



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Considerando Segurança e Planos de Programação da Geração

Autor: Irênio de Jesus Silva Junior

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari

Co-Orientador: Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro (FEIS-UNESP)

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner	FENG/PUC-RS
Dr. Silvio Binato	PSR Consultoria
Prof. Dr. Fujio Sato	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Paulo França	FEEC/UNICAMP

Campinas, Outubro de 2005.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38p Silva Junior, Irênio de Jesus
Planejamento da expansão de sistemas de transmissão considerando segurança e planos de programação da geração / Irênio de Jesus Silva Junior. --Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientadores: Carlos Alberto Favarin Murari, Rubén Augusto Romero Lázaro
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Algoritmos genéticos. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Energia elétrica – Transmissão. 4. Otimização combinatoria. I. Murari, Carlos Alberto Favarin. II. Lázaro, Rubén Augusto Romero. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Titulo em Inglês: Transmission systems expansion planning considering security and generation programming plans

Palavras-chave em Inglês: Genetic algorithms, Electric power systems, Electric power transmission, Combinatorial optimization

Área de concentração: Energia

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Sérgio Luís Haffner, Silvio Binato, Ariovaldo Garcia, Fujio Sato, Paulo França

Data da defesa: 07/10/2005

Resumo

Este trabalho apresenta algumas propostas para solucionar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, estático e multiestágio, considerando restrições de segurança - critério de segurança $(n - 1)$, assim como para o planejamento da expansão de um sistema elétrico que satisfaça simultaneamente vários planos de programação da geração pré-especificados. Visando superar deficiências na determinação de soluções ótimas para sistemas de grande porte quando se usa métodos exatos, como decomposição de Benders e algoritmos Branch and Bound, implementou-se um algoritmo genético (AG) especializado, o AG de Chu-Beasley. Utilizou-se o modelo DC para realizar a modelagem da rede elétrica para os problemas da expansão de sistemas de transmissão aqui propostos. Para a geração da população inicial e melhora de um descendente do AG de Chu-Beasley utilizou-se o algoritmo heurístico construtivo de Villasana-Garver-Salon.

Abstract

This Ph.D. thesis presents some proposals to solve the transmission network expansion planning problem, static and multistage, taking into account security constraints - $(n - 1)$ security criterium, and the transmission expansion planning to satisfy some generation programming plans. Trying to find optimal solutions to large scale power systems, the specialized genetic algorithm of Chu-Beasley was implemented. The DC model was used to model the electrical network, and the constructive heuristic algorithm of Villasana-Garver-Salon was implemented to create the initial population and to improve the offsprings of the Chu-Beasley Genetic Algorithm.

Agradecimentos

- Ao professor Carlos Murari pela orientação e estímulo a mim dispensados ao longo dos anos de pós graduação.
- Ao professor Rubén Romero pela excelente co-orientação e empenho neste trabalho de doutorado.
- Ao amigo Marcos Rider pela amizade, incentivo e ajuda técnica, sem a qual a realização deste trabalho não seria possível.
- Ao amigo Eudemario de Santana pelo companheirismo desde o começo da minha vida acadêmica.
- Aos professores André França, Ariovaldo Garcia, Carlos Castro, Carlos Murari e Fujio Sato pelo respeito e coleguismo com os quais sempre fui tratado.
- À Edna Servidone por ser sempre tão simpática e prestativa.
- Aos demais amigos do DSEE pela amizade e ajuda ao longo destes anos. Em especial: Adriana Scheffer, Ahda Grilo, Ana Carolina Canoas e Marcos Guimarães.
- À Capes e à FAPESP pelo apoio financeiro.

Dedico este trabalho a minha mãe Virgília,
aos meus irmãos Bernadete, Célia e Edson
e ao meu sobrinho Lucas.

Sumário

1	Introdução	1
2	Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão	4
2.1	Introdução	4
2.2	Modelo de Transportes	5
2.3	Modelo Híbrido Não Linear	7
2.4	Modelo Híbrido Linear	8
2.5	Modelo DC	9
2.6	Modelo Linear Disjuntivo	11
2.7	Modelagem do Problema de Planejamento Multiestágio	13
2.8	Técnicas de Solução	14
2.8.1	Algoritmos Heurísticos Construtivos - AHC	14
2.8.1.1	AHC do Mínimo Esforço	16
2.8.1.2	AHC de Mínimo Corte de Carga	16
2.8.1.3	AHC de Villasana-Garver-Salon (VGS)	17
2.8.2	AHC de Villasana-Garver-Salon Para o Problema Multiestágio	18
2.8.3	Métodos Clássicos de Otimização	21
2.8.3.1	Algoritmos <i>Branch and Bound</i>	21
2.8.3.2	Decomposição de Benders	22

2.8.4	Metaheurísticas	23
2.8.4.1	<i>Simulated Annealing</i>	23
2.8.4.2	Algoritmo Genético	24
2.8.4.3	Busca Tabu	25
2.8.4.4	GRASP	25
2.9	Planejamento da Expansão em Ambiente Competitivo	26
3	Algoritmo Genético	27
3.1	Codificação do Problema	28
3.1.1	Planejamento Estático	28
3.1.2	Planejamento Multiestágio	29
3.2	População Inicial	29
3.3	Função Objetivo e Infactibilidades	30
3.4	Seleção	30
3.5	Recombinação	31
3.6	Mutação	32
3.6.1	Planejamento Estático	32
3.6.2	Planejamento Multiestágio	33
3.7	Melhoria Local de um Indivíduo	33
3.7.1	Eliminando a Infactibilidade	34
3.7.2	Melhorando a Função Objetivo	34
3.8	Substituição da População	34
3.9	Pseudo-Código do AG de Chu-Beasley	35
3.10	Testes e Resultados - Planejamento Estático	36
3.10.1	Sistema Proposto por Garver	37
3.10.1.1	Com a Configuração Base e Sem Redespacho	37

3.10.1.2	Com Configuração Base e Com Redespacho	37
3.10.2	Sistema IEEE 24	38
3.10.3	Sistema Sul Brasileiro	39
3.10.4	Análise dos Resultados	40
3.11	Testes e Resultados - Planejamento Multiestágio	41
3.12	Conclusões	43
4	Planejamento Considerando Restrições de Segurança	44
4.1	Introdução	44
4.2	Modelagem do Planejamento Estático com Segurança	45
4.3	Proposta de Solução	48
4.3.1	Planejamento Tradicional	48
4.4	Resolução da Modelagem Proposta	49
4.5	Testes e Resultados	49
4.5.1	Sistema Proposto por Garver	50
4.5.1.1	Com Configuração Base e Sem Redespacho	50
4.5.1.2	Com Configuração Base e Com Redespacho	50
4.5.1.3	Sistema Ilhado com Redespacho	51
4.5.2	Sistema IEEE 24	53
4.5.3	Sistema Sul Brasileiro	53
4.6	Análise dos Resultados	54
4.7	Conclusões	54
5	Planejamento Estático com Restrições de Segurança e Planos Especificados de Programação da Geração	55
5.1	Introdução	55
5.2	Planejamento Atendendo Planos Específicos de Programação da Geração	56

5.2.1	Modelagem Matemática	56
5.3	Planejamento Estático da Transmissão com Restrições de Segurança Atendendo Planos de Programação da Geração Pré-determinados	59
5.4	Testes e Resultados	61
5.4.1	Sistema Garver	61
5.4.1.1	Planejamento Atendendo Planos de Programação da Geração	61
5.4.1.2	Planejamento com Restrições de Segurança Atendendo Planos de Programação da Geração	62
5.4.2	Sistema IEEE 24	62
5.4.2.1	Planejamento Atendendo Planos de Programação da Geração	62
5.4.2.2	Planejamento com Restrições de Segurança Atendendo Planos de Programação da Geração	63
5.4.3	Sistema Sul Brasileiro	64
5.4.3.1	Planejamento Atendendo Planos de Programação da Geração	64
5.4.3.2	Planejamento com Restrições de Segurança Atendendo Planos de Programação da Geração	65
5.5	Análise dos Resultados	65
5.6	Conclusões	66
6	Considerações Finais	67
A	Dados dos Sistemas Testados	69
A.1	Sistema Garver	69
A.2	Sistema IEEE 24	70
A.3	Sistema Sul Brasileiro	71
A.4	Sistema Colombiano - Multiestágio	73
B	Artigos Aceitos e Submetidos	78

Lista de Figuras

3.1	Proposta de Codificação Para o Planejamento Estático	28
3.2	Proposta de Codificação Para o Planejamento Multiestágio	29
3.3	Recombinação de um Ponto (Codificação Estática)	31
3.4	Recombinação de um Ponto (Codificação Multiestágio)	32
3.5	Mutação (Codificação Estática)	33
3.6	Mutação (Codificação Multiestágio)	33
3.7	Sistema Garver - Configuração Inicial.	37
3.8	Sistema IEEE 24 Barras.	38
3.9	Sistema Sul Brasileiro.	39
3.10	Sistema Colombiano	42
4.1	Plano de expansão do sistema Garver sem redespacho e com segurança.	50
4.2	Plano de expansão do sistema Garver com redespacho e com segurança.	51
4.3	Plano de expansão do sistema Garver ilhado com redespacho e sem segurança.	52
4.4	Plano de expansão do sistema Garver ilhado com redespacho e com segurança.	53
5.1	Plano de expansão do sistema Garver para o planejamento atendendo diversos planos de programação da geração.	62

Lista de Tabelas

3.1	Esforço Computacional	40
5.1	Potência Gerada em MW - Garver	61
5.2	Potência Gerada em MW - IEEE 24	63
5.3	Potência Gerada em MW - Sistema Sul Brasileiro	65
A.1	Dados de Barras	69
A.2	Dados de Linhas	69
A.3	Dados de Barras	70
A.4	Dados de Linhas	70
A.5	Dados de Barras	71
A.6	Dados de Linhas	72
A.7	Dados de Barras	73
A.8	Dados de Barras - Continuação	74
A.9	Dados de Barras - Continuação	75
A.10	Dados de Linhas	76
A.11	Dados de Linhas - Continuação	77

Capítulo 1

Introdução

O problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica deve encontrar um plano de expansão do sistema elétrico, isto é, deve especificar as linhas de transmissão e/ou transformadores a serem instalados para que o sistema opere de forma adequada em um horizonte de planejamento especificado. Este horizonte de planejamento pode ser 10, 12 ou 15 anos (no caso do planejamento estático), ou 4 ou 5 anos (no caso do planejamento multiestágio). O planejamento deve satisfazer as necessidades do mercado de energia elétrica com certas especificações de qualidade nos serviços e com o menor custo possível.

Para o planejamento da expansão geralmente são usados modelos matemáticos simplificados para representar a rede elétrica. Estes modelos são mais fáceis de solucionar e conseguem modelar a rede elétrica de maneira satisfatória. Neste trabalho adota-se o modelo DC, ainda considerado o modelo ideal para a área de planejamento da expansão da transmissão. Entretanto, as propostas apresentadas podem ser usadas em modelos mais simplificados tais como os modelos de transporte e híbrido ou em modelos mais sofisticados como no modelo AC [27].

Quanto ao período de planejamento, o problema pode ser considerado como sendo apenas de um estágio, denominado planejamento estático, ou o horizonte de planejamento pode ser separado em vários estágios, e nesse caso temos o problema de planejamento multiestágio da expansão de sistemas de transmissão.

O problema de planejamento da expansão da transmissão é um problema de programação não linear inteiro misto (PPNLIM) que pode ser muito difícil de resolver devido a natureza não linear, à presença de variáveis inteiras e sua característica multimodal com um número muito elevado de ótimos locais. Sendo assim, quando são analisados sistemas de médio e grande porte, sua natureza combinatória conduz a um número elevado de alternativas para a expansão da transmissão [13].

Para solucionar este problema podem ser utilizados dois tipos de metodologias: os métodos aproximados [1, 6, 8, 9, 10, 13, 22, 26, 30, 32, 33] e os métodos exatos [3, 14, 11, 12, 29].

Os métodos aproximados, que são os algoritmos heurísticos construtivos e as metaheurísticas (algoritmos genéticos, busca tabu, *simulated annealing* e outros), apresentam a vantagem de fornecer soluções de boa qualidade, porém não se pode provar a sua convergência para um ótimo global.

Os métodos exatos, algoritmos *Branch and Bound* e decomposição de Benders, possuem prova de convergência finita e conseguem atingir soluções ótimas para sistemas de pequeno e médio porte, porém para sistemas de maior porte apresentam problemas de convergência e elevado esforço computacional.

Visando contribuir para a solução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, que considere restrições de segurança e também planos de programação da geração, ciente das dificuldades citadas nos parágrafos precedentes, este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo II apresenta-se de forma detalhada o estado da arte do problema de planejamento da expansão da transmissão, os modelos matemáticos desenvolvidos ao longo do tempo e as técnicas de solução utilizadas. Faz-se também neste capítulo uma revisão das principais publicações sobre o problema do planejamento da expansão da transmissão.

No Capítulo III apresenta-se o Algoritmo Genético de Chu-Beasley (AGCB) [21], que pertence à família das metaheurísticas, utilizado para solucionar o problema da expansão da transmissão, estático e multiestágio, considerando-se: restrições de segurança e restrições de segurança juntamente com restrições de operação.

No Capítulo IV apresenta-se o modelo matemático para o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão com restrições de segurança. Essa formulação permite encontrar um plano de expansão de sistemas de transmissão seguro utilizando o modelo DC para representar a rede elétrica. O critério de segurança usado é o conhecido critério $(n - 1)$ [5].

No Capítulo V apresenta-se um modelo matemático para o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão com restrições de operação juntamente com restrições de segurança. Assume-se que são conhecidos os diferentes planos de programação da geração que devem estar presentes na operação do sistema. A formulação possibilita encontrar um plano de expansão da rede elétrica que permita ao sistema elétrico operar adequadamente para cada um dos planos de programação da geração previamente especificados e que em uma situação de contingência simples o mesmo tenha capacidade de operar adequadamente remanejando a programação da geração. O

critério de segurança usado também é o critério $(n - 1)$.

No Capítulo VI são apresentadas algumas considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.

No Apêndice A são apresentados os dados dos sistemas testados.

No Apêndice B é apresentada uma relação de todos os artigos que foram aceitos ou submetidos em congressos e revistas durante a elaboração da presente tese de doutorado.

Capítulo 2

Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão

2.1 Introdução

No problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, um problema específico de otimização de sistemas de energia elétrica, existem duas etapas consecutivas para se obter a solução: modelagem matemática e técnica de solução. As modelagens matemáticas do problema da expansão de sistemas de transmissão bem como as diversas técnicas de solução utilizadas são apresentadas neste capítulo.

O problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica a longo prazo é um problema de programação não-linear inteiro misto (PPNLIM) que deve encontrar o plano ótimo de expansão do sistema elétrico, isto é, deve especificar as linhas de transmissão e/ou transformadores que devem ser construídos para que o sistema opere de forma adequada em um horizonte de planejamento especificado. Dados: a configuração inicial, os dados de geração e a demanda do horizonte de planejamento, tenta-se determinar o plano de expansão com um custo mínimo que atenda completamente a demanda sem haver cortes de carga.

Em planejamento da expansão geralmente são usados modelos matemáticos simplificados para representar a rede elétrica. Nos próximos capítulos é empregado o modelo DC [13], ainda considerado o modelo mais indicado para trabalhos de planejamento da expansão. Entretanto, as propostas de planejamento que são apresentadas neste trabalho, podem ser usadas em modelos mais relaxados tais como os modelos de transporte e híbrido, sendo estas versões relaxadas do modelo DC, ou em modelos mais exatos como no modelo AC.

Considerando-se o período de planejamento, o problema pode ser formulado em apenas um

estágio, chamado de planejamento estático, ou o horizonte de planejamento pode ser separado em vários estágios, e nesse caso tem-se o problema de planejamento multiestágio da expansão de sistemas de transmissão.

Por fim, as propostas de expansão encontradas devem ser avaliadas por intermédio das técnicas utilizadas na operação de sistemas elétricos tais como fluxo de carga AC, análise de estabilidade eletromecânica e de tensão, análise de curto-circuito, etc., o que permite concluir se há ou não necessidade de realizar reforços adicionais no sistema elétrico.

2.2 Modelo de Transportes

O modelo de transportes foi a primeira proposta sistemática de modelagem matemática usada com sucesso no planejamento da expansão da transmissão. O modelo foi proposto por Garver em [1] e representou o início de uma sistemática pesquisa nos problemas de planejamento de sistemas de transmissão sugerindo o uso de diferentes modelos para os problemas de operação e de planejamento.

No modelo de transportes aborda-se a primeira lei de Kirchhoff, ou seja, especifica-se que o somatório dos fluxos de potência que entram em uma barra deve ser igual ao somatório dos fluxos que saem dessa mesma barra.

O modelo de transportes assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} & (2.1) \\
 \text{s.a.} & \\
 & \mathbf{S}f + g = d \\
 & |f_{ij}| \leq (n_{ij}^o + n_{ij}) \bar{f}_{ij} \\
 & 0 \leq g \leq \bar{g} \\
 & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 & n_{ij} \text{ inteiro; e } f_{ij} \text{ irrestrito} \\
 & (i, j) \in \Omega
 \end{aligned}$$

onde:

- c_{ij} é o custo de um circuito que pode ser adicionado ao ramo $i - j$;

- n_{ij} é o número de circuitos adicionados no ramo $i - j$;
- \bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos que podem ser adicionados ao ramo $i - j$;
- n_{ij}^0 é o número de circuitos no caso base no ramo $i - j$;
- f_{ij} é o fluxo de potência total através dos circuitos do ramo $i - j$;
- \bar{f}_{ij} é o fluxo de potência máximo em um circuito no ramo $i - j$;
- f é o vetor com os elementos f_{ij} ;
- v é o investimento total;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico;
- g é o vetor com os elementos g_k (geração na barra k) no qual o máximo valor é \bar{g} ;
- d é o vetor de demanda;
- Ω é o conjunto de todos os ramos do sistema;

As variáveis de decisão e a estrutura matemática do modelo de transportes apresentado originalmente por Garver é diferente da mostrada em (2.1), mas as duas formulações são conceitualmente equivalentes.

Em [1], Garver propõe um AHC (Algoritmo Heurístico Construtivo) para encontrar uma boa configuração e não necessariamente a configuração ótima. Este processo é chamado de passo-a-passo onde em cada iteração do algoritmo se toma a decisão de adicionar uma linha à configuração inicial. Em cada passo do AHC de Garver resolve-se o problema (2.1) após se relaxar as variáveis de investimento. Deve-se observar que se em (2.1) retiramos a restrição n_{ij} inteiro então (2.1) se transforma em um PPL (Problema de Programação Linear). Assim, a resolução do PPL permite identificar o circuito mais atrativo e que pode ser adicionado ao sistema elétrico. O circuito mais interessante é aquele que apresenta o maior valor na relação $ID_{ij} = n_{ij}\bar{f}_{ij}$ para os valores de n_{ij} fornecidos pela resolução do PPL.

Após analisar o circuito escolhido atualizamos os valores de n_{ij}^0 com a adição de um circuito. O processo iterativo termina quando a resolução do PPL produz um investimento $v = 0$ que significa que o sistema se encontra operando adequadamente com as linhas de transmissão já adicionadas.

2.3 Modelo Híbrido Não Linear

A modelagem do modelo híbrido [11] especifica o seguinte: a parcela do sistema elétrico correspondente aos caminhos em que já existem circuitos na configuração base devem satisfazer as duas leis de Kirchhoff e a outra parcela, correspondente aos caminhos novos em que não existem circuitos na configuração base, deve satisfazer unicamente a primeira lei de Kirchhoff. Uma vez definida a modelagem matemática desta maneira, a solução encontrada também deve satisfazer as duas leis de Kirchhoff na parte do sistema onde existiam circuitos na configuração base e somente a primeira lei de Kirchhoff na parte do sistema onde não existiam circuitos na configuração base.

A versão do modelo híbrido aqui descrita, é utilizada apenas para auxiliar no processo de resolução do modelo DC, que é descrito adiante, em algoritmos de planejamento de sistemas de transmissão [11]. Entretanto, existe uma modelagem híbrida alternativa que produz uma modelagem linear que pode ser usada isoladamente no problema de planejamento de sistemas de transmissão [14, 15].

A formulação matemática do modelo híbrido não linear assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} & (2.2) \\
 \text{s.a.} & \\
 & \mathbf{S}f + g = d \\
 & f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i,j) \in \Omega_1 \\
 & |f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij} \\
 & 0 \leq g \leq \bar{g} \\
 & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 & n_{ij} \text{ inteiro; } f_{ij} \text{ irrestrito;} \\
 & \theta_j \text{ irrestrito } \forall j \in \Omega_3
 \end{aligned}$$

em que:

- n_{ij}^0 são os circuitos da topologia base;
- γ_{ij} é a susceptância de um circuito no caminho $i - j$;
- Ω representa todos os ramos em que podem ser adicionados novos circuitos;

- Ω_1 representa o conjunto de circuitos existentes na configuração base;
- Ω_2 representa o conjunto de circuitos correspondentes aos novos caminhos;
- Ω_3 representa o conjunto de barras que fazem parte da configuração base;
- θ_j é o ângulo da tensão das barras existentes na configuração base.

2.4 Modelo Híbrido Linear

Existe uma forma alternativa de considerar a modelagem híbrida que pode ser mais fácil de resolver por que o problema resultante é um problema de programação linear inteiro misto (PPLIM). Esta modelagem é usada em [10, 14, 15] com diferentes aplicações. Nesta modelagem, todas as novas adições de circuitos devem cumprir somente com a primeira lei de Kirchhoff, isto é, os circuitos adicionados em caminhos onde já existem circuitos e onde não existem, devem satisfazer somente a primeira lei de Kirchhoff. Em outras palavras, esta modelagem é equivalente a considerar duas redes superpostas onde a rede original existente na configuração base deve cumprir as duas leis de Kirchhoff e os novos circuitos adicionados devem cumprir somente a primeira lei de Kirchhoff. Essa modelagem é uma versão relaxada do modelo híbrido não linear apresentado anteriormente.

Assim, a formulação híbrida alternativa assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} & (2.3) \\
 \text{s.a.} & \\
 & \mathbf{S}f' + \mathbf{S}_0 f_0 + g = d \\
 & f_{ij}^0 - \gamma_{ij} n_{ij}^0 (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i,j) \in \Omega_1 \\
 & |f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} \\
 & |f'_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij} \\
 & 0 \leq g \leq \bar{g} \\
 & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 & n_{ij} \text{ inteiro; } f_{ij} \text{ irrestrito} \\
 & \theta_j \text{ irrestrito } \forall j \in \Omega_3
 \end{aligned}$$

onde:

- \mathbf{S}_0 é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema existente na configuração base;
- f_0 é o vetor dos fluxos nos circuitos existentes na configuração base;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema completo;
- f' é o vetor de fluxos dos circuitos adicionados;
- θ_j são os ângulos de fase das barras que estão ligadas ao sistema elétrico na configuração base.

2.5 Modelo DC

Nesta seção apresenta-se o modelo matemático do problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão usando o modelo DC, assim como uma análise desta forma de planejamento. Este tipo de planejamento considera um horizonte de planejamento apenas de um estágio e determina o número de linhas que devem ser adicionadas a cada ramo do sistema. Assim, os investimentos podem ser feitos no início do horizonte de planejamento. O modelo DC é uma generalização do modelo de fluxo de carga DC que está bem detalhado em [16].

O problema de planejamento conforme formulado a seguir, é um problema de programação não-linear inteiro misto (PPNLIM) que apresenta muitos ramos candidatos com a possibilidade de alocação de várias linhas em cada ramo.

$$\text{Min } v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_i r_i \quad (2.4)$$

s.a.

$$\mathbf{S}f + g + r = d \quad (2.5)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.6)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{f}_{ij}$$

$$0 \leq g \leq \bar{g}$$

$$0 \leq r \leq d$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}$$

$$n_{ij} \text{ inteiro; } f_{ij} \text{ e } \theta_j \text{ irrestritos}$$

$$(i, j) \in \Omega$$

onde:

- c_{ij} é o custo de um circuito que pode ser adicionado ao ramo $i - j$;
- γ_{ij} é a susceptância de um circuito que pode ser adicionado ao ramo $i - j$;
- n_{ij} é o número de circuitos adicionados no ramo $i - j$;
- \bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos que podem ser adicionados ao ramo $i - j$;
- n_{ij}^o é o número de circuitos no caso base no ramo $i - j$;
- f_{ij} é o fluxo de potência total através dos circuitos do ramo $i - j$;
- f é o vetor com os elementos f_{ij} ;
- \bar{f}_{ij} é o fluxo de potência máximo em um circuito no ramo $i - j$;
- v é o investimento total;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico;
- g é o vetor com os elementos g_k (geração na barra k) no qual o máximo valor é \bar{g} ;
- d é o vetor de demanda;
- α é o parâmetro adequado de transformação de unidades (fator de penalidade);
- r é o vetor de geradores artificiais;
- Ω é o conjunto de todos os ramos do sistema;
- θ_j é o ângulo de operação da barra j .

Quando é especificada a quantidade de linhas a serem adicionadas, n_{ij} , o problema reduz-se a um problema de programação linear (PPL), cuja única função é verificar se esta proposta de investimento produz um corte de carga ou não.

A função objetivo (2.4) difere levemente do custo de expansão convencional pelo fato de ter sido acrescentado o termo $\alpha \sum_i r_i$ na mesma para facilitar a resolução do problema com a utilização de um Algoritmo Genético (AG), sendo que ao modelo DC foi acrescentada a restrição $0 \leq r \leq d$.

Sendo assim, para cada proposta de investimento n_{ij} fornecida pelo algoritmo utilizado para solucionar o problema, avalia-se se a mesma provoca um corte de carga ou não, e seja qual for este corte de carga a proposta será considerada factível, ocorrendo a penalização na função objetivo através do fator α . Entretanto, quanto maior o corte de carga, maior será a penalização, fazendo

com que esta proposta de investimento se torne inviável do ponto de vista econômico. Portanto, um bom algoritmo de solução encontra a melhor proposta de investimento, com o menor custo de construção e com um corte de carga igual a zero.

A restrição (2.5), que representa a conservação de potência em cada nó, modela a Lei das Correntes de Kirchhoff no equivalente de rede DC, e a restrição (2.6) é uma expressão da Lei de Ohm para o equivalente DC da rede, sendo que a Lei das Tensões de Kirchhoff é contemplada de forma implícita. Detalhe: a restrição (2.6) é não-linear.

Este modelo será o utilizado nos próximos capítulos deste trabalho.

2.6 Modelo Linear Disjuntivo

A modelagem matemática considerada como ideal para o problema do planejamento é o modelo DC, que é um problema de programação não linear inteiro misto (PPNLIM). Entretanto, é possível transformar o modelo DC não linear num problema equivalente cuja modelagem matemática corresponde a um “modelo linear”. Em geral, sempre é possível transformar um problema não linear quadrático com variáveis binárias e reais usando uma transformação que permite separar os termos quadráticos em relações não lineares. Este processo é obtido incorporando ao problema um parâmetro M de valor muito grande. Esta modelagem, denominada linear disjuntiva, encontra-se detalhadamente apresentada em [14]. A modelagem linear disjuntiva, cuja solução ótima é a mesma do modelo DC, assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\text{Min } v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} y_{ij} + \alpha \sum_{k \in \Gamma} r_k & (2.7) \\
\text{s.a.} & \\
& \mathbf{S}_0 f^0 + \mathbf{S}_1 f^1 + g + r = d \\
& f_{ij}^0 - \gamma_{ij}^0 (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i,j) \in \Omega_1 \\
& f_{ij}^1 - \gamma_{ij}^1 (\theta_i - \theta_j) \leq M(1 - y_{ij}) \\
& f_{ij}^1 - \gamma_{ij}^1 (\theta_i - \theta_j) \geq -M(1 - y_{ij}) \\
& |f_{ij}^0| \leq \bar{f}_{ij} \\
& |f_{ij}^1| \leq \bar{f}_{ij} y_{ij} \\
& 0 \leq g \leq \bar{g} \\
& 0 \leq r \leq d \\
& y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in \Omega_T \\
& f_{ij}^1, f_{ij}^0 \text{ e } \theta_j \text{ irrestritos}
\end{aligned}$$

onde:

- y_{ij} é uma variável binária igual a 1 se é adicionado o circuito no caminho $i - j$, caso contrário é igual a 0;
- \mathbf{S}_0 é a matriz de incidência nó-ramo transposta dos circuitos existentes na configuração base com fluxos f^0 ;
- \mathbf{S}_1 é a matriz de incidência nó-ramo transposta dos circuitos candidatos considerados como variáveis binárias e com fluxos f^1 .

O modelo linear disjuntivo apresenta algumas desvantagens e vantagens em relação ao modelo DC não linear convencional. A principal desvantagem está relacionada com o aumento da dimensão do problema devido à introdução das variáveis binárias e, principalmente, com a determinação do parâmetro M para cada restrição que passa a representar o fator complicante na solução do modelo linear disjuntivo. A principal vantagem está relacionada com a modelagem linear e, eventualmente, pode-se desenvolver algoritmos adequados com propriedades de convergência interessantes do ponto de vista teórico.

2.7 Modelagem do Problema de Planejamento Multiestágio

No planejamento multiestágio não se define apenas a construção ótima das linhas e os tipos de investimentos, mas também o momento mais apropriado para serem feitos tais investimentos para que o contínuo crescimento da demanda e da geração sejam sempre assimilados pelo sistema da melhor forma possível.

O horizonte de planejamento é dividido em vários estágios e as linhas devem ser adicionadas em cada estágio do horizonte de planejamento sendo que os investimentos são feitos no começo de cada estágio. Quando diversos estágios são considerados, o objetivo é a minimização do valor presente da soma de todos investimentos feitos ao longo dos anos correspondentes aos períodos simulados.

Considerando-se uma taxa anual de desconto I , o cálculo dos valores presentes dos custos de investimento, para o ano de referência t_0 , com ano inicial t_1 , um horizonte de $t_T - t_1$ anos e T estágios, é realizado através de [15, 26]:

$$c(x) = (1 - I)^{t_1 - t_0} c_1(x) + (1 - I)^{t_2 - t_0} c_2(x) + \dots + (1 - I)^{t_T - t_0} c_T(x)$$

$$c(x) = \delta_{inv}^1 c_1(x) + \delta_{inv}^2 c_2(x) + \dots + \delta_{inv}^T c_T(x)$$

$$\delta_{inv}^t = (1 - I)^{t - t_0} \quad t = 1, \dots, T.$$

onde:

- x representa as variáveis de investimento (circuitos a serem construídos);
- $c_t(x)$ representa o valor do investimento no estágio t .

Sendo assim, o modelo DC assume a seguinte forma para o planejamento multiestágio [15, 26]:

$$\begin{aligned}
\text{Min } v &= \sum_{t=1}^T \left[\delta_{inv}^t \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij}^t + \alpha \sum_k r_k^t \right] \\
\text{s.a.} & \\
& \mathbf{S}^t f^t + g^t + r^t = d^t \\
& f_{ij}^t - \gamma_{ij} \left(n_{ij}^0 + \sum_{m=1}^t n_{ij}^m \right) (\theta_i^t - \theta_j^t) = 0 \\
& |f_{ij}^t| \leq \left(n_{ij}^0 + \sum_{m=1}^t n_{ij}^m \right) \bar{f}_{ij} \\
& \underline{g}_j^t \leq g_j^t \leq \bar{g}_j^t \\
& 0 \leq r^t \leq d^t \\
& \underline{n}_{ij}^t \leq n_{ij}^t \leq \bar{n}_{ij}^t \\
& \sum_{t=1}^T n_{ij}^t \leq \bar{n}_{ij} \\
& n_{ij}^t \text{ inteiro; } \theta_i^t \text{ irrestrito} \\
& t = 1, 2, \dots, T.
\end{aligned}$$

As variáveis são as mesmas do planejamento estático apenas com o acréscimo do índice t que define o estágio do planejamento.

2.8 Técnicas de Solução

Nesta seção são apresentadas as técnicas mais utilizadas para se solucionar os modelos matemáticos propostos para o problema de planejamento da expansão da transmissão.

2.8.1 Algoritmos Heurísticos Construtivos - AHC

Os AHC representam um processo passo a passo onde em cada passo, através de um critério de desempenho ou indicador de sensibilidade escolhe-se uma componente da solução (uma linha de transmissão a ser construída) até ser encontrada uma solução factível. Assim, a grande diferença entre os AHC é o critério de desempenho e os modelos escolhidos.

Existem diferentes métodos aproximados que são utilizados para se determinar planos de expansão de sistemas de transmissão a longo prazo, os quais geralmente são de fácil implementação

e requerem pouco esforço computacional, mas, quanto maior o sistema analisado pior é a qualidade da solução [13]. Os AHC mais conhecidos são o de Garver [1], o de Villasana-Garver-Salon [10], o do Mínimo Esforço [6] e o do Mínimo Corte de Carga [22].

De forma geral, um AHC é resolvido com os seguintes passos:

- 1 Assumir a topologia base como topologia corrente. Escolher o modelo matemático (transportes, híbrido, DC ou AC).
- 2 Resolver o problema determinado pelo critério de sensibilidade (indicador de sensibilidade). Esse problema pode ser um problema de programação linear (PPL), um fluxo de carga DC ou um problema de programação não-linear (PPNL). Neste passo geralmente existe uma relaxação da integralidade das variáveis do problema determinado.
- 3 Teste de convergência:
 - Se não existe a necessidade de novas linhas, ou seja, o custo do investimento (valor da função objetivo) é nulo e foi encontrada uma solução factível para o problema escolhido, então ir ao Passo 4.
 - Caso contrário, usar um indicador de sensibilidade para encontrar o caminho mais interessante; adicionar uma linha de transmissão no caminho selecionado; atualizar a topologia corrente e voltar ao Passo 2.
- 4 Verificar se alguma linha adicionada ao longo do processo pode ser retirada.

Neste trabalho utilizou-se o AHC de Villasana-Garver-Salon (VGS) [10] para a criação, de forma eficiente, da população inicial do algoritmo genético utilizado para solucionar o problema do planejamento da expansão estático. Ao invés de se criar uma população inicial de forma aleatória, utiliza-se o AHC de VGS para determinar uma solução factível e a partir dessa solução faz-se sucessivas “perturbações” na vizinhança da mesma até que a população inicial seja definida.

Utilizou-se também o mesmo AHC para eliminar a infactibilidade (eliminar o corte de carga) de um descendente do algoritmo genético, assim como melhorar a proposta de investimento n_{ij} . Para o problema do planejamento da expansão da transmissão multiestágio utilizou-se uma extensão do AHC de Villasana-Garver-Salon desenvolvido em [28]. O AHC de VGS foi escolhido pelo fato do mesmo ter se mostrado mais eficiente do que os demais em testes realizados anteriormente.

2.8.1.1 AHC do Mínimo Esforço

Esta metodologia, apresentada em [6], é formulada usando o modelo DC e realiza um plano de expansão passo a passo e o critério para a adição do próximo circuito é determinado por uma análise de sensibilidade, chamada de mínimo esforço.

Nesta metodologia a dificuldade de desconexões na rede inicial é contornada adotando-se , superposta à configuração do sistema, uma “rede fictícia” constituída por ligações com susceptâncias iguais a, por exemplo, 10^{-4} vezes os valores nominais, colocadas em todos os ramos onde é permitida a construção de novas linhas. A baixa capacidade de transmissão da rede fictícia faz com que estas só sejam utilizadas quando não houver possibilidade de transporte de potência pela rede real.

A relação a seguir é utilizada como um critério de desempenho na adição de novos circuitos ao sistema.

$$\Delta Z_{ij}^* = -\frac{1}{2}(\theta_i^* - \theta_j^*)^2 \Delta \gamma_{ij}$$

em que $\Delta \gamma_{ij}$ é a variação da susceptância de um circuito do ramo ij .

Em cada passo do processo de planejamento é adicionado ao sistema aquele circuito que produz o maior impacto na distribuição dos fluxos na rede, isto é, aquele que apresenta o maior valor de $|\Delta Z_{ij}|$.

Esta metodologia tem como vantagem a sua rapidez e geralmente apresenta soluções de boa qualidade. A desvantagem é que ela não garante a otimalidade da solução.

2.8.1.2 AHC de Mínimo Corte de Carga

Este algoritmo foi desenvolvido em [2] e em cada iteração do algoritmo é realizada a adição de um circuito e este circuito é selecionado de acordo com o seguinte índice de sensibilidade:

$$IS_{mcc} = (\pi_i - \pi_j)(\theta_i - \theta_j)$$

em que π_j é o multiplicador de Lagrange da j -ésima restrição do sistema ($\mathbf{S}f + g + r = d$) e os θ_j são os ângulos de tensão de barra obtidos ao se resolver o modelo DC para a configuração corrente.

O índice de sensibilidade é um indicador do impacto da adição de um circuito no corte de carga de um sistema se o circuito fosse adicionado ao sistema elétrico. Assim, aquele circuito que

possui o maior valor absoluto do índice de sensibilidade deve ser adicionado à configuração base pois é o melhor candidato para produzir uma maior diminuição no corte de carga do sistema.

2.8.1.3 AHC de Villasana-Garver-Salon (VGS)

O Modelo Híbrido Linear (MHL) é empregado no AHC de VGS para o cálculo do índice de sensibilidade que determina o circuito a ser adicionado ao sistema elétrico em cada passo do AHC. É denominado de modelo híbrido linear qualquer modelo no qual apenas os circuitos da configuração corrente obedecem a Lei de Kirchhoff para Tensão. Nesse contexto, o MHL utilizado no algoritmo de Villasana-Garver-Salon assume o seguinte formato:

$$\text{Min } v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (2.8)$$

s.a.

$$\mathbf{S}^0 f^0 + \mathbf{S} f + g = d \quad (2.9)$$

$$f_{ij}^0 - \gamma_{ij} n_{ij}^0 (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.10)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}$$

$$|f_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij}$$

$$0 \leq g \leq \bar{g}$$

$$n_{ij} \geq 0$$

$$n_{ij}^0 \text{ topologia corrente; } f_{ij}^0, f_{ij} \text{ e } \theta_j \text{ irrestritos}$$

$$\Omega_0 \text{ conjunto de circuitos da topologia corrente}$$

$$\Omega \text{ conjunto de circuitos a serem adicionados}$$

- \mathbf{S}^0 é a matriz de incidência nó-ramo transposta da topologia corrente;
- f_{ij}^0 é o fluxo dos circuitos na topologia corrente;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema completo;
- f_{ij} é o fluxo através dos novos circuitos adicionados pelo PPL.

Considerando-se que o relaxamento da integralidade das restrições transforma o problema em um problema linear, o índice de sensibilidade é definido como o fluxo de potência através dos

circuitos com $n_{ij} \neq 0$ da solução do PPL. Em cada passo do AHC de VGS o circuito selecionado para adição é identificado pelo seguinte índice de sensibilidade:

$$IS = \max\{IS_{ij} = n_{ij}\bar{f}_{ij}\} \quad (2.11)$$

onde n_{ij} é a solução ótima do modelo híbrido linear relaxado. Em cada passo, a topologia corrente é atualizada, ou seja, ela é formada pela topologia do caso base mais os circuitos adicionados durante o processo iterativo. Uma outra característica importante neste algoritmo é que cada circuito adicionado durante o processo iterativo deve obedecer as duas leis de Kirchhoff, o que significa que quando o algoritmo converge, a proposta de expansão é factível para o modelo DC já que a topologia corrente (circuitos da topologia base e os circuitos adicionados no processo iterativo) satisfaz as duas leis de Kirchhoff.

O algoritmo de VGS assume a seguinte forma:

- 1 Assumir a topologia do caso base como topologia corrente e usar o modelo híbrido linear. Todos os circuitos da topologia corrente devem satisfazer as duas leis de Kirchhoff.
- 2 Solucionar um PPL para o MHL usando a topologia corrente. Se o PPL indicar que o sistema está operando adequadamente ($v = 0$ na solução do PPL) significa que uma nova solução para o modelo de planejamento da expansão DC foi encontrada. Pare.
- 3 Usar o índice de sensibilidade para identificar o circuito mais atrativo. Atualizar a topologia corrente com o circuito escolhido e ir ao Passo 2.

Deve-se observar que a importância do AHC de VGS está no fato, de mesmo resolvendo PPL's, encontrar uma solução factível para o modelo DC que é um modelo não linear.

2.8.2 AHC de Villasana-Garver-Salon Para o Problema Multiestágio

A expansão do AHC de VGS para o problema multiestágio deve solucionar o mesmo de forma integrada. Sendo assim, o AHC de VGS para este tipo de problema assume a seguinte forma:

- 1 Assumir a topologia base como topologia corrente e usar o MHL. Fazer $k = 1$, onde k define o estágio em análise.

- 2 Solucionar um PPL para o MHL usando a topologia corrente. Se $n_{ij}^k = 0 \forall (i, j) \in \Omega$ então a adição de linhas no estágio k está concluída. Ir ao Passo 4. Caso contrário, ir ao Passo 3.
- 3 Utilizando o índice de sensibilidade, escolher o circuito mais atrativo para ser adicionada uma linha no estágio k . Atualizar a topologia corrente com a linha adicionada e voltar ao Passo 2.
- 4 Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de custos. Verificar, usando um PPL, se a remoção de uma linha mantém o sistema operando adequadamente. Se sim, então remover o circuito, caso contrário manter o circuito. Repetir o processo simulando a remoção de linhas até todas as linhas terem sido testadas. Todas as linhas que não forem removidas representam a solução do AHC.
- 5 Fazer $k = k + 1$ e voltar ao Passo 2.

Assim como no planejamento estático, o índice de sensibilidade assume a seguinte forma:

$$IS = \max\{IS_{ij} = n_{ij} \bar{f}_{ij}\} \quad (2.12)$$

No Passo 2 o algoritmo resolve um PPL para a topologia corrente e neste PPL as adições de circuitos devem ser consideradas separadamente em cada passo do algoritmo. No Passo 2, o algoritmo do planejamento multiestágio resolve o seguinte PPL:

$$\begin{aligned}
\text{Min } v &= \sum_{t=1}^T \left[\delta_{inv}^t \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij}^t \right] \\
\text{s.a.} & \\
\mathbf{S}^{0t} f^{0t} + \mathbf{S}^t f^t + g^t &= d^t \\
f_{ij}^{0t} - \gamma_{ij} (n_{ij}^0 + \sum_{t=1}^T n_{ij}^{1t}) (\theta_i^t - \theta_j^t) &= 0 \\
|f_{ij}^{0t}| &\leq (n_{ij}^0 + \sum_{t=1}^T n_{ij}^{1t}) \bar{f}_{ij}; \quad \forall (i,j) \in \Omega_0 \\
|f_{ij}^t| &\leq \sum_{t=1}^T n_{ij}^t \bar{f}_{ij} \\
0 &\leq g^t \leq \bar{g}^t \\
\sum_{t=1}^T [n_{ij}^{1t} + n_{ij}^t] &\leq \bar{n}_{ij} \\
n_{ij}^t &\geq 0 \\
n_{ij}^0 &\text{ topologia corrente; } f_{ij}^{0t}, f_{ij}^t \text{ e } \theta_j^t \text{ irrestritos} \\
\Omega_0 &\text{ conjunto de circuitos da topologia corrente} \\
t &= 1, 2, \dots, T
\end{aligned} \tag{2.13}$$

n_{ij}^{1t} representa os circuitos adicionados durante o processo, assumindo valores conhecidos para o PPL. n_{ij}^t representa os circuitos da solução do PPL.

Dois aspectos devem ser analisados no Passo 2: (1) a lógica de adição de circuitos, e (2) o uso do índice de sensibilidade. A primeira tarefa do algoritmo consiste em solucionar a capacidade de transmissão nos primeiros estágios. Ou seja, o algoritmo adiciona todos os circuitos necessários no intuito de encontrar condições de operação adequadas no primeiro estágio. Sendo assim, o processo passa para o segundo estágio e então para o próximo, sucessivamente, até que o último estágio seja processado.

Este procedimento é o mais lógico por que os circuitos adicionados num certo estágio ainda estão operando nos estágios subsequentes, reduzindo dessa forma a necessidade de investimentos posteriores nos estágios correspondentes.

2.8.3 Métodos Clássicos de Otimização

O planejamento da expansão de sistemas de transmissão a longo prazo é um tipo de problema que apresenta um número extremamente elevado de alternativas de investimento. Além disso, este tipo de problema possui um número elevado de ótimos locais, o que leva a maioria dos métodos clássicos de otimização a parar o processo de busca em uma solução ótima local e às vezes de qualidade não satisfatória.

Os métodos mais utilizados são os algoritmos *Branch and Bound* e as técnicas de decomposição de Benders.

2.8.3.1 Algoritmos *Branch and Bound*

O algoritmo *Branch and Bound* é um algoritmo enumerativo cuja estrutura de resolução baseia-se na construção de uma “árvore” onde os “nós” representam os problemas candidatos e os “ramos” representam as novas restrições que devem ser consideradas.

Por intermédio desta árvore, todas as soluções inteiras da região viável do problema são enumeradas de modo implícito ou explícito o que garante que todas as soluções ótimas serão encontradas no caso de problemas convexos. A estrutura geral apresenta três elementos fundamentais: separação, relaxação e sondagem.

A finalidade na separação é utilizar a estratégia “dividir para conquistar” para resolver o problema. Quando a solução do problema não é possível, separa-se o problema em dois ou mais subproblemas descendentes, gerando uma lista de problemas candidatos. Se a solução não é ainda possível, o problema é novamente separado e seus descendentes são adicionados à lista de candidatos, caso contrário, o problema é resolvido e uma nova solução é obtida.

A relaxação consiste em, temporariamente, ignorar algumas restrições do problema original visando torná-lo mais fácil de resolver. A condição que deve ser satisfeita é que o conjunto de soluções viáveis do problema original esteja contido no conjunto de soluções viáveis do problema relaxado.

Na etapa de sondagem determina-se quais problemas descendentes são promissores e devem ser examinados e quais devem ser descartados.

Aplicações desta técnica de solução foram utilizadas em [42, 25, 43, 3].

2.8.3.2 Decomposição de Benders

A decomposição de Benders é uma técnica de decomposição matemática usada para solucionar problemas complicados ou muito grandes através da solução repetida de uma série de problemas mais fáceis ou menores.

Nesta técnica, um problema de programação linear inteiro misto é decomposto em uma série de subproblemas menores, um denominado de Mestre e outro denominado de Escravo. Assim, o problema é resolvido iterativamente com os subproblemas mestre e escravo trocando informações.

Na década de 80 iniciou-se uma nova fase de se tentar resolver o problema de planejamento da expansão da transmissão de uma forma ótima e a principal ferramenta aplicada foi aquela baseada em técnicas de otimização matemática. Com esse intuito, a metodologia mais usada foi a técnica de decomposição de Benders, a qual explora a decomposição natural do problema da expansão em duas partes, (1) um subproblema de investimento (em que se escolhe um plano de expansão candidato e calcula-se então o custo de investimento associado ao mesmo) e (2) um subproblema de operação (onde é testado o plano de expansão candidato em termos do adequado atendimento da carga).

Em [31] foram apresentados resultados teóricos de uma pesquisa na qual foi feita uma análise teórica sobre os problemas de convexidade e sobre as características dos cortes de Benders para o problema do planejamento da transmissão. Utilizando estas idéias, em [11] propõe-se o uso de um esquema de decomposição hierarquizado composto por três fases. A primeira fase resolve o problema do planejamento da transmissão usando decomposição de Benders na qual o subproblema de operação é resolvido com um modelo aproximado e relaxando-se as restrições de integralidade das variáveis de investimento. Na segunda fase a rede é modelada com o modelo híbrido. Na última fase o subproblema de operação é resolvido usando um algoritmo de programação linear e o subproblema de investimento é resolvido usando um algoritmo de enumeração implícita [12].

Dando continuidade a estudos com decomposição de Benders, em [30] empregou-se um esquema de decomposição hierarquizado de duas fases e em [32] foi proposto um método heurístico que tira vantagem da decomposição natural do problema em subproblemas de operação e investimento. O subproblema de investimento é resolvido empregando um algoritmo heurístico construtivo.

Para sistemas de pequeno e médio porte, as metodologias de decomposição de Benders obtiveram excelentes resultados, porém, quando testadas em sistemas de maior porte, como o Norte-Nordeste Brasileiro, as metodologias não obtiveram convergência. Com o objetivo de superar esta deficiência dos métodos de decomposição, foram iniciadas pesquisas relacionadas com metaheurísticas, cujas características fundamentais são as de resolver problemas de grande porte e

obter soluções de boa qualidade.

Algumas outras aplicações de decomposição de Benders no problema de planejamento da expansão da transmissão podem ser encontradas em [36, 37, 38, 12, 39, 40, 41, 29].

2.8.4 Metaheurísticas

A idéia fundamental de uma metaheurística consiste em analisar ou operar em um conjunto reduzido do espaço de busca. Esse processo de busca deve ser realizado de uma forma eficiente para que seja encontrada uma solução de boa qualidade. Portanto, uma metaheurística é uma estratégia de busca que especifica a forma com a qual deve ser realizada a busca de forma inteligente.

A grande vantagem de usar metaheurísticas é que para uma proposta de codificação especificada, em que são conhecidas as variáveis de investimento, o problema de planejamento da expansão da transmissão, para o modelo DC e suas versões relaxadas, pode ser desacoplado em PPL's independentes. Essa particularidade permite que o problema de planejamento de qualquer tipo, com ou sem restrições de segurança, centralizado ou em mercado competitivo, considerando incertezas na demanda ou não, seja resolvido através do mesmo algoritmo (metaheurística) usado em planejamento básico e centralizado [8, 9, 26], isto é, deve-se realizar apenas pequenas alterações no algoritmo genético aplicado em um tipo de problema para que o mesmo possa ser aplicado no problema mais complexo. Essa particularidade é uma das principais características das metaheurísticas. Logicamente, o esforço computacional esperado para encontrar soluções de qualidade para os modelos mais abrangentes no problema de planejamento deverá ser grande, mas o trabalho de programação varia muito pouco. Assim, para cada proposta de investimento pode-se determinar o custo de expansão e o corte de carga para cada tipo de operação e os valores exatos das variáveis de operação são encontrados resolvendo PPL's.

2.8.4.1 *Simulated Annealing*

A metodologia *Simulated Annealing* [13] foi definida no início da década de 80 como uma nova ferramenta empregada na solução de grandes problemas combinatoriais. Surgiu do campo da termodinâmica como consequência da comparação de problemas formulados nesta área com os do campo da pesquisa operacional.

A idéia original que deu lugar a esta metaheurística é chamada Algoritmo de Metrópolis que por sua vez está baseado no Método de Monte Carlo, com o qual se estudam as propriedades de equilíbrio na análise do comportamento microscópico do corpos.

Na verdade, *Simulated Annealing* foi desenvolvida analisando o processo de *annealing* em sólidos. *Annealing* é um dos processos de construção de cristais perfeitos, no qual o material sólido é esquentado até temperaturas elevadas, assumindo uma estrutura atômica altamente desordenada. Depois o material é resfriado lentamente, mantendo o quase-equilíbrio térmico, até atingir o estado de mínima energia onde o material assume a estrutura de um material perfeito.

Simulated Annealing foi usado com sucesso em muitas áreas da pesquisa operacional. Tem a característica de apresentar soluções ótimas ou quasi-ótimas, porém com um esforço computacional elevado.

Publicações mais relevantes utilizando esta técnica de solução em planejamento da expansão da transmissão são [50, 51].

2.8.4.2 Algoritmo Genético

O algoritmo genético é uma metodologia usada para resolver problemas combinatórios complexos, com grande aplicabilidade em problemas de grande porte em diversas áreas. Inicialmente desenvolvido por Holland [17], esta técnica baseia-se no princípio da seleção natural que acontece na natureza e que fornece maiores chances de sobrevivência aos indivíduos mais adaptados. Matematicamente, pode-se considerar o algoritmo genético como uma metaheurística que tem uma alta probabilidade de encontrar a solução ótima global de problemas grandes e complexos e que apresentam muitas soluções ótimas locais.

Este é o caso do planejamento da expansão da transmissão, que devido às restrições de integralidade se torna um problema de difícil solução, devido ao grande número de soluções locais possíveis.

No algoritmo genético aparece um conjunto de componentes que define o tipo e a qualidade do algoritmo, sendo eles:

- A representação e a codificação do problema do planejamento;
- O mecanismo geracional: seleção, *crossover* e mutação.
- Geração da população inicial;
- Parâmetros de controle e critério de parada.

Algumas publicações importantes que utilizam algoritmos genéticos no planejamento da expansão da transmissão são [9, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 26]

2.8.4.3 Busca Tabu

O Busca Tabu é um procedimento metaheurístico utilizado para gerenciar um algoritmo heurístico de busca local evitando que o processo pare em um ótimo local. Assim, Busca Tabu realiza uma exploração através do espaço de configurações contornando adequadamente os ótimos locais.

A teoria desta metaheurística foi desenvolvida por Fred Glover [19], a qual se baseia em conceitos que pertencem ao domínio da inteligência artificial e segundo Glover: “neste se guia um procedimento de busca local para explorar o espaço de soluções além do ótimo local”. Como na busca local, Busca Tabu seleciona de modo agressivo o melhor dos movimentos possíveis em cada passo e este movimento permite a Busca Tabu de mover-se em sua vizinhança. Deste modo, pode-se escapar dos ótimos locais e continuar a busca em outras regiões.

Para evitar que o processo regresse aos ótimos locais e entre em um ciclo repetitivo, a Busca Tabu classifica os movimentos mais recentes como “movimentos tabu” e estes proibem que uma configuração seja revisitada.

Este método contém dois tipos de memória: de curto e de longo prazo. Com relação à memória de curto prazo, a mesma contém os eventos ocorridos mais recentemente; já a de longo prazo armazena dados de frequência de determinados eventos.

Algumas aplicações de Busca Tabu ao problema do planejamento da transmissão podem ser encontradas em [52, 53, 54].

2.8.4.4 GRASP

GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) é um processo iterativo que tem duas fases associadas com cada iteração: uma fase de construção, onde uma solução viável é construída por um procedimento “guloso” aleatório, e uma fase de busca local, que busca por um mínimo local pertencente a uma dada vizinhança a partir da solução obtida pela fase de construção. A melhor solução, considerando todas as iterações do GRASP, é mantida como a resposta para o problema.

As principais funções da metaheurística GRASP são os procedimentos da fase de construção, onde uma solução viável é iterativamente construída, e a fase de busca local, onde se busca por uma solução mínima local que esteja dentro de uma vizinhança pré-determinada da solução obtida na fase de construção. Uma boa aplicação desta metaheurística é encontrada em [33].

2.9 Planejamento da Expansão em Ambiente Competitivo

Devido à reestruturação pela qual o setor elétrico vem passando em todo mundo nos últimos anos, houve um grande aumento no interesse pelo planejamento da expansão da transmissão em um ambiente competitivo. O trabalho pioneiro nesta área de pesquisa foi realizado pelo National Grid Company [55], e a experiência obtida com os sistemas Inglês [56] e Chileno tem promovido o interesse sobre o planejamento da transmissão em um ambiente desregulamentado e consequentemente o número de publicações nesta área tem aumentado bastante [57]. Trabalhos como os apresentados em [58]-[64] tem fornecido alguns detalhes importantes para se entender como o setor elétrico reestruturado tem afetado o planejamento da expansão da transmissão.

Conforme as novas normas regulatórias tem sido estabelecidas, a necessidade de se rever o processo de planejamento de expansão da transmissão tem se tornado bastante importante. Esta revisão conceitual deve incluir tanto os modelos como os algoritmos de solução [65], bem como os problemas emergentes causados pelas características especiais da atividade da transmissão de potência em um ambiente competitivo [66]-[73].

Capítulo 3

Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) é uma metodologia que vem sendo utilizada para resolver problemas de otimização não convexos com excelentes soluções para problemas de médio e grande porte, como é o caso de sistemas de energia elétrica [13].

O AG foi inicialmente formulado por Holland [17] baseado no princípio de seleção natural que acontece na natureza, onde os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de sobreviverem e conseqüentemente de transmitirem seu código genético aos seus descendentes. Matematicamente, pode-se considerar o AG como sendo parte da família das metaheurísticas que possui uma alta probabilidade de encontrar a solução ótima global de problemas grandes e complexos que apresentam muitas soluções ótimas locais. A teoria básica de AG é apresentada em [18, 20].

Neste trabalho, o AG proposto por Chu-Beasley (AGCB), inicialmente desenvolvido para resolver o problema generalizado de atribuição [21], é utilizado para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. O AGB foi escolhido pelo fato do mesmo possuir em sua formulação básica algumas características que se assemelham e se enquadram no problema da expansão da transmissão, e de fato, através dele obteve-se bons resultados quando comparado com outras metaheurísticas que foram utilizadas anteriormente para solucionar o mesmo problema.

De forma geral, as principais características do AGB que o tornam apropriado para solucionar o problema do planejamento da expansão da transmissão são:

- O uso de uma função *fitness* para identificar o valor da função objetivo (custo total da construção dos circuitos de uma proposta de expansão) e uma função *unfitness* que quantifica a infactibilidade da solução testada (corte de carga provocado por uma proposta de expansão);
- Difere da maioria do AG's pelo fato de substituir na população apenas um indivíduo em cada

iteração, e não toda ou quase toda a população;

- Armazena na população apenas indivíduos diferentes, o que corresponde a propostas de expansão diferentes. Isso mantém a diversidade genética da população e evita a convergência prematura.
- Realiza uma estratégia eficiente de melhoria local para cada indivíduo testado.

A seguir são apresentadas em detalhes as alterações realizadas no AGCB para a sua adaptação ao problema da expansão de sistemas de transmissão, para que este seja resolvido de forma mais eficiente através deste algoritmo.

3.1 Codificação do Problema

A proposta de codificação, isto é, a forma de representar uma proposta de solução, em geral é o aspecto mais importante da estrutura de um AG. A codificação pode facilitar ou complicar a implementação dos mecanismos de um AG. Neste trabalho é utilizada uma codificação decimal para uma proposta de solução, ou seja, o número de linhas a serem construídas.

3.1.1 Planejamento Estático

Para o problema estático da expansão de sistemas de transmissão, um indivíduo do AGCB (proposta de solução) é representado por um vetor de tamanho nl (número de ramos candidatos nos quais podem ser acrescentados novos circuitos), onde cada elemento deste vetor corresponde a um ramo do sistema em análise onde podem ser construídas novas linhas. O valor de cada elemento pode variar de 0 até o número máximo de linhas que podem ser acrescentadas no respectivo ramo. Exemplificando, na codificação mostrada na Figura 3.1, o ramo 2 – 3 tem 2 novas linhas, o ramo 4 – 7 tem 1 nova linha, etc.

1 – 5	2 – 3	2 – 7	3 – 1	3 – 5	3 – 8	4 – 7	5 – 2
0	2	0	1	0	3	1	0

Figura 3.1: Proposta de Codificação Para o Planejamento Estático

3.1.2 Planejamento Multiestágio

Para o problema da expansão do tipo multiestágio, um indivíduo do AGCB é representado por uma matriz de dimensão $(n \times nl)$, onde n representa o número de estágios e nl o número de ramos candidatos do sistema. Em cada estágio do indivíduo tem-se a quantidade de linhas que são inseridas ao sistema apenas naquele estágio. Exemplificando, na codificação apresentada na Figura 3.2, o ramo 2 – 3 tem 2 linhas acrescentadas no Estágio 1 e 1 linha acrescentada no Estágio n .

1 – 5	2 – 3	2 – 7	3 – 1	3 – 5	3 – 8	4 – 7	5 – 2	
0	2	0	1	0	3	1	0	Estágio 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
0	1	3	0	1	0	2	0	Estágio n

Figura 3.2: Proposta de Codificação Para o Planejamento Multiestágio

O número de indivíduos da população no AGCB para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão varia em função da dimensão do sistema testado e do tipo de planejamento a ser analisado.

3.2 População Inicial

Se para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão usando AG, a população inicial for gerada aleatoriamente, pode ser necessário um maior esforço computacional especialmente para sistemas de médio e grande porte. Portanto, uma forma de melhorar o desempenho do AG é gerar de maneira eficiente esta população inicial [8]. Sendo assim, utiliza-se o AHC (algoritmo heurístico construtivo) de VGS (Villasana-Garver-Salon) para se obter uma solução aproximada do problema, circuitos a serem construídos. E a partir desta solução aproximada faz-se "perturbações" aleatórias em sua vizinhança até que uma quantidade pré-determinada de soluções aproximadas seja atingida, formando-se assim a população inicial do AG.

Pode-se gerar a população inicial a partir de uma solução inicial obtida quando se resolve de maneira aproximada uma versão relaxada do modelo DC, conhecida também como Modelo de Transportes [1], onde somente se leva em conta a primeira lei de Kirchhoff [26]. Neste trabalho é implementada a inicialização da população através de um algoritmo heurístico construtivo, conforme sugerido em [8].

3.3 Função Objetivo e Infactibilidades

Para cada indivíduo da população tanto pode ser calculada a função objetivo (*fitness*), que representa o custo total do planejamento das linhas a serem construídas, como também pode ser calculada a infactibilidade do indivíduo (*unfitness*) que representa o corte de carga provocado pelo indivíduo.

Na maioria dos AG's aplicados a problemas restritos, as infactibilidades são penalizadas na função objetivo ou as propostas de solução infactíveis são descartadas. No AGCB a função objetivo e a infactibilidade de cada indivíduo da população são calculadas e armazenadas separadamente e utilizadas para fins diferentes.

A função objetivo é usada para implementar a seleção e também na substituição de um elemento na população quando todos os elementos da população são factíveis. A infactibilidade é usada para substituir um elemento da população quando existem propostas de solução infactíveis na população.

Uma das vantagens do AGCB é que não precisa se ter a preocupação de escolher o valor de α por que o custo da expansão $\sum c_{ij}n_{ij}$ é armazenado separadamente do custo do corte de carga $\alpha \sum r_i$. Sendo assim, α pode ser eliminado por que aparece multiplicando apenas o corte de carga, e os valores de corte de carga aparecem apenas no vetor do *unfitness*.

3.4 Seleção

A seleção usada é aquela baseada em torneio na qual, em cada jogo, participam dois ou três indivíduos da população corrente. O processo se dá da seguinte forma: são sorteados aleatoriamente dois ou três indivíduos da população e aquele que possuir melhor *fitness* será o pai número 1 e, após isso o processo é realizado novamente para que seja determinado o pai número 2, sendo este diferente do primeiro. Selecionados os dois pais, ambos passam para a fase de recombinação.

Para problemas de grande porte pode ser mais eficiente usar um tamanho de população maior, e nesse caso uma população maior significa maior diversidade topológica. Entretanto, um incremento na população deve ser acompanhado de um aumento de jogadores na seleção por torneio.

3.5 Recombinação

A troca de material genético ou recombinação usada é a de um ponto, na qual escolhe-se aleatoriamente um ponto de recombinação e geram-se dois descendentes com uma parcela de cada uma das topologias geradoras separadas pelo ponto de recombinação.

Enquanto no AG tradicional os dois descendentes gerados podem fazer parte da população na próxima geração, no AGCB apenas um dos descendentes pode fazer parte da população. Assim, aleatoriamente e com a mesma probabilidade é escolhido apenas um descendente, sendo o outro eliminado.

Na Figura 3.3 tem-se um exemplo de recombinação entre duas codificações estáticas, em que o segundo descendente é eliminado.

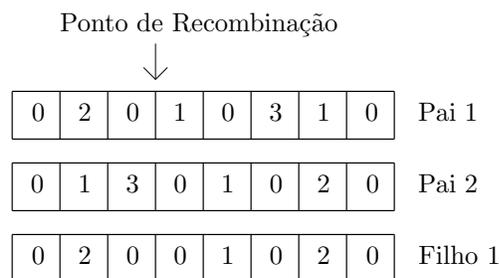


Figura 3.3: Recombinação de um Ponto (Codificação Estática)

Na Figura 3.4 tem-se um exemplo de recombinação entre codificações multiestágio na qual o segundo descendente é eliminado. Deve-se observar que a recombinação só pode ser feita entre estágios de mesma ordem e que para cada estágio os pontos de recombinação são escolhidos de forma independente, podendo variar de um estágio para outro.

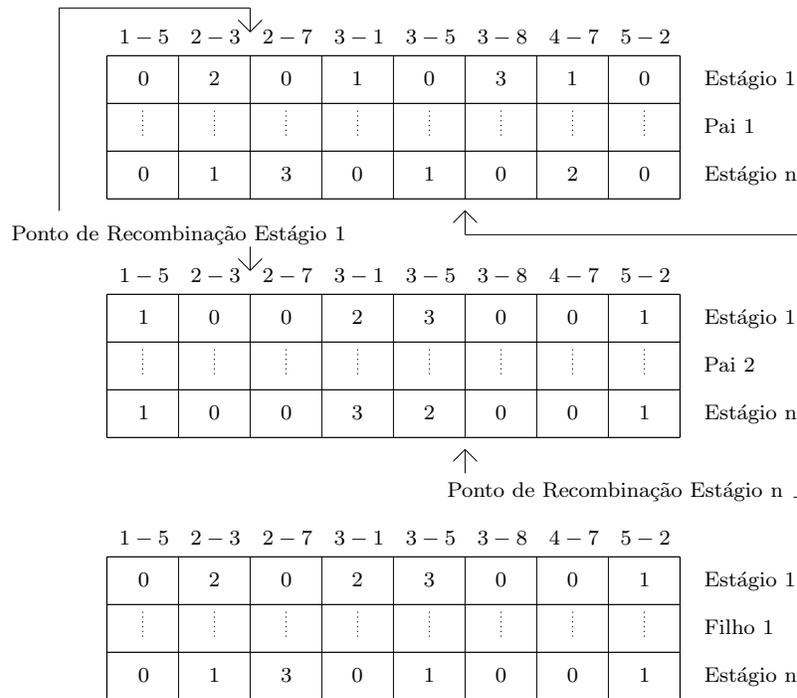


Figura 3.4: Recombinação de um Ponto (Codificação Multiestágio)

3.6 Mutação

3.6.1 Planejamento Estático

No processo de mutação toma-se o filho escolhido após o processo de recombinação; escolhem-se de forma aleatória dois pontos (ramos) do indivíduo e após isto trocam-se as informações contidas nestes pontos (ramos), uma pela outra. Esse tipo de mutação é uma característica da formulação original do AGCB.

Neste trabalho, o AGCB foi implementado de tal forma que quando os pontos selecionados para a mutação possuem informação genética idêntica, novos pontos são sorteados até que as informações contidas em tais pontos sejam diferentes.

Na Figura 3.5 tem-se um exemplo de mutação.

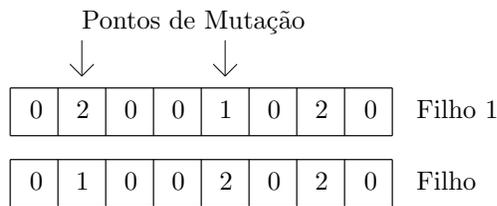


Figura 3.5: Mutação (Codificação Estática)

3.6.2 Planejamento Multiestágio

Quando se trata de mutação em um indivíduo multiestágio, aplica-se o método proposto em [26], onde se escolhe de forma aleatória apenas um ponto (ramo) por estágio e, também de forma aleatória, acrescenta-se ou retira-se uma linha desse ponto (ramo). Na Figura 3.6 tem-se um exemplo deste tipo de mutação.

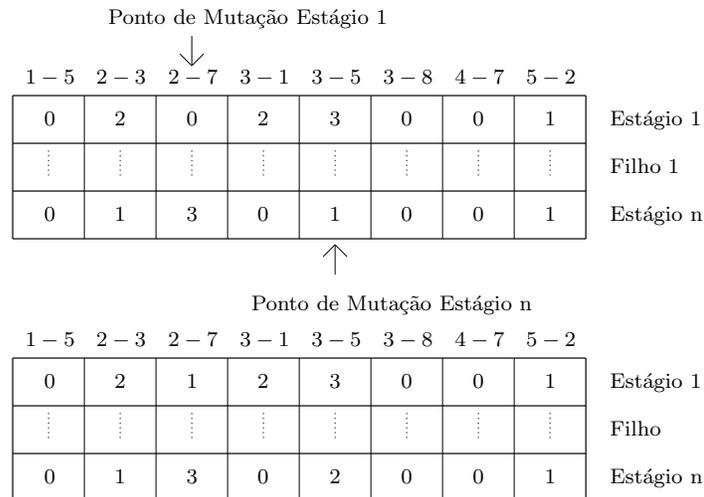


Figura 3.6: Mutação (Codificação Multiestágio)

3.7 Melhoria Local de um Indivíduo

A melhoria local de um indivíduo é uma das maiores contribuições do AGCB, e é composta por dois tipos de melhorias: da infactibilidade e da função objetivo.

3.7.1 Eliminando a Infactibilidade

Se o descendente gerado é infactível, isto é, apresenta corte de carga, então elimina-se a infactibilidade com o auxílio de um algoritmo heurístico construtivo (AHC) proposto por Villasana-Garver-Salon [10].

No algoritmo Villasana-Garver-Salon (VGS) dois conceitos fundamentais são considerados: 1) quando as restrições de integralidade das variáveis de investimento no AHC são relaxadas, o modelo VGS transforma-se em um problema de programação linear (PPL) que é usado para identificar o circuito mais adequado a ser adicionado ao sistema durante o processo iterativo do AHC; e 2) cada circuito adicionado cumpre as duas leis de Kirchhoff, e assim a solução final é factível para o modelo DC, em comparação com outros AHC que usam modelos relaxados (por exemplo o modelo de transportes) em que a solução final só cumpre a primeira lei de Kirchhoff [1].

Considerando que o principal objetivo deste passo é eliminar a infactibilidade do indivíduo, o AHC proposto por VGS acrescentará linhas ao indivíduo para eliminar a infactibilidade, resolvendo apenas PPL's em cada passo do AHC, sendo o resultado factível para o modelo DC.

3.7.2 Melhorando a Função Objetivo

Após a execução do AHC de Villasana-Garver-Salon (VGS) comentado anteriormente, algumas linhas são acrescentadas ao indivíduo que está no processo de melhoria local. Sendo o AHC de VGS um modelo aproximado, algumas linhas acrescentadas são desnecessárias e devem ser retiradas para que o indivíduo (proposta de solução) não fique muito caro. Sendo assim, faz-se uma ordenação de todas as linhas da proposta de solução por ordem decrescente de custos e faz-se a retirada uma a uma de todas as linhas. Aquela que quando simulada sua retirada do indivíduo não apresenta corte de carga é uma linha desnecessária e, conseqüentemente, é eliminada do mesmo. O processo é repetido para todas as linhas até não haver mais linhas desnecessárias. Permanecerão no indivíduo aquelas linhas que quando simulada a sua retirada, a proposta de solução resultante apresenta corte de carga.

3.8 Substituição da População

No AG implementado neste trabalho não existe a estratégia de substituição geracional da população como acontece nos AG's convencionais onde a cada iteração, toda ou quase toda população é substituída por uma outra. A proposta do AGCB consiste em substituir, em cada passo,

apenas um indivíduo da população. O descendente gerado e candidato a substituir um elemento da população é incorporado na mesma seguindo o procedimento:

- O descendente deverá substituir o elemento da população de pior qualidade (maior custo) desde que o descendente seja de melhor qualidade (menor custo).
- O descendente gerado deve ser diferente de todos os elementos da população para fazer parte da mesma ou seja, deve apresentar uma configuração de construção de circuitos que não exista na população. Se ele for igual a um membro pertencente à população automaticamente será descartado.

Esta proposta apresenta mudanças conceitualmente muito simples quando comparada com o AG tradicional. O que torna tal proposta mais eficiente são os seguintes motivos:

- Todas as soluções armazenadas na população corrente são diferentes evitando assim a convergência prematura muito comum em AG's convencionais em que não se faz uma análise das topologias geradas para evitar a repetição de topologias armazenadas.
- A fase de melhoria local, eliminação da infactibilidade do descendente gerado assim como da qualidade da função objetivo, fornece uma estratégia interessante que permite uma evolução mais eficiente do AG.
- A lógica de substituição da população corrente preserva as melhores topologias geradas, isto é, a incumbente, assim como as melhores soluções existentes na população corrente não estão sujeitas à eliminação por decisões de caráter aleatório como pode acontecer com o AG tradicional. Portanto, melhores topologias somente são descartadas quando aparecem descendentes de melhor qualidade. Essa estratégia é mais eficiente que a proposta de elitismo usada para preservar as melhores topologias da população corrente.

3.9 Pseudo-Código do AG de Chu-Beasley

O AG de Chu-Beasley assume a seguinte forma:

- 1 Especificar os parâmetros de controle.
- 2 Gerar a população inicial e transformá-la na população corrente.
- 3 Substituir um elemento da população:

- a) Escolher duas topologias geradoras através de uma seleção baseada em torneio.
- b) Fazer a recombinação nas duas topologias geradas pela seleção e preservar apenas um descendente (o outro descendente é descartado).
- c) Implementar mutação no descendente preservado.
- d) Se o descendente for infactível, eliminar a infactibilidade deste descendente.
- e) Melhorar a função objetivo do descendente gerado.

4 Incorporar o descendente gerado na população corrente satisfazendo as seguintes condições:

- Se na população existirem topologias infactíveis, situação que pode ocorrer no início do processo onde, a partir do critério utilizado para gerar a população inicial, podem ser gerados indivíduos infactíveis, então o descendente gerado substitui a topologia que tem a maior infactibilidade se esta for maior que a infactibilidade do descendente gerado. Caso contrário o descendente é descartado.
- Quando todos os elementos da população já são factíveis, então o descendente gerado substitui a topologia factível de pior qualidade (maior custo) desde que o descendente gerado seja de melhor qualidade (menor custo). Caso contrário o descendente é descartado.
- No item anterior também deve-se verificar se o descendente gerado já está presente na população. Assim, se o descendente gerado já se encontra na população então esse descendente deve ser descartado evitando o armazenamento de topologias repetidas na população.

5 Atualizar o contador de iterações e voltar ao Passo 3.

O processo é interrompido se a incumbente (melhor solução encontrada no processo) não melhora após um número especificado de iterações ou se foi atingido um número máximo de PPL's. Para cada sistema analisado o primeiro critério escolhido variou de 200 a 1000 iterações (descendentes gerados). O segundo critério é apresentado para cada caso.

3.10 Testes e Resultados - Planejamento Estático

O algoritmo genético proposto para solucionar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão estático foi testado em três sistemas elétricos conhecidos na literatura especializada. O primeiro sistema é o sistema originalmente proposto por Garver [1], o segundo sistema é o sistema IEEE 24 e o terceiro sistema é o sistema sul brasileiro de 46 barras e 79 ramos.

3.10.1 Sistema Proposto por Garver

O sistema Garver, mostrado na Figura 3.7, possui 6 barras, 15 ramos candidatos, uma demanda total de 760 MW e um número máximo possível de linhas adicionadas por ramo igual a 5. A topologia inicial e os dados elétricos do sistema, para todos os casos simulados, encontram-se nas referências [1, 4] e no Apêndice A.

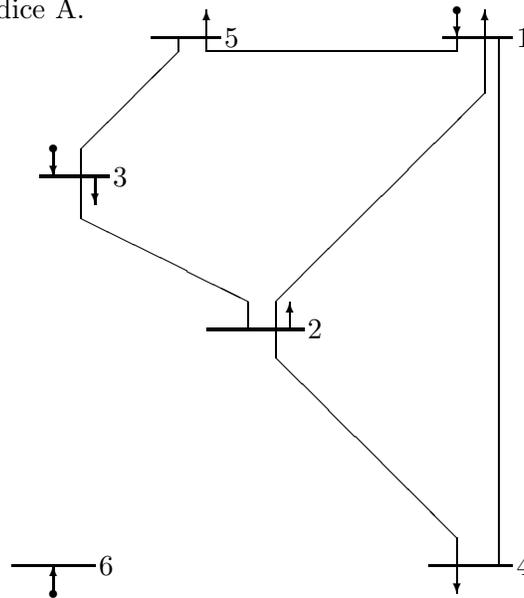


Figura 3.7: Sistema Garver - Configuração Inicial.

3.10.1.1 Com a Configuração Base e Sem Redespacho

A melhor solução para o problema de planejamento da expansão sem reprogramação da geração é igual a $v = 200.000$ US\$ e apresenta a adição das seguintes linhas: $n_{2-6} = 4$, $n_{3-5} = 1$ e $n_{4-6} = 2$. O AGCB encontrou a solução anterior após 51 execuções de PPL's, em média, com uma população de 30 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$. Em uma das inicializações, a solução ótima foi obtida com apenas 47 execuções de PPL's.

3.10.1.2 Com Configuração Base e Com Redespacho

Quando é possível reprogramar a geração, a melhor solução do problema de planejamento tem um investimento de $v = 110.000$ US\$ e apresenta a adição das seguintes linhas à topologia base: $n_{3-5} = 1$ e $n_{4-6} = 3$. O AGCB encontrou a solução anterior depois de 117 execuções de PPL's, em

média, com uma população de 30 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$. Em uma das inicializações, a solução ótima foi obtida com apenas 41 execuções de PPL's.

3.10.2 Sistema IEEE 24

Este sistema possui 24 barras, 41 ramos, uma demanda total de 8.550 MW e número máximo possível de adições de linhas por ramo igual a 3. A topologia inicial pode ser vista na Figura 3.8 e os dados elétricos do sistema encontram-se nas referências [7, ?] e no Apêndice A.

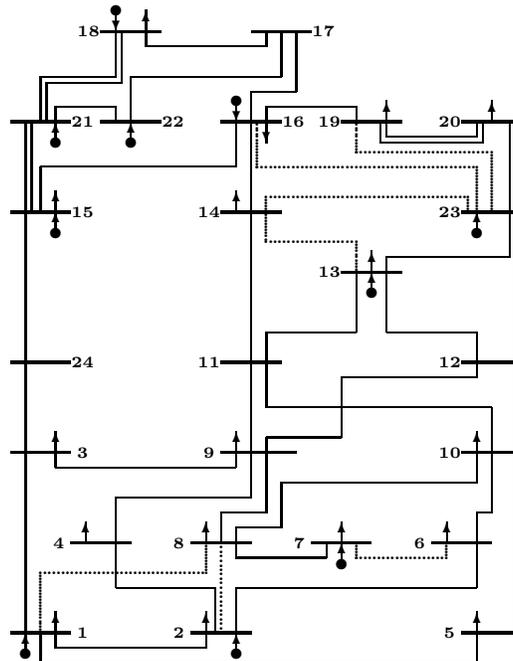


Figura 3.8: Sistema IEEE 24 Barras.

O investimento necessário para resolver o problema de planejamento para o sistema IEEE 24 barras é de $v = 152.000$ US\$, com a adição das seguintes linhas à topologia base:

$$n_{06-10} = 1; \quad n_{07-08} = 2; \quad n_{10-12} = 1; \quad n_{14-16} = 1.$$

O AGCB encontrou a solução anterior depois de 80 execuções de PPL's, em média, com uma população de 50 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$. Em uma das inicializações a solução ótima foi obtida com apenas 59 execuções de PPL's.

3.10.3 Sistema Sul Brasileiro

Este sistema tem 46 barras, 79 ramos, uma demanda total de 6.880 MW e não existe um número máximo de linhas que podem ser adicionadas por ramo. Este sistema representa um bom teste para a metodologia proposta pelo fato de ser um sistema real. A topologia inicial pode ser vista na Figura 3.9 e os dados elétricos do sistema encontram-se nas referências [4, 11, 12] e no Apêndice A.

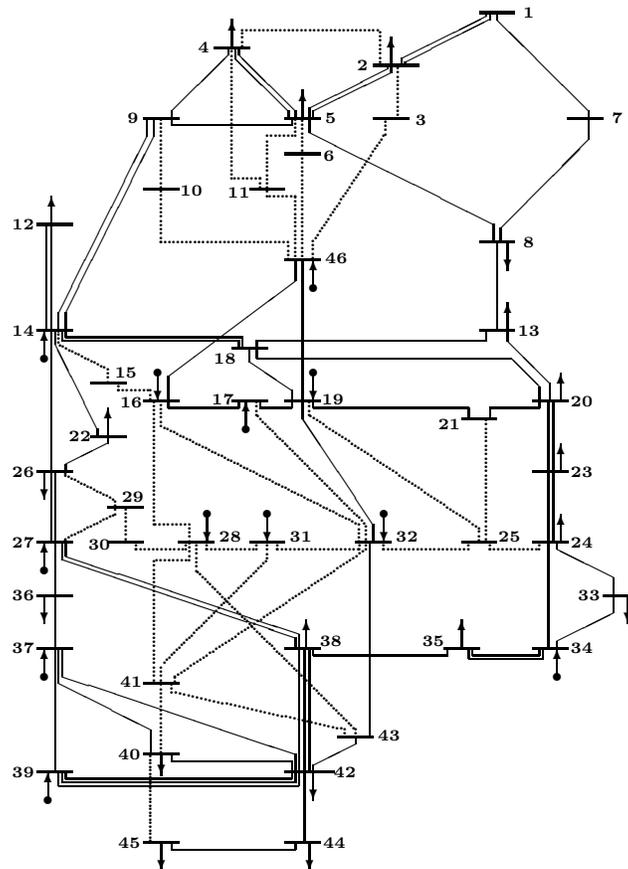


Figura 3.9: Sistema Sul Brasileiro.

O investimento necessário para resolver o problema de planejamento para o Sistema Sul Brasileiro é de $v = 72.870.000$ US\$, com a adição das seguintes linhas:

$$\begin{aligned} n_{02-05} &= 1; & n_{05-06} &= 2; & n_{13-20} &= 1; & n_{20-21} &= 2; \\ n_{20-23} &= 1; & n_{42-43} &= 1; & n_{46-06} &= 1. \end{aligned}$$

O AGCB encontrou a solução anterior depois de 900 execuções de PPL's, em média, com uma população de 40 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$. Em uma das inicializações a solução ótima foi obtida com apenas 63 execuções de PPL's.

3.10.4 Análise dos Resultados

Para estimar o esforço computacional requerido em cada metaheurística para solucionar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão estático, bem como para mostrar a superioridade do algoritmo genético de Chu-Beasley especializado na solução deste tipo de problema, foi utilizada como parâmetro de análise a quantidade de PPL's necessários para a solução deste problema usando cada uma das metaheurística em análise: algoritmo genético de Chu-Beasley modificado (AGCB), algoritmo genético extendido (AG), simulated annealing (SA), tabu search (TS) e algoritmos híbridos (TS-SA, TS-AG, TS-SA-AG). Para cada metaheurística apresenta-se a quantidade mínima e máxima de PPL's necessários para se obter a melhor solução de planejamento para cada sistema. No caso do AGCB o problema de planejamento da expansão da transmissão para cada sistema foi solucionado 10 vezes. Os resultados encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 3.1: Esforço Computacional

	Garver Sem Repro.	Garver Com Repro.	Sul Brasileiro
AGCB	50 – 70	50 – 130	100 – 1500
AG [13]	700 – 1000	500 – 750	3500 – 4500
SA [13]	1000 – 1300	800 – 1000	4000 – 5000
TS [13]	600 – 700	400 – 500	4100 – 6900
TS-SA [13]	600 – 700	360 – 470	1700 – 2500
TS-AG [13]	500 – 620	300 – 500	1400 – 1900
TS-SA-AG [13]	550 – 700	330 – 460	1450 – 2000

Como já foi citado anteriormente, observa-se pela tabela acima a eficiência do AGCB com a execução de menos PPL's para a solução do problema da transmissão quando comparado com as demais metaheurísticas, que até o momento, eram consideradas como as mais eficientes para este tipo de planejamento [13].

3.11 Testes e Resultados - Planejamento Multiestágio

O algoritmo genético de Chu-Beasley proposto para solucionar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão multiestágio foi testado no sistema Colombiano que possui 93 barras e 155 caminhos candidatos. A topologia deste sistema é ilustrada na Figura 3.10. Nesta figura as linhas cheias representam os caminhos da topologia base e as linhas pontilhadas representam novos caminhos para adição de circuitos. A adição de circuitos é permitida tanto nos caminhos da topologia base quanto nos novos caminhos propostos. O número máximo de linhas que podem ser adicionadas por caminho é igual a 5.

Este sistema permite a expansão em três estágios, denominados P_1 , P_2 e P_3 . O estágio P_1 vai do ano de 2002 até o ano de 2005, o estágio P_2 vai de 2005 até 2009 e o estágio P_3 vai de 2009 até 2012. A taxa de desconto anual é de 10%, portanto, as linhas adicionadas no estágio P_1 aparecem na função objetivo com seus custos nominais. Já as linhas adicionadas nos estágios P_2 e P_3 aparecem na função objetivo com os custos multiplicados por 0,729 e 0,478, respectivamente.

O algoritmo genético híbrido proposto em [26] encontrou sua melhor solução com um investimento igual a $v = 514,4$ milhões de dólares com a adição das seguintes linhas:

- Estágio P_1 :

$$n_{45-81} = 1; \quad n_{55-57} = 1; \quad n_{55-62} = 1; \quad n_{56-57} = 1; \quad n_{56-81} = 1; \quad n_{82-85} = 1.$$

- Estágio P_2 :

$$n_{19-82} = 1; \quad n_{27-29} = 1; \quad n_{56-57} = 1; \quad n_{62-73} = 1; \quad n_{72-73} = 1.$$

- Estágio P_3 :

$$\begin{aligned} n_{15-18} = 1; \quad n_{19-82} = 1; \quad n_{29-64} = 1; \quad n_{30-65} = 1; \\ n_{30-72} = 1; \quad n_{43-88} = 2; \quad n_{55-84} = 1; \quad n_{68-86} = 1. \end{aligned}$$

Este algoritmo proposto em [26] utilizou uma população de tamanho inicial de 200 a 400 indivíduos, seleção de pais por torneio com $k = 3$ e solucionou em média 210.000 PPL's para atingir a sua solução ótima.

O algoritmo genético de Chu-Beasley (AGCB), para solucionar o problema de planejamento da expansão multiestágio para o sistema Colombiano, utilizou uma população com 140 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 3$. O AGBCB encontrou uma solução de melhor qualidade com investimento $v = 503,8$ milhões de dólares com a adição das seguintes linhas:

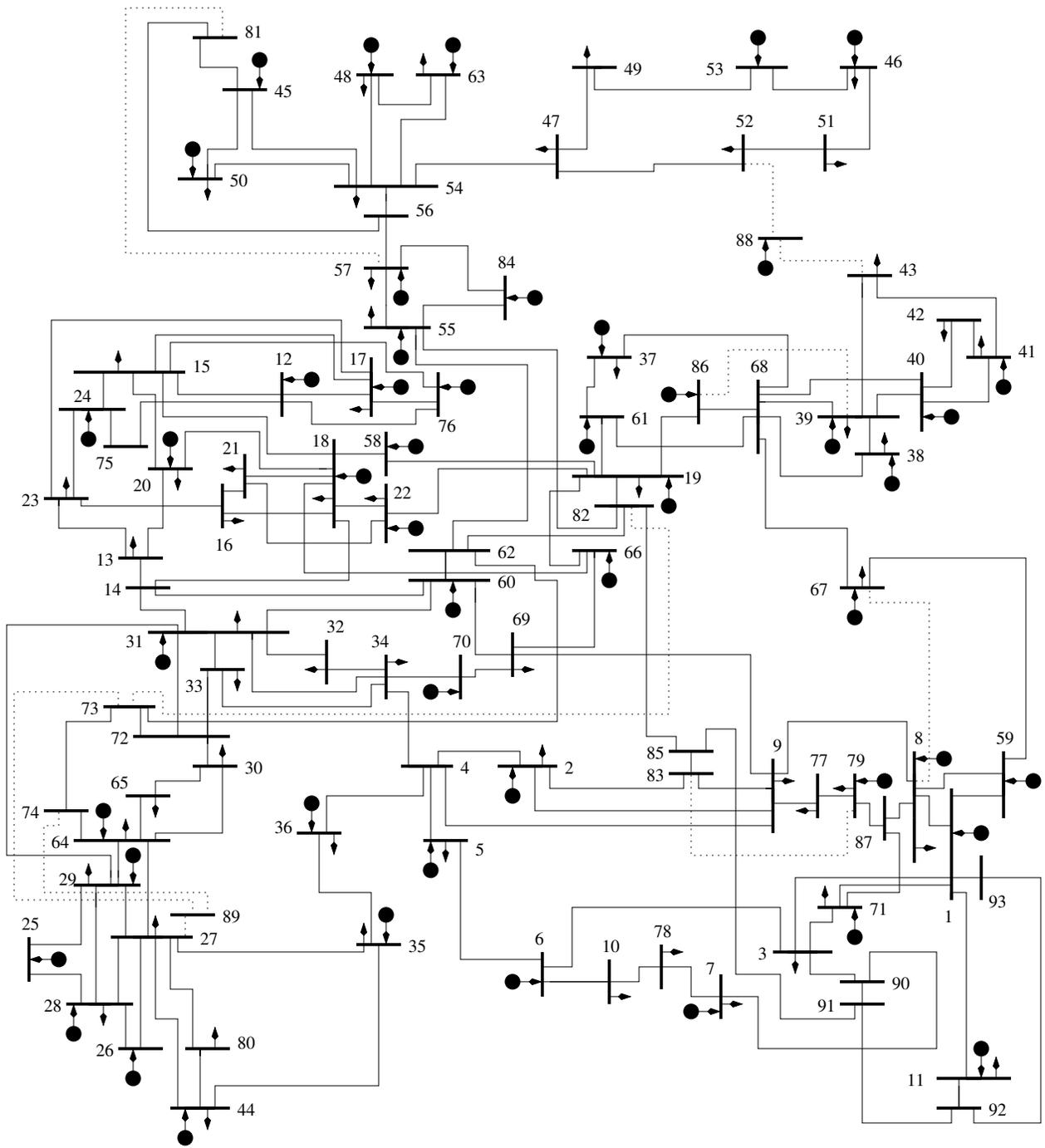


Figura 3.10: Sistema Colombiano

- Estágio P_1 :

$$n_{57-81} = 2; \quad n_{55-57} = 1; \quad n_{55-62} = 1; \quad n_{45-81} = 1; \quad n_{82-85} = 1.$$

- Estágio P_2 :

$$n_{27-29} = 1; \quad n_{62-73} = 1; \quad n_{72-73} = 1; \quad n_{19-82} = 1.$$

- Estágio P_3 :

$$\begin{aligned} n_{52-88} = 1; \quad n_{15-18} = 1; \quad n_{55-84} = 1; \quad n_{55-62} = 1; \\ n_{29-31} = 1; \quad n_{29-64} = 2; \quad n_{68-86} = 1. \end{aligned}$$

O AGCB resolveu de 20.500 a 64.000 PPL's para atingir a solução ótima, mostrando mais uma vez ser mais eficiente do que a metaheurística que até o momento era considerada a melhor para solucionar este tipo de problema complexo.

3.12 Conclusões

Um algoritmo genético especializado foi utilizado para resolver os modelos matemáticos dos problemas de planejamento da expansão de sistemas de transmissão estático e multiestágio. Resultados obtidos usando sistemas de pequeno e médio porte conhecidos na literatura especializada mostram o excelente desempenho do AG de Chu-Beasley. O tamanho da população utilizada para cada sistema foi determinado através de testes, ou seja, para cada sistema começou-se utilizando uma população grande e foi-se reduzindo o tamanho dessa população de forma que essa redução não comprometesse o desempenho do AGCB.

O AGCB mostrou ser mais eficiente do que as outras meta-heurísticas usadas na solução dos problemas em análise. Isso pode ser confirmado observando-se que o AGCB executa menos PPL's que as demais metaheurísticas para atingir a mesma solução para os sistemas testados no caso do planejamento estático. Já para o planejamento multiestágio, além de resolver menos PPL's, o AGCB encontra uma solução melhor do que aquela apresentada em [26] para o sistema testado.

Uma metaheurística eficiente é importante quando o modelo do planejamento da transmissão agrega algumas exigências e, conseqüentemente, necessita de um número maior de execuções de PPL's para ser solucionado. Alguns exemplos de modelos mais complexos são: planejamento com restrições de segurança, planejamento em mercado competitivo, planejamento com incertezas e uma combinação entre eles tanto para o caso estático quanto para o caso multiestágio.

Capítulo 4

Planejamento Considerando Restrições de Segurança

4.1 Introdução

Durante esta pesquisa poucas referências bibliográficas sobre planejamento da expansão considerando restrições de segurança foram encontradas [5, 6], e nestas pode-se constatar a seguinte proposta: realizar o planejamento da expansão considerando restrições de segurança em duas fases. Na fase 1 é realizado um processo de planejamento sem segurança e na fase 2, usando o plano de expansão obtido na fase 1, realiza-se um trabalho de adição de novos circuitos simulando a retirada de cada um dos circuitos considerados no critério de segurança e nesta fase geralmente é usada a mesma estratégia usada na fase 1. A vantagem deste tipo de estratégia de solução é que pode ser encontrada uma proposta de expansão segura com um esforço computacional relativamente pequeno. A principal desvantagem é que o plano de expansão não é ótimo e além disso o plano de expansão é fortemente influenciado pelo plano de expansão da fase 1, o que pode ser crítico em sistemas de grande porte e complexos.

Neste capítulo analisamos o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão com segurança, usando-se o modelo DC para representar a rede elétrica. Como critério de segurança adotou-se o critério $(n - 1)$ que é a proposta mais usada em trabalhos de planejamento de sistemas de transmissão [5, 6]. O critério de segurança $(n - 1)$ estabelece que o sistema deve ser expandido de forma que se for retirada uma linha de transmissão, o sistema resultante deve continuar operando adequadamente. Nesse contexto, o trabalho de planejamento resolve apenas o problema de transferência de potência ativa.

Com a finalidade de solucionar o problema da expansão com restrições de segurança, nes-

te capítulo é proposto um modelo matemático baseado no Algoritmo Genético de Chu-Beasley (AGCB). Diversos sistemas conhecidos na literatura especializada foram utilizados para testar a metodologia e uma análise comparativa dos resultados do problema de planejamento da expansão com e sem segurança também é apresentada.

4.2 Modelagem do Planejamento Estático com Segurança

Nesta seção apresentamos o modelo matemático do problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão com segurança usando o modelo DC, assim como uma análise desta forma de planejamento.

O respectivo modelo matemático pode ser apresentado na seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \\
 \text{s.a.} \quad & n = \{n_{ij}\} \in ROT \\
 & n = \{n_{ij}\} \in ROS
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde:

- *ROT* representa o conjunto das soluções factíveis das restrições básicas do planejamento estático.
- *ROS* representa o conjunto das soluções factíveis das restrições de segurança.
- c_{ij} é o custo de um circuito que pode ser adicionado ao ramo $i - j$.
- n_{ij} é o número de circuitos adicionados no ramo $i - j$.
- n são todos os circuitos candidatos à adição no sistema elétrico.

Neste trabalho consideramos que o sistema opera com segurança se satisfaz o critério $(n - 1)$, isto é, o sistema é expandido de forma que ainda opera adequadamente quando for retirada qualquer linha de transmissão numa situação de contingência. Nesse contexto, as restrições *ROS*, para o problema com nl ramos para expansão, assumem a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\mathbf{S}f^p + g^p &= d \\
f_{ij}^p - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij})(\theta_i^p - \theta_j^p) &= 0 \quad \forall (i, j) \in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\
f_{ij}^p - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij} - 1)(\theta_i^p - \theta_j^p) &= 0 \text{ para } (i, j) = p \\
|f_{ij}^p| &\leq (n_{ij}^o + n_{ij})\bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\
|f_{ij}^p| &\leq (n_{ij}^o + n_{ij} - 1)\bar{f}_{ij} \text{ para } (i, j) = p \\
0 &\leq g^p \leq \bar{g} \\
0 &\leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
(n_{ij} + n_{ij}^o - 1) &\geq 0 \text{ e inteiro para } (i, j) = p \\
n_{ij} &\geq 0 \text{ e inteiro } \forall (i, j) \in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\
f_{ij}^p \text{ e } \theta_j^p &\text{ irrestritos} \\
(i, j) &\in \Omega \text{ e } p = 1, 2, \dots, nl
\end{aligned} \tag{4.2}$$

onde:

- γ_{ij} é a susceptância do circuito que pode ser adicionado ao ramo $i - j$;
- n_{ij} é o número de circuitos adicionados no ramo $i - j$;
- n_{ij}^o é o número de circuitos no ramo $i - j$, no caso base;
- f_{ij} é o fluxo de potência total no ramo $i - j$;
- \bar{f}_{ij} é o fluxo de potência máximo em um circuito no ramo $i - j$;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico;
- f é o vetor com os elementos f_{ij} ;
- g é o vetor com os elementos g_k (geração na barra k) no qual o máximo valor é \bar{g} ;
- d é o vetor de demanda;
- \bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos que podem ser adicionados ao ramo $i - j$;
- θ_j é o ângulo de operação da barra j ;
- p é o ramo contingenciado;
- Ω é o conjunto de todos os ramos do sistema.

No conjunto de restrições (4.2) existem nl conjuntos de variáveis de operação e um conjunto para cada contingência quando consideramos todos os ramos $p = (i, j) \in \Omega$. Deve-se observar também que

os nl subproblemas estão relacionados pelas variáveis n_{ij} , assim como com o conjunto ROT original do planejamento sem segurança. Portanto, o número de variáveis de operação cresce nl vezes, mas as variáveis de investimento n_{ij} , que são as variáveis complicantes do problema, permanecem inalteradas em relação ao planejamento sem segurança.

Para a solução do problema de planejamento com segurança através de uma metaheurística, no modelo matemático são incluídos geradores artificiais em cada barra de demanda para que seja mais simples se manipular o modelo matemático no processo de solução. Portanto, o modelo matemático assume a forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } v = & \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha [w^o + \sum_{k=1}^{nl} w^k] & (4.3) \\
 \text{s.a.} & \\
 & \mathbf{S}f + g + r = d \\
 & f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \\
 & |f_{ij}| \leq (n_{ij}^o + n_{ij})\bar{f}_{ij} \\
 & 0 \leq g \leq \bar{g} \\
 & 0 \leq r \leq d \\
 & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 & n_{ij} \text{ inteiro; } f_{ij} \text{ e } \theta_j \text{ ilimitado} \\
 & \mathbf{S}f^p + g^p + r^p = d \\
 & f_{ij}^p - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij})(\theta_i^p - \theta_j^p) = 0 \quad \forall (i, j) \in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\
 & f_{ij}^p - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij} - 1)(\theta_i^p - \theta_j^p) = 0 \text{ para } (i, j) = p \\
 & |f_{ij}^p| \leq (n_{ij}^o + n_{ij})\bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\
 & |f_{ij}^p| \leq (n_{ij}^o + n_{ij} - 1)\bar{f}_{ij} \text{ para } (i, j) = p \\
 & 0 \leq g^p \leq \bar{g} \\
 & 0 \leq r^p \leq d \\
 & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 & [n_{ij} + n_{ij}^o - 1] \geq 0 \text{ e inteiro para } (i, j) = p \\
 & n_{ij} \geq 0 \text{ e inteiro } \forall (i, j) \in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\
 & f_{ij}^p \text{ e } \theta_j^p \text{ irrestritos} \\
 & (i, j) \in \Omega \text{ e } p = 1, 2, \dots, nl
 \end{aligned}$$

em que w^o é a soma das gerações artificiais do primeiro conjunto de restrições correspondente a operação sem contingência e α é um parâmetro de penalidade para o corte de carga no sistema. Ele deve ser ajustado de forma que torne desinteressante uma proposta de solução que acarrete corte de carga ao sistema quando usamos uma metaheurística que usa penalidade na função objetivo original o que não acontece no algoritmo de Chu e Beasley que trata os termos da função objetivo separadamente. Na formulação (4.3), cada w^k corresponde à soma de gerações artificiais para a operação de cada conjunto de restrições para cada $(i, j) = p \in 1, 2, \dots, nl$. Assim, a forma matemática de w^k é:

$$w^k = \sum_{s \in \Gamma} r_s^p \quad (4.4)$$

em que r_s^p é a geração artificial (corte de carga) na barra de demanda $s \in \Gamma$ (conjunto de barras de demanda) para a operação com a contingência $p = 0, 1, 2, \dots, nl$ sendo $p = 0$ a operação sem contingência.

4.3 Proposta de Solução

Nesta seção analisamos brevemente a proposta de planejamento tradicional considerando segurança.

4.3.1 Planejamento Tradicional

Da referência [5] obtém-se duas propostas relacionadas ao problema de planejamento considerando segurança: (1) uma proposta de modelagem matemática abordada por meio de um *software* comercial e (2) uma proposta heurística de duas fases.

Um modelo matemático considerando variáveis de investimento binárias e com um elevado incremento das variáveis do problema, particularmente das variáveis de investimento, é apresentado em [5]. Esse modelo é usado para resolver o sistema de 6 barras de Garver [1] usando o *software* MPSX/370. Trata-se de uma modelagem interessante mas que apresenta um incremento excessivo de variáveis para problemas de grande porte [5].

Para contornar o incremento de variáveis no problema de planejamento com segurança, foi proposto em [5] um método heurístico que realiza fundamentalmente as seguintes tarefas: (1) encontra um plano de expansão sem segurança, (2) identifica um conjunto de caminhos em que devem ser

consideradas possibilidades de adição para que o sistema opere adequadamente com segurança, (3) identifica todas as combinações possíveis de reforço do sistema considerando todas as combinações de reforço já identificadas no passo anterior e (4) verifica a operação com contingência simples de cada proposta de expansão com reforço e escolhe como proposta de solução aquela em que o sistema com reforço opera adequadamente com contingência simples e com menor investimento. Esta proposta, portanto, pode ser considerada como um algoritmo heurístico de duas fases. Em [6] também foi proposto um algoritmo heurístico de duas fases para resolver o problema de planejamento com segurança.

4.4 Resolução da Modelagem Proposta

A grande vantagem de usar o AGCB é que para uma proposta de codificação especificada em que são conhecidas as variáveis de investimento $n = \{n_{ij}^{esp}\}$, o problema (4.3) pode ser desacoplado em $(nl + 1)$ PPL's independentes. Essa particularidade permite que o problema de planejamento com segurança seja resolvido usando o mesmo algoritmo (metaheurística) usado em planejamento sem segurança [8, 9, 26], isto é, deve-se realizar apenas pequenas alterações no AGCB aplicado em um tipo de problema para que o mesmo possa ser aplicado no problema mais complexo. Essa particularidade é uma das principais características das metaheurísticas. Logicamente, o esforço computacional esperado para encontrar soluções de qualidade para o problema de planejamento com segurança deve ser em torno de nl vezes maior quando comparado com o esforço de processamento para resolver o problema de planejamento sem segurança, mas o trabalho de programação varia muito pouco. Para cada proposta de investimento pode-se determinar o custo de expansão, assim como o corte de carga para cada tipo de operação (operação normal e para cada tipo de contingência) e o valor exato das variáveis de operação são encontrados resolvendo PPL's.

4.5 Testes e Resultados

O algoritmo proposto para solucionar o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão com segurança foi testado em três sistemas elétricos conhecidos na literatura especializada. O primeiro sistema é o sistema originalmente proposto por Garver [1], o segundo sistema é o IEEE 24 [7, ?] e o terceiro é o sistema sul brasileiro de 46 barras e 79 ramos [13].

4.5.1 Sistema Proposto por Garver

4.5.1.1 Com Configuração Base e Sem Redespacho

O planejamento com segurança para este sistema pode ser encontrado usando a metodologia proposta neste capítulo, obtendo um valor de investimento igual a $v = 298.000$ US\$ e a adição das seguintes linhas: $n_{2-6} = 4$, $n_{3-5} = 2$, $n_{3-6} = 1$ e $n_{4-6} = 3$. A solução é mostrada na Figura 4.1 onde também é apresentado o ponto de operação para o caso base. O AGCB encontrou a solução ótima após 3286 execuções de PPL's, em média, utilizando uma população de 30 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$.

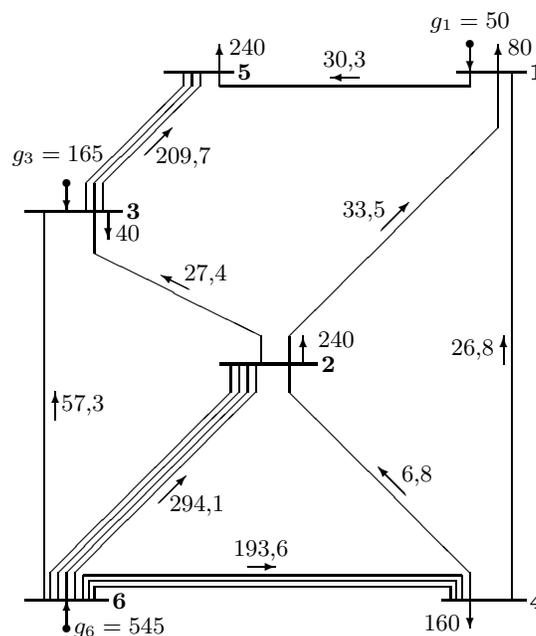


Figura 4.1: Plano de expansão do sistema Garver sem redespacho e com segurança.

4.5.1.2 Com Configuração Base e Com Redespacho

Usando a metodologia proposta, foi realizado um teste de planejamento com segurança para o caso em que existe a possibilidade de reprogramação da geração. Para o sistema anterior o valor de investimento obtido é igual a $v = 180.000$ US\$ e a topologia ótima final possui a adição das seguintes linhas: $n_{2-3} = 1$, $n_{2-6} = 1$, $n_{3-5} = 2$ e $n_{4-6} = 3$. A solução é mostrada na Figura 4.2 onde também é apresentado o ponto de operação para o caso base. O AGCB encontrou a solução ótima após 2233 chamadas de PPL's, em média e com uma população de 30 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$.

4.5.1.3 Sistema Ilhado com Redespacho

Neste caso foi testado o sistema Garver ilhado, isto é, retirado todos os circuitos da topologia base. Foi testado apenas o caso com reprogramação da geração. A solução do problema de planejamento sem segurança é mostrada na Figura 4.3 e é preciso um investimento de $v = 190.000$ US\$ com a adição das seguintes linhas: $n_{1-5} = 1$, $n_{2-3} = 2$, $n_{2-6} = 1$, $n_{3-5} = 2$ e $n_{4-6} = 2$. O AGCB encontrou a solução anterior após 31 execuções de PPL's, em média, com uma população de 30 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$.

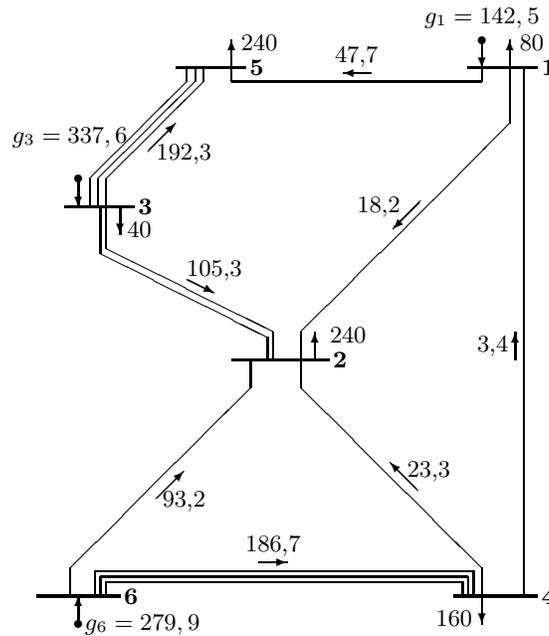


Figura 4.2: Plano de expansão do sistema Garver com redespacho e com segurança.

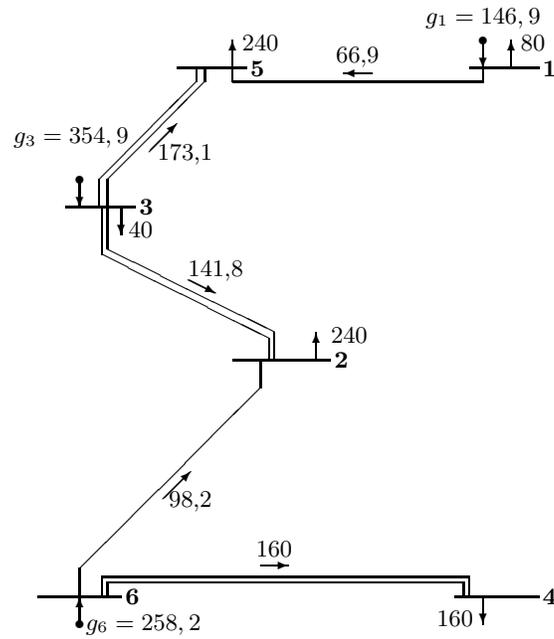


Figura 4.3: Plano de expansão do sistema Garver ilhado com redespacho e sem segurança.

Para o caso anterior, considerando o problema de planejamento com segurança, o valor de investimento obtido é igual a $v = 270.000$ US\$ e a topologia final possui o acréscimo das seguintes linhas: $n_{1-5} = 1$, $n_{2-3} = 2$, $n_{2-6} = 2$, $n_{3-5} = 3$ e $n_{4-6} = 3$, conforme mostrado na Figura 4.4 onde também é apresentado o ponto de operação para o caso base. o AGCB encontrou a solução ótima após 483 chamadas de PPL's, em média, com uma população de 30 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$.

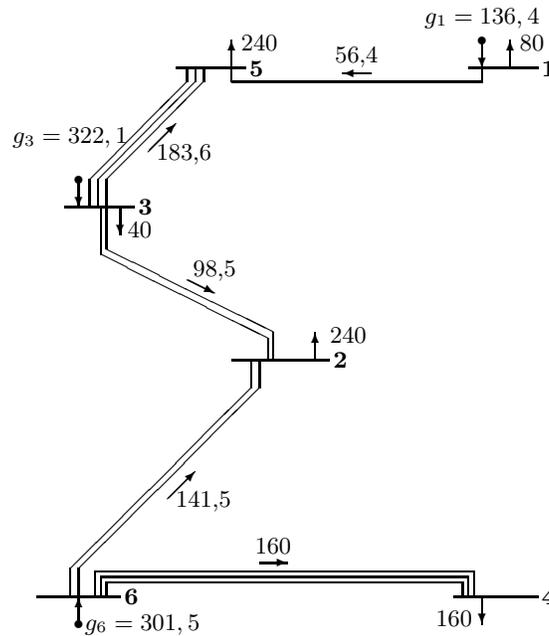


Figura 4.4: Plano de expansão do sistema Garver ilhado com redespacho e com segurança.

4.5.2 Sistema IEEE 24

O planejamento da expansão com segurança e com redespacho para este sistema usando a metodologia apresentada neste trabalho obtém um valor de investimento igual a $v = 441.000.000$ US\$ e as linhas adicionadas são:

$$\begin{aligned}
 n_{01-05} &= 1; & n_{03-24} &= 1; & n_{04-09} &= 1; & n_{06-10} &= 2; \\
 n_{07-08} &= 2; & n_{10-11} &= 1; & n_{11-13} &= 1; & n_{14-16} &= 1; \\
 n_{15-24} &= 1; & n_{16-17} &= 1.
 \end{aligned}$$

Os seguintes parâmetros foram utilizados para este sistema: 1) uma população de 50 indivíduos e 2) seleção de pais por torneio com $k = 2$. O AGCB encontrou a solução ótima após 58.734 execuções de PPL's, em média.

4.5.3 Sistema Sul Brasileiro

O planejamento com segurança e com redespacho para o sistema anterior encontrado usando a metodologia apresentada neste trabalho possui um valor de investimento igual a $v = 213.160.000$ US\$ e as linhas adicionadas são:

$$\begin{aligned}
n_{02-05} &= 1; & n_{05-06} &= 3; & n_{12-14} &= 1; & n_{19-21} &= 1; \\
n_{20-21} &= 3; & n_{20-23} &= 2; & n_{31-32} &= 1; & n_{32-43} &= 1; \\
n_{42-43} &= 2; & n_{42-44} &= 1; & n_{44-45} &= 1; & n_{46-06} &= 2.
\end{aligned}$$

Na resolução deste sistema utilizou-se os seguintes parâmetros: população com 60 indivíduos e seleção de pais por torneio com $k = 2$. O AGCB encontrou a solução ótima após 303.950 execuções de PPL's, em média.

4.6 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos pela metodologia proposta para o sistema Garver (para todos os casos simulados) são os mesmos resultados obtidos pela metodologia de duas fases apresentados na referência [5].

Para os sistemas de médio porte simulados algumas linhas do planejamento sem segurança não fazem parte do planejamento com segurança, são elas: a linha n_{10-12} do sistema IEEE 24 barras e a linha n_{13-20} do sistema Sul Brasileiro. Esta diferença pode ser maior para sistemas de maior porte afetando diretamente o planejamento. Isto contraria a afirmação que se encontra em [5] de que o planejamento sem segurança sempre faz parte do planejamento com segurança.

O esforço computacional que a metodologia realizaria para encontrar o planejamento seguro de um sistema de grande porte seria exageradamente elevado. Para resolver este tipo de problema seria recomendado utilizar ferramentas de processamento paralelo.

4.7 Conclusões

Um modelo matemático e uma metodologia de solução para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão com restrições de segurança foram apresentados. Um algoritmo genético especializado foi utilizado para resolver o modelo matemático do problema de planejamento da expansão com restrições de segurança.

Uma análise comparativa dos resultados da metodologia apresentada com os resultados da metodologia de duas fases, mostram que os resultados são os mesmos para sistemas de pequeno porte. Porém, para sistemas de maior porte e mais complexos existem diferenças, evidenciando dessa forma a qualidade superior da metodologia proposta neste trabalho.

Capítulo 5

Planejamento Estático com Restrições de Segurança e Planos Especificados de Programação da Geração

5.1 Introdução

Até o momento não se tem observado publicações sobre planejamento da expansão com restrições de segurança e que, adicionalmente, em condições sem contingência opere adequadamente para vários planos de programação da geração, tendo sido encontradas algumas contribuições sobre planejamento da expansão apenas com restrições de segurança [5, 6] e sobre planejamento da expansão apenas considerando planos específicos de geração [7].

Em planejamento da expansão de sistemas de transmissão geralmente são usados modelos matemáticos simplificados para representar a rede elétrica. O problema de planejamento pode ser generalizado para levar em conta na modelagem matemática determinadas condições de operação, dentre elas a exigência que o sistema opere adequadamente atendendo planos de programação da geração pré-determinados.

Neste capítulo é apresentado um modelo matemático e uma técnica de solução para o problema da expansão de sistemas de transmissão estático com restrições de segurança levando em conta os planos de programação da geração pré-determinados. Como critério de segurança adotou-se o critério $(n - 1)$ por ser o mais usado em pesquisas sobre planejamento de sistemas de transmissão.

A proposta de expansão implica que o sistema expandido pode operar adequadamente para vários planos de geração previamente especificados e que também pode operar adequadamente com a saída de uma linha de transmissão após realizar um remanejamento da geração.

5.2 Planejamento Atendendo Planos Específicos de Programação da Geração

O modelo matemático do planejamento atendendo este tipo de restrição pode ser apresentado compactamente na seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } v = & \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \\
 \text{s.a.} & \\
 & n = \{n_{ij}\} \in RO \\
 & n = \{n_{ij}\} \in RM
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

em que RO representa as restrições de operação e RM representa as restrições que contemplam as novas exigências de planos pré-determinados. Um sistema elétrico deve ter a capacidade de operar em várias propostas de programação da geração determinadas pelas novas exigências do setor elétrico satisfazendo fundamentalmente os seguintes quesitos:

- Uma distribuidora deve ser atendida em sua demanda especificada.
- Uma unidade geradora deve ter a capacidade de gerar a potência máxima especificada no plano de expansão.
- O sistema não deve apresentar problemas de congestionamento para planos de reprogramação especificados.

Note-se que algumas destas exigências são independentes e outras estão relacionadas. E para levar em conta estas exigências deve-se dispor de uma modelagem matemática adequada.

5.2.1 Modelagem Matemática

Nesta seção é proposta uma modelagem matemática desenvolvida para determinar a topologia ótima que opere adequadamente com todos os planos de programação da geração especificados pelo operador do sistema. A formulação tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } v = & \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{k=0}^{ps} w_1^k & (5.2) \\
 \text{s.a.} & \\
 & \mathbf{S}f^k + g^k + r^k = d \\
 & f_{ij}^k - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij})(\theta_i^k - \theta_j^k) = 0 \\
 & |f_{ij}^k| \leq (n_{ij}^o + n_{ij})\bar{f}_{ij} \\
 & 0 \leq g^k \leq \bar{g}^k \\
 & 0 \leq r^k \leq d \\
 & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 & n_{ij} \text{ inteiro; } f_{ij}^k \text{ e } \theta_j^k \text{ irrestritos} \\
 & (i, j) \in \Omega \\
 & k = 0, 1, 2, \dots, ps
 \end{aligned}$$

onde:

- v é o investimento total.
- c_{ij} é o custo de um circuito que pode ser adicionado ao ramo $i - j$.
- n_{ij} é o número de circuitos adicionados no ramo $i - j$.
- α é um parâmetro de penalidade que penaliza na função objetivo qualquer corte de carga no sistema. Ele deve ser ajustado de forma que torne desinteressante uma proposta de solução que acarrete corte de carga ao sistema.
- r_s é o corte de carga na barra s .
- r é o vetor para r_s .
- d é o vetor de demanda.
- γ_{ij} é a susceptância de um circuito que pode ser adicionado ao ramo $i - j$.
- n_{ij}^o é o número de circuitos no caso base.
- f_{ij} é o fluxo de potência total no circuito $i - j$.
- \bar{f}_{ij} é o fluxo de potência máximo de um circuito $i - j$.

- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico.
- f é o vetor com os elementos f_{ij} .
- g é o vetor com os elementos g_k (geração na barra k) no qual o máximo valor é \bar{g} .
- \bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos que podem ser adicionados ao ramo $i - j$.
- θ_j é o ângulo na barra j .
- Ω é o conjunto de todos os caminhos.
- ps é o número de planos de programação da geração determinado pela lógica de operação do órgão operador do sistema.

O valor de w_1^k é a soma das gerações artificiais para o plano de operação k . Assim, a forma matemática de w_1^k é a seguinte:

$$w_1^k = \sum_{s \in \Gamma} r_s^k \tag{5.3}$$

em que Γ representa as barras de carga e r_s^k é a geração artificial na barra de demanda s para o plano de operação k .

Na modelagem matemática (5.2), para $k = 0$ tem-se apenas o conjunto de restrições RO do planejamento centralizado e para $k = 1, \dots, ps$ tem-se a modelagem matemática correspondente ao planejamento em que o sistema elétrico operaria sem problemas de congestão para qualquer plano de geração. Em [?] é mostrada a forma adequada para determinar o número máximo de planos de programação diferentes que podem existir em um sistema elétrico considerando a lógica do órgão operador do sistema. Esta lógica diz que se em um sistema existem k geradores então $(k - 1)$ geradores operam em sua capacidade máxima ou mínima e o gerador que sobra faz o balanço de potência. Deve ser observado que, seguindo esta lógica, alguns planos são infactíveis (impossíveis) e devem ser desprezados.

Deve-se observar que um sistema elétrico pode especificar os planos de programação da geração que devem ser levados em conta, e dessa forma, especificar o valor de ps assim como os valores de geração para cada gerador em cada um desses planos. Isso vai depender do planejamento energético para o período de planejamento da expansão da transmissão. Deve-se observar também que a quantidade de variáveis não inteiras na modelagem matemática (5.2) cresce com o valor de k e essa

quantidade de variáveis pode assumir valores proibitivos. Entretanto, a quantidade de variáveis inteiras permanece constante.

5.3 Planejamento Estático da Transmissão com Restrições de Segurança Atendendo Planos de Programação da Geração Pré-determinados

Considera-se que um sistema está adequadamente expandido para operar com restrições de segurança com planos de geração pré-determinados se o mesmo pode operar em qualquer plano de programação da geração especificado se não existe contingência e se satisfaz o critério de segurança $(n - 1)$ com uma adequada reprogramação da geração. Neste caso, as exigências dos planos pré-determinados podem não necessariamente serem atendidas. Entretanto, existe pelo menos um ponto de operação adequado, como por exemplo, a operação fornecida pelo planejamento básico.

Observe-se que nessa definição está implícito que:

- Qualquer geradora pode operar em qualquer ponto de operação respeitando seus limites, considerando-se a situação em que há contingência;
- Que todas as distribuidoras devem estar adequadamente atendidas mesmo em situação de contingência simples de linhas ou transformadores;
- Todas as exigências da operação integrada devem estar satisfeitas.

Levando-se em consideração todos estes aspectos, a formulação matemática assume a seguinte forma:

$$\text{Min } v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha \left[\sum_{k=0}^{ps} w_1^k + \sum_{p=1}^{nl} w_2^p \right] \quad (5.4)$$

s.a.

$$\begin{aligned} \mathbf{S} f^k + g^k + r^k &= d \\ f_{ij}^k - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij})(\theta_i^k - \theta_j^k) &= 0 \\ |f_{ij}^k| &\leq (n_{ij}^o + n_{ij}) \bar{f}_{ij} \\ 0 &\leq g^k \leq \bar{g}^k \\ 0 &\leq r^k \leq d \\ f_{ij}^k \text{ e } \theta_j^k &\text{ ilimitado} \\ k &= 0, 1, 2, \dots, ps \\ \mathbf{S} f^p + g^p + r^p &= d \\ f_{ij}^p - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij})(\theta_i^p - \theta_j^p) &= 0 \\ \forall (i, j) &\in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\ f_{ij}^p - \gamma_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij} - 1)(\theta_i^p - \theta_j^p) &= 0 \\ \text{para } (i, j) &= p \\ |f_{ij}^p| &\leq (n_{ij}^o + n_{ij}) \bar{f}_{ij} \\ \forall (i, j) &\in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\ |f_{ij}^p| &\leq (n_{ij}^o + n_{ij} - 1) \bar{f}_{ij} \text{ para } (i, j) = p \\ 0 &\leq g^p \leq \bar{g} \\ 0 &\leq r^p \leq d \\ 0 &\leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\ [n_{ij} + n_{ij}^o - 1] &\geq 0 \text{ e inteiro para } (i, j) = p \\ n_{ij} &\geq 0 \text{ e inteiro } \forall (i, j) \in 1, 2, \dots, nl; \text{ e } (i, j) \neq p \\ f_{ij}^p \text{ e } \theta_j^p &\text{ ilimitado} \\ (i, j) &\in \Omega \text{ e } p = 1, 2, \dots, nl \end{aligned}$$

w_2^p corresponde a soma de gerações artificiais para a operação de cada conjunto de restrições para cada $(i, j) = p \in 1, 2, \dots, nl$. Assim, a forma matemática de w_2^p é:

$$w_2^p = \sum_{s \in \Gamma} r_s^p \quad (5.5)$$

em que r_s^p é a geração artificial (corte de carga) na barra de demanda $s \in \Gamma$ (conjunto de barras de demanda) para a operação com a contingência $p = 0, 1, 2, \dots, nl$ sendo $p = 0$ a operação sem contingência.

5.4 Testes e Resultados

O algoritmo proposto para solucionar o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão com restrição de segurança em mercado competitivo foi testado em três sistemas elétricos conhecidos na literatura especializada. O primeiro é o sistema originalmente proposto por Garver [1], o segundo é o sistema IEEE 24 [13] e o terceiro é o sistema sul brasileiro de 46 barras e 79 ramos [13].

5.4.1 Sistema Garver

5.4.1.1 Planejamento Atendendo Planos de Programação da Geração

Para esta rede foram considerados 4 planos de programação da geração designados por P_1 , P_2 , P_3 e P_4 , mostrados na Tabela 5.1 que permitiriam que o sistema opere sem congestão para qualquer plano de programação da geração. O plano P_0 representa a capacidade máxima de geração de cada gerador, isto é, corresponde ao planejamento básico.

Tabela 5.1: Potência Gerada em MW - Garver

Gerador	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
g_1	150	150	150	0	0
g_3	360	360	10	360	160
g_6	600	250	600	400	600

O algoritmo encontra um plano de expansão com investimento de $v = 268.000$ US\$ com a construção das seguintes linhas: $n_{2-6} = 4$, $n_{3-5} = 2$, $n_{3-6} = 1$ e $n_{4-6} = 2$. A solução é mostrada na Figura 5.1, onde também é apresentado o ponto de operação para o plano de programação P_1 .

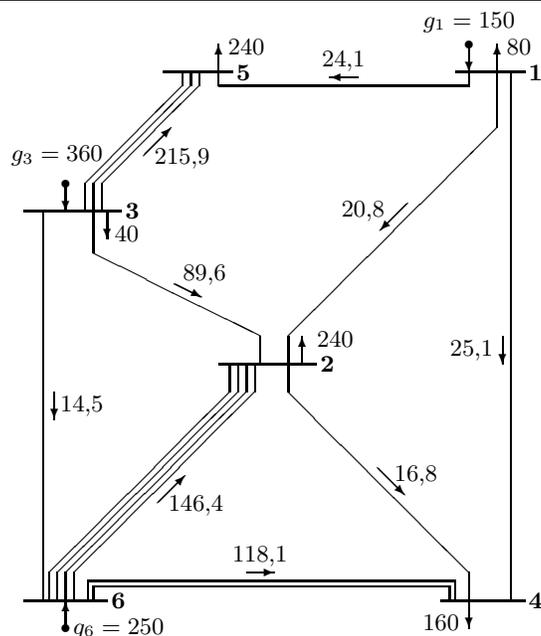


Figura 5.1: Plano de expansão do sistema Garver para o planejamento atendendo diversos planos de programação da geração.

5.4.1.2 Planejamento com Restrições de Segurança Atendendo Planos de Programação da Geração

O planejamento da expansão para o sistema Garver operando de maneira a atender todos os planos de programação da geração apresentados na seção anterior e respeitando os critérios de segurança apresentados neste trabalho é o mesmo encontrado para o caso sem as restrições de segurança, isto é, o mostrado na Figura 5.1.

5.4.2 Sistema IEEE 24

5.4.2.1 Planejamento Atendendo Planos de Programação da Geração

Para este sistema foram selecionados quatro planos de programação da geração que também são estudados em [7], designados por P_1 , P_2 , P_3 e P_4 , o plano P_0 representa a capacidade máxima de geração de cada gerador para o planejamento com reprogramação da geração. Os planos de geração são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Potência Gerada em MW - IEEE 24

Gerador	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
g_1	576	576	465	576	520
g_2	576	576	576	576	520
g_7	900	900	722	900	812
g_{13}	1773	1773	1424	1457	1559
g_{15}	645	645	645	325	581
g_{16}	465	465	465	282	419
g_{18}	1200	1200	1200	603	718
g_{21}	1200	1200	1200	951	1077
g_{22}	900	900	900	900	900
g_{23}	1980	315	953	1980	1404

Essa configuração de planos de geração representa um $ps = 4$. Para esta configuração foi encontrada uma solução com custo igual a $v = 532.000.000$ US\$ e as linhas adicionadas são:

$$\begin{aligned}
 n_{01-05} &= 1; & n_{03-24} &= 1; & n_{06-10} &= 1; & n_{07-08} &= 2; \\
 n_{10-12} &= 1; & n_{13-14} &= 1; & n_{14-16} &= 1; & n_{15-24} &= 1; \\
 n_{16-17} &= 2; & n_{16-19} &= 1; & n_{17-18} &= 2; & n_{20-23} &= 1.
 \end{aligned}$$

5.4.2.2 Planejamento com Restrições de Segurança Atendendo Planos de Programação da Geração

Para os planos de programação da geração especificados no item anterior, o planejamento para o sistema IEEE 24 encontra uma solução com investimento de $v = 579.000.000$ US\$. Neste plano de expansão as seguintes linhas são acrescentadas ao sistema:

$$\begin{aligned}
 n_{01-05} &= 1; & n_{03-24} &= 1; & n_{04-09} &= 1; & n_{06-10} &= 2; \\
 n_{07-08} &= 2; & n_{10-11} &= 1; & n_{11-13} &= 1; & n_{14-16} &= 1; \\
 n_{15-24} &= 1; & n_{16-17} &= 2; & n_{16-19} &= 1; & n_{17-18} &= 2; \\
 n_{20-23} &= 1.
 \end{aligned}$$

Quando é utilizada a lógica para elaboração dos planos de programação da geração para que o sistema opere sem congestão para qualquer plano de geração, para este sistema IEEE 24, de que todos os geradores, exceto um, estão em seu limite máximo ou mínimo de geração e este gerador que sobra completa o balanço de potência, são encontrados 276 planos factíveis de programação da geração.

Seguindo-se esta lógica, o planejamento encontra uma solução com investimento igual a $v = 1.273.000.000$ US\$ e adição das seguintes linhas:

$$\begin{aligned}
 n_{01-02} &= 1; & n_{02-04} &= 1; & n_{02-08} &= 1; & n_{03-24} &= 1; \\
 n_{04-09} &= 1; & n_{05-10} &= 1; & n_{06-10} &= 2; & n_{07-08} &= 2; \\
 n_{08-09} &= 1; & n_{08-10} &= 1; & n_{09-12} &= 1; & n_{10-11} &= 1; \\
 n_{10-12} &= 2; & n_{11-14} &= 1; & n_{12-13} &= 1; & n_{12-23} &= 1; \\
 n_{14-16} &= 2; & n_{15-21} &= 1; & n_{15-24} &= 1; & n_{16-17} &= 2; \\
 n_{16-19} &= 1; & n_{17-18} &= 1; & n_{20-23} &= 1; & n_{21-22} &= 1;
 \end{aligned}$$

5.4.3 Sistema Sul Brasileiro

5.4.3.1 Planejamento Atendendo Planos de Programação da Geração

Para este sistema foram selecionados onze planos de programação da geração de tal forma que os maiores geradores e os menores geradores possam operar com sua capacidade máxima em mais de um plano. Tais planos são designados por $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9$ e P_{10} , o plano P_0 representa a capacidade máxima de geração de cada gerador para o planejamento com reprogramação da geração. Os planos de geração são mostrados na Tabela 5.3. Essa configuração de planos de geração representa um $ps = 10$. Para esta configuração foi encontrada uma solução com custo igual a $v = 205.590.000$ US\$ e as linhas adicionadas são:

$$\begin{aligned}
 n_{05-06} &= 2; & n_{14-26} &= 1; & n_{17-19} &= 1; & n_{18-19} &= 1; \\
 n_{19-25} &= 1; & n_{20-21} &= 1; & n_{24-25} &= 2; & n_{28-31} &= 1; \\
 n_{31-32} &= 1; & n_{32-43} &= 1; & n_{33-34} &= 1; & n_{42-43} &= 3; \\
 n_{46-06} &= 1.
 \end{aligned}$$

Tabela 5.3: Potência Gerada em MW - Sistema Sul Brasileiro

Gerador	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
g_{14}	1257	1257	1257	1257	1257	1257	1257	0	0	0	944
g_{16}	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1055	2000	1262	642	1366
g_{17}	1050	1050	1050	1050	1050	1050	0	312	1050	0	1000
g_{19}	1670	1670	1670	1670	1670	1670	0	0	0	1670	773
g_{27}	220	220	0	0	0	0	220	220	220	220	54
g_{28}	800	683	800	0	0	0	800	800	800	800	730
g_{31}	700	0	103	700	0	0	700	700	700	700	310
g_{32}	500	0	0	203	500	0	500	500	500	500	450
g_{34}	748	0	0	0	403	748	748	748	748	748	221
g_{37}	300	0	0	0	0	155	300	300	300	300	212
g_{39}	600	0	0	0	0	0	600	600	600	600	221
g_{46}	700	0	0	0	0	0	700	700	700	700	599

5.4.3.2 Planejamento com Restrições de Segurança Atendendo Planos de Programação da Geração

Considerando-se os mesmos planos de programação da geração do item anterior para este sistema, encontramos um plano de expansão com um investimento igual a $v = 298.190.000$ US\$ com a construção das seguintes linhas:

$$\begin{aligned}
 n_{02-05} &= 1; & n_{05-06} &= 3; & n_{12-14} &= 1; & n_{14-26} &= 1; \\
 n_{17-19} &= 1; & n_{18-19} &= 1; & n_{19-21} &= 1; & n_{20-21} &= 2; \\
 n_{20-23} &= 1; & n_{21-25} &= 1; & n_{24-25} &= 2; & n_{24-34} &= 1; \\
 n_{28-31} &= 1; & n_{31-32} &= 1; & n_{31-41} &= 1; & n_{40-41} &= 1; \\
 n_{40-45} &= 1; & n_{41-43} &= 1; & n_{42-43} &= 2; & n_{46-06} &= 2.
 \end{aligned}$$

5.5 Análise dos Resultados

Um aspecto importante a ser observado a partir dos resultados obtidos é a grande diferença de investimento necessário para os problemas de planejamento centralizado, planejamento centralizado com segurança, planejamento atendendo planos de programação da geração e planejamento com restrição de segurança observando vários planos de programação da geração.

A grande diferença de investimentos entre as propostas de planejamento cria o problema que consiste em determinar os responsáveis no incremento do investimento para cada tipo de planejamento e além disso, deve-se observar em que tipo de mercado o sistema elétrico opera e quais os

critérios de segurança que devem ser atendidos para que o planejamento realizado tenha o menor custo possível.

5.6 Conclusões

Este capítulo apresentou um novo modelo matemático que permite modelar de forma adequada o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão que deve operar atendendo diversos planos de programação da geração respeitando restrições de segurança. Essa modelagem matemática é muito flexível pois as propostas de planejamento centralizado, planejamento centralizado com segurança, e propostas de planejamento para um número reduzido de planos de programação da geração representam casos particulares do modelo matemático proposto.

Este tipo de planejamento da expansão de sistemas de transmissão requer um esforço computacional muito elevado e é necessário pensar em processamento paralelo para analisar sistemas de grande porte.

Capítulo 6

Considerações Finais

Durante esta pesquisa foram desenvolvidas algumas propostas para o planejamento da expansão da transmissão, sendo este um problema de difícil solução por ser do tipo não linear inteiro misto (quando é utilizado o modelo DC para representar a rede de transmissão). As propostas aqui apresentadas, trataram do planejamento da expansão da transmissão considerando: restrições de segurança e operação atendendo diversos planos de programação da geração sob restrições de segurança.

O planejamento com restrições de segurança faz-se necessário para o aumento da confiabilidade no fornecimento de energia elétrica e o planejamento atendendo diversos planos de geração faz-se necessário para acompanhar o processo de desregulamentação pelo qual o setor elétrico vem passando ao redor do mundo nos últimos anos.

Nas formulações matemáticas dos modelos de expansão desenvolvidos nesta pesquisa, observou-se, devido à complexidade de cada um, a necessidade de uma ferramenta de solução que determinasse a melhor solução possível para cada um deles e portanto, uma das maiores contribuições deste trabalho foi a adaptação de um algoritmo genético altamente eficiente para a solução, não apenas do problema de planejamento da expansão, mas de problemas das áreas de planejamento da expansão e operação para sistemas elétricos como um todo.

O algoritmo genético implementado difere dos demais pelo fato de possuir um processo de melhoria local eficiente. Este algoritmo apresenta uma outra vantagem que é a criação eficiente de uma população inicial com a utilização do algoritmo heurístico construtivo de Villasana-Garver-Salon [10].

Deve-se ainda expandir todos os estudos feitos para o caso do planejamento multiestágio, tendo em vista que este tipo de planejamento acompanha de maneira mais uniforme o crescimento

das necessidades de expansão dos sistemas de transmissão. Por fim, as propostas de expansão obtidas devem ser avaliadas através de técnicas usadas em operação tais como fluxo de carga AC, análise de estabilidade electromecânica e de tensão, análise de curto-circuito, etc. e, nesse estágio, pode ser necessário realizar reforços adicionais no sistema elétrico.

Apêndice A

Dados dos Sistemas Testados

A.1 Sistema Garver

Tabela A.1: Dados de Barras

Barra #	Geração [MW]		Carga [MW]	Barra #	Geração [MW]		Carga [MW]
	Máxima	Nível Ger.			Máxima	Nível Ger.	
1	150	50	80	4	0	0	160
2	0	0	240	5	0	0	240
3	360	165	40	6	600	545	0

Tabela A.2: Dados de Linhas

De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10^3 US\$]	De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10^3 US\$]
1-2	1	0,40	100	40	2-6	0	0,30	100	30
1-3	0	0,38	100	38	3-4	0	0,59	82	59
1-4	1	0,60	80	60	3-5	1	0,20	100	20
1-5	1	0,20	100	20	3-6	0	0,48	100	48
1-6	0	0,68	70	68	4-5	0	0,63	75	63
2-3	1	0,20	100	20	4-6	0	0,30	100	30
2-4	1	0,40	100	40	5-6	0	0,61	78	61
2-5	0	0,31	100	31					

A.2 Sistema IEEE 24

Tabela A.3: Dados de Barras

Barra #	Geração Máxima [MW]	Carga [MW]	Barra #	Geração Máxima [MW]	Carga [MW]
1	576	324	13	1773	795
2	576	291	14	0	582
3	0	540	15	645	951
4	0	222	16	465	300
5	0	213	17	0	0
6	0	408	18	1200	999
7	900	375	19	0	543
8	0	523	20	0	384
9	0	525	21	1200	0
10	0	585	22	900	0
11	0	0	23	1980	0
12	0	0	24	0	0

Tabela A.4: Dados de Linhas

De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10^6 US\$]	De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10^6 US\$]
1-2	1	0,0139	175	3	13-23	1	0,0865	500	120
1-3	1	0,2112	175	55	14-16	1	0,0389	500	54
1-5	1	0,0845	175	22	15-16	1	0,0173	500	24
2-4	1	0,1267	175	33	15-21	2	0,0490	500	68
2-6	1	0,1920	175	50	15-24	1	0,0519	500	72
3-9	1	0,1190	175	31	16-17	1	0,0259	500	36
3-24	1	0,0839	400	50	16-19	1	0,0231	500	32
4-9	1	0,1037	175	27	17-18	1	0,0144	500	20
5-10	1	0,0883	175	23	17-22	1	0,1053	500	146
6-10	1	0,0605	175	16	18-21	2	0,0259	500	36
7-8	1	0,0614	175	16	19-20	2	0,0396	500	55
8-9	1	0,1651	175	43	20-23	2	0,0216	500	30
8-10	1	0,1651	175	43	21-22	1	0,0678	500	94
9-11	1	0,0839	400	50	1-8	0	0,1344	500	35
9-12	1	0,0839	400	50	2-8	0	0,1267	500	33
10-11	1	0,0839	400	50	6-7	0	0,1920	500	50
10-12	1	0,0839	400	50	13-14	0	0,0447	500	62
11-13	1	0,0476	500	66	14-23	0	0,0620	500	86
11-14	1	0,0418	500	58	16-23	0	0,0822	500	114
12-13	1	0,0476	500	66	19-23	0	0,0606	500	84
12-23	1	0,0966	500	134					

A.3 Sistema Sul Brasileiro

Tabela A.5: Dados de Barras

Barra #	Geração [MW]		Carga [MW]	Barra #	Geração [MW]		Carga [MW]
	Máxima	Nível Ger.			Máxima	Nível Ger.	
2	0,0	0,0	443,1	28	800,0	730,0	0,0
4	0,0	0,0	300,7	31	700,0	310,0	0,0
5	0,0	0,0	238,0	32	500,0	450,0	0,0
8	0,0	0,0	72,2	33	0,0	0,0	229,1
12	0,0	0,0	511,9	34	748,0	221,0	0,0
13	0,0	0,0	185,8	35	0,0	0,0	216,0
14	1257,0	944,0	0,0	36	0,0	0,0	90,1
16	2000,0	1366,0	0,0	37	300,0	212,0	0,0
17	1050,0	1000,0	0,0	38	0,0	0,0	216,0
19	1670,0	773,0	0,0	39	600,0	221,0	0,0
20	0,0	0,0	1091,2	40	0,0	0,0	262,1
22	0,0	0,0	81,9	42	0,0	0,0	1607,9
23	0,0	0,0	458,1	44	0,0	0,0	79,1
24	0,0	0,0	478,2	45	0,0	0,0	86,7
26	0,0	0,0	231,9	46	700,0	599,0	0,0
27	220,0	54,0	0,0				

Tabela A.6: Dados de Linhas

De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10 ⁶ US\$]	De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10 ⁶ US\$]
01-07	1	0,0616	270	4,349	44-45	1	0,1864	200	11,924
01-02	2	0,1065	270	7,076	19-32	1	0,0195	1800	23,423
04-09	1	0,0924	270	6,217	46-19	1	0,0222	1800	26,365
05-09	1	0,1173	270	7,732	46-16	1	0,0203	1800	24,319
05-08	1	0,1132	270	7,480	18-19	1	0,0125	600	8,178
07-08	1	0,1023	270	6,823	20-21	1	0,0125	600	8,178
04-05	2	0,0566	270	4,046	42-43	1	0,0125	600	8,178
02-05	2	0,0324	270	2,581	02-04	0	0,0882	270	5,965
08-13	1	0,1348	240	8,793	14-15	0	0,0374	270	2,884
09-14	2	0,1756	220	11,267	46-10	0	0,0081	2000	10,889
12-14	2	0,0740	270	5,106	04-11	0	0,2246	240	14,247
14-18	2	0,1514	240	9,803	05-11	0	0,0915	270	6,167
13-18	1	0,1805	220	11,570	46-06	0	0,0128	2000	16,005
13-20	1	0,1073	270	7,126	46-03	0	0,0203	1800	24,319
18-20	1	0,1997	200	12,732	16-28	0	0,0222	1800	26,365
19-21	1	0,0278	1500	32,632	16-32	0	0,0311	1400	36,213
16-17	1	0,0078	2000	10,505	17-32	0	0,0232	1700	27,516
17-19	1	0,0061	2000	8,715	19-25	0	0,0325	1400	37,748
14-26	1	0,1614	220	10,409	21-25	0	0,0174	2000	21,121
14-22	1	0,0840	270	5,712	25-32	0	0,0319	1400	37,109
22-26	1	0,0790	270	5,409	31-32	0	0,0046	2000	7,052
20-23	2	0,0932	270	6,268	28-31	0	0,0053	2000	7,819
23-24	2	0,0774	270	5,308	28-30	0	0,0058	2000	8,331
26-27	2	0,0832	270	5,662	27-29	0	0,0998	270	6,672
24-34	1	0,1647	220	10,611	26-29	0	0,0541	270	3,894
24-33	1	0,1448	240	9,399	28-41	0	0,0339	1300	39,283
33-34	1	0,1265	270	8,288	28-43	0	0,0406	1200	46,701
27-36	1	0,0915	270	6,167	31-41	0	0,0278	1500	32,632
27-38	2	0,2080	200	13,237	32-41	0	0,0309	1400	35,957
36-37	1	0,1057	270	7,025	41-43	0	0,0139	2000	17,284
34-35	2	0,0491	270	3,591	40-45	0	0,2205	180	13,994
35-38	1	0,1980	200	12,631	15-16	0	0,0125	600	8,178
37-39	1	0,0283	270	2,329	46-11	0	0,0125	600	8,178
37-40	1	0,1281	270	8,389	24-25	0	0,0125	600	8,178
37-42	1	0,2105	200	13,388	29-30	0	0,0125	600	8,178
39-42	3	0,2030	200	12,934	40-41	0	0,0125	600	8,178
40-42	1	0,0932	270	6,268	02-03	0	0,0125	600	8,178
38-42	3	0,0907	270	6,116	05-06	0	0,0125	600	8,178
32-43	1	0,0309	1400	35,957	09-10	0	0,0125	600	8,178
42-44	1	0,1206	270	7,934					

A.4 Sistema Colombiano - Multiestágio

Tabela A.7: Dados de Barras

Barra #	Estágio 1 [MW]		Estágio 2 [MW]		Estágio 3 [MW]	
	Geração	Carga	Geração	Carga	Geração	Carga
1	240	0	240	0	240	0
2	0	352,9	165	406,53	165	486,66
3	0	393	0	490,50	0	587,08
4	0	0	0	0	0	0
5	40	235	40	293,56	40	351,42
6	34	0	34	0	34	0
7	0	300	0	374,26	136	448,03
8	100	339	230	423	230	505,87
9	0	348	0	434,12	0	519,69
10	0	60	0	74,21	0	88,84
11	80	147	108	183,90	108	220,15
12	47	0	47	0	47	0
13	0	174	0	217,26	0	260,08
14	0	0	0	0	0	0
15	0	377	0	470,17	0	562,84
16	0	236	0	294	0	351,90
17	35	136	35	169,57	35	203
18	480	36,20	540	45,20	540	54,10
19	900	19,60	1340	24,26	1340	29,28
20	0	202,40	0	252,50	45	302,27
21	0	186	0	231,70	0	227,44
22	200	53	200	66,13	200	79,17
23	0	203	0	252,50	0	302,27
24	120	0	150	0	150	0
25	86	0	86	0	86	0
26	70	0	70	0	70	0
27	0	266	0	331,40	0	396,71
28	0	326	0	406,30	14	486,39
29	618	339	618	422,60	618	505,96
30	0	137	0	166,70	0	199,55
31	189	234	189	327,30	189	391,88
32	0	126	0	157,30	0	188,33
33	0	165	0	206,53	0	247,24
34	0	77,50	0	96,70	0	115,81
35	200	172	200	214,60	200	256,86
36	0	112	0	140	44	167,29
37	138	118	138	147,30	138	176,30
38	0	86	15	108,40	15	129,72
39	0	180	0	224	15	268,19
40	305	0	305	0	305	0

Tabela A.8: Dados de Barras - Continuação

Barra	Estágio 1 [MW]		Estágio 2 [MW]		Estágio 3 [MW]	
	Geração	Carga	Geração	Carga	Geração	Carga
41	70	54,80	100	68,40	100	81,85
42	0	102	0	127,30	0	152,39
43	0	35,40	0	44,20	0	52,90
44	23	257	23	321,30	23	384,64
45	950	0	1208	0	1208	0
46	150	121	150	151,70	150	181,62
47	0	41,15	0	51,50	0	61,60
48	775	600	885	750	885	896,26
49	0	130	0	162	0	193,27
50	240	424	240	528	240	632,75
51	0	128	0	159	0	190,45
52	0	38	0	46,50	0	55,60
53	280	0	320	0	320	0
54	0	76	0	95,30	0	114,19
55	40	223	40	279	40	333,59
56	0	0	0	0	0	0
57	0	226	130	281	130	336,94
58	190	0	190	0	190	0
59	160	0	160	0	160	0
60	1191	0	1216	0	1216	0
61	155	0	155	0	155	0
62	0	0	0	0	0	0
63	900	35	1090	44	1090	52,77
64	0	88	0	110,55	280	132,35
65	0	132	0	165	0	197,58
66	200	0	300	0	300	0
67	474	266	474	332,45	474	397,98
68	0	0	0	0	0	0
69	0	71,40	0	89	0	106,61
70	30	0	180	0	180	0
71	0	315	211	393	424	471,21
72	0	0	0	0	0	0
73	0	0	0	0	0	0
74	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0
76	40	0	40	0	40	0
77	0	55	0	70	0	82,85
78	0	36,65	0	45,10	0	54,07
79	0	98	0	123	300	146,87
80	0	60	0	72	0	88,34

Tabela A.9: Dados de Barras - Continuação

Barra	Estágio 1 [MW]		Estágio 2 [MW]		Estágio 3 [MW]	
	Geração	Carga	Geração	Carga	Geração	Carga
81	0	0	0	0	0	0
82	0	0	0	0	0	0
83	0	0	0	0	0	0
84	0	0	0	0	500	0
85	0	0	0	0	0	0
86	0	0	300	0	850	0
87	0	0	0	0	0	0
88	0	0	0	0	300	0
89	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0
91	0	0	0	0	0	0
92	0	0	0	0	0	0
93	0	0	0	0	0	0

Tabela A.10: Dados de Linhas

De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10 ⁶ US\$]	De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10 ⁶ US\$]
52-88	0	0,0980	300	34,190	31-34	1	0,0792	250	12,412
43-88	0	0,1816	250	39,560	31-33	2	0,0248	350	6,432
57-81	0	0,0219	550	58,890	31-60	2	0,1944	250	25,982
73-82	0	0,0374	550	97,960	31-72	2	0,0244	350	6,317
27-89	0	0,0267	450	13,270	47-54	2	0,1003	250	14,252
74-89	0	0,0034	550	14,570	47-49	2	0,0942	250	13,562
73-89	0	0,0246	550	66,650	18-58	2	0,0212	350	5,742
79-83	0	0,0457	350	15,400	18-20	1	0,0504	350	9,537
8-67	0	0,2240	250	29,200	18-66	2	0,0664	350	11,377
39-86	0	0,0545	350	9,880	18-21	1	0,0348	350	7,467
25-28	1	0,0565	320	9,767	18-22	1	0,0209	350	6,432
25-29	1	0,0570	320	9,882	19-22	1	0,0691	350	11,722
13-14	2	0,0009	350	3,902	4-5	3	0,0049	350	4,247
13-20	1	0,0178	350	5,742	5-6	2	0,0074	350	4,477
13-23	1	0,0277	350	7,007	17-23	1	0,0913	250	12,987
14-31	2	0,1307	250	18,662	17-76	1	0,0020	350	3,902
14-18	2	0,1494	250	20,232	12-17	1	0,0086	350	4,707
11-60	2	0,1067	300	15,977	1-71	2	0,0841	250	14,367
2-4	2	0,0271	350	6,662	1-8	1	0,0810	250	13,217
2-9	1	0,0122	350	5,282	1-11	1	0,0799	250	12,527
2-83	1	0,0200	570	5,972	4-36	2	0,0850	250	13,562
9-83	1	0,0200	400	5,972	19-58	1	0,0826	320	11,722
15-18	1	0,0365	450	7,927	27-64	1	0,0280	350	6,777
15-17	1	0,0483	320	9,422	27-28	1	0,0238	350	6,202
15-20	1	0,0513	320	9,652	27-44	1	0,0893	250	16,322
15-76	1	0,0414	320	9,882	26-27	1	0,0657	350	10,917
15-24	1	0,0145	350	5,282	27-29	1	0,0166	350	5,052
37-61	1	0,0139	350	4,937	19-66	1	0,0516	350	9,307
19-61	2	0,1105	250	16,092	74-74	1	0,0214	600	58,278
61-68	1	0,0789	250	12,412	64-65	1	0,0741	350	11,837
37-68	1	0,0544	320	9,652	29-64	1	0,0063	350	4,362
40-68	1	0,1320	320	18,162	4-34	2	0,1016	270	14,942
12-75	1	0,0641	320	11,492	34-70	2	0,0415	350	8,272
24-75	1	0,0161	350	5,512	33-34	1	0,1139	320	16,322
35-36	1	0,2074	250	27,362	8-71	1	0,0075	400	4,477
27-35	1	0,1498	250	22,072	54-63	3	0,0495	320	9,077
35-44	2	0,1358	250	20,347	48-63	1	0,0238	350	6,317
38-68	1	0,0389	350	7,927	67-68	2	0,1660	250	22,072
38-39	1	0,0300	350	6,317	39-68	1	0,0145	350	5,282
27-80	1	0,0242	350	7,007	8-9	1	0,0168	350	5,972
44-80	1	0,1014	250	17,587	79-87	1	0,0071	350	4,477
56-81	1	0,0114	550	32,858	8-87	1	0,0132	350	5,167
45-54	1	0,0946	320	13,562	39-43	1	0,1163	250	16,552
45-50	2	0,0070	350	4,362	41-43	1	0,1142	250	16,322
10-78	1	0,0102	350	4,937	23-24	1	0,0255	350	6,317
7-78	1	0,0043	350	4,132	21-22	1	0,0549	350	9,882
30-64	1	0,1533	250	20,577	26-28	1	0,0512	350	9,307
30-65	1	0,0910	250	13,677	28-29	1	0,0281	350	6,777

Tabela A.11: Dados de Linhas - Continuação

De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10 ⁶ US\$]	De-Para	n_{ij}^0	Reat. [pu]	\bar{f}_{ij} [MW]	Custo [10 ⁶ US\$]
30-72	2	0,0173	350	5,512	6-10	1	0,0337	350	7,582
55-57	1	0,0174	600	46,808	33-72	1	0,0228	350	6,202
57-84	1	0,0087	600	26,658	39-40	2	0,1020	250	16,207
55-84	1	0,0087	600	26,658	12-76	1	0,0081	350	4,707
56-57	2	0,0240	600	62,618	48-54	3	0,0396	350	8,042
9-77	1	0,0190	350	5,857	50-54	2	0,0876	250	12,872
77-79	1	0,0097	350	5,167	62-73	1	0,0272	750	73,158
1-59	2	0,0232	350	6,202	49-53	2	0,1008	250	14,252
59-67	2	0,1180	250	16,667	40-41	1	0,0186	350	5,742
8-59	2	0,1056	250	15,402	45-81	1	0,0267	450	13,270
1-3	1	0,1040	250	15,862	64-74	1	0,0267	500	13,270
3-71	1	0,0136	450	5,167	54-56	3	0,0267	450	13,270
3-6	1	0,0497	350	9,422	60-62	3	0,0257	450	13,270
55-62	1	0,0281	550	70,988	72-73	2	0,0267	500	13,270
47-52	1	0,0644	350	10,572	19-82	1	0,0267	450	13,270
51-52	1	0,0859	250	12,872	55-82	1	0,0290	550	77,498
29-31	2	0,1042	250	32,981	62-82	1	0,0101	600	30,998
41-42	1	0,0094	350	4,707	83-85	2	0,0267	450	13,270
40-42	1	0,0153	350	5,167	82-85	1	0,0341	700	89,898
46-53	2	0,1041	250	14,597	19-86	1	0,1513	300	20,922
46-51	1	0,1141	250	16,322	68-86	1	0,0404	350	8,272
69-70	2	0,0228	350	6,202	7-90	2	0,0050	350	4,247
66-69	2	0,1217	250	17,127	3-90	1	0,0074	350	4,592
9-69	2	0,1098	350	15,747	90-91	1	0,0267	550	13,270
60-69	2	0,0906	350	13,677	85-91	1	0,0139	600	40,298
31-32	1	0,0259	350	6,547	11-92	1	0,0267	450	13,270
32-34	1	0,0540	350	9,767	1-93	1	0,0267	450	13,270
16-18	1	0,0625	350	10,917	92-93	1	0,0097	600	30,068
16-23	1	0,0238	350	6,892	91-92	1	0,0088	600	27,588
16-21	1	0,0282	350	6,892					

Apêndice B

Artigos Aceitos e Submetidos

- **I. J. S. Junior e C. F. Murari.** “Aplicação da Teoria de Conjuntos Nebulosos no Cálculo do Custo Incremental Para o Despacho Econômico em Sistemas de Geração de Energia Elétrica”. *XV CBA - Congresso Brasileiro de Automática*. Setembro de 2004, Gramado-RS.
- **I. J. S. Junior, C. F. Murari e A. P. Grilo.** “Power Systems Investments Analysis With Insertion of Uncertainties Based On Fuzzy Sets Theory”. *The 7th IASTED Internacional Conference on POWER AND ENERGY SYSTEMS - PES 2004*. Novembro de 2004, Clearwater Beach, Florida, USA.
- **I. J. S. Junior e C. F. Murari.** “Metodologia Baseada em Fuzzy Sets Para Obtenção Mais Realista dos Custos da Transmissão Para Comercialização de Energia Elétrica Entre Concessionárias”. *I ERIAC - Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ*. Maio de 2005, Cidade do Leste, Paraguai.
- **I. J. S. Junior e C. F. Murari.** “Análise de Investimentos na Geração de Energia Elétrica Considerando as Incertezas Através de Algoritmos Fundamentados em Fuzzy Sets”. *I ERIAC - Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ*. Maio de 2005, Cidade do Leste, Paraguai.
- **M. J. Rider, I. J. S. Junior, R. Romero, A. V. Garcia e C. F. Murari.** “Transmission Network Expansion Planning in Full Open Market Considering Security Constraints”. *Proceedings of the International Conference 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech* Junho de 2005, São Petersburgo, Russia.
- **I. J. S. Junior, M. J. Rider, R. Romero e C. F. Murari.** “Transmission Network

Expansion Planning Considering Uncertainty in Demand

Proceedings of the 2005 PES General Meeting Junho de 2005, São Francisco, USA.

- **I. J. S. Junior, M. J. Rider, R. Romero, A. V. Garcia e C. F. Murari.** “Transmission Network Expansion Planning With Security Constraints”.
Aceito para publicação no *IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*.
- **I. J. S. Junior, M. J. Rider, R. Romero e C. F. Murari.** “Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty in Demand”.
Artigo na segunda revisão do *IEEE Transactions on Power Systems*.
- **I. J. S. Junior, M. J. Rider, R. Romero, A. V. Garcia e C. F. Murari.** “Algoritmo Genético de Chu-Beasley para o Problema de Planejamento da Expansão da Transmissão”.
VII SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Luís - MA, 21-23 de setembro de 2005.
- **I. J. S. Junior, M. J. Rider, R. Romero e C. F. Murari.** “Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Considerando Restrições de Segurança e Incertezas na Demanda”.
Resumo submetido ao *X SEPOPE*. Florianópolis - SC, Maio de 2006.

Referências Bibliográficas

- [1] L. L. Garver, “Transmission network estimation using linear programming”, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-89, pp. 1688-1697, Sep./Oct. 1970.
- [2] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto, “Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. Power App. Systems*, vol. PAS-104, no. 2, Feb. 1985.
- [3] S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia and R. Romero, “Specialised branch-and-bound algorithm for transmission network expansion planning”, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, no. 5, pp. 482-488, 2001.
- [4] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia and S. Haffner, “Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning”, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, no. 1, pp. 27-36, 2002.
- [5] A. Seifu, S. Salon and G. List, “Optimization of transmission line planning including security constraints”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 1507-1513, Oct. 1989.
- [6] A. Monticelli, A. Jr. Santos and M.V.F. Pereira, “Interactive transmission network planning using a least-effort criterion”, *IEEE Trans. Power App. Systems*, vol. 101, no. 10, pp. 3919-3925, 1982.
- [7] R. Fang and D.J. Hill, “A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 374-380, Feb. 2003.
- [8] R. Gallego, A. Monticelli and R. Romero, “Transmission systems expansion planning by an extended genetic algorithms”, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 3, pp. 329-335, 1998.

-
- [9] E. da Silva, H. Gil and J. Areiza, “Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp 1168-1175, November 2000.
- [10] R. Villasana, L. L. Garver and S. J. Salon, “Transmission network planning using linear programming”, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 349-356, Feb. 1985.
- [11] R. Romero and A. Monticelli, “A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 373-380, Feb. 1994.
- [12] R. Romero and A. Monticelli, “A zero-one implicit enumeration method for optimizing investments in transmission expansion planning”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1385-1391, May. 1994.
- [13] R. Gallego, “Planejamento a Longo Prazo de Sistemas de Transmissão Usando Técnicas de Otimização Combinatorial”, Tese de Doutorado, UNICAMP, Brasil, 1997.
- [14] S. Binato, “Expansão Ótima de Sistemas de Transmissão Através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes”, Tese de Doutorado, UFRJ, Brasil, abril de 2000.
- [15] S. Haffner, “O Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos no Contexto de um Ambiente Competitivo”, Tese de Doutorado, UNICAMP, Brasil, julho de 2000.
- [16] A. Monticelli, “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, Editora Edgar Bucher Ltda, 1983.
- [17] J. H. Holland, “*Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*”. The University of Michigan Press, 1975.
- [18] D. E. Goldberg, “*Genetics algorithms in search, optimization and machine Learning*”, Addison Wesley Reading, Mass., 1989.
- [19] F. Glover, “Tabu Search” - Part I, *ORSA Journal Computing*, vol. 1, no. 3, 1989.
- [20] Z. Michalewicz, “*Genetic algorithms + data structures = evolution programs*”, Artificial Intelligence, Springer, Berlin, 1996.
- [21] P. C. Chu and J. E. Beasley, “A genetic algorithm for the generalized assignment problem”, *Computers Operations Research*, 24(1), pp 17-23, 1997.

- [22] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto, “Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. PAS-104, no. 2, February 1985.
- [23] T. Torre, J. W. Feltes, T. G. Roman and H. Merrill, “Deregulation, privatization, and competition: transmission planning under uncertainty”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 460-465, May 1999.
- [24] M. Oloomi, M. Shahidehpour, H. Shانهchi and G. Balzer, “Market Based Transmission Planning Under Uncertainties”, *8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Iowa State University, Ames, Iowa, pp. 563-563, Sep. 2004.
- [25] J. Choi, A. A. El-Keib and T. Tran, “A Fuzzy Branch and Bound Based Transmission System Expansion Planning for the Highest Satisfaction Level of the Decision Maker ”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 476-484, Feb. 2005.
- [26] A. H. Escobar, R. A. Gallego and R. Romero, “Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 735-744, May. 2004.
- [27] M. J. Rider, A. V. Garcia and R. Romero, “A constructive heuristic algorithm to short term transmission network expansion planning”, *General Meeting 2004*. vol. 1, pp. 2107-2113, Denver, Colorado.
- [28] C. R. Rocha, “Desenvolvimento de técnicas heurísticas e de otimização clássica para o problema de planejamento da expansão a longo prazo de sistemas de transmissão”, Tese de Doutorado, FEIS-UNESP, 2004.
- [29] M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto, S. H. F. Cunha and G. C. Oliveira, “A Decomposition Approach to Automated Generation/Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. Power App. Systems*, vol. PAS-104, no. 11, November 1985.
- [30] G. C. Oliveira, A. P. Costa and S. Binato, “Large Scale Transmission Network Planning Using Optimization and Heuristic Techniques”, *IEEE Trans. on Power Systems*. vol. 10, no. 4, pp. 1828-1834, 1995.
- [31] S. Granville and M. V. F. Pereira, “ Analysis of the Linearized Power Flow Model in Benders Decomposition”, EPRI Report RP 2473-6, Stanford University, Fevereiro, 1995.
- [32] G. Bayona and J. I. Arriaga, CHOPIN, “A heuristic Model For Long Term Transmission Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Systems*. vol. 4, no. 4, pp. 1886-1894, 1994.

- [33] S. Binato, G. C. Oliveira and J. L. Araujo, "A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Network Expansion Planning". *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 247-253, May 2001.
- [34] H. Faria, S. Binato, M. G. C. Resende and D. M. Falcão, "Power transmission network design by Greedy Randomized Adaptive Path Relinking", *IEEE Trans. on Power Systems*. vol. 20, no. 1, pp. 43-49, 2005.
- [35] L. M. V. G. Pinto and A. Nunes, "A model for the optimal transmission expansion planning", *Proc. 10th Power Syst. Comput. Conf.*, pp 16-23, 1990.
- [36] S. Binato, M. V. F. Pereira and S. Granville, "A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 16, pp. 235-240, May 2001.
- [37] P. Tsamasphyru, A. Renaud and P. Carpentier, "Transmission network planning: An efficient Benders decomposition scheme", *Proc. 13th PSCC in Trondheim*, pp. 487-494, 1999.
- [38] S. N. Siddiqi and M. L. Baughman, "Valued-based transmission planning and the effects of networks models", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, pp. 1835-1842, Nov. 1995.
- [39] G. Latorre, A. Ramos, I. J. Perez-Arriaga, J. F. Alonso and A. Saiz, "PERLA: A static model for long-term transmission planning - Modeling options and suitability analysis", *Proc. 2nd Spanish-Portuguese Conf. Elect. Eng.*, July 1991.
- [40] G. Latorre, I. J. Perez-Arriaga, A. Ramos and J. Roman, "A static model for long-term transmission planning", *Proc. 1st Spanish-Portuguese Conf. Elect. Eng.*, July 1990.
- [41] S. Granville, M. V. F. Pereira, G. B. Dantzig, B. Avi-Itzhak, M. Avriel, A. Monticelli and L. M. V. G. Pinto, "Mathematical Decomposition Techniques for Power Systems Expansion Planning - Vol. 2: Analysis of the Linearized Power Flow Model Using the Bender Decomposition Technique", Project 2473-6 EPRI EL-5299, 1998.
- [42] S. T. Lee, K. L. Hocks and E. Hynilicza, "Transmission expansion using branch-and-bound integer programming with optimal cost-capacity curves", *IEEE Trans. Power App. Systems*, vol. PAS-93, pp. 1390-1400, July 1974.
- [43] L. M. V. G. Pinto and A. Nunes, "A model for the optimal transmission expansion planning", *Proc. 10th Power Syst. Comput. Conf.*, pp. 16-23, 1990.

- [44] K. Yoshimoto, K. Yasuda and R. Yokohama, "Transmission expansion planning using neuro-computing hybridized with genetic algorithm", *Proc. 1995 Int. Conf. Evol. Comput.*, pp 126-131.
- [45] R. A. Gallego, A. Monticelli and R. Romero, "Transmission expansion planning by extended genetic algorithm", *Proc. Inst. Elect. Eng. - Gen. Trans. Dist.*, vol 145, no. 3, pp. 329-335, May 1998.
- [46] R. A. Gallego, R. Romero and A. Escobar, "Planning of the Pereira power system using an efficient genetic algorithm", *Proc. 1st Meeting G and T CIER*, Bog., Colombia, 1999.
- [47] R. Romero, M. Mantovani, R. A. Gallego and A. Monticelli, "Experimental analysis of selection methods in a genetic algorithm applied to the planning electrical system", *Proc. 15th Int. Conf. CAD/CAM Robotic and Factories of the Future*, Aguas de Lindoia, Brasil, 1999.
- [48] R. A. Gallego, R. Romero and A. Escobar, "Static Planning of the Colombian transmission system using genetic algorithms", *Proc. 16th Int. Conf. CAD/CAM*, Trinidad e Tobago, June 2000.
- [49] A. Escobar, R. A. Gallego, R. Romero and S. A. Oliveira, "Hybrid model analysis and constructive algorithms in the performance of a genetic algorithm for the planning of an electric power transmission system", *Proc. 17th Int. Conf. CARS and FOF*, Durban, Africa do Sul, 2001.
- [50] R. A. Gallego, A. B. Alves, A. Monticelli and R. Romero, "Parallel simulated annealing applied to long term transmission network expansion planning", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, pp. 181-188, Feb. 1997.
- [51] R. Romero, R. A. Gallego and A. Monticelli, "Transmission system expansion planning by simulated annealing", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 11, pp. 364-369, Feb. 1996.
- [52] E. L. Silva, J. M. Areiza, G. C. Oliveira and S. Binato, "Transmission network expansion planning under a tabu search approach" *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 16, pp. 62-68, Feb. 2001.
- [53] R. A. Gallego, R. Romero and A. Monticelli, "Tabu search algorithm for network analysis" *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 15, pp. 490-495, May 2000.
- [54] F. Wen and C. S. Chang, "Transmission network optimal planning using the tabu search method", *Electric Power Systems Research*, no. 42, pp. 153-163, Aug. 1997.

-
- [55] E. G. Cleobury, "Transmission planning in today's environment", *Proc. Inst. Elect. Eng. Colloquium on Alternatives to More Overhead Lines*, pp. 1-10, 1993.
- [56] A. Henney, "A global perspective on the impact of competition on transmission", *Proc. IEEE Colloquium on Network Pricing, Investment and Access*, pp. 1-6, Oct. 1995.
- [57] R. Baldick and E. Kahn, "Transmission planning issues in a competitive economic environment", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, pp. 1497-1503, Nov. 1993.
- [58] I. J. Perez-Arriaga, "The transmission function: Access, investment and remuneration", *Proc. Int. Seminar on Electr. Sector Deregulation*, Bogota, Colombia, 1995.
- [59] H. Rudnick, "Transmission systems expansion in generation competitive markets", *Proc. 1st Int. Meeting G and T Commission de Integracion Energetica Regional*, Bogota, Colombia, 1999.
- [60] H. Rudnick and R. Quinteros, "Power system planning in the south america electric market restructuring", *Proc. VI Symp. Specialists Elect. Oper. and Expansion Planning*, Bahia, Brasil, 1998.
- [61] M. V. F. Pereira and B. G. Gorestein, "Transmission pricing methods", *Seminar: Remuneration and Pricing of the Power Services*, Bogota, Colombia, 1996.
- [62] G. Latorre and R. D. Cruz, "Toward a generation-transmission integrated planning model in deregulation environments", *Seminar: Remuneration and Pricing of the Power Services*, Bogota, Colombia, 1996.
- [63] P. H. Corredor, "Transmission planning in a competitive environment", *Proc. 2nd Int. Seminar on Energy Planning*, Bogota, Colombia, 1996.
- [64] A. Villegas, "Transmission privatization", *Proc. 2nd Energy and Telecommun. Sectors Nat. Forum*, Bucaramanga, Colombia, 1998.
- [65] R. E. Clayton and R. Mukerji, "System planning tools for the competitive market", *IEEE Comput. Applicat. Power*, pp. 50-55, July 1996.
- [66] H. Singh, S. Hao and A. Papalexopoulos, "Transmission congestion management in competitive electricity markets", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, pp. 672-680, May 1998.
- [67] F. A. Rahimi and A. Vojdani, "Meet the emerging transmission market segments", *IEEE Comput. Applicat. Power*, pp. 26-32, Jan. 1999.

-
- [68] D. Shirmohammandi, B. Wollemberg, A. Vojdani, P. Sandrin, M. Pereira, F. Rahimi, T. Schneider and B. Scott, "Transmission dispatch and congestion management in the emerging energy market structures", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, pp. 1466-1474, Nov. 1998.
- [69] R. S. Fang and A. K. David, "Transmission congestion management in an electricity market environment", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, pp. 877-883, Aug. 1999.
- [70] R. S. Fang and A. K. David, "An integrated congestion management strategy for real-time system operation", *IEEE Power Eng. Rev.*, vol 19, pp. 52-54, May 1999.
- [71] T. W. Gedra, "On transmission congestion and pricing", *IEEE Trans Power. Syst.*, vol. 14, pp. 241-248, Feb. 1999.
- [72] S. Hunt and G. Shuttleworth, "Unlocking the grid", *IEEE Spectr.*, pp.20-25, July 1996.
- [73] J. D. Mountford and R. R. Austria, "Keeping the lights on!", *IEEE Spectr.*, pp. 34-39, June 1999.