

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

Celso Tadao Miasaki

**Planejamento da Expansão do Sistema de
Transmissão de Energia Elétrica Utilizando
Controladores FACTS**

TESE DE DOUTORADO

ILHA SOLTEIRA - SP

Março de 2006

Celso Tadao Miasaki

**Planejamento da Expansão do Sistema de
Transmissão de Energia Elétrica Utilizando
Controladores FACTS**

Tese de Doutorado submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP.

Orientador: Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

ILHA SOLTEIRA - SP

Março de 2006

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica utilizando controladores FACTS

AUTOR: CELSO TADAO MIASAKI

ORIENTADOR: Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
DEE/ Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

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

Prof. Dr. OSVALDO RONALD SAAVEDRA MENDEZ
DEE - UFMA/São Luis/MA

Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
DEE/ Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ARIIVALDO VERANDIO GARCIA
DSEE - FEEC - UNICAMP/Campinas/SP

Data da realização: 24 de março de 2006.



Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Para Luiza, minha mãe, que com seus exemplos me mostrou que é na luta diária que vencemos.

À memória de Tadashi, meu pai, que conquistou seu espaço, com muito trabalho e dedicação.

À todos os meus familiares que me ajudaram com palavras de incentivo, ajuda emocional e me forneceram a tranquilidade necessária para que pudesse vencer este desafio.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus sinceros agradecimentos:

- Ao amigo e professor Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro um agradecimento em especial, por aceitar ser orientador deste trabalho, pela competência, dedicação, atenção, estímulo e auxílio até a conclusão do mesmo. Obrigado pela paciência, pela credibilidade, pelos ensinamentos e tempo a mim dispensado;
- Aos professores José Roberto Sanches Mantovani, Dionízio Paschoareli Júnior, Osvaldo Saavedra Mendez e Ariovaldo Verandio Garcia pela grandiosa colaboração na correção do texto e pelas valiosas sugestões;
- A todos os docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica - FEIS/UNESP, que me acolheram e, diretamente ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. Em especial, não poderia deixar de agradecer aos professores Mantovani, Minussi e Grilo, principalmente pela amizade, apoio e disponibilidade. Também pela troca de conhecimentos, discussões técnicas que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho;
- A secretaria de Pós-Graduação (Fátima, Onilda e Adelaide) pelas muitas gentilezas e atenções a mim dispensadas durante todo o curso;
- Aos técnicos do laboratório de computação Deoclécio e José Roberto;
- A secretária do DEE, senhorita Cristina e sua colega Luzinete pelo trabalho desenvolvido;

- Aos meus amigos e colegas de departamento pela excelente convivência e pela amizade ao longo deste trabalho, em especial: Marco, Gustavo, Wendel, Marilene, Célia, Carlos Rocha, Cilim, Elizete, Maira, Mara, Alessandra, Mariza, Delberis, Rodrigo, Nando, Godoy, Edilton, Quevedo, Edgar, Silvio Salas; Willington, Cuiabá, Pardal, Tiago, Aislan, Shigueo, Cossi, Tony, Pedro, Silvia Kagesawa, Mariellen, Rangel, Silvia Taglialenha e Rosana Takehara;
- Ao trio de amigos Paulo, Patrícia e Otony, que mesmo distantes, sempre me incentivaram a enfrentar este desafio;
- Aos meus familiares, sem os quais certamente não estaria aqui;
- A minha namorada, Cibelle, que vem me mostrando, através de seus olhos, um mundo diferente do qual venho com o tempo percebendo através dos meus. Sou eternamente grato por todo esforço em superar e aturar as minhas “fases”. Obrigado por todo o teu amor.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro deste trabalho;
- A PROPP e ao PPGEE pelo auxílio para apresentação de trabalhos em congressos;
- Enfim, a todas as pessoas que porventura não tenha relacionado aqui, mas que sempre estiveram ao meu lado, tanto nos momentos ruins quanto nos bons momentos, e tenha contribuído para a minha formação pessoal, moral e profissional desta minha caminhada de vida, o meu muito, mas muito obrigado.

EPÍGRAFE

“Uma universidade, antes de tudo, é um centro de contestação do mundo à sua volta. Um refúgio onde se cultiva a dúvida. Um oásis onde teorias costumam ser erodidas e mitos, contestados.”

Carlos Chagas

LISTA DE FIGURAS

3.1 – Fluxo de malha	29
3.2 – Fluxo paralelo	29
3.3 – Capacitor série chaveado a tiristor	35
3.4 – Compensador série controlado a tiristor	36
3.5 – Diagrama unifilar da linha Norte-Sul	36
3.6 – Compensador série estático síncrono	38
3.7 – Transformador defasador	40
5.1 – Linha de transmissão	62
5.2 – Linha de transmissão com transformador defasador	63
5.3 – Sistema de 3 barras	64
5.4 – Solução do sistema com transformador defasador	64
6.1 – Codificação do modelo PS	74
6.2 – Processo de recombinação	78
6.3 – Processo de mutação	80
6.4 – Topologia de um sistema fictício	83
6.5 – Codificação do modelo SC	84
6.6 – Processo de recombinação	87
6.7 – Processo de mutação	88
6.8 – Topologia de um sistema fictício	91
6.9 – Codificação do modelo PS+SC	92
6.10 – Processo de recombinação	94
6.11 – Processo de mutação	95
6.12 – Fluxograma do modelo PS+SC	98

7.1 – Análise comparativa entre os modelos DC, PS e de transportes.	118
7.2 – Análise comparativa entre os modelos DC, SC e de transportes.	118
7.3 – Análise comparativa entre os modelos DC, PS+SC e de transportes. .	119
A.1 – Sistema IEEE 24 barras	135

LISTA DE TABELAS

5.1 – Dados das linhas do sistema de 3 barras	63
5.2 – Dados das barras do sistema de 3 barras	63
7.1 – Planos de expansão utilizando o modelo de transportes	102
7.2 – Planos de expansão utilizando o modelo DC	103
7.3 – Planos de expansão utilizando o modelo PS e transformadores defasadores de custo reduzido	105
7.4 – Número de PL's resolvidos nos planos de expansão utilizando o modelo PS e transformadores defasadores de custo reduzido	106
7.5 – Planos de expansão utilizando o modelo PS e transformadores defasadores de custo elevado	107
7.6 – Número de PL's resolvidos nos planos de expansão utilizando o modelo PS e transformadores defasadores de custo elevado	108
7.7 – Soluções com o plano P_1 do sistema IEEE 24 barras que utiliza o modelo PS e transformadores defasadores de custo intermediário	109
7.8 – Soluções com o plano P_3 do sistema IEEE 24 barras que utiliza o modelo PS e transformadores defasadores de custo intermediário	110
7.9 – Soluções com o plano P_4 do sistema IEEE 24 barras que utiliza o modelo PS e transformadores defasadores de custo intermediário	111
7.10 – Planos de expansão utilizando o modelo SC	112
7.11 – Número de PL's resolvidos nos planos de expansão utilizando o modelo SC	113
7.12 – Planos P_1 , P_2 e P_3 de expansão utilizando o modelo PS+SC	114
7.13 – Planos P_4 e P_5 de expansão utilizando o modelo PS+SC	115

7.14 – Número de PL's resolvidos nos planos de expansão utilizando o modelo PS+SC	115
7.15 – Fluxo de potência (MW) encontrados nas simulações com os modelos testados e aplicados ao sistema IEEE 24 barras.	116
 B.1 – Sistema IEEE 24 barras - geração e demanda	136
B.2 – Sistema IEEE 24 barras - dados das linhas	137

LISTA DE SÍMBOLOS

- c_{ij} : custo da adição de um circuito no caminho $i-j$;
- Co_{ij} : coeficiente de sensibilidade da linha no caminho $i-j$;
- Cf_{ij} : coeficiente de aproveitamento de um circuito no caminho $i-j$;
- d : vetor de demanda nas barras;
- d_k : demanda na barra k ;
- d_{ij} : custo fixo do transformador defasador;
- f : vetor dos fluxos, composto de elementos f_{ij} ;
- f^0 : vetor de fluxo de potência dos caminhos existentes na configuração base, compostos de elementos f_{ij}^0 ;
- f' : vetor de fluxo de potência nos novos caminhos candidatos, compostos de elementos f'_{ij} ;
- f^S : vetor de fluxo de potência nos novos caminhos candidatos, compostos de elementos f_{ij}^S ;
- f_{ij} : fluxo total no caminho $i-j$;
- $\overline{f_{ij}}$: fluxo máximo permitido para um circuito no caminho $i-j$;
- f_{ij}^0 : fluxo total de potência nos caminhos existentes na configuração base;
- f'_{ij} : fluxo total de potência nos novos caminhos candidatos;
- f_{ij}^S : fluxo total de potência nos caminhos existentes na configuração base;
- g : vetor de geração, composto de elementos g_i ;
- g_i : nível de geração na barra i ;
- $\overline{g_i}$: máxima capacidade de geração na barra i ;
- h_{ij} : custo fixo do dispositivos de compensação série;

M : parâmetro com valor elevado;
 ns : número de linhas que podem ser adicionadas no caminho $i-j$;
 n_b : Número de barras do sistema;
 nl : número de caminhos no sistema;
 nr : número de topologias repetidas;
 n_{ij} : número de circuitos adicionados no caminho $i-j$ no processo de otimização;
 n_{ij}^k : número de linhas adicionadas em uma proposta de investimento k no caminho $i-j$;
 ntd_{ij} : número de transformadores defasadores no caminho $i-j$;
 $\overline{n_{ij}}$: número máximo de adições permitidas no caminho $i-j$;
 n_{ij}^0 : número de circuitos na configuração base no caminho $i-j$;
 $npop$: tamanho da população;
 r : vetor de geração artificial, composto de elementos r_k ;
 r_k : geração artificial na barra k ;
 S : matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico;
 S^0 : matriz de incidência nó ramo transposta dos caminhos existentes na configuração base;
 S^S : matriz de incidência nó ramo transposta ampliada;
 Td : taxa de diversificação;
 T_R : taxa de recombinação;
 T_M : taxa de mutação;
 v : custo de investimento;
 v^k : valor da função de adaptação de uma proposta de investimento k ;
 y_{ij}^S : indica a adição ou não de uma linha no caminho $i-j$;
 w^k : corte de carga de uma proposta de investimento k ;

- α : penalidade devido ao corte de carga;
- β_{ij} : indica a presença ou ausência de dispositivos de compensação série no caminho $i-j$;
- β_{ij}^k : indica a presença ou ausência de dispositivos de compensação série no caminho $i-j$ em uma proposta de investimento k ;
- δ_{ij} : indica a presença ou ausência de transformadores defasadores no caminho $i-j$;
- δ_{ij}^k : indica a presença ou ausência de transformadores defasadores no caminho $i-j$ em uma proposta de investimento k ;
- ϕ_{ij} : ângulo do transformador defasador no caminho $i-j$;
- γ_{ij} : susceptância de uma linha no caminho $i-j$;
- λ_{ij} : taxa de compensação (em porcentagem);
- θ_j : ângulo de fase na barra j ;
- ρ_{ij} : porcentagem de compensação série no caminho $i-j$;
- ρ_{ij}^k : porcentagem de compensação série no caminho $i-j$, em uma proposta de investimento k .
- Γ : conjunto de todas as barras que possuem carga;
- Ω : conjunto de caminhos onde podem ser adicionadas novas linhas;
- Ω_1 : conjunto de caminhos onde existe linha na configuração base;
- Ω_3 : conjunto de barras que fazem parte da configuração base;

RESUMO

Neste trabalho de pesquisa tem-se a finalidade investigar, propor e testar a viabilidade técnica, de novos modelos matemáticos aplicados ao problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica a longo prazo. A motivação se deve ao fato que os modelos matemáticos estáticos mais utilizados para representar este problema têm como estratégia adicionar, no processo de expansão, somente linhas de transmissão e transformadores convencionais. Para tanto, busca-se inserir e avaliar tecnicamente os controladores flexíveis de transmissão em corrente alternada (do inglês, Flexible Alternating Current Transmission Systems - FACTS) como elementos do processo de expansão do sistema, juntamente com as linhas de transmissão e os transformadores convencionais, nos modelos matemáticos propostos. Neste trabalho, adicionam-se controladores FACTS com a intenção de obter uma melhor distribuição dos fluxos de potência ativa no sistema e, como consequência, contribuir para uma redução do custo de investimento em novas linhas de transmissão. Portanto, a metodologia proposta é um procedimento que incorpora inovações em relação à literatura existente. Os impactos da adição dos controladores FACTS na rede são analisados através dos resultados das simulações computacionais feitas com as metodologias propostas e realizados com o sistema teste IEEE 24 barras, com cinco planos de geração. Com o intuito de encontrar a alocação ótima dos equipamentos no sistema, foram desenvolvidos e implementados algoritmos genéticos especializados. Os resultados indicam um excelente desempenho das metodologias e dos modelos propostos.

