos de expansão de baixo investimento capazes de operar o sistema sob condições normais.

Após a análise, as melhores soluções obtidas foram as mesmas apresentadas na Tabela 4.5. A técnica AG conseguiu obter planos diferentes porém todos com custo de investimento maiores que os obtidos pela técnica *TSHA*. Isto ocorre devido a alta qualidade dos indivíduos que foram utilizados como população inicial.

Já a segunda análise considerou a função de aptidão apresentada na Equação 3.10 (Equação que penaliza o investimento, a energia não suprida e também o déficit de energia no sistema quando da ocorrência de uma contingência simples). A aplicação da nova função de aptidão tornou inaptas as soluções apresentadas na Tabela 4.5 tidas como os melhores planos de expansão em condições normais de operação, pois estes planos foram incapazes de evitar cortes de carga quando da ocorrência de contingências simples. Os indivíduos mais aptos obtidos após análise da técnica AG estão apresentados na Tabela 4.6.

Dois pontos merecem ser destacados a partir destes resultados. O primeiro é o fato de haver uma maior necessidade de investimentos e inclusão de um maior número de reforços em relação ao plano obtido na Seção 4.3.1 e aos planos apresentados na Seção 4.3.3, de forma a garantir a correta operação em face a contingências. O segundo ponto que deve ser destacado é o fato da melhor solução obtida pela técnica AG ser a mesma obtida na Seção 4.5.2 indicando que a solução obtida pelas metodologias é de boa qualidade.

Tabela 4.6 – Estratégia de expansão para o Sistema Seis Barras: Técnica *TSHA\_AG*

Ano	Plano 1 Reforços	Plano 2 Reforços	Plano 3 Reforços	Plano 4 Reforços
1	-	-	-	1-5
2	1-5	1-5	1-5	-
3	1-4	1-4	1-4	1-4
4	1-5, 3-6	1-5, 3-6	1-5, 3-6	1-5, 3-6
5	1-4	1-4	1-4	1-4
6	1-5, 3-5, 2-6	1-4, 1-5, 2-5, 2-6	1-4, 1-5, 3-5, 2-6	1-5, 3-5, 2-6
7	1-4, 2-5	3-5	2-5	1-4, 2-5
8	2-4, 3-6, 4-5	2-4, 3-6, 4-5	2-4, 3-6, 4-5	2-4, 3-6, 4-5
Custo Total (10 <sup>6</sup> US\$)	195,916	197,199	197,199	197,569

#### 4.4 SISTEMA GARVER

O diagrama do sistema Garver é apresentado na Figura 4.3. Este sistema é composto por seis barramentos, seis linhas de transmissão existentes no caso base e a possibilidade de conexão entre quaisquer barramentos atendendo a um limite de quatro linhas de transmissão paralelas para um mesmo ramo.

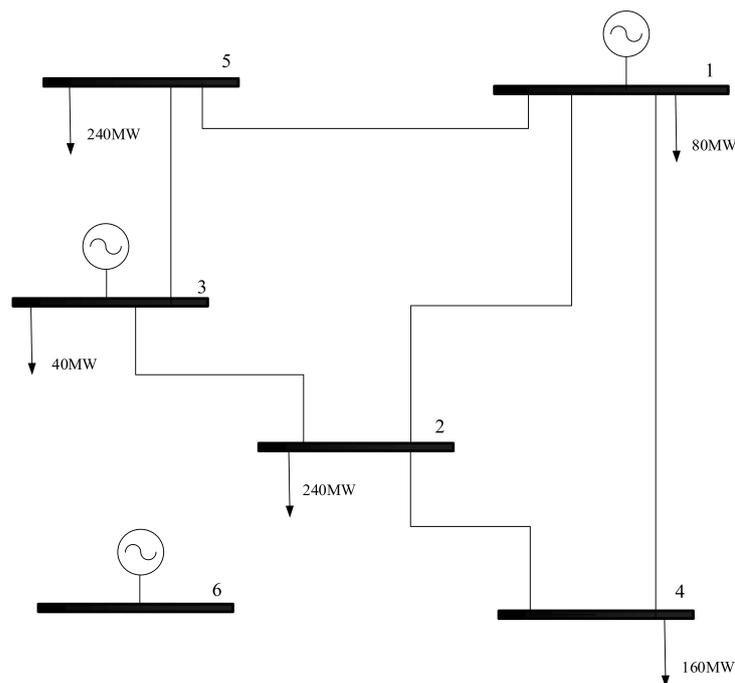


Figura 4.3 – Diagrama do Sistema Garver

Para esta análise o horizonte de planejamento será dividido em seis anos. A capacidade de geração instalada no ano zero totaliza 1110 MW, ao passo que a carga demandada do sistema é de 760 MW. Será considerado um crescimento linear de 5% ao ano para a capacidade de geração e carga, atingindo para o último ano 1417 MW e 970 MW para o limite de geração e a demanda, respectivamente. Os dados completos para este sistema são apresentados no Apêndice ??.

#### 4.4.1 Resultados obtidos pela técnica *DLHA*

Nesta seção será aplicada a técnica *DLHA* para a determinação da sequência de expansão do Sistema Garver. O resultado obtido está apresentando na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Sequência de expansão para o Sistema Garver: Técnica *DLHA*

Ano	Planejamento Reforços			
	04-06	02-06	03-05	02-03
1	2	1	1	1
2	-	1	-	-
3	-	-	-	-
4	-	-	1	-
5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
Custo Total	172,299 10 <sup>6</sup> US\$			

O resultado obtido para este estudo de caso apresenta menor investimento apenas em relação a Sequência “E” proposta em Leite da Silva et al. [79]. Uma justificativa para isto é a dificuldade da metodologia quando da necessidade de construção de muitas linhas candidatas em um mesmo ano.

Este estudo de caso apresenta para o Ano 0 do planejamento a carga do estudo estático proposto por Garver [4], cujo ótimo global é a construção das linhas {04-06 (2), 02-06 (1), 03-05 (1) e 02-03 (1)} de acordo com Oliveira et al. [37], e desta maneira implica na construção de muitos reforços em um mesmo ano.

#### 4.4.2 Resultados obtidos pela técnica *DLHA\_RS*

O Sistema Garver também será analisado pela técnica *DLHA\_RS*. Para este estudo será considerado a possibilidade de falha em todas as linhas existentes no caso base. Além disto, não será permitido a sobrecarga em circuitos. O resultado obtido pela metodologia está apresentado na Tabela 4.8

Tabela 4.8 – Sequência de expansão para o Sistema Garver: Técnica *DLHA\_RS*

Ano	Planejamento Reforços			
	04-06	02-06	03-05	02-03
1	2	2	2	-
2	-	-	-	-
3	-	1	-	1
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
Custo Total	193,057 10 <sup>6</sup> US\$			

O planejamento da Tabela 4.8 tem um custo de investimento inferior a todas as sequências propostas por Leite da Silva et al. [79] para o caso em que é considerado o critério determinístico  $N - 1$ . Este fato demonstra que a metodologia tem grande potencial

para a obtenção de estratégias de expansão para sistemas em que se busca a manutenção da operação ainda que ocorram faltas simples.

Deve-se ressaltar que o resultado apresentado tem um custo de investimento superior ao custo do planejamento apresentado na Tabela 4.7. Isto se deve a maior necessidade de reforços de forma a garantir a operação segura do sistema.

#### 4.4.3 Resultados obtidos pela técnica *TSHA*

Neste momento o Sistema Garver será avaliado pela técnica *TSHA*. Para este estudo de caso foi escolhido manter 30 soluções durante o processo de busca. Os melhores planos estão apresentadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Estratégia de expansão para o Sistema Garver: Técnica *TSHA*

Ano	Plano 1 Reforços			Plano 2 Reforços		
	04-06	02-06	03-05	04-06	02-06	03-05
1	2	2	1	2	2	2
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	1	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
Custo Total	156,528 10 <sup>6</sup> US\$			160,000 10 <sup>6</sup> US\$		

Analisando os resultados, o Plano 1 obtido pelo *TSHA* é igual ao melhor resultado apresentado em Leite da Silva et al. [79] para a situação em que são desconsiderados os critérios de segurança. Já o Plano 2 também é apresentado em Leite da Silva et al. [79], mas como sendo a terceira melhor sequência de expansão.

A Figura 4.4 mostra a evolução dos custos das soluções obtidas neste estudo de caso, é possível observar que as soluções estão no intervalo [156,528 - 242,361].

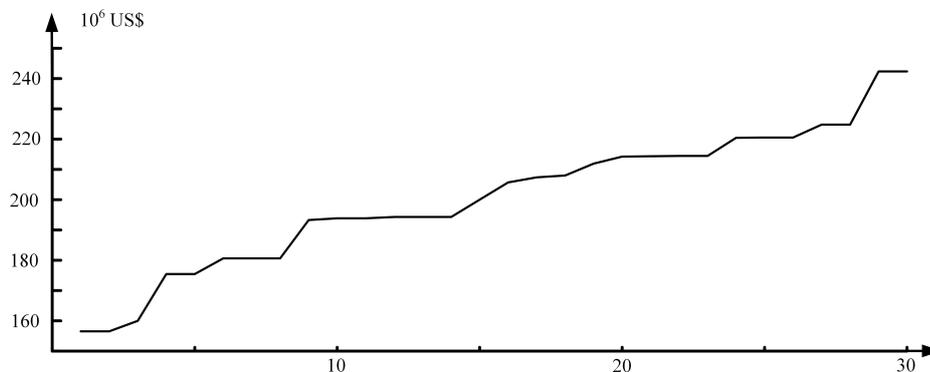


Figura 4.4 – Evolução dos custos do Sistema Garver obtidos pela técnica *TSHA*

#### 4.4.4 Resultados obtidos pela técnica *TSHA\_AG*

Nesta seção o conjunto de 30 soluções obtidas pela técnica *TSHA*, para o sistema Garver, serão submetidas a evolução de formar a obter soluções com maior aptidão ao problema do planejamento dinâmico da transmissão.

Na primeira análise, o AG buscará soluções que atendam a carga do sistema em condição normal de operação. Os melhores planos obtidos após a convergência do AG são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Estratégia de expansão para o Sistema Garver: Técnica *TSHA\_AG*

Ano	Plano 1 Reforços			Plano 2 Reforços		
	04-06	02-06	03-05	04-06	02-06	03-05
1	2	2	1	2	2	1
2	-	-	-	-	-	1
3	-	-	1	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
Custo Total	156,528 10 <sup>6</sup> US\$			158,180 10 <sup>6</sup> US\$		

O Plano 1 é o mesmo apresentado na Tabela 4.9 e pertencente a população inicial. Já o Plano 2 é um plano com custo intermediário aos planejamentos propostos na Tabela 4.9 demonstrando que a técnica AG permite também diversificar a população obtida pela técnica *TSHA*. O Plano 2 é apresentado em Leite da Silva et al. [79] sendo a segunda melhor opção de planejamento para o caso em que são desconsiderados critérios de confiabilidade.

A segunda análise consiste em considerar como função de aptidão a Equação 3.10 e desta maneira, buscar planos capazes de garantir a operação segura do sistema. Os melhores resultados obtidos após a análise do AG são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Estratégia de expansão para o Sistema Garver: Técnica *TSHA\_AG*

Ano	Plano 1 Reforços			Plano 2 Reforços		
	04-06	02-06	03-05	04-06	02-06	03-05
1	2	2	2	2	2	2
2	-	-	-	-	1	1
3	-	1	1	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
Custo Total	201,32 10 <sup>6</sup> US\$			205,45 10 <sup>6</sup> US\$		

Em relação aos planos obtidos, o Plano 1 tem um custo superior ao planejamento obtido na Tabela 4.8, porém custo inferior a todos o planos obtidos por Leite da Silva et al. [79] para a análise com segurança. Já o Plano 2 tem um custo superior ao Plano 1, porém é capaz de manter a operação do sistema ainda que, além das linhas existentes no caso base, as candidatas incorporadas ao longo do horizonte de planejamento sofram falhas nos anos subsequentes a sua inclusão no sistema.

## 4.5 SISTEMA SUL EQUIVALENTE BRASILEIRO

O sistema equivalente sul brasileiro é formado pelas barras e ramos mais importantes do respectivo sistema real, em sua rede base ele é composto por 46 barramentos e 62 linhas de transmissão existentes no caso base. Para esta análise, o conjunto de linhas candidatas foi obtido em [83], os dados deste sistema são apresentados no Apêndice ??.

O problema de planejamento dinâmico, neste estudo de caso, consiste em um horizonte de planejamento de 10 anos partindo do ano 0, cada ramo candidato pode receber até três reforços, a demanda prevista para décimo ano é de 6880,0 MW e a capacidade de geração instalada no décimo ano é de 10545,0 MW. Ambas, capacidade de geração e demanda tiveram seus valores para o ano 0 considerados 35% de seus respectivos valores do ano 10, tanto geração quanto demanda apresentam um crescimento linear.

### 4.5.1 Resultados obtidos pela técnica *DLHA*

A primeira análise consiste na determinação da sequência de planejamento do sistema sul brasileiro pela técnica *DLHA*, como anteriormente dito, esta metodologia é capaz de determinar apenas uma sequência de planejamento. A sequência obtida é apresentada na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Sequência de expansão para o Sistema Sul: Técnica *DLHA*

Ano	Reforços	Custo (10 <sup>6</sup> US\$)
1	20-21	19,28
2	42-43	17,53
3	46-06 and 05-06	47,12
4	-	00,00
5	05-06	13,17
6	-	00,00
7	20-23 and 20-21	19,22
8	-	00,00
9	-	00,00
10	18-20	12,73
Total de investimento em valor presente		129,05

No intuito de avaliar a solução e validar a metodologia, o solver para programação não linear inteira mista do pacote de otimização do Lingo foi utilizado para resolver diretamente o modelo inteiro. A simulação considerou o mesmo conjunto de candidatas e adicionou informações obtidas a partir da heurística *DLHA*: (i) O planejamento começa a partir do ano 1, e (ii) o número máximo de linhas de transmissão para cada ano.

Com o auxílio destas restrições o solver foi capaz de convergir para a mesma solução apresentada na Tabela 4.12 após 28h de simulação.

### 4.5.2 Resultados obtidos pela técnica *DLHA\_RS*

Nesta seção a aproximação proposta para a técnica *DLHA*, para obter planos que atendam a critérios de segurança, será utilizada para a determinação de uma sequência de

expansão capaz de permitir ao sistema sul brasileiro permanecer operando ainda que as linhas {01-07, 01-02, 07-08, 04-05, 14-18} sofram contingências. Para este estudo de caso não será permitido sobrecarga nos circuitos remanescentes.

Após a análise, foi obtida a sequência de planejamento apresentada na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Sequência de expansão para o Sistema Sul: Técnica *DLHA\_RS*

Ano	Reforços	Custo (10 <sup>6</sup> US\$)
1	20-21	19,28
2	42-43	17,53
3	46-06, 05-06	47,12
4	-	00,00
5	05-06	13,17
6	-	00,00
7	20-23, 20-21	19,22
8	-	00,00
9	13-20	07,85
10	18-20	12,73
Total de investimento em valor presente		136,90

A sequência de investimentos obtida é praticamente o mesmo plano de expansão apresentado na Tabela 4.12, diferenciando apenas pela inclusão da linha 13 – 20 no Ano 9 do planejamento, porém a estratégia é capaz de manter o sistema operando ainda que uma das linhas da lista de contingência apresente uma falha. A melhoria da confiabilidade por um aumento relativamente baixo no custo de investimento torna a sequência uma boa alternativa para o planejador.

#### 4.5.3 Resultados obtidos pela técnica *TSHA*

A técnica *TSHA* foi utilizada para a determinação da sequência de planejamento do sistema sul brasileiro, novamente tomou-se o cuidado de limitar o número de soluções, onde as soluções de maior custo contínuo foram ceifadas de maneira a permitir um máximo de 20 soluções.

Os melhores resultados obtidos pela técnica *TSHA* são apresentados na Tabela 4.14

Tabela 4.14 – Estratégia de expansão para o Sistema Sul: Técnica *TSHA*

Ano	Plano 1	Plano 2
1	20-21	20-21
2	42-43	42-43, 46-06
3	46-06, 05-06	05-06
4	-	-
5	05-06	05-06
6	-	-
7	20-23, 20-21	20-23, 20-21
8	-	-
9	-	-
10	18-20	18-20
Custo Total	129,070 10 <sup>6</sup> US\$	132,189 10 <sup>6</sup> US\$

O Plano 1 é a mesma sequência de planejamento obtida pela heurística *DLHA* e validada através da solução direta do modelo inteiro de planejamento dinâmico da

transmissão. O Plano 2 é outra opção de investimento, apesar de ter maior custo pode ser uma boa opção dando liberdade ao planejador e aumentando a confiabilidade do sistema no Ano 2 do planejamento com a antecipação da construção da linha 46 – 06.

A partir da Figura 4.5 é possível observar o comportamento das demais soluções obtidas no processo em relação aos planos apresentados na Tabela 4.14.

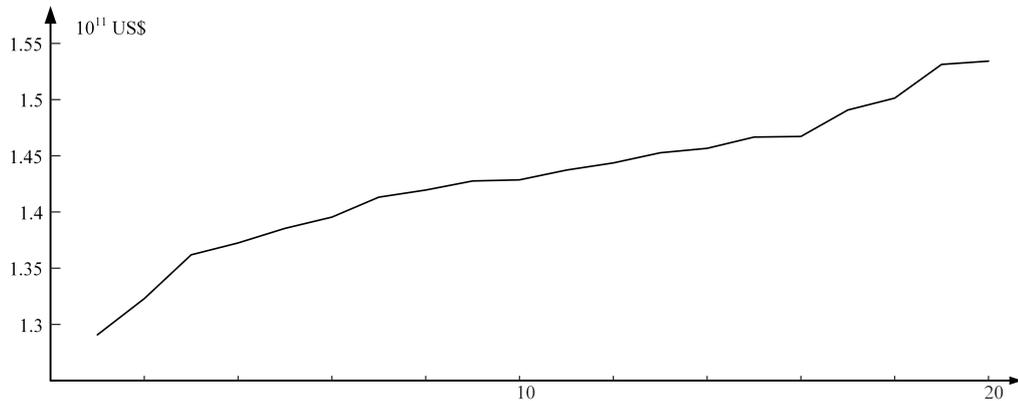


Figura 4.5 – Evolução dos custos do Sistema Sul obtidos pela técnica *TSHA*

#### 4.5.4 Resultados obtidos pela técnica *TSHA\_AG*

Nesta seção a técnica AG será utilizada para melhorar o conjunto de soluções obtidas pela técnica *TSHA* para o sistema sul brasileiro. Novamente a análise será dividida em duas simulações, a primeira irá considerar a operação em condições normais, já a segunda análise irá avaliar a possibilidade da ocorrência de falta em uma das seguintes linhas de transmissão {01-07, 01-02, 07-08, 04-05, 14-18}.

Na análise pela técnica *TSHA* foram mantidos apenas 20 planos, assim, na análise pelo AG serão gerados 10 planos utilizando as informações heurísticas obtidas pela metodologia *TSHA* de forma a complementar a população inicial.

Para a análise considerando apenas a operação sob condições normais, a técnica AG não foi capaz de aprimorar as soluções obtidas pela técnica *TSHA* e apresentadas na Tabela 4.14.

Já na análise considerando a operação segura do sistema, a técnica AG foi capaz de obter planos que permitem a manutenção do sistema mesmo da ocorrência de falta simples. As soluções estão apresentadas na tabela 4.15.

Os planos da Tabela 4.15 apresentam custos mais elevados em relação ao plano apresentado na Tabela 4.13, porém, estes planos podem ser boas alternativas por fornecerem maior confiabilidade no sistema além de garantir uma maior liberdade na hora da decisão de investimento.

Tabela 4.15 – Estratégia de expansão para o Sistema Sul: Técnica *TSHA\_AG*

Ano	Plano 1	Plano 2
1	20-21	20-21
2	42-43	42-43
3	46-06, 05-06	46-06, 05-06
4	-	-
5	05-06	05-06
6	-	-
7	20-23, 20-21	20-23, 20-21
8	-	-
9	42-43	42-43, 13-20
10	18-20, 13-20, 42-43	18-20, 42-43
Custo Total	155,797 10 <sup>6</sup> US\$	156,509 10 <sup>6</sup> US\$

#### 4.6 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

A Tabela 4.16 mostra a comparação entre os tempos computacionais para as técnicas *DLHA* e *TSHA* na obtenção de planos que atendem ao sistema em operação normal.

Tabela 4.16 – Comparação entre tempos computacionais

Heurística	Tempo por solução (minutos)		
	Sistema Seis Barras	Sistema Garver	Sistema Sul
<i>DLHA</i>	6,32	52,40	15,76
<i>TSHA</i>	2,65	1,53	8,08

A heurística *DLHA* é a técnica de maior custo computacional por solução, para a solução do modelo é necessário um grande número de fluxo de potência ótimo na determinação da sequência de expansão. Este fator é acentuado quando existe no horizonte de planejamento um ano que exige a construção de muitos reforços.

A técnica *TSHA* apresenta bom custo computacional por solução, o motivo para tal é o processo de busca, toda solução analisada acaba por se tornar duas soluções distintas quando da incorporação das candidatas que tiveram o menor custo global, sendo assim muitas soluções apresentam um tronco em comum não sendo necessário construir a solução desde o primeiro ano do horizonte de planejamento.

As análises que consideram restrições de segurança são dependentes do número de contingências, e no caso do *TSHA\_AG*, também dependentes do número de indivíduos na população. A tabela 4.17 mostra a comparação entre os tempos computacionais das técnicas *DLHA\_RS* e *TSHA\_AG* na obtenção de planos que atendem a critérios de segurança.

Tabela 4.17 – Comparação entre tempos computacionais

Heurística	Tempo por solução (minutos)		
	Sistema Seis Barras	Sistema Garver	Sistema Sul
<i>DLHA_RS</i>	29,31	83,10	90,26
<i>TSHA_AG</i>	4,65	3,53	30,18

Para a técnica *DLHA\_RS*, o tempo por solução é em média o número de contingências multiplicado pelo tempo apresentado na Tabela 4.16 para a técnica *DLHA*, isto ocorre devido a similaridade entre as metodologias. Pode ocorrer em algumas situações um aumento no número de reforços adicionados em um mesmo ano do planejamento, o que aumenta o tamanho das árvores de busca, impactando no tempo computacional final.

Para a técnica *TSHA\_AG* as variáveis de decisão são conhecidas, então cada indivíduo necessita de poucos segundos para serem avaliados. O número de avaliações de cada indivíduo é proporcional a quantidade de elementos presentes na lista de contingência e também ao número de gerações definidas para o algoritmo genético.

#### 4.7 CONCLUSÃO

O presente capítulo apresentou os resultados obtidos para as metodologias propostas. Um sistema de seis barramentos, o sistema Garver e o sistema Sul equivalente foram utilizados para a validação das metodologias.

Os estudos de casos podem ser divididos em duas categorias, os que consideram e os que não incluíram critérios de segurança no planejamento das redes. Nos estudos que visam atender apenas a operação em condições normais, temos:

A metodologia *DLHA* a qual foi capaz de encontrar soluções de boa qualidade, validadas através de um processo de otimização inteiro e também por trabalhos propostos pela literatura. Apesar da qualidade das soluções a heurística é limitada por obter apenas uma sequência de expansão.

E também a metodologia *TSHA* que permitiu obter dentre seu conjunto de soluções a mesma sequência de expansão determinadas pelo método *DLHA*, sua vantagem está no fato de fornecer mais de uma sequência de expansão permitindo assim uma maior liberdade para o planejador.

Já quanto a operação segura, a metodologia *TSHA\_AG* e a técnica *DLHA\_RS* demonstraram que ambas tem potencial para encontrar planos capazes de assegurar a operação do sistema ainda que ocorram faltas simples. Na simulação do sistema Garver, a qual foi possível realizar comparação com trabalho da literatura, as técnicas obtiveram até mesmo planos de menor investimento.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTUROS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs um modelo matemático de programação não linear inteiro misto para a solução do planejamento dinâmico de linhas de transmissão, o modelo foi obtido a partir das equações do fluxo de carga CC consagrado na literatura.

A inclusão da variável de decisão foi realizada de maneira semelhante a apresentada em Oliveira et al. [37], porém adaptada ao problema de múltiplos estágios. Os diversos estágios foram acoplados de forma a se obter uma visão sobre todo o horizonte de planejamento.

Para a solução do modelo as variáveis de decisão ( $ED_{ij(k)}^y$ ), inicialmente binárias, foram representadas por uma função contínua, e, de acordo com índices de sensibilidade, discretizadas no intuito de se obter soluções que representem corretamente o sistema elétrico.

Para auxiliar o processo de discretização das variáveis  $ED_{ij(k)}^y$ , foram propostas metodologias que fazem uso de informações heurísticas e métodos passo a passo de forma a construir as sequências de expansão.

Cada metodologia apresenta sua singularidade, na Seção 3.4 foi proposta a técnica *DLHA* que assegura a correta operação do sistema através de listas de reforços. A metodologia identifica o primeiro ano que deve receber investimento, e de maneira crescente, vai atendendo a necessidade do sistema até que este opere sem cortes de carga.

Já na Seção 3.5 é apresentado um aprimoramento da técnica *DLHA\_RS* que permite a metodologia obter planos que atendam ao critério de segurança  $N - 1$  de acordo com uma lista de contingências.

A metodologia *TSHA* consiste em testar todas as linhas selecionadas por índices de sensibilidade e opta pela construção das linhas que proporcionam o menor impacto na função objetivo. A cada decisão a solução analisada se torna duas, desta maneira, a técnica é capaz de obter mais de uma sequência de expansão para o problema do planejamento da transmissão.

Por último, é formulado uma metodologia que faz uso da técnica evolutiva Algoritmo Genético (AG) para a solução do planejamento dinâmico de sistemas de transmissão de energia elétrica. De forma a diminuir o espaço de busca e melhorar a performance do AG, informações heurísticas são extraídas da técnica *TSHA*. A técnica é expandida de forma a obter soluções que atendam ou não ao critério de confiabilidade  $N - 1$ .

As metodologias propostas para a solução do modelo contínuo se mostraram eficientes, a representação contínua das variáveis garantiu tempos computacionais viáveis, e

os dois índices trabalhando em conjunto propiciaram soluções de boa qualidade para os sistemas simulados. Desta maneira, este trabalho apresenta um modelo de planejamento dinâmico da expansão e métodos para a solução deste modelo que permitem obter sequências de expansão capazes de operar o sistema elétrico sob condições normais ou em casos de emergência quando da ocorrência de faltas simples.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

No intuito de dar segmento ao trabalho, esta seção apresenta alguns temas para a continuidade da pesquisa, como discriminados:

1. Utilizar a técnica decomposição de Benders de forma a auxiliar a obtenção de planos que atendam ao critério de segurança  $N - 1$ .
2. Utilizar critérios não-determinísticos como os índices LOLE (loss of load expectation) e LOLC (loss of load cost) para aumentar o nível de segurança nos estudos de planejamento de redes.
3. Realizar um estudo relacionando os planos obtidos com o critério determinístico  $N - 1$  com estudos probabilístico de forma a verificar se de fato os planos que suportam uma contingência simples são os mais seguros.
4. Incluir as informações heurísticas obtidas através da técnica *TSHA* em outros métodos meta-heurísticos e realizar estudos comparando o desempenho destas metodologias.
5. Incluir critérios de segurança na metodologia *TSHA*.
6. Aprimorar o desempenho dos programas de forma a simular sistemas de maior porte para listas de contingências mais amplas.

## REFERÊNCIAS

- [1] POUBEL, R. P. B.; *Planejamento dinâmico da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- [2] LATORRE, G.; CRUZ R. D.; AREIZA, J. M.; VILLEGAS, A.; *Classification of publications and models on transmission expansion planning*. IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, May 2003.
- [3] LEE, C. W.; SIMON, K. K.; ZHONG, J.; WU F. F.; *Transmission expansion planning from past to future*, Power Systems Conference and Exposition, 2006.
- [4] GARVER, L. L.; *Transmission network estimation using linear programming*, IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. PAS-89, No. 7, Sep. 1970.
- [5] VILLASANA, R.; GARVER, L. L.; SALON, S. J.; *Transmission network planning using linear programming*, IEEE Transmission on Power Apparatus Syst., vol. PAS-104, pp. 349-356, Feb. 1985.
- [6] BERRY, P. E.; DUNNETT, R. M.; *Contingency constrained economic dispatch algorithm for transmission planning*, IEE Proc., vol. 136-C, pp. 238-244, Jul. 1989.
- [7] HASHIMOTO, S. H. M.; ROMETO, R.; MANTOVANI, J. R. S.; *Efficient linear programming algorithm for the transmission network expansion planning problem*, Proc. IEE-Gen. Transm. Dist., vol. 150, pp. 536- 542, Sept. 2003.
- [8] SANTOS, A.; FRANCAP. M.; SAID, A.; *An optimization model for longrange transmission expansion planning*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, pp. 94-101, Feb. 1989.
- [9] BAHIENSE, L.; OLIVEIRA, G. C.; PEREIRA, M.; GRANVILLE, S.; *A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, pp. 560-565, Aug. 2001.
- [10] LUMBRERAS, S.; RAMOS, A.; *Transmission expansion planning using an efficient version of Bender's decomposition. A case study*, PowerTech, IEEE Grenoble, 2013.
- [11] PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. M. V. G.; CUNHA, S. H. F.; OLIVEIRA, G. C.; *A decomposition approach to automated generation/transmission expansion planning*, IEEE Trans. Power Syst., vol. PAS-104, pp. 3074- 3083, Nov. 1985.
- [12] OLIVEIRA, G. C.; COSTA, A. P. C.; BINATO, S.; *Large scale transmission network planning using optimization and heuristic techniques*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, pp. 1828-1833, Nov. 1995.
- [13] BINATO, S.; PEREIRA, M. V. F.; GRANVILLE, S.; *A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, pp.235-240, May 2001.
- [14] AL-HAMOUZ, Z. M.; AL-FARAJ, A. S.; *Transmission expansion planning using nonlinear programming*, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf., vol. 1, pp. 50-55, 2002.

- [15] JINGDONG, X.; GUOQING, T.; *The application of genetic algorithms in the multi objective transmission network planning*, in Proc. 4th Int. Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management, pp. 338-341, 1997.
- [16] GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A.; ROMERO, R.; *Transmission expansion planning by an extended genetic algorithm*, Proc. IEE-Gen. Transm. Dist., vol. 145, pp. 329-335, May 1998.
- [17] DUAN, G.; YU, Y.; *Problem-specific genetic algorithm for power transmission system planning*, Electric Power Systems Research, vol.61, pp. 41-50, Feb. 2002.
- [18] ROMERO, R.; GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A.; *Transmission system expansion planning by simulated annealing*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, pp. 364-369, Feb. 1996.
- [19] WEN, F.; CHANG, C. S.; *Transmission network optimal planning using the tabu search method*, Electric Power Systems Research, vol. 42, pp.153-163, Aug., 1997.
- [20] GALLEGO, R. A.; ALVES, B.; MONTICELLI, A.; ROMERO, R.; *Parallel simulated annealing applied to long term transmission network expansion planning*, IEEE Trans. Power Syst, vol.12, pp. 181-188, Feb., 1997.
- [21] SILVA, E. L.; ORTIZ, J. M. A.; OLIVEIRA, G. C.; BINATO, S.; *Transmission network expansion planning under a tabu search approach*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, pp. 62-68, Feb., 2001.
- [22] BINATO, S.; OLIVEIRA, G. C.; ARAÚJO, J. L.; *A greedy randomized adaptive search procedure for transmission expansion planning*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, pp. 247-253, May, 2001.
- [23] KIM, H.; MOON, S.; CHOI, J.; LEE, C.; WANG, J.; BILLINTON, R.; *Transmission system expansion planning of KEPCO system (YOUNGNAM AREA) using fuzzy set theory*, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf., vol. 1, pp. 535-540, Jul.2002.
- [24] KIMIYAGHALAM, A.; MAHDAVI, M.; JALILZADEH, S.; ASHOURI, A.; *Improved binary particle swarm optimization based TNEP considering network losses, voltage level, and uncertainty in demand*, Journal of Artificial Intelligence in Electrical Engineering, Volume 1, No. 2, September, 2012.
- [25] SHAYEGHI, H.; YOSEFI, A.; SEYEDSHENAVA S. J.; *Optimization of transmission lines loading in TNEP using improved discrete honey bee mating optimization algorithm*, Elixir International Journal, Volume 52, 2012.
- [26] RATHORE, C.; ROY, R.; RAJ, S.; SINHA, A. K.; *Mosquitoes-behaviour based (MOX) evolutionary algorithm in static transmission network expansion planning*, Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013.
- [27] MENDONÇA, I. M.; POUBEL, R. P. B.; JUNIOR, I. C. S.; OLIVEIRA, E. J.; MARCATO, A.L. M.; WILLER, L.; *Static transmission network expansion planning of electric power systems using the firefly optimization*, Power Tech, 2013.

- [28] LEDEZMA, L. F. F.; ALCARAZ, G. G.; JAVADI, M. S.; *Static transmission expansion planning considering uncertainty in demand using BPSO*, North American Power Symposium (NAPS), 2013.
- [29] SOUSA, A. S.; ASADA, E. N.; *Long-term transmission system expansion planning with multi-objective evolutionary algorithm*, Electric Power Systems Research, Volume 119, Pages 149-156 February, 2015.
- [30] GIL, H. A.; SILVA, E. L.; *A reliable approach for solving the transmission network expansion planning problem using genetic algorithms*, Electric Power Systems Research, vol. 58, pp. 45-51, May, 2001.
- [31] GALLEGO, R. A.; ROMERO, R.; MONTICELLI, A. J.; *Tabu search algorithm for network synthesis*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, pp. 490-495, May, 2000.
- [32] SILVA, E. L.; GIL, H. A.; AREIZA, J. M.; *Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, pp. 1168-1175, Aug. 2000.
- [33] TORRES, S. P.; CASTRO, C. A.; *Parallel particle swarm optimization applied to the static transmission expansion planning*, Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, Sixth IEEE/PES, 2012.
- [34] SERNA, C.; DURÁN, J.; CARMARGO, A.; *A model for expansion planning of transmission systems, a practical application example*, IEEE Trans. Power Syst., vol. PAS-97, pp. 610-615, Mar./Apr. 1978.
- [35] MONTICELLI, A.; SANTOS, A.; PEREIRA, M. V. F.; CUNHA, S. H.; PARKER, B. J.; PRAÇA, J. C. G.; *Interactive transmission network planning using a leasteffort criterion*, IEEE Trans. Power Syst., vol. PAS-101, pp. 3919- 3925, Oct. 1982.
- [36] LATORRE-BAYONA, G.; PÉREZ-ARRIAGA, I. J.; *Chopin, a heuristic model for long term transmission expansion planning*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, pp. 1886-1894, Nov.1994.
- [37] OLIVEIRA, E. J.; SILVA, I. C.; PEREIRA, J. L. R.; CARNEIRO, S.; *Transmission system expansion planning using a sigmoid function to handle integer investment variables*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, pp. 1616-1621, Aug. 2005.
- [38] BENNON, R. J.; JUVEZ, J. A.; MELIOPOULOS, A. P.; *Use of sensitivity analysis in automated transmission planning*, IEEE Trans. Power Syst., vol. PAS-101, pp. 53-59, Jan. 1982.
- [39] EKWUE, A. O.; CORY, B. J.; *Transmission system expansion planning by interactive methods*, IEEE Trans. Power Syst., vol. PAS-103, pp. 1583-1591, Jul. 1984.
- [40] ROMERO, R.; ROCHA, C.; MANTOVANI, J. R. S.; SÁNCHEZ, I. G.; *Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning*, Proc. IEEGen. Transm. Dist., vol. 152, pp. 277-282, Mar. 2005.
- [41] DEHGHAN, S.; SABOORI, H.; KAZEMI, A.; JADID, S.; *Transmission network expansion planning using a DEA-based benders decomposition*, Electrical Engineering (ICEE), 18th Iranian Conference, 2010.

- [42] GU, Y.; NI, M.; BO, R.; *Transmission expansion planning considering economic and reliability criteria*, Power and Energy Society General Meeting, 2012.
- [43] YOUSSEF, H. K.; HACKAM, R.; *New transmission planning model*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, pp. 9-18, Feb. 1989.
- [44] WANG, X. L.; WANG, X. F.; MAO, Y. B.; *Improved genetic algorithm for optimal multistage transmission system planning*, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf., vol. 3, pp. 1737-1742, Jul. 2001.
- [45] ESCOBAR, A. H.; GALLEGO, R. A.; ROMERO, R.; *Multistage and coordinated planning of the expansion of transmission systems*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, pp. 735-744, May, 2004.
- [46] BRAGA, A. S. D.; SARAIVA, J. T.; *A multiyear dynamic approach for transmission expansion planning and long-term marginal costs computation*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, pp. 1631-1639, Aug. 2005.
- [47] FU, R.; WEI, P.; SUN, Y.; TANG, G.; *A new congestion monitoring index constrained multistage transmission expansion planning under market environment*, DRPT2008 Nanjing China, April 2008.
- [48] LEITE DA SILVA, A. M.; MANSO, L. A. F.; RESENDE, L. C.; REZENDE, L. S.; *Tabu search applied to transmission expansion planning considering losses and interruption costs*, Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008.
- [49] SUM-IM, T.; TAYLOR, G.A.; IRVING, M.R.; SONG, Y.H.; *Differential evolution algorithm for static and multistage transmission expansion planning*, Generation, Transmission & Distribution, IET, Volume 3, 2009.
- [50] RESENDE, L.S.; LEITE DA SILVA, A. M.; HONÓRIO, L. M.; *Artificial immune systems and differential evolution based approaches applied to multi-Stage transmission expansion planning*, Intelligent System Applications to Power Systems, 2009.
- [51] LEITE DA SILVA, A. M.; REZENDE, L.S.; HONÓRIO, L. M.; MANSO, L.A.F.; *Performance comparison of metaheuristics to solve the multi-stage transmission expansion planning problem*, Generation, Transmission & Distribution, IET, Volume 5, 2011.
- [52] AGUADOA, J. A.; DE LA TORRE A. S.; CONTRERAS, J.; CONEJO, A. J.; MARTÍNEZ, A.; *Market-driven dynamic transmission expansion planning*, Electric Power Systems Research, Volume 82, Pages 88-94, January, 2012.
- [53] SHARAN, I.; BALASUBRAMANIAN, R.; *Integrated generation and transmission expansion planning including power and fuel transportation constraints*, Energy Policy, Volume 43, Pages 275-284, April, 2012.
- [54] ROCHA, M. C.; SARAIVA, J. T.; *A multiyear dynamic transmission expansion planning model using a discrete based EPSO approach*, Electric Power Systems Research, Volume 93, December, 2012.

- [55] ROCHA, M. C.; SARAIVA, J. T.; *A discrete evolutionary PSO based approach to the multiyear transmission expansion planning problem considering demand uncertainty*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 45, Issue 1, February, 2013.
- [56] AKBARI, T.; BINA M. T.; *A linearized formulation of AC multi-year transmission expansion planning: A mixed-integer linear programming approach*, Electric Power Systems Research, Volume 114, Pages 93-100, September, 2014.
- [57] MORTAZ, E.; FUERTE-LEDEZMA, L. F.; GUTIERREZ-ALCARAZ, G.; VALENZUELA, J.; *Transmission expansion planning using multivariate interpolation*, Electric Power Systems Research, Volume 126, Pages 87-99, September, 2015.
- [58] ROMERO, R.; ROCHA, C.; MANTOVANI, M.; MANTOVANI, J.R.S.; *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, September 2003.
- [59] ROMERO, R.; ROCHAV, C.; MANTOVANI, M.; MANTOVANI, J. R. S.; *Evaluation of hybrid models for static and multistage transmission system planning*, Revista Controle & Automação, Vol.18 no.1/Janeiro, Fevereiro e Março 2007.
- [60] HINOJOSA, B. N. R. V. H.; GALLEGUILLOS, N.; *A simulated rebounding algorithm applied to the multi-stage security-constrained transmission expansion planning in power systems*, Electrical Power and Energy Systems, 2013.
- [61] RUDNICK, H.; PALMA, R.; CURA, E.; SILVA, C.; *Economically adapted transmission systems in open access schemes - application of genetic algorithms*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, pp. 1427-1440, Aug., 1996.
- [62] SILVA, I. J.; RIDER, M. J.; ROMERO, R.; GARCIA, A.V.; MURARI, C.A.; *Transmission network expansion planning with security constraints*, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 152, No. 6, pp. 828-836, Nov., 2005.
- [63] TOR, O. B.; GUVEM, A. N.; SHADIDEHPOUR, M.; *Congestion-driven transmission planning considering the impact of generator expansion*, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 23, NO. 2, MAY, 2008.
- [64] SEIFU, A.; SALON, S.; LIST, G.; *Optimization of transmission line planning including security constraints*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, pp. 1507-1512, Oct. 1989.
- [65] YUEHUI, C.; HAIVAN, C.; JINFU, C.; XIANZHONG, D.; *An improved particle swarm optimization algorithm for multistage and coordinated planning of transmission systems market-based transmission expansion planning*, IEEE/PES, Transmission and Distribution Conference & Exhibition, 2005 .
- [66] SEPASIAN, S. M.; DEIFI, H.; FOROUD, A.; HATAMI, A. R.; *A multiyear security constrained hybrid generation-transmission expansion planning algorithm including fuel supply costs*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, no. 3, August 2009.
- [67] LEITE DA SILVA, A. M.; REZENDE, L. S.; MANSO, L. A.; *Transmission expansion planning: a methodology to include security criteria and uncertainties using optimization techniques*, Innovations in Power Systems Reliability, pp 191-220, February, 2011.

- [68] ZHANG, A.; VITTAL, V.; HEYDT, G. T.; QUINTERO, J.; *A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, no. 2, May 2012.
- [69] KAMYAB, G. R.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; RASHIDINEIAD, M.; *A PSO based approach for multi-stage transmission expansion planning in electricity markets*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 54, Pages 91-100, January 2014.
- [70] VINASCOA, G.; TEJADAA, D.; DA SILVA, F.; RIDER, M.; *Transmission network expansion planning for the Colombian electrical system: Connecting the Ituango hydroelectric power plant*, Electric Power Systems Research, Volume 110, Pages 94-103, 2014.
- [71] LEITE DA SILVA, A. M.; SALES, W. S.; RESENDE, L. C.; MANSO, L. A. F.; SACRAMENTO, C. E.; REZENDE, L. S.; *Evolution strategies to transmission expansion planning considering unreliability costs*, 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, Stockholm, Sweden - June 11-15, 2006.
- [72] SIDDIQI, S. N.; BAUGHMAN, M. L.; *Value-based transmission planning and the effects of network models*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, pp. 1835-1842, Nov. 1995.
- [73] FANG, R.; HILL, D. J.; *A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets*, IEEE Trans. Power Syst, vol. 18, pp.374-380, Feb. 2003.
- [74] BUYDI, M. O.; BALZER, G.; SHABECHI, H. M.; SHADIDEHPOUR, M.; *Market-based transmission expansion planning*, IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 19, no. 4, November, 2004.
- [75] CHOI, J.; MOUNT, I. C. T. D.; THOMAS, R. J.; *Transmission expansion planning using contingency criteria*, IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 22, no. 4, November, 2007.
- [76] LEITE DA SILVA, A. M.; REZENDE, L. S.; MANSO, L. A. F.; RESENDE, L. C.; *Reliability worth applied to transmission expansion planning based on ant colony system*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 32, Issue 10, Pages 1077-1084, December 2010.
- [77] ORFANOS, G. A.; GEORGILAKIS, P. S.; HATZIARGYRIOU, N. D.; *Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, no. 2, May 2013.
- [78] FUERTE-LEDEZMA, L.; GUTIERREZ-ALCARAZ, G.; JAVADI, M. S.; *Static transmission expansion planning considering uncertainty in demand using BPSO*, North American Power Symposium, Sept. 2013.
- [79] LEITE DA SILVA, A. M.; REZENDE L. S.; MANSO, L. A. F.; ANDERS, G. J.; *Transmission expansion planning: A discussion on reliability and 'N-1' security criteria*, Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), p. 244-251, 2010.
- [80] MANSO, L. A. F.; LEITE DA SILVA, A. M.; *Probabilistic criteria for power system expansion planning*, Electric Power Systems Research, Vol. 69, n. 1, p. 51-58, 2004.

- [81] BARROS, J. R. P.; MELO, A. C. G.; LEITE DA SILVA, A. M.; *An approach to the explicit consideration of unreliability costs in transmission expansion planning*, European transactions on electrical power, Vol. 17, n. 4, p. 401-412, 2007.
- [82] MANSO, L. A. F.; ABREU, P. E.; RESENDE, L. C.; LEITE DA SILVA, A. M.; *Transmission Expansion Planning Including Unreliability Costs*, Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2012.
- [83] POUBEL, R. P. B.; OLIVEIRA, E. J.; HONÓRIO, L. M.; OLIVEIRA, L. W.; JUNIOR, I. C. S.; *A coupled model to multistage transmission expansion planning*, Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2015.
- [84] MENDONÇA, I. M.; JUNIOR, I. C. S.; MARCATO, A. L. M.; *Static planning of the expansion of electrical energy transmission systems using particle swarm optimization*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 60, p. 234-244, 2014.

## APÊNDICE A – Dados do Sistema Seis Barras

Os dados elétricos de todas as barras que compõem o Sistema Seis Barras, são mostrados na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Dados de barra do Sistema Seis Barras

Barra	Tipo	$\underline{PG}_i^0$ (MW)	$\overline{PG}_i^0$ (MW)	$D_i^0$ (MW)
1	PV	0,0	120,0	00,0
2	PV	0,0	070,0	20,0
3	PV	0,0	070,0	00,0
4	PQ	0,0	000,0	20,0
5	PQ	0,0	000,0	00,0
6	PQ	0,0	000,0	20,0

Os dados elétricos de todos os circuitos existentes que compõem o Sistema Seis Barras, são mostrados na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Dados dos circuitos existentes no Sistema Seis Barras

Circuitos	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	Capacidade (MW)
01-02	10,0	40,0	25
01-04	10,0	40,0	25
01-05	15,0	60,0	20
02-03	13,0	50,0	20
02-04	05,0	20,0	40
02-05	15,0	60,0	20
02-06	10,0	40,0	25
03-05	13,0	52,0	20
03-06	05,0	20,0	40
04-05	20,0	80,0	15
05-06	15,0	60,0	20

Os dados elétricos de todos os circuitos candidatos que compõem o Sistema Seis Barras, são mostrados na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Dados dos circuitos candidatos do Sistema Seis Barras

Circuitos	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	$Ic_{ij}^0$ ( $10^6$ US\$)	Capacidade (MW)
01-02	10,0	40,0	25	25
01-04	10,0	40,0	25	25
01-05	15,0	60,0	20	20
02-03	13,0	50,0	20	20
02-04	05,0	20,0	40	40
02-05	15,0	60,0	20	20
02-06	10,0	40,0	25	25
03-05	13,0	52,0	20	20
03-06	05,0	20,0	40	40
04-05	20,0	80,0	15	15
05-06	15,0	60,0	20	20

## APÊNDICE B – Dados do Sistema Garver

Os dados elétricos de todas as barras que compõem o Sistema Garver, são mostrados na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Dados de barra do Sistema Garver

Barra	Tipo	$\underline{PG}_i^0$ (MW)	$\overline{PG}_i^0$ (MW)	$D_i^0$ (MW)
1	PV	0,0	150,0	080,0
2	PV	0,0	-	240,0
3	PV	0,0	360,0	040,0
4	PQ	0,0	000,0	160,0
5	PQ	0,0	000,0	240,0
6	PQ	0,0	600,0	-

A Tabela B.2 apresenta os dados de todos os circuitos existentes que compõem o Sistema Garver.

Tabela B.2 – Dados dos circuitos existentes no Sistema Garver

Circuitos	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	Capacidade (MW)
01–02	10,0	40,0	100
01–04	15,0	60,0	080
01–05	05,0	20,0	100
02–03	05,0	20,0	100
04–02	10,0	40,0	100
03–05	05,0	20,0	100

Os dados elétricos de todos os circuitos candidatos que compõem o Sistema Garver, são mostrados na Tabela B.3.

Tabela B.3 – Dados dos circuitos candidatos do Sistema Garver

Circuitos	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	$Ic_{ij}^0$ ( $10^6$ US\$)	Capacidade (MW)	Reforços
01–02	10,0	40,0	100	40	3
01–03	09,0	38,0	100	38	4
01–04	15,0	60,0	080	60	3
01–05	05,0	20,0	100	20	3
01–06	17,0	68,0	070	68	4
02–03	05,0	20,0	100	20	3
02–04	10,0	40,0	100	40	3
02–05	08,0	31,0	100	31	4
02–06	08,0	30,0	100	30	4
03–04	15,0	59,0	082	59	4
03–05	05,0	20,0	100	20	3
03–06	12,0	48,0	100	48	4
04–05	16,0	63,0	075	63	4
04–06	08,0	30,0	100	30	4
05–06	15,0	61,0	78	61	4

## APÊNDICE C – Dados do sistema Sul Equivalente

Os dados elétricos de todas as barras que compõem o sistema Sul Equivalente são mostrados na Tabela C.1. É importante ressaltar que neste estudo de caso será permitido o déficit de até 1 MW.

Tabela C.1 – Dados de barra do sistema Sul Equivalente

Barra	Tipo	$\underline{PG}_i^0$ (MW)	$\overline{PG}_i^0$ (MW)	$D_i^0$ (MW)
01	PQ	-	-	0000,00
02	PQ	-	-	0443,10
03	PQ	-	-	0000,00
04	PQ	-	-	0300,70
05	PQ	-	-	0238,00
06	PQ	-	-	0000,00
07	PQ	-	-	0000,00
08	PQ	-	-	0072,20
09	PQ	-	-	0000,00
10	PQ	-	-	0000,00
11	PQ	-	-	0000,00
12	PQ	-	-	0511,90
13	PQ	-	-	0185,80
14	PV	0,0	1257	0000,00
15	PQ	-	-	0000,00
16	PV	0,0	2000	0000,00
17	PV	0,0	1050	0000,00
18	PQ	-	-	0000,00
19	PV	0,0	1670	0000,00
20	PQ	-	-	1085,00
21	PQ	-	-	0000,00
22	PQ	-	-	0081,90
23	PQ	-	-	0457,10
24	PQ	-	-	0478,20
25	PQ	-	-	0000,00
26	PQ	-	-	0231,90
27	PV	0,0	0220	0000,00
28	PV	0,0	0800	0000,00
29	PQ	-	-	0000,00
30	PQ	-	-	0000,00
31	PV	0,0	0700	0000,00
32	PV	0,0	0500	0000,00
33	PQ	-	-	0229,10
34	PV	0,0	0748	0000,00
35	PQ	-	-	0216,00
36	PQ	-	-	0090,10
37	PV	0,0	0300	0000,00
38	PQ	-	-	0216,00
39	PV	0,0	0600	0000,00
40	PQ	-	-	0262,10
41	PQ	-	-	0000,00
42	PQ	-	-	1600,00
43	PQ	-	-	0000,00
44	PQ	-	-	0079,10
45	PQ	-	-	0086,70
46	PV	0,0	0700	0000,00

Os dados elétricos de todos os circuitos existentes que compõem o sistema Sul Equivalente são mostrados na Tabela C.2.

Os dados elétricos de todos os circuitos candidatos considerados nas simulações do sistema sul Equivalente são mostrados na Tabela C.3. Estes circuitos são os mesmos

utilizados em [83].

Tabela C.2 – Dados dos circuitos existentes do Sistema Sul Equivalente

Circuitos	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	Capacidade (MW)
01-07	01,9380	006,1600	0270,0000
01-02	05,4030	010,6500	0270,0000
01-02	05,4030	010,6500	0270,0000
04-09	04,6990	009,2400	0270,0000
05-09	05,8110	011,7300	0270,0000
05-08	05,6950	011,3200	0270,0000
07-08	06,7010	010,2300	0270,0000
04-05	01,3350	005,6600	0270,0000
04-05	01,3350	005,6600	0270,0000
02-05	17,0930	003,2400	0270,0000
02-05	17,0930	003,2400	0270,0000
08-13	09,4980	013,4800	0240,0000
09-14	12,2910	017,5600	0220,0000
09-14	12,2910	017,5600	0220,0000
12-14	06,6150	007,4000	0270,0000
12-14	06,6150	007,4000	0270,0000
14-18	06,6150	015,1400	0240,0000
14-18	06,6150	015,1400	0240,0000
13-18	06,6150	018,0500	0220,0000
13-20	00,6150	010,7300	0270,0000
18-20	06,6150	019,9700	0200,0000
19-21	00,0000	002,7800	1500,0000
16-17	03,1810	000,7800	2000,0000
17-19	08,2050	000,6100	2000,0000
14-26	08,2050	016,1400	0220,0000
14-22	22,0920	008,4000	0270,0000
22-26	00,0000	007,9000	0270,0000
20-23	00,0000	009,3200	0270,0000
20-23	00,0000	009,3200	0270,0000
23-24	09,4980	007,7400	0270,0000
23-24	09,4980	007,7400	0270,0000
26-27	09,4980	008,3200	0270,0000
26-27	09,4980	008,3200	0270,0000
24-34	08,2050	016,4700	0220,0000
24-33	08,2050	014,4800	0240,0000
33-34	08,2050	012,6500	0270,0000
27-36	12,2910	009,1500	0270,0000
27-38	22,0920	020,0800	0200,0000
27-38	22,0920	020,0800	0200,0000
36-37	09,4980	010,5700	0270,0000
34-35	08,2050	004,9100	0270,0000
34-35	08,2050	004,9100	0270,0000
35-38	08,2050	019,8000	0200,0000
37-39	08,2050	002,8300	0270,0000
37-40	08,2050	012,8100	0270,0000
37-42	00,0000	021,0500	0200,0000
39-42	00,0000	020,3000	0200,0000
39-42	00,0000	020,3000	0200,0000
39-42	00,0000	020,3000	0200,0000
40-42	08,2050	009,3200	0200,0000
38-42	08,2050	009,0700	0270,0000
38-42	08,2050	009,0700	0270,0000
38-42	08,2050	009,0700	0270,0000
32-43	08,2050	003,0900	1400,0000
42-44	08,2050	012,0600	0270,0000
44-45	08,2050	018,6400	0200,0000
19-32	08,2050	001,9500	1800,0000
46-19	08,2050	002,2200	1800,0000
46-16	08,2050	002,0300	1800,0000
18-19	08,2050	001,2500	0600,0000
20-21	08,2050	001,2500	0600,0000
42-43	08,2050	001,2500	0600,0000

Tabela C.3 – Dados dos circuitos candidatos do Sistema Sul Equivalente

Circuitos	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	$Ic_{ij}^0$ ( $10^6$ US\$)	Capacidade (MW)
04-02	6,610	08,800	05,960	0270
04-05	1,330	05,600	04,040	0270
04-09	4,690	09,200	06,210	0270
04-11	6,610	22,400	14,240	0240
05-06	6,610	01,200	08,170	0600
13-20	6,610	10,700	00,710	0270
20-18	6,610	19,900	12,730	0200
20-21	8,200	01,200	08,170	0600
20-23	00,00	09,300	06,260	0270
24-25	6,610	01,200	08,170	0600
24-33	8,200	14,400	09,390	0240
24-34	8,200	16,400	10,610	0220
42-43	8,200	01,200	08,170	0600
46-06	6,610	01,200	16,000	2000