ABSTRACT

This work is aimed at investigating, proposing and testing the technical viability of new mathematical models applied to the long-term power transmission system expansion planning problem. It was motivated due to the fact that most used static mathematical models for representing this problem have as strategy to add, within the expansion process, only transmission lines and conventional transformers. Therefore, this work is focused on the technical evaluation and insertion of FACTS devices as elements of the system expansion process, along with transmission lines and conventional transformers, in the considered mathematical models. FACTS devices will be added aimed at obtaining a better distribution of the active power flows in the system and, consequently, contributing to diminish investment costs due to new transmission lines. Thus, proposed methodology incorporates innovations respect to existing literature. Impacts due to the addition of FACTS devices in the network are analyzed through simulations carried out with the proposed methodology considering the test system IEEE 24, with five generation units. In order to find the optimal placement of such devices in the system, specialized genetic algorithms were developed and implemented. Results indicate an excellent performance of the proposed methodologies and models.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabela

Lista de Símbolos

Resumo

Abstract

1 – Introdução	01
1.1 – Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão	01
1.2 – Motivação do Trabalho	04
1.3 – Objetivos do Trabalho	05
1.4 – Características Gerais – Limitações e Alcance	05
1.5 – Estrutura da Tese	07
2 – Modelos Matemáticos	09
2.1 – Introdução	09
2.2 – Modelagem Clássica	11
2.2.1 – Modelo AC	11
2.2.2 – Modelo de Transportes	12
2.2.2.1 – Formulação Matemática do Modelo de Transportes	13
2.2.2.2 – Formulação Matemática do Modelo de Transportes Modificado	15
2.2.3 – Modelo DC	16
2.2.3.1 – Formulação Matemática do Modelo DC	17
2.2.3.2 – Formulação Matemática do Modelo DC Modificado	18
2.2.4 – Modelo Híbrido	19
2.2.4.1 – Formulação Matemática do Modelo Híbrido Não Linear	20
2.2.4.2 – Formulação Matemática do Modelo Híbrido Linear	21
2.2.5 – Modelo Linear Disjuntivo	22

2.2.5.1 – Formulação Matemática do Modelo Linear Disjuntivo	23
3 – Controladores FACTS	26
3.1 – Introdução	26
3.2 – Controladores FACTS	28
3.3 – Compensação Série	33
3.3.1 – Capacitor Série Chaveado a Tiristor – TSSC	34
3.3.2 – Compensação Série Controlada a Tiristor – TCSC	35
3.3.3 – Compensador Série Estático Síncrono – SSSC	37
3.4 – Transformadores Defasadores	38
4 – Metaheurísticas	41
4.1 – Técnicas de solução Utilizadas no Problema de Planejamento	41
4.2 – Métodos Heurísticos	42
4.2.1 – Métodos Construtivos	43
4.2.2 – Métodos de Decomposição e Partição	43
4.2.3 – Métodos de Redução	43
4.2.4 – Manipulação do Modelo	44
4.2.5 – Métodos de Busca Através da Vizinhança	44
4.3– Métodos de Otimização Clássica	44
4.4– Métodos Metaheurísticos	45
4.4.1 – Algoritmos Evolutivos	47
4.5 Algoritmos Genéticos	48
4.5.1 – Representação de uma Configuração Candidata	50
4.5.2 – Função Objetivo	50
4.5.3 – População Inicial	51
4.5.4 – Ciclo Geracional	51
4.5.4.1 – Seleção	51
4.5.4.2 – Recombinação	52
4.5.4.3 – Mutação	53
4.5.5 – Critério de Parada	53
4.5.6 – Parâmetros de Controle	54
5 – Modelos Matemáticos Usando Controladores FACTS	55
5.1 – Introdução	56

5.2 – Modelos Matemáticos com Controladores FACTS	59
5.2.1 – Modelos Matemáticos com Transformadores Defasadores	60
5.2.1.1 – Exemplo Ilustrativo	63
5.2.2 – Modelos Matemáticos com Compensação Série	65
5.2.3 – Modelos Matemáticos com Transformadores Defasadores e Compensação Série	69
6 – Algoritmos Genéticos Especializados	71
6.1 – Introdução	71
6.2 – Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Modelo Matemático que Adiciona Transformadores Defasadores no Sistema	73
6.2.1 –Codificação	73
6.2.2 – Função de Adaptação e Infactibilidades	75
6.2.3 – População Inicial	76
6.2.4 –Seleção	77
6.2.5 –Recombinação	77
6.2.6 –Mutação	78
6.2.7 – Detalhes Específicos do Algoritmo Genético Proposto	81
6.2.7.1 – Parâmetros de Controle	81
6.2.7.2 – Critério de Parada	82
6.2.7.3 – Elitismo	82
6.2.7.4 – Mecanismo de Diversidade Populacional	82
6.3 – Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Modelo Matemático que Adiciona Dispositivos de Compensação Série no Sistema	83
6.3.1 –Codificação	83
6.3.2 –População Inicial	84
6.3.3 – Função de Adaptação e Infactibilidades	85
6.3.4 –Seleção	86
6.3.5 –Recombinação	86
6.3.6 –Mutação	87
6.3.7 – Detalhes Específicos do Algoritmo Evolutivo Proposto	89
6.3.7.1 – Parâmetros de Controle	89

6.3.7.2 – Critério de Parada	89
6.3.7.3 – Elitismo	89
6.3.7.4 – Mecanismo de Diversidade Populacional	90
6.4 – Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Modelo	
Matemático que Adiciona Transformadores Defasadores e	90
Dispositivos de Compensação Série no Sistema	
6.4.1 –Codificação	90
6.4.2 –População Inicial	92
6.4.3 – Função de Adaptação e Infactibilidades	92
6.4.4 –Seleção	93
6.4.5 –Recombinação	94
6.4.6 –Mutação	94
6.4.7 – Detalhes Específicos do Algoritmo Evolutivo Proposto	96
6.4.7.1 – Parâmetros de Controle	96
6.4.7.2 – Critério de Parada	96
6.4.7.3 – Elitismo	97
6.4.7.4 – Mecanismo de Diversidade Populacional	97
7 – Testes e Resultados	99
7.1 – Introdução	99
7.2 – Planejamento da Expansão com Adição de Linhas de	
Transmissão	102
7.2.1 – Modelo de Transportes	102
7.2.2 – Modelo DC	103
7.3 – Planejamento da Expansão com Adição de Transformadores	
Defasadores	104
7.3.1 – Testes com Transformadores Defasadores de custo reduzido	105
7.3.2 – Testes com Transformadores Defasadores de custo elevado	107
7.3.3 – Testes com Transformadores Defasadores de custo	
intermediário	108
7.4 – Planejamento da Expansão com Adição de Dispositivos de	
Compensação Série	111

7.5 – Planejamento da Expansão com Adição de Transformadores Defasadores e Dispositivos de Compensação Série	113
7.6 – Comentários Sobre os Resultados	117
8 – Conclusões e Perspectivas	120
8.1 – Conclusões Finais	121
8.2 – Sugestões de Melhorias para Futuros Trabalhos	123
Referências Bibliográficas	125
Apêndice A – Sistema Teste	135
A.1 – Sistema IEEE-24 barras	135
Apêndice B – Dados do Sistema Teste	136
B.1 – Dados das Barras	136
B.2 – Dados das Linhas	137

Capítulo 1

Introdução

1.1 Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão

Uma das áreas mais tradicionais e antigas da engenharia elétrica é a que se refere aos sistemas de energia. Essa área trata do fornecimento de energia elétrica, sendo dividida em quatro setores: geração, transmissão, distribuição e comercialização.

De acordo com Elgerd ([ELGERD, 1976](#)):

O objetivo de um sistema de energia elétrica é gerar energia elétrica em quantidades suficientes e nos locais mais apropriados, transmiti-la em grandes quantidades aos centros de carga e então distribuí-la aos consumidores individuais, em forma e qualidade apropriada, e com o menor custo ecológico e econômico possível.

O sistema de transmissão de energia elétrica tem como função fazer com que a potência gerada chegue aos consumidores, bem como prover a interligação entre áreas de maneira eficiente.

Já o planejamento do sistema de transmissão iniciar-se-ia com o estabelecimento dos panoramas de crescimento do consumo de energia demandada pela sociedade, de acordo com previsões ao longo do tempo. É a partir desses panoramas que se verifica a eventual

necessidade de se ampliar e fortalecer a rede. No caso das condições de atendimento não serem satisfeitas, deve-se propor um plano que tenha coerência entre o fornecimento de energia à carga, a demanda e as instalações de novos equipamentos no sistema. Para integrar esses novos equipamentos, de forma a manter as condições técnicas e operacionais adequadas, é preciso planejar a alocação desses reforços sobre o sistema de transmissão (SOARES NETO, 2005).

O principal objetivo do planejamento da expansão do sistema de transmissão é obter o plano ótimo de expansão do sistema elétrico. O melhor plano de expansão deverá indicar onde deverão ser alocados novos equipamentos para que o sistema opere de forma adequada, que obedeça às restrições operacionais e financeiras para um determinado cenário futuro.

A criação de um modelo matemático que represente o problema de planejamento da expansão da transmissão começa com algumas hipóteses, onde a exatidão e a complexidade são consideradas na construção do modelo. Geralmente, o problema é representado por um problema de programação não-linear inteiro misto que apresenta um número elevado de soluções ótimas locais para sistemas reais. Este número está associado aos possíveis planos da expansão, que especificam o modo operacional ótimo. Assim, um problema básico consiste em definir a alternativa de expansão de menor custo que satisfaça todas as restrições operacionais.

No planejamento estático da expansão da transmissão a longo prazo (tipicamente com um horizonte de mais de 5 anos), cujos dados da carga são fornecidos, algumas simplificações podem ser aplicadas. Por exemplo, são desconsideradas as restrições referentes a magnitude da tensão, embora sejam essenciais para o planejamento a curto prazo. Deve-se enfatizar que, mesmo fazendo tais simplificações, o problema resultante é considerado complexo, com soluções ótimas desconhecidas para vários sistemas reais.

Um tema de pesquisa muito relevante, no contexto atual do mercado de energia, faz referência à otimização dos sistemas elétricos. Desta forma, é natural a existência de trabalhos voltados para a otimização do problema de planejamento de sistemas de transmissão. As técnicas de otimização, chamadas de metaheurísticas podem ser utilizadas para resolver problemas de otimização complexos que exigem elevado esforço de processamento e apresentam o fenômeno da explosão combinatória. As metaheurísticas são especialmente

adaptadas para problemas que apresentam um espaço de busca imenso com muitos ótimos locais.

Este trabalho dedica-se ao desenvolvimento de pesquisas na área de planejamento de sistemas elétricos, cuja contribuição está na apresentação de novos modelos matemáticos estáticos para representar o problema de planejamento da expansão da transmissão a longo prazo. Na literatura, os modelos DC e de transportes são freqüentemente utilizados para resolver o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão. Os dois modelos consideram somente a adição de linhas de transmissão e transformadores convencionais no problema de planejamento da transmissão. Neste trabalho é proposta uma nova estratégia de expansão da transmissão. Para isso, apresentam-se modelos matemáticos que permitem a adição de novos tipos de equipamentos no sistema, juntamente com a adição de linhas de transmissão e transformadores convencionais. A presença desses equipamentos no sistema tem como meta o uso mais eficiente das linhas de transmissão através do controle do fluxo de potência ativa.

Há uma vasta literatura sobre os controladores FACTS, dentre eles existem trabalhos que trata da melhoria operacional através do uso desses dispositivos. Por exemplo, alteração do fluxo de potência ativa para eliminar os problemas de congestionamento e/ou otimizar o despacho de potência (BROSDA E HANDSCHIN, 2001), (GERBEX, CHERKAoui E GERMOND, 2003), (HUANG, 2003), (CAI, ERLICH E STAMTSIS, 2004) e (TARANTO, PINTO E PEREIRA 1992).

Os controladores FACTS abrangem um conjunto de equipamentos que atuam sobre os parâmetros da rede (impedância, amplitudes e ângulos de defasagem entre as tensões terminais das barras) para controlar o nível de tensão e o fluxo de potência. Porém, neste trabalho são utilizados com o objetivo específico de redirecionar o fluxo de potência ativa. Desta forma, foram escolhidos o transformador defasador e os dispositivos de compensação série, pois dentre as suas particularidades, ambos possuem a característica de redistribuir o fluxo de potência ativa.

Todos os problemas de otimização gerados pelos modelos propostos apresentam um comportamento combinatório e consideram variáveis discretas e contínuas. Além disso, são mais complexos que os modelos clássicos, devido a considerar as características dos

controladores FACTS. Para resolver esses problemas de otimização são utilizadas metaheurísticas.

1.2 Motivação do Trabalho

Há um grande interesse no desenvolvimento de novos modelos e técnicas de solução para resolver o problema de planejamento do sistema de transmissão que considerem a utilização mais eficiente das linhas de transmissão através do controle do fluxo de potência.

Nos últimos anos ocorreram mudanças significativas no setor elétrico mundial que restringiram os investimentos em unidades de geração e linhas de transmissão tão necessárias para sua ampliação. Portanto, podem aparecer problemas de capacidade de transmissão das linhas. Assim, existe a expectativa que os sistemas de transmissão futuros sejam caracterizados por uma maior necessidade de flexibilização.

Uma alternativa interessante que vem ao encontro deste novo cenário que se apresenta para o setor elétrico é utilizar controladores FACTS, um conceito tecnológico de transporte de energia elétrica por sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada, que permite novas estratégias de operação e controle dos sistemas. Esses controladores fazem uso da eletrônica de potência para controlar alguns parâmetros do sistema.

Um outro fator que tem evoluído bastante nas últimas duas décadas na área de sistemas de potência é a aplicação de métodos de otimização. Esses métodos são muito eficientes e poderosos, já que são capazes de garantir a obtenção de um melhor desempenho elétrico e econômico do sistema de potência ([OLVERA, 2002](#)).

Além disso, a evolução observada na área de informática contribui para que as simulações computacionais, com modelos que representem o problema de planejamento, possam ser realizadas em máquinas com melhor desempenho. Como consequência, existe a expectativa de uma melhoria sensível no processamento de operações para a resolução de modelos matemáticos considerados complexos. Também contribui para a resolução desses modelos o surgimento de novas técnicas de solução e a evolução das existentes.

1.3 Objetivos do Trabalho

Os principais objetivos e contribuições deste trabalho podem ser enumerados da seguinte forma:

- Analisar a viabilidade técnica de se adicionar controladores FACTS no modelo matemático que representa o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão;
- Desenvolver, relatar e testar modelos matemáticos que adicionam transformadores defasadores e dispositivos de compensação série, de forma independente e integrados, no problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão;
- Desenvolver, apresentar e implementar algoritmos evolutivos, eficazes e eficientes, para a resolução dos modelos matemáticos propostos;
- Ilustrar, por meio de simulações computacionais, as metodologias propostas utilizando para isso um sistema teste;
- Discutir e analisar a validade dos resultados, encontrados nas simulações computacionais, com as metodologias propostas.

1.4 Características Gerais – Limitações e Alcance

A solução do problema de fluxo de potência envolve a resolução de um conjunto de equações não-lineares. Em função destas não-linearidades, as soluções numéricas devem ser iterativas. Quando este problema não-linear é resolvido com ferramentas não-lineares, este fluxo de potência é chamado de completo (ou AC), e quando o problema é simplificado, considerando somente a potência ativa, o fluxo de potência é chamado de linearizado (ou DC). Geralmente, para os estudos a longo prazo, não existe a necessidade de uma representação completa do sistema, e portanto, pode-se utilizar um modelo de fluxo de potência linearizado. Entretanto, quando há interesse em se avaliar de forma exata as perdas de transmissão, deve-se utilizar o modelo AC ([TEIVE, 1997](#)).

Normalmente, ao invés de considerar todas as funções a respeito do planejamento em um único modelo, o planejamento da expansão de sistemas de transmissão utiliza modelos matemáticos linearizados para representar a rede elétrica. Assim, este trabalho está focado somente para modelos simplificados, para os quais estão dirigidos os modelos matemáticos e as técnicas de solução propostas.

Vale ressaltar que todos os modelos propostos, neste trabalho, buscam mostrar a flexibilidade e a viabilidade técnica de se adicionar controladores FACTS no problema de planejamento. São modelos simplificados da rede e estão baseados no modelo DC, um dos modelos mais empregado no problema de planejamento. Conseqüentemente, resolvem apenas o problema de fluxo de potência ativa. Outros aspectos de análise de desempenho como os problemas de estabilidade, os critérios de segurança e as perdas do sistema, que são tópicos relevantes na expansão da transmissão estão fora do escopo desta pesquisa.

Há desafios e dúvidas ao incluir controladores FACTS no problema de planejamento da expansão de sistema de transmissão de energia elétrica. Este trabalho busca encontrar a resposta para algumas questões como:

- Qual o custo dos equipamentos;
- Como elaborar uma função objetivo que inclua o custo desses equipamentos;
- Quais restrições sofrem influência desses equipamentos;
- Qual é o melhor lugar para alocar os equipamentos; e quais devem ser seus parâmetros;
- Quais e quantos equipamentos devem ser adicionados no sistema;
- A formulação matemática do fluxo de potência é diferente para cada tipo de equipamento;
- Qual equipamento apresenta melhor desempenho;
- Qual técnica de solução pode ser utilizada mais eficientemente para resolver o modelo com adição de controladores FACTS.

1.5 Estrutura da Tese

Além deste capítulo, existem mais sete capítulos que estão organizados da seguinte forma:

No capítulo 2, faz-se uma revisão dos modelos matemáticos mais conhecidos na literatura e aplicados no problema de planejamento da expansão do sistema da transmissão. São apresentadas as formulações matemáticas, as vantagens e limitações de cada modelo.

No capítulo 3, é dada uma visão geral sobre os controladores FACTS, sendo apresentados os tipos e as características desses equipamentos. Os dispositivos de compensação série e os transformadores defasadores são estudados com mais detalhes.

No capítulo 4, apresenta-se uma breve exposição das técnicas de solução utilizadas no problema de planejamento de sistemas de transmissão no contexto de otimização. A teoria sobre algoritmo genético é mostrada de forma mais minuciosa, sendo apresentado um breve histórico; e como devem ser implementados: a codificação, a função objetivo, a população inicial, o ciclo geracional, o critério de parada, até os parâmetros necessários para a sua execução.

No capítulo 5, faz-se uma exposição de modelos matemáticos inéditos, propostos para resolver o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão a longo prazo. Todos os modelos visam alocar novos componentes no processo de expansão do sistema com o objetivo de reduzir o custo de investimento em novas linhas de transmissão.

No capítulo 6, ilustra-se a técnica de solução aplicada ao problema de planejamento da expansão com a adição de controladores FACTS. São apresentados os esquemas dos algoritmos genéticos especializado aplicados na resolução dos modelos propostos. Detalha-se, também, o processo de obtenção da população inicial e os mecanismos de mutação, utilizados para melhorar o desempenho dos algoritmos implementados.

No capítulo 7 são apresentados os resultados dos testes obtidos com as metodologias propostas. Inicialmente, são descritos os detalhes sobre a implementação computacional. Este capítulo também visa mostrar a viabilidade técnica da metodologia proposta e os benefícios da adição de controladores FACTS no sistema.

Finalmente, no capítulo 8, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelos Matemáticos

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos mais conhecidos na literatura e aplicados ao problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica (PESTEE). A exposição dos modelos de transportes, DC, híbrido e disjuntivo tem o objetivo de fornecer informações que contribuam para uma melhor compreensão dos modelos matemáticos propostos neste trabalho, os quais serão abordados nos capítulos subseqüentes.

2.1. Introdução

A maioria dos problemas do nosso cotidiano pode ser representado, de forma adequada, por meio de um modelo matemático. O modelo matemático é uma ferramenta que auxilia os pesquisadores na simulação, análise e compreensão de dados experimentais. Conseqüentemente, há um grande interesse no desenvolvimento, implementação e exploração de modelos matemáticos.

Embora possuam diversas formas, dimensões e níveis de complexidade, todos lidam com um processo de decisão e apresentam uma estrutura em comum. Um modelo de programação

matemática é composto de uma função objetivo e um conjunto de restrições que relaciona um conjunto de variáveis de decisão através de um conjunto de equações e inequações algébricas.

Nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica existem diversos problemas que envolvem o processo de otimização. Normalmente, a meta é minimizar os custos de investimento e de operação do sistema.

Neste trabalho aborda-se o planejamento da expansão do sistema de transmissão, que é um problema de otimização, motivo pelo qual sua resolução deve compreender a execução de duas etapas consecutivas e claramente definidas: a *modelagem matemática* e a *técnica de solução* escolhida para resolver o modelo matemático. Salienta-se que o modelo proposto deve representar adequadamente o problema real e permitir sua resolução por meio das técnicas de solução disponíveis.

Normalmente, à medida que são implementadas melhorias no modelo matemático do problema real, a técnica de solução se torna mais complexa. Assim sendo, deve existir um compromisso entre a modelagem matemática adotada e a técnica de solução escolhida, para que se possa obter o máximo de aproveitamento dos recursos computacionais (ROMERO, 1999).

O problema de planejamento da expansão de sistema de transmissão de energia elétrica procura determinar como ampliar a capacidade do sistema, de forma a atender simultaneamente a previsão futura de um crescente aumento da demanda, e manter o fornecimento contínuo de potência. Também tenta maximizar o uso dos recursos atuais, de forma confiável e com eficiência, com o objetivo de adiar os investimentos necessários para o funcionamento do sistema.

Normalmente, o problema de planejamento do sistema de transmissão é classificado, com relação ao horizonte considerado para os custos de investimentos, em *estático* ou *multiestágio*.

No planejamento estático, todos os investimentos são realizados em um único ano horizonte de planejamento, isto é, em uma única etapa se determina o local e o tipo de dispositivo que devem ser instalados na rede.

No planejamento multiestágio, o horizonte de planejamento é dividido em várias etapas. Neste último planejamento, além de se determinar o local e o tipo, determina-se quando instalar novos equipamentos.

Neste trabalho utiliza-se o planejamento estático que, apesar de implicar em soluções aproximadas para o problema, apresenta cenários que levam a propostas de investimentos confiáveis.

Existem vários modelos matemáticos que podem ser aplicados ao problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica, a seguir são comentados os principais modelos matemáticos aplicados no planejamento estático, encontrados na literatura.

2.2. Modelagem Clássica

No planejamento estático de sistemas de transmissão tradicional, o problema real é um sistema elétrico que possui uma configuração corrente (topologia inicial) e tem como meta chegar a um cenário futuro estimado (topologia final), através do melhor plano de expansão (construção de novos circuitos) para o sistema. Em outras palavras, *onde e que* tipos de circuitos devem ser construídos para que o sistema opere adequadamente para um crescimento especificado da demanda.

2.2.1. Modelo AC

A modelagem matemática ideal para indicar a operação adequada seria a representação do problema através das relações matemáticas de fluxo de carga AC. Entretanto, existem motivos que impedem a sua utilização de forma intensiva.

Um motivo é que a maioria dos sistemas utilizados no planejamento da transmissão apresenta uma configuração inicial não conexa, isto é, apresenta um conjunto de barras isoladas ou ilhadas da parte principal do sistema e, pelo menos no contexto atual, é difícil

resolver sistemas deste tipo empregando as relações matemáticas de fluxo de carga AC e as técnicas de solução conhecidas (KUOKAWA, 1999), (ROCHA, 1999).

Outro motivo é que o problema de planejamento de sistemas de transmissão trabalha somente com o fluxo de potência ativa no sistema elétrico e, o problema de geração de reativos é resolvido numa fase posterior. Neste último caso, mesmo que o sistema elétrico seja conexo, a convergência do modelo AC seria difícil.

Portanto, existem dificuldades em resolver simultaneamente os problemas de expansão dos sistemas de transmissão (construção de linhas e/ou transformadores) e alocação de reativos no sistema elétrico (ROMERO, 1999). Entretanto, já começam a surgir trabalhos como (RIDER ET AL., 2004) e (SANCHEZ, 2004) que utilizam o método de pontos interiores para solucionar problemas de programação linear e não-linear, com o objetivo de desenvolver técnicas de otimização que trabalhem diretamente com o modelo AC.

Utilizado inicialmente para resolver problemas de programação linear, o método de pontos interiores pode viabilizar o uso do modelo AC em um futuro próximo, já que para problemas de grande escala este método fornece um melhor desempenho computacional quando comparado com outras técnicas de otimização não-linear.

Nas últimas quatro décadas de pesquisas foram propostos vários modelos matemáticos, lineares e não-lineares, para representar o problema de planejamento de sistema de transmissão. Os que obtiveram maior destaque foram o modelo de transportes, modelo de fluxo de carga DC (ou modelo DC), os modelos híbridos e o modelo disjuntivo. Convém ressaltar que esses modelos não consideram as potências reativas, as magnitudes das tensões nodais e os taps dos transformadores.

2.2.2. Modelo de Transportes

A grande dificuldade em resolver um problema de planejamento de sistemas de transmissão, utilizando o modelo de fluxo de carga AC, fez com que diversos pesquisadores buscassem idéias alternativas.

No início da década de 70, Garver sugeriu a utilização de um modelo, mais relaxado que o modelo de fluxo de carga AC utilizado na operação, que permitia encontrar configurações atrativas de expansão do sistema mesmo utilizando uma proposta aproximada (GARVER, 1970). A proposta sugere o uso de modelos diferentes para os problemas de operação e de planejamento. Este modelo teve enorme aceitação e ficou conhecido como modelo de transportes e representou o marco inicial de uma nova sistemática de pesquisa nos problemas de planejamento de sistemas de transmissão.

Este modelo aproximado permite encontrar configurações atraentes dentro de condições adequadas de operação, além de reduzir o custo de investimento no plano de crescimento do sistema elétrico. Neste caso, o sistema deve satisfazer à Lei de Kirchhoff das correntes (LKC) e os circuitos e as unidades geradoras devem operar dentro de seus limites especificados.

A Lei de Kirchhoff das correntes simplesmente especifica que o somatório dos fluxos de potência que entram numa barra do sistema deve ser igual ao somatório do fluxo de potência que saem dessa mesma barra.

2.2.2.1. Formulação Matemática do Modelo de Transportes

A modelagem matemática do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, usando o modelo de transportes, proposto por Garver assume a seguinte forma:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \quad (2.1)$$

s.a.

$$S \cdot f + g = d \quad (2.2)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (2.3)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (2.4)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (2.5)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (2.6)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (2.7)$$

As notações adotadas para os dados de entrada do modelo de transporte foram: c_{ij} : custo de um circuito no caminho i-j; S : matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico; f : vetor dos fluxos; g : vetor de geração; d : vetor de demanda; n_{ij}^0 : número de circuitos existentes na configuração base no caminho i-j; $\overline{f_{ij}}$: fluxo máximo permitido para um circuito no caminho i-j; $\overline{g_i}$: vetor de máxima capacidade de geração nas barras de geração; $\overline{n_{ij}}$: vetor com o número máximo de adições permitidas no caminho i-j.

As variáveis do problema são representadas por v : investimento devido a adição de circuitos no sistema; n_{ij} : número de circuitos adicionados no caminho i-j; g_i : potência ativa gerada na barra i; f_{ij} : fluxo total no caminho i-j.

No modelo de transportes, a equação (2.1) representa a função objetivo, que determina o custo de investimentos em novas linhas de transmissão ao longo do horizonte de planejamento especificado.

As equações correspondentes à LKC estão representadas pelo conjunto de restrições (2.2), uma equação para cada barra do sistema; o conjunto de restrições (2.3) se refere à capacidade de transmissão dos circuitos (linhas e/ou transformadores), sendo o valor absoluto necessário, uma vez que o fluxo de potência pode fluir nos dois sentidos.

As restrições (2.4) representam os limites de geração nas barras de geração e as restrições (2.5) representam os limites de circuitos adicionados em cada caminho candidato i-j. As restrições (2.6) e (2.7) são restrições próprias das características das variáveis.

Do ponto de vista de pesquisa operacional, o sistema (2.1) - (2.7) é um problema de programação linear inteiro misto (PLIM), cuja resolução é complexa, especialmente para sistemas elétricos de grande porte.

A maior fonte de complexidade no problema são as variáveis n_{ij} que precisam ser inteiras. Se fossem permitidas adições fracionárias de circuitos (linhas e/ou transformadores), isto é, que as variáveis n_{ij} assumissem valores reais, então, o problema se transformaria num

simples problema de programação linear (PL) mesmo para o caso de sistemas de grande porte (KUOKAWA, 1999).

Um aspecto que merece destaque no modelo de transportes é a ausência da Lei de Kirchhoff das tensões (LKT), que faz com que sua solução não dependa das reatâncias dos circuitos.

O modelo de transportes foi o primeiro a utilizar programação linear, pois a função objetivo e suas restrições são lineares. Uma consequência deste fato é que praticamente não existe diferença entre resolver problemas de sistemas conexo ou altamente ilhado (ROMERO, 1999). Por outro lado, a principal limitação é que a solução ótima do modelo de transportes às vezes pode ficar muito distante da solução ótima do modelo DC devido a não necessidade de satisfazer a LKT.

Em alguns tipos de algoritmos utilizados no problema de planejamento de sistemas de transmissão é mais adequado fazer alterações na modelagem básica para permitir a aplicação das técnicas de solução. Uma modificação bastante utilizada é a inclusão de novas variáveis que representam o corte de carga associado a todas as barras de cargas do sistema. Este recurso também pode ser visto como uma geração artificial, que tem como objetivo tornar o problema sempre viável nas implementações computacionais (BINATO, 2000).

Note que estes geradores artificiais, do ponto de vista matemático, nada mais são que um aumento no número de variáveis no problema original e que na solução final todas as variáveis correspondentes aos geradores artificiais devem ser iguais a zero para que os dois problemas (original e modificado) tenham soluções equivalentes (ROCHA, 1999).

2.2.2.2. Formulação Matemática do Modelo de Transportes Modificado

No modelo de transportes modificado existe a presença de novas variáveis que representam os geradores artificiais e são indicadas pelas variáveis r_k . O modelo pode ser equacionado da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{k \in \Gamma} r_k \quad (2.8)$$

s.a.

$$S.f + g + r = d \quad (2.9)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (2.10)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (2.11)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (2.12)$$

$$0 \leq r_k \leq d_k \quad (2.13)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (2.14)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (2.15)$$

No modelo de transportes modificado, a equação (2.8) representa a função objetivo, sendo composta por duas parcelas. A primeira corresponde aos custos de investimento em novas linhas de transmissão e a segunda se refere a uma penalidade pela presença de corte de carga. O parâmetro de penalidade α transforma o corte de carga em valores financeiros e deve ser devidamente ponderado, para tornar pouco atrativas as configurações que possuem corte de carga. O símbolo Γ indica o conjunto de todas as barras que possuem carga.

Na restrição (2.9), referente a LKC, os vetores g e r indicam respectivamente, as gerações existentes e artificiais. As restrições (2.13) representam os limites de geração artificial nas barras.

Uma característica interessante do modelo modificado é que sempre existe uma solução factível trivial, não necessariamente ótima, fazendo cada $r_k = d_k$ e todas as outras variáveis iguais a zero.

2.2.3. Modelo DC

O modelo DC é um modelo baseado no acoplamento entre os fluxos de potência ativa e as aberturas angulares, o qual vem sendo aplicado na análise do planejamento de sistemas de energia elétrica (MONTICELLI, 1983).

Testes experimentais mostraram que as configurações encontradas ao utilizar o modelo DC apresentam bom desempenho quando avaliadas com os modelos tradicionais de operação de sistema de energia elétrica, como o fluxo de carga AC. Outro fator importante é a existência de diversas técnicas de solução que permitem resolver adequadamente o modelo DC (ROMERO, 1999). Atualmente, os pesquisadores consideram o modelo DC o modelo ideal para realizar os trabalhos de planejamento de sistemas de transmissão, sendo os outros modelos versões relaxadas (aproximadas) ou simplificadas deste modelo.

2.2.3.1. Formulação Matemática do Modelo DC

A formulação matemática do modelo DC para o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão, quando se considera apenas a instalação de linhas de transmissão e/ou transformadores convencionais, é caracterizada da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \quad (2.16)$$

s.a.

$$S.f + g = d \quad (2.17)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.18)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (2.19)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (2.20)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (2.21)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (2.22)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (2.23)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (2.24)$$

A principal diferença na formulação matemática entre o modelo DC e o modelo de transportes se encontra no conjunto de equações (2.18). Essa restrição representa a LKT, uma equação para cada caminho i-j. Nesta restrição, o produto entre a variável n_{ij} e as variáveis θ_j faz com que a equação (2.18) seja não linear e, portanto, tem-se um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM).

Neste modelo, todas as barras do sistema elétrico devem satisfazer a LKC e todos os laços existentes devem satisfazer a LKT.

A LKT é utilizada para expressar os fluxos de potência nos componentes internos como funções das tensões de seus nós terminais (MONTICELLI, 1983).

2.2.3.2. Formulação Matemática do Modelo DC Modificado

O modelo DC modificado, para considerar as necessidades de demanda de potência ativa, é descrito conforme as equações:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{k \in \Gamma} r_k \quad (2.25)$$

s.a.

$$S \cdot f + g + r = d \quad (2.26)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.27)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (2.28)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (2.29)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (2.30)$$

$$0 \leq r_k \leq d_k \quad (2.31)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (2.32)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (2.33)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (2.34)$$

Da mesma forma que no modelo de transportes, foram usadas as variáveis r_k , as quais correspondem à inclusão de geradores artificiais no sistema.

2.2.4. Modelo Híbrido

Tem-se conhecimento que o modelo DC apresenta dificuldade para trabalhar com redes não-conexas. Por outro lado, o modelo de transportes apresenta uma excelente flexibilidade para trabalhar com este tipo de problema, mas suas soluções podem ter uma qualidade bastante inferior da solução ótima do modelo DC.

O modelo híbrido surgiu como uma forma de contornar os problemas mencionados anteriormente. Este modelo permite encontrar soluções mais próximas da solução ótima do modelo DC e trabalhar eficientemente na parcela correspondente à parte não-conexa do problema de planejamento.

Pode-se dizer que o modelo híbrido é uma combinação entre o modelo de transportes e o modelo DC. Encontrar a solução ótima deste modelo é de uma complexidade quase equivalente ao modelo DC e, por este motivo, as diferentes variações do modelo híbrido são utilizados na maioria das vezes apenas para auxiliar no processo de resolução do modelo DC. O modelo híbrido pode apresentar uma estrutura de um problema de programação linear ou não-linear.

A primeira proposta de se usar um modelo híbrido no problema de planejamento de sistema de transmissão foi apresentada por Villasana ([VILLASANA, GARVER E SALON, 1985](#)), sendo aplicado como uma forma de auxílio para o indicador de sensibilidade do algoritmo heurístico proposto pelos autores. Depois foi sistematizado por Granville ([GRANVILLE E PEREIRA, 1985](#)) e reformulado por Romero ([ROMERO E MONTICELLI, 1994](#)). Portanto, este último modelo possui um contexto e uma estrutura diferente da idéia original.

Na tentativa de se obter soluções mais próximas da solução ótima do modelo DC e trabalhar de forma eficiente com a parte não-convexa do sistema, ([ROMERO E MONTICELLI, 1994](#)) propuseram um modelo híbrido não-linear.

2.2.4.1. Formulação Matemática do Modelo Híbrido Não-Linear

A formulação matemática do modelo híbrido não-linear proposto por (ROMERO E MONTICELLI, 1994) é caracterizada da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \quad (2.35)$$

s.a.

$$S.f + g = d \quad (2.36)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}).(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.37)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}).\overline{f_{ij}} \quad (2.38)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (2.39)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (2.40)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (2.41)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (2.42)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (2.43)$$

Neste modelo, Ω_1 representa o conjunto de caminhos onde existe linha na configuração base. As equações (2.36) e (2.37) indicam, respectivamente, que o modelo híbrido deve satisfazer a LKC em todas as barras do sistema e a LKT somente nos laços existentes na configuração base.

Nota-se que o conjunto de equações referente à LKT representa a diferença entre os três modelos matemáticos. No modelo de transportes, esse conjunto não aparece. No modelo híbrido aparece somente uma parcela dessas equações e, no modelo DC aparecem todas as equações desse tipo.

Uma observação importante é salientar que a não-linearidade das restrições, que representam a LKT, transforma o modelo híbrido e DC em um problema com nível de complexidade maior em relação ao modelo de transportes.

2.2.4.2. Formulação Matemática do Modelo Híbrido Linear

Com o intuito de facilitar a resolução do modelo híbrido, alguns pesquisadores fazem uso de uma versão relaxada. Para isso, utilizam um problema equivalente, cuja modelagem matemática corresponde a um problema linear inteiro misto. Os trabalhos de Binato (BINATO, 2000) e Haffner (HAFFNER, 2000) são exemplos de trabalhos que utilizam essa variação, porém com finalidades diferentes.

Neste problema equivalente são consideradas 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 LKC.

Em outras palavras, nesta nova formulação do modelo híbrido, existem dois sistemas superpostos, a configuração base deve satisfazer as duas leis de Kirchhoff e uma rede completa formada pelos circuitos candidatos à adição que deve cumprir apenas com a LKC. Assim, a formulação matemática do modelo híbrido linear é caracterizada da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \quad (2.44)$$

s.a.

$$S^0 f^0 + S.f' + g = d \quad (2.45)$$

$$f_{ij}^0 - \gamma_{ij} \cdot n_{ij}^0 \cdot (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.46)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \cdot \overline{f_{ij}} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.47)$$

$$|f_{ij}'| \leq n_{ij} \cdot \overline{f_{ij}} \quad \forall (i, j) \in \Omega \quad (2.48)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (2.49)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (2.50)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (2.51)$$

$$f_{ij}^0 \quad \text{Irrestrito} \quad (2.52)$$

$$f_{ij}' \quad \text{Irrestrito} \quad (2.53)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad \forall (i, j) \in \Omega_3 \quad (2.54)$$

Neste modelo modificado, S^0 e S são, respectivamente, as matrizes de incidência transpostas dos caminhos existentes na configuração base e do sistema completo; f^0 representa o vetor de fluxo de potência dos caminhos existentes na configuração base e são compostos de elementos f_{ij}^0 ; f' é o vetor de fluxo de potência dos novos caminhos candidatos e são compostos de elementos f'_{ij} ; n_{ij}^0 é o número de circuitos existentes na configuração base; n_{ij} número de novos circuitos adicionados. Note que neste modelo os fluxos nas linhas serão diferentes em um determinado caminho $i-j$, caso contenha dois tipos de linha, existentes e adicionadas durante o processo iterativo.

A grandeza Ω_1 representa o conjunto de caminhos onde existe linha na configuração base; Ω representa o conjunto de caminhos onde podem ser adicionadas novas linhas; Ω_3 representa o conjunto de barras que fazem parte da configuração base, isto é, as barras que não estão ilhadas; θ_j é a magnitude do ângulo da tensão das barras existentes na configuração base, isto é, para as barras que pertencem a Ω_3 .

2.2.5. Modelo Linear Disjuntivo

O modelo DC apresenta uma estrutura de problema de programação não-linear inteiro misto. Entretanto, é possível transformar este modelo em um problema equivalente, cuja formulação matemática corresponde a um “modelo linear”.

Na maioria das vezes é possível transformar um problema não-linear quadrático com variáveis binárias e reais, num problema linear com variáveis binárias e reais. Para isso, utiliza-se uma transformação que permite desmembrar os termos quadráticos em relações lineares. Este processo é obtido inserindo-se ao problema um parâmetro M de valor elevado.

Proposto por Granville (GRANVILLE E PEREIRA, 1985), Sharifnia (SHARIFNIA E AASHTIANI, 1985) e Villasana (VILLASANA, 1984), de forma independente, este modelo

chamado de linear disjuntivo é um problema equivalente, cuja solução ótima é a mesma do modelo DC (BINATO, 2000).

2.2.5.1. Formulação Matemática do Modelo Linear Disjuntivo

O modelo linear disjuntivo para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão assume a seguinte forma:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} \sum_{s=1}^{ns} y_{ij}^S + \alpha \sum_{k \in \Gamma} r_k \quad (2.55)$$

s.a.

$$S^S \cdot f^S + S^0 f^0 + g + r = d \quad (2.56)$$

$$f_{ij}^0 - \gamma_{ij} \cdot n_{ij}^0 \cdot (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.57)$$

$$f_{ij}^S - \gamma_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) \leq M \cdot (1 - y_{ij}^S) \quad S = 1, \dots, ns \quad \forall (i, j) \in \Omega \quad (2.58)$$

$$f_{ij}^S - \gamma_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) \geq -M \cdot (1 - y_{ij}^S) \quad S = 1, \dots, ns \quad \forall (i, j) \in \Omega \quad (2.59)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \cdot \overline{f_{ij}} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.60)$$

$$|f_{ij}^S| \leq y_{ij}^S \cdot \overline{f_{ij}} \quad S = 1, \dots, ns \quad \forall (i, j) \in \Omega \quad (2.61)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (2.62)$$

$$f_{ij}^0 \quad \text{Irrestrito} \quad (2.63)$$

$$f_{ij}^S \quad \text{Irrestrito} \quad (2.64)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (2.65)$$

$$y_{ij}^S \quad \text{Binário} \quad \forall (i, j) \in \Omega_T \quad (2.66)$$

Neste modelo, y_{ij}^S é uma variável que indica a adição ($y_{ij}^S = 1$) ou não ($y_{ij}^S = 0$) de uma linha de transmissão no caminho i-j. Neste caso, o número de linhas adicionadas no caminho i-j é representado por: $n_{ij} = \sum_{S=1}^{ns} y_{ij}^S$. A notação ns representa o número de linhas que podem ser adicionadas no caminho i-j; f^S é o vetor de fluxo de potência dos caminhos candidatos e são compostos de elementos f_{ij}^S ; S^S matriz de incidência nó ramo transposta ampliada com uma

coluna para cada circuito candidato, já que cada linha de transmissão candidata está representada por uma variável binária.

O conjunto de restrições (2.56) contém n_b equações que representam a LKC, sendo n_b o número de barras do sistema.

O conjunto de restrições (2.57) representa a LKT para os circuitos existentes na configuração base, uma equação para cada caminho em que exista circuito na configuração base. Caso existam nl_0 caminhos com circuitos na configuração base, a matriz S^0 será de dimensão $(nl_0 \times n_b)$. Deve-se observar que, se um caminho apresentar vários circuitos na configuração base, essa informação será armazenada em uma única coluna da matriz S^0 .

O conjunto de restrições (2.58) e (2.59) que representa a LKT para cada circuito candidato a adição, realmente, podem ser representadas na forma compactada:

$$\left| f_{ij}^S - \gamma_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) \right| \leq M \cdot (1 - y_{ij}^S) \quad (2.67)$$

Assim, por exemplo, caso seja possível adicionar até cinco circuitos em um caminho i-j, então, devem existir cinco restrições do tipo (2.67), porque cada circuito candidato à adição é considerado separadamente como uma variável binária. Portanto, a matriz de incidência nó-ramo S^S deverá ter uma dimensão muito maior que a matriz S^0 . A mesma observação é válida para as dimensões dos vetores f^S e f^0 .

É fácil verificar que a relação (2.67) representa a LKT para cada circuito binário candidato à adição. Caso seja adicionado um circuito no caminho i-j, isto é, a variável y_{ij}^S assumo o valor 1 na restrição (2.67), verifica-se facilmente que:

$$\left| f_{ij}^S - \gamma_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) \right| \leq 0 \Rightarrow f_{ij}^S - \gamma_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.68)$$

Por outro lado, se não ocorrer a adição de um circuito no caminho i-j, y_{ij}^S deve assumir o valor zero. Então, a restrição (2.67) se transforma na relação:

$$\left| f_{ij}^S - \gamma_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) \right| \leq M \quad (2.69)$$

Esta restrição é trivial e sempre verdadeira, se o parâmetro M for muito grande.

Ao comparar o modelo linear disjuntivo em relação ao modelo DC não-linear convencional percebe-se que as principais desvantagens são: o aumento da dimensão do problema com a introdução de variáveis binárias (no modelo DC podem ser usadas as variáveis inteiras n_{ij}) e a escolha ou determinação do parâmetro M para cada restrição, que passa a ser um parâmetro que complica a solução do modelo.

A principal vantagem está relacionada com a modelagem linear que possibilita o desenvolvimento de algoritmos adequados, com propriedades de convergência interessantes do ponto de vista teórico ([BINATO, 2000](#)).

Capítulo 3

Controladores FACTS

Neste capítulo são apresentados os modelos de controladores FACTS, sendo abordados pontos relevantes como suas características e seus tipos. Esses equipamentos estáticos abrangem um conjunto de equipamentos cuja função é atuar sobre alguns parâmetros do sistema para controlar o fluxo de potência e, desta forma, permitir uma melhor utilização do sistema de energia elétrica. Dentre os controladores FACTS, este estudo trata, com mais detalhes, os dispositivos de compensação série e os transformadores defasadores.

3.1. Introdução

Na era atual, são grandes os desafios das empresas do setor elétrico para produzir e fornecer, de maneira eficiente e segura, energia para seus consumidores. As principais barreiras a serem superadas são: o rápido crescimento da demanda, a infra-estrutura inadequada, a obrigação de equilibrar crescimento de energia com proteção ambiental, a reestruturação, a desregulamentação e a falta de investimentos ([REED, PASERBA E SALAVANTIS, 2003](#)). Esse conjunto de fatores contribui para que o sistema existente atue de forma diferente do que havia sido planejado e, como consequência, existe a necessidade de se adotar novas estratégias para sua operação e planejamento.

A complexidade da operação e planejamento de um sistema de potência se deve, em grande parte, a problemas relacionados com o sistema de transmissão, que tem como função prover a interligação entre áreas de maneira eficiente e flexível e, fazer com que a potência gerada chegue aos consumidores de forma contínua.

As linhas de transmissão estão sujeitas aos limites térmicos e/ou de estabilidade, que restringem o nível de potência que pode ser transmitido com segurança. Tais limites criam pontos de congestionamento na rede de transmissão. Esses pontos não são fixos; eles se modificam de acordo com as alterações nos fluxos de potência resultantes do despacho de geração, das características da carga e das contingências (WATANABE ET AL., 1998). Portanto, torna-se cada vez mais importante controlar o fluxo de potência nas linhas de transmissão, para direcioná-los para regiões que possuam capacidade ociosa de carregamento, aliviando, assim, as regiões de sobrecarga.

Os problemas gerados pela presença desses pontos de congestionamento no sistema de transmissão são: baixa capacidade de carregamento, necessidade de redespacho da geração, capacidade extra de geração ou importação de energia, pontos de operação não-econômicos (NILSON E BAHRMAN, 1994). Além disso, as incertezas e os custos de investimentos no sistema também contribuem para a falta de capacidade de transmissão de energia.

Buscam-se soluções alternativas para o problema de suprimento elétrico, através de inovações tecnológicas na área de transmissão de energia elétrica a fim de aumentar a capacidade de transmissão e melhorar o controle do sistema existente tornando-o mais aproveitável, tendo em vista a necessidade de maior eficiência na gestão dos sistemas elétricos.

Os planejadores e operadores trabalham com sistemas cada vez mais dinâmicos e com menor margem operacional, conseqüentemente, os sistemas de potência precisam ter uma maior flexibilidade para interagir com a maior diversidade dos padrões de geração e carga. Embora o conceito de flexibilidade seja bastante geral, no que diz respeito aos sistemas elétricos é definido como: “a habilidade dos sistemas de potência em se adaptarem rapidamente a novas circunstâncias, de modo a operarem permanentemente da melhor forma possível” (CAVALIERI, 2001) (PIN, 2004).

Neste sentido, a aplicação de novos dispositivos desenvolvidos com os avanços da eletrônica de potência, os chamados controladores FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) vêm ao encontro deste novo cenário que se apresenta para o setor elétrico.

3.2. Controladores FACTS

Equipamentos FACTS começaram a ser implementados a partir do final da década de 60, contudo, o acrônimo FACTS surgiu na década de 80 quando Narain Hingorani publicou seu trabalho com a finalidade de propor o uso da eletrônica de potência para o controle de parâmetros dos sistemas de potência em corrente alternada ([HINGORANI, 1988](#)).

Pode-se dizer que FACTS é uma filosofia (ou conceito tecnológico) de transporte de energia elétrica por sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada, que permite novas estratégias de operação e controle dinâmico dos sistemas.

Esses controladores estáticos abrangem um conjunto de equipamentos cuja idéia principal é atuar sobre os parâmetros da rede para controlar: o nível de tensão e o fluxo de potência (ativa e/ou reativa), eliminando os problemas causados por fluxo em malha e pelo fluxo paralelo, ambos não desejáveis. Isto é feito através de alterações nas características da rede como a impedância aparente, as amplitudes e os ângulos de defasagem entre as tensões terminais das redes de transmissão.

O fluxo de potência em rede CA segue as leis de Kirchhoff, também conhecido como fluxo livre. A diferença entre o fluxo livre e o fluxo desejado é chamada de fluxo de malha. Em outras palavras, os fluxos de malha são aqueles que se formam entre dois sistemas interligados por uma malha fechada, mesmo que sejam capazes de suprir sua própria carga, fazem com que o sistema seja subutilizado ([WATANABE ET AL., 1998](#)).

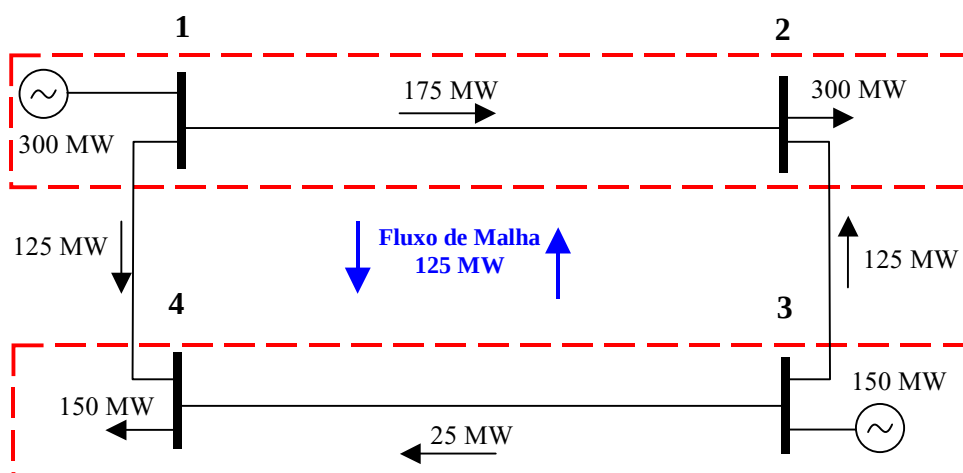


Figura 3.1. Fluxo de malha. (TARANTO, PINTO E PEREIRA, 1992).

Na figura 3.1 tem-se um exemplo de problema de fluxo de malha. O gerador de 300MW na barra 1 fornece 175MW de carga para a barra 2 e 125MW de carga para a barra 4. Algo semelhante ocorre com o gerador da barra 3. Se o gerador da barra 1 e a demanda na barra 2 forem de uma mesma empresa, percebe-se que a empresa não pode transmitir os 300 MW gerados diretamente para a demanda na barra 2. Assim, aparece uma maior dependência entre as empresas, como mostra a figura 3.1.

Fluxos paralelos são aqueles, que mesmo fazendo parte da transmissão normal de potência entre duas companhias, afetam regiões não desejáveis do sistema interligado (WATANABE ET AL., 1998).

Na figura 3.2, o fluxo de potência entre as barras A e B caminha por duas rotas, uma direta e outra passando por C.

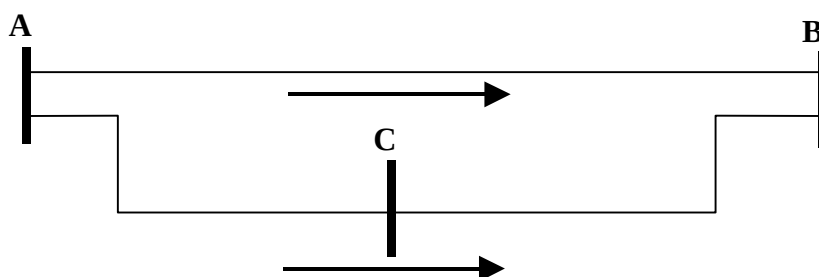


Figura 3.2. Fluxo paralelo. (TARANTO, PINTO E PEREIRA, 1992).

O cálculo do fluxo de potência é de vital importância nos estudos de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. O objetivo do cálculo de fluxo de potência, em condições normais, é determinar as características de operação em regime permanente do sistema elétrico (geração – transmissão – distribuição) para um dado conjunto de barras de carga e de geração. A solução obtida deve fornecer informações sobre a magnitude e ângulo das tensões, os fluxos de potência ativa, reativa e as perdas ([ARRILLAGA E ARNOLD, 1991](#)).

Em um sistema de potência, a aplicação de um dispositivo de controle está relacionada diretamente às necessidades de reforço do sistema para alcançar determinados objetivos de desempenho ([FARDANESH, 2004](#)).

Com a presença desses controladores o sistema se torna mais eficiente devido a:

- Um maior controle sobre o fluxo de potência de modo a direcionar os fluxos para rotas predefinidas;
- Aumento do desempenho das linhas de transmissão;
- Redução de fluxos de malha;
- Operação com níveis seguro de carga, isto é, sem sobrecargas;
- Amortecimento das oscilações do sistema;
- Melhoria da confiabilidade do sistema ao limitar os efeitos das falhas no sistema e equipamentos ([ABB, 2002](#)).

Quando comparados com os equipamentos eletro-mecânicos, os controladores FACTS apresentam a vantagem de serem compactos, de baixa manutenção e de rápida resposta, de fácil deslocamento e instalação.

A desvantagem de alguns controladores FACTS se encontra no elevado custo. Um exemplo é o controlador unificado de fluxo de potência (Unified Power Flow Controller - UPFC), um dos equipamentos da família FACTS mais promissores, pois podem controlar, de forma individual ou juntos, três parâmetros básicos ([tensão, impedância e ângulo entre](#)

tensões) do fluxo de potência para transmissões em corrente alternada. Entretanto, exige um capital elevado para ser instalado, não podendo ser instalado em todas as linhas de transmissão (AN E GEDRA, 2002). Esses equipamentos se encontram em fase experimental, com pesquisas consumindo alguns milhões de dólares.

Os controladores FACTS possuem diversas aplicações dentre as quais podem ser destacadas: o despacho econômico, o fluxo de potência ótimo AC/DC e o gerenciamento do congestionamento da transmissão.

No que diz respeito à função dos componentes eletrônicos, os controladores FACTS podem ser classificados em chaveados, controlados e avançados. Uma outra forma de classificação seria dividi-los em dois grandes grupos: os compensadores ligados em derivação à rede e os compensadores ligados em série.

A classificação que se apresenta a seguir foi proposta por Gyugyi (SONG E JOHNS, 1999), que classifica esses equipamentos por gerações.

Na primeira geração de controladores estão incluídos os equipamentos que utilizam chaves semicondutoras, tais como os tiristores.

O controle das chaves semicondutoras permite o desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar alterações rápidas nas características do sistema elétrico e utilizar a energia de maneira mais eficiente e econômica (CAVALIERI, 2001).

Os equipamentos que fazem parte desta geração e estão ligados em paralelo à rede são o reator controlado a tiristor (*Thyristor Switched Reactor* - TSR), o capacitor chaveado a tiristor (*Thyristor Switched Capacitor* - TSC) e o compensador estático de reativos (*Static Var Compensator* – SVC).

Também estão incluídos nesta geração, porém, são conectados em série na rede, o compensador série chaveado a tiristor (*Thyristor Switched Series Capacitor* - TSSC) e o compensador série controlado a tiristor (*Thyristor Controlled Series Capacitor* – TCSC).

Um exemplo de equipamento da primeira geração que possui as características série e paralelo de forma integrada é o transformador defasador (*Phase Shifter – PS*) (CAVALIERI, 2001).

A segunda geração é composta por equipamentos que utilizam chaves autocomutadas tipo IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ou GTOs (*Gate Turn Off Thyristor*).

Um controlador que pode ser conectado em derivação e que pertence a esta geração é o compensador estático de reativos avançados (*Advanced Static Var Compensator - ASVC*), cuja nomenclatura mais usual é compensador estático (*Static Compensator - STATCOM*). Um exemplo de compensador ligado em série é o compensador série estático síncrono (*Static Synchronous Series Compensator - SSSC*).

A terceira geração de controladores FACTS é composta por conversores estáticos como fonte de tensão (VSC). Estes controladores não utilizam elementos passivos na compensação. O controle, tanto de ativo quanto de reativo, é feito a partir da diferença da tensão entre o VSC e a barra onde é conectado. Um equipamento representante desta geração é o controlador unificado de fluxo de potência (*Unified Power Flow Controller - UPFC*) que se caracteriza pela associação de compensadores série e em derivação. É um controlador versátil, pois consegue controlar, individualmente ou de forma combinada, três parâmetros que interferem no fluxo de potência: tensão, impedância de transferência e ângulo de transmissão. Desta forma, é dito ser possível controlar o fluxo de potência ativa e reativa de forma independente na linha onde o UPFC é instalado. O UPFC é uma combinação do STATCOM (na conexão em derivação) e o SSSC (para a conexão série), que são conectados através de uma ligação em corrente contínua.

Na quarta geração, a integração dos equipamentos série e em derivação é feita em linhas diferentes. Fazem partes desta classe o controlador de fluxo de potência entre linhas (*Interline Power Flow Controller - IPFC*), o compensador estático conversível (*Convertible Static Compensator - CSC*), e outras possibilidades.

A proposta deste trabalho é procurar soluções técnicas viáveis para o problema de planejamento de sistemas de transmissão de energia elétrica. Normalmente, este problema é resolvido através da adição de linhas de transmissão no sistema. A novidade da proposta se

encontra na possibilidade de inserir na rede, além das linhas, os controladores FACTS. No caso, os compensadores séries (TSSC, TCSC e SSSC) e os transformadores defasadores. Assim, a seguir são apresentadas algumas características desses equipamentos.

3.3. Compensação Série

Os capacitores série são utilizados satisfatoriamente há muitos anos no sentido de melhorar a estabilidade e a capacidade de carga de uma rede de transmissão de alta tensão. Estes equipamentos reduzem a reatância efetiva da linha de transmissão.

A tensão inserida por um capacitor série é proporcional e em quadratura com a corrente na linha. A potência reativa gerada pelo capacitor é proporcional ao quadrado da corrente. Um capacitor série tem, então, uma ação auto-reguladora. Quando há incrementos de carga no sistema, a potência reativa gerada pelo capacitor em série também aumenta ([SONG E JOHNS, 1999](#)).

Geralmente, os impactos da compensação série em sistemas de potência são a regulação de tensão no estado transitório e a prevenção do colapso de tensão, a melhoria na margem de estabilidade transitória, o incremento da estabilidade dinâmica do sistema de transmissão de potência e o controle do fluxo de potência ([GRUNBAUM E PERNOT, 2001](#)).

O controle de potência ativa transmitida, através de uma linha de transmissão em corrente alternada, pode ser efetuado através dos seguintes parâmetros:

- Variação dos módulos das tensões terminais;
- Diferença angular;
- Variação da reatância série x_{km} .

Os módulos das tensões terminais variam somente dentro de certos limites operacionais. A diferença angular, em geral, não pode ser controlada localmente na barra, pois envolve o

ajuste dos ângulos de carga em máquinas síncronas. A compensação série controlada é utilizada em sistemas de potência com o intuito de controlar o fluxo de potência, numa linha previamente especificada, através da variação de sua reatância série.

A idéia principal na compensação série está em cancelar parte da reatância da linha por meio de capacitores série (MILLER, 1982). Portanto, os dispositivos de compensação série oferecem uma alternativa atraente para otimizar as linhas sobrecarregadas.

A seguir são apresentados os conceitos básicos de operação de três dispositivos de compensação série: compensação série chaveada a tiristor, compensação série controlada a tiristor e o compensador série estático síncrono.

3.3.1. Capacitor Série Chaveado a Tiristor - TSSC

As aplicações do capacitor série chaveado a tiristor utilizam tiristores chaveados em paralelo com um banco de capacitores em série para inserir ou remover rapidamente, partes do banco em passos discretos.

Similar ao módulo do TCSC, o TSSC difere deste pela maneira de operação. Enquanto que no TCSC é feito o controle de ângulo de disparo dos tiristores, o TSSC opera com suas válvulas apenas em dois estados: bloqueados ou em total condução.

Quando os tiristores estão bloqueados, o TSSC opera como um capacitor série convencional. Quando os tiristores estão em condução, o capacitor está fora do sistema.

O TSSC apresenta uma saída discretizada ou em degraus. Assim, de acordo com a figura 3.3, um esquema de compensação série controlada pode ser feito através de vários blocos de capacitores, sendo que uma progressão geométrica define o valor de cada bloco de capacitores, a fim de se obter de maneira otimizada, vários pontos de operação.

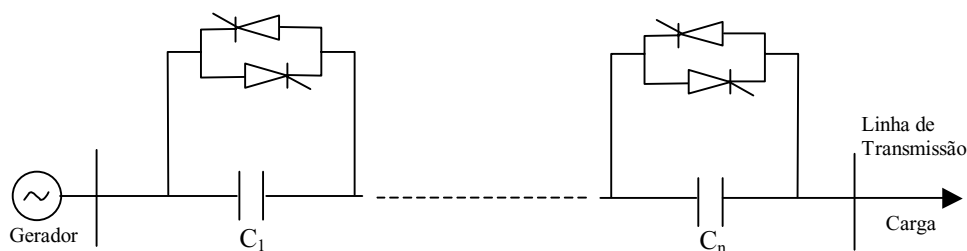


Figura 3.3. Capacitor série chaveado a tiristor.

3.3.2. Compensação Série Controlada a Tiristor - TCSC

Os compensadores séries controlados a tiristores oferecem uma alternativa forte para otimização da transmissão sobre ligações de potência. Com a compensação série, é possível aumentar a capacidade de transferência de potência de um sistema com baixo custo de investimento, se comparado com a construção de linhas de transmissão adicionais (ABB, 2002).

Provendo controle contínuo da impedância, o TCSC oferece várias vantagens sobre a instalação de capacitores séries fixos convencionais, entre as quais o controle contínuo de nível de compensação desejado e o ajuste fino do fluxo de potência dentro da rede. A configuração de um TCSC inclui um ramo indutivo controlado por tiristor em paralelo com um banco de capacitores, conforme figura 3.4. Esta combinação permite um controle suave da reatância capacitiva de frequência fundamental.

A operação do TCSC depende da combinação das impedâncias paralelas entre os reatores e capacitores do conjunto compensador. Tipicamente, a compensação série em sistema de transmissão pode chegar a 30% da impedância total da linha. Este equipamento controla o ângulo de transmissão por meio da alteração da impedância entre duas barras.

A alta velocidade de chaveamento das chaves eletrônicas que compõem o TCSC permite um aumento no fluxo de potência da linha, com capacidade de rápida adaptação das condições operacionais para casos de contingências.

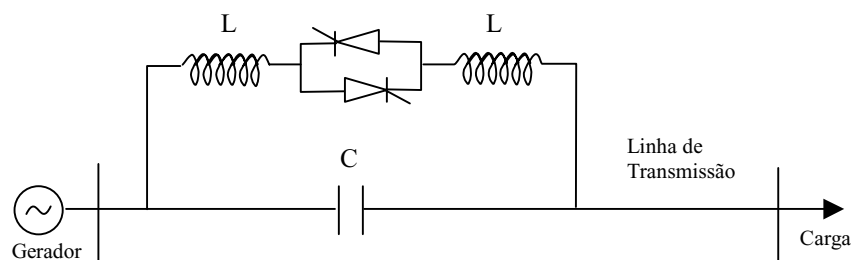


Figura 3.4. Compensador série controlado a tiristor.

No Brasil, o TCSC é encontrado na linha de transmissão que conecta os sistemas norte e sul, e exerce a função de manter a estabilidade (sincronismo) entre dois sistemas ao passo que nos Estados Unidos ele é usado para a redistribuição dos fluxos de potência (otimização do sistema). Entretanto, podem surgir pesquisas para que, num futuro não muito distante, os equipamentos instalados no Brasil, também venham a controlar o fluxo.

A linha Norte-sul entrou em operação comercial em março de 1999, tornando-se a primeira linha interligando os sistemas Norte/Nordeste (NORTE) e Sul/Sudeste/Centro-oeste (SUL). Esta união entre esses dois sistemas formou um sistema único, que passou a ser chamado de Sistema Nacional Interligado (SIN). Esta interligação pode proporcionar flexibilidade ao sistema. É, de uma maneira geral, caracterizado por se tratar de um circuito compacto em 500kV, com 1020 km.

Esta interligação parte do município de Imperatriz (Maranhão) até Serra da Mesa (Goiás), com três subestações intermediárias (Colina, Miracema e Gurupi). Conforme figura 3.5, percebe-se a presença de dois TCSC, um em cada extremidade. Ela está dimensionada para transmitir de 0 a 1300 MW em ambos os sentidos.

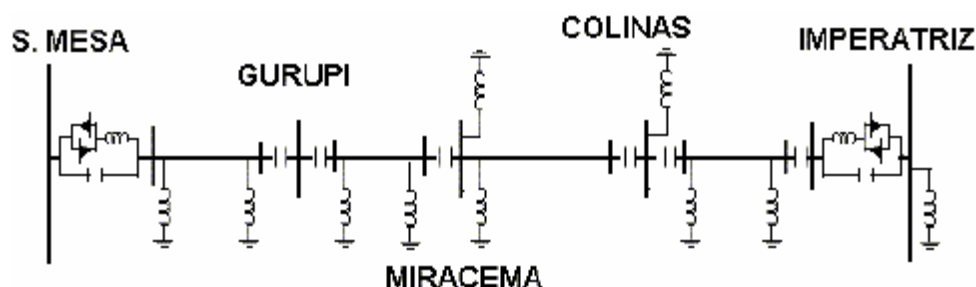


Figura 3.5. Diagrama unifilar da linha Norte-Sul.

Indiretamente, esta interligação representa um avanço tecnológico importante que é o uso de dispositivos FACTS (TCSC), amenizando o congestionamento da transmissão e tornando os sistemas de transmissão de energia elétrica mais flexíveis.

3.3.3. Compensador Série Estático Síncrono – SSSC

O compensador série estático síncrono faz parte dos controladores FACTS avançados que utilizam conversores estáticos como fonte de tensão na compensação de reativos (ou mesmo potência ativa). O SSSC possui uma fonte de tensão inversa, que gera uma tensão AC controlável sendo conectado em série com a linha de transmissão no sistema de potência. A tensão injetada está em quadratura com a corrente de linha, com uma reatância capacitiva ou indutiva que influencia o fluxo de potência na linha de transmissão.

Com a capacidade de mudar a reatância capacitiva para indutiva, o SSSC é muito efetivo controlando o fluxo de potência no sistema.

O SSSC oferece uma alternativa de compensação série na linha capacitiva. O SSSC é uma fonte de tensão síncrona que, internamente, gera uma tensão desejada de compensação série, em série com a linha e independente da corrente de linha. O SSSC pode ser considerado funcionalmente como um gerador ideal. O SSSC pode modificar tanto a potência reativa como a ativa do sistema AC, sendo simples o controle da posição angular da tensão inserida com a respectiva corrente de linha.

A figura 3.6 mostra o diagrama básico do compensador série avançado SSSC conectado com a linha de transmissão através de um transformador série ([WATANABE ET AL., 1998](#)).

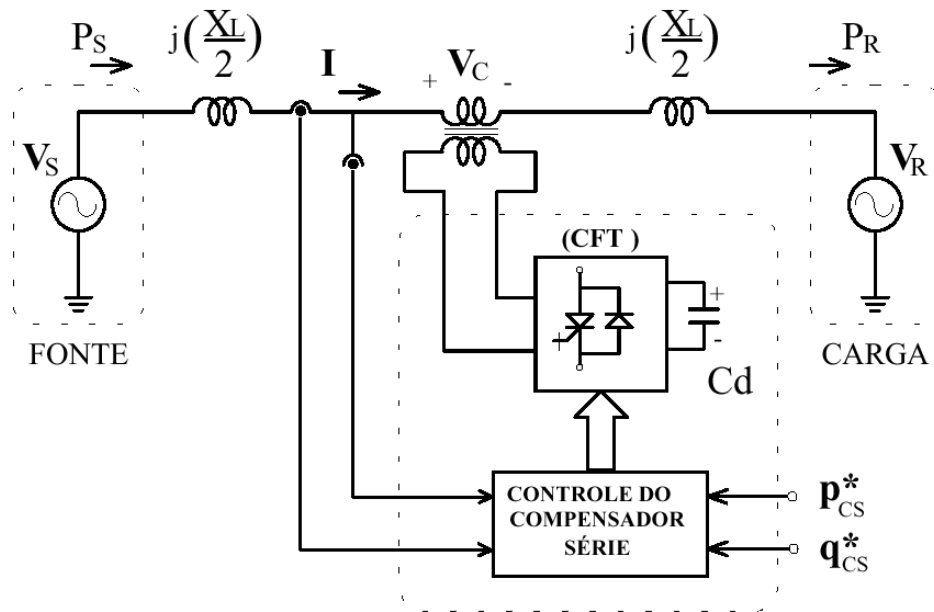


Figura 3.6. Compensador série estático síncrono.

3.4. Transformadores Defasadores

Estudos sobre a potência, através de uma linha de transmissão, mostram que o controle da reatância e do ângulo de fase são meios efetivos para se controlar o fluxo de potência em uma rede de transmissão em corrente alternada (REZA E KLING, 2002) (NORROZIAN E ANDERSSON, 1993). Um transformador defasador é um componente promissor do sistema de potência no contexto de controladores FACTS. Dada a sua habilidade de controlar o fluxo de potência ativa, o transformador defasador encontra uma boa rota para a passagem de potência entre a geração e os centros de carga (CASTRO, BATISTA E MEDEIROS PINTO, 2001).

Há uma quantia significativa de trabalhos (IRAVANI ET AL., 1994), (CASTRO, BATISTA E MEDEIROS PINTO, 2001), (HUANG, 2002), (REZA E KLING, 2002), (LIMA ET AL., 2003) e (HUANG, 2003) que investigam a aplicação de diferentes tipos de transformadores defasadores no sistema de transmissão. Estes equipamentos atuam no sentido de alterar a diferença angular da tensão entre as barras às quais estão conectadas. Este controle pode ser obtido utilizando-se várias concepções.

Normalmente, os defasadores são aplicados na regulação do fluxo de potência em regime permanente. Entretanto, a disponibilidade de tiristores de potência e de conversores para a implementação de defasadores possibilita sua utilização em outras situações.

Os defasadores controlados a semicondutores podem ser usados para (SONG E JOHNS, 1999):

- Melhoria da qualidade da energia;
- Eliminação de pequenas oscilações;
- Melhoria da estabilidade transitória.

Este tipo de transformador permite que se controle somente o fluxo de potência ativa no ramo no qual ele está inserido, de forma a ficar abaixo de um determinado limite (PATERNI ET AL., 1997). Em outras palavras, é capaz de diminuir os fluxos em linhas sobrecarregadas ou aumentar os fluxos em linhas subutilizadas, ou seja, faz um redirecionamento dos fluxos (REZA E KLING, 2002).

A figura 3.7 representa um controlador defasador. As válvulas de tiristores são associadas em antiparalelo formando uma chave bidirecional, comutada naturalmente. Estas chaves são conectadas ao enrolamento secundário de um transformador. Ao disparar o conjunto de tiristores, uma tensão fasorial é conectada em série com a linha de transmissão, através do secundário do transformador. A amplitude da tensão inserida em série pode, então, ser variada através de um controle de fase para disparar os tiristores. Um transformador, com vários “taps” no secundário, é utilizado para evitar a geração excessiva de harmônicos.

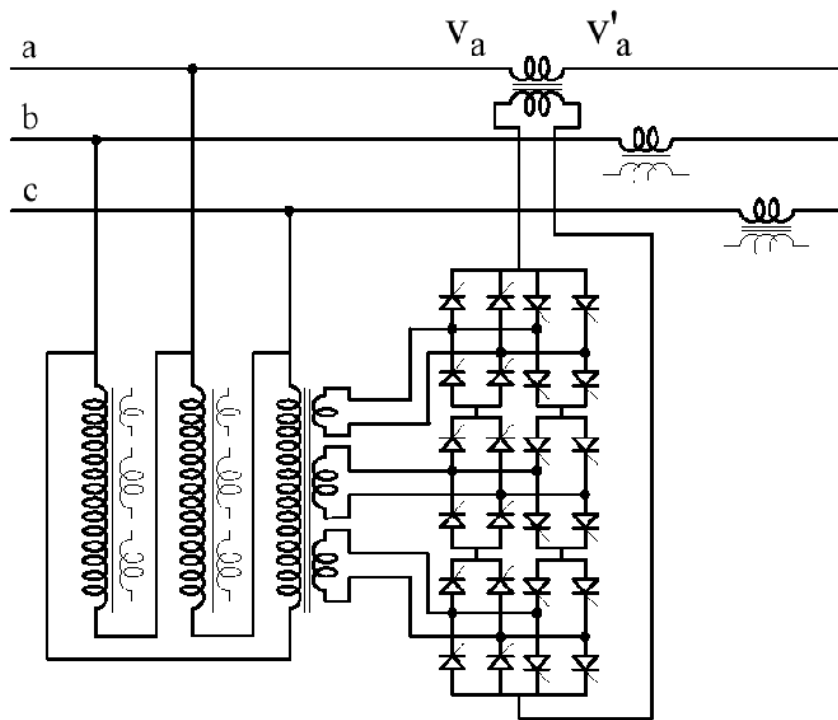


Figura 3.7. Transformador defasador.

Capítulo 4

Metaheurísticas

Este capítulo apresenta uma exposição das técnicas de solução utilizadas no problema de planejamento de sistemas de transmissão, dando ênfase à classe dos métodos metaheurísticos.

Tendo em vista que uma das metas deste trabalho é desenvolver e implementar métodos metaheurísticos para minimizar os custos de investimento na expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, são apresentadas com destaque as características gerais de três algoritmos genéticos utilizados para resolver os modelos propostos.

4.1 Técnicas de Solução Utilizadas no Problema de Planejamento

Na literatura existem diversos modelos matemáticos e uma variedade de técnicas de solução que podem ser aplicados ao problema de planejamento da expansão dos sistemas de transmissão de energia elétrica. Neste planejamento qualquer ferramenta de cálculo que utilize alguns dados iniciais do sistema como ponto de partida e realize um processo de busca com o objetivo de encontrar diferentes opções de expansão e fornecer um ou mais planos quase-ótimo são chamados de técnicas de síntese de sistemas elétricos.

De acordo com a metodologia utilizada para obtenção do plano de expansão, as técnicas de síntese podem ser agrupadas em duas categorias: métodos heurísticos ou aproximados e métodos exatos de otimização matemática. Entretanto, existem as metaheurísticas, que são uma classe de métodos aproximados projetados para resolver problemas difíceis de otimização combinatória, em que os métodos heurísticos não são efetivos nem eficientes.

4.2 Métodos Heurísticos

A enorme dificuldade ou até impossibilidade de modelar todas as variáveis envolvidas no processo, o número elevado de combinações possíveis e a complexidade do problema são fatores que dificultam a utilização de métodos exatos para a resolução do problema de planejamento. Além disso, o tempo de processamento computacional, exigido por um método exato, é elevado, o que torna impraticável a obtenção de soluções ótimas em tempos satisfatórios. Estes fatos levam as empresas de energia elétrica a utilizarem bastante os métodos *heurísticos*, também chamados de *aproximados*, nos trabalhos de planejamento.

Na grande maioria dos métodos de planejamento de sistema de transmissão o elevado esforço computacional está relacionado com a resolução de um grande número de problemas de programação linear ou não-linear. Assim, a necessidade de se obter uma solução de boa qualidade para o problema de planejamento, com um tempo de processamento computacional satisfatório conduz a aplicação de métodos heurísticos.

Um método heurístico é uma técnica de otimização baseada no senso comum (intuição) e/ou em relações matemáticas aproximadas, que de maneira sistemática propiciam encontrar soluções de um problema complexo, embora na maioria das vezes não se consiga obter um ponto ótimo global e não forneça informações sobre a qualidade da solução obtida.

As vantagens ao utilizar um método heurístico são: uma maior flexibilização para manejar as variáveis (características) do problema; geralmente apresenta mais de uma solução, ampliando a possibilidade de escolha; facilidade de compreensão em relação a métodos matemáticos complexos que são utilizados na maioria dos métodos exatos; apresentar uma estrutura simples e serem robustos (DIAZ ET AL., 1996).

Os artigos de (VILLASANA, GARVER E SALON, 1985), (GARVER, 1970), (LEVI E CALOVIC, 1991), (PEREIRA E PINTO, 1985) e (MONTICELLI ET AL., 1982) entre outros, podem ser citados como trabalhos que utilizaram métodos heurísticos para resolver o problema de planejamento de sistemas da transmissão.

Existem diferentes tipos de heurísticas, que podem ser classificadas como:

4.2.1 Métodos Construtivos

Consiste em ir adicionando, geralmente um a um, componentes individuais da solução até encontrar uma solução viável. O mais popular é o chamado algoritmo guloso, cuja estratégia é escolher, em cada passo, aquela solução que produz o máximo benefício em cada passo. O algoritmo guloso termina quando encontra uma configuração viável ou não existe uma solução vizinha melhor.

4.2.2 Métodos de Decomposição e Partição

Com a finalidade de simplificar o processo de resolução, a decomposição consiste em separar o problema em vários problemas menores, sendo a solução de um o ponto inicial do próximo, de forma que quando todos forem resolvidos tem-se uma solução do problema. A partição é ligeiramente diferente e consiste em separar um problema em vários subproblemas independentes e a solução do problema é obtida juntando as soluções parciais.

4.2.3 Métodos de Redução

Trata da redução do tamanho do problema identificando características específicas das variáveis de decisão. Neste sentido, comporta algumas características com o método de decomposição, mas o método de redução pode ainda encontrar características específicas de correlação das variáveis.

4.2.4 Manipulação do Modelo

Nesta estratégia são feitas mudanças na estrutura do modelo ideal tornando-o mais simples de resolver, isto é, são utilizados modelos relaxados do modelo ideal. Utiliza-se a solução do modelo relaxado para ajudar a encontrar uma boa solução do modelo ideal. Neste processo pode-se linearizar restrições não-lineares, relaxar a integralidade de variáveis inteiras, eliminar restrições pouco atrativas ou adicionar restrições novas e interessantes.

4.2.5 Métodos de Busca Através da Vizinhança

Estes métodos partem de uma solução inicial viável (ou às vezes inviável) e utilizando um mecanismo de transição adequado pelo espaço de busca, passa da solução corrente para uma solução vizinha. O processo termina quando todos os vizinhos são de pior qualidade. Durante o processo iterativo, sempre existe uma solução armazenada que é a melhor das soluções já visitadas. Um dos maiores inconvenientes destes métodos, na solução de problemas, é a existência de diversos pontos ótimos locais.

4.3 Métodos de Otimização Clássica

Os métodos de otimização clássica, geralmente, utilizam técnicas de decomposição matemática. Possuem a característica de serem muito eficientes em sistemas de pequeno e médio porte, pois encontram a solução ótima do problema de planejamento, porém para sistemas de grande porte apresentam problemas de convergência e de elevado esforço computacional (ROMERO, 1999). Portanto, essa técnica está restrita a pequenas instâncias devido a complexidade do problema. A técnica de decomposição de Benders usada por vários algoritmos é um exemplo de método de otimização clássica que explora a decomposição natural do problema em duas partes: um subproblema de investimento e um subproblema de operação.

4.4 Métodos Metaheurísticos

Os algoritmos metaheurísticos representam um conjunto de técnicas de otimização adaptadas para trabalhar na resolução de diversos problemas complexos e que apresentam o fenômeno da explosão combinatória, principalmente naqueles em que os métodos heurísticos não são eficientes, nem efetivos. Nas últimas duas décadas houve um crescimento espetacular desses algoritmos, os quais foram aplicados com muito sucesso para resolver diversos problemas no campo da pesquisa operacional e alguns problemas de engenharia elétrica (ROMERO, 1999).

Já foram propostos vários métodos metaheurísticos para lidar com o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão, por exemplo, o simulated annealing (ROMERO, GALLEGO E MONTICELLI, 1996) (GALLEGO ET AL., 1997), o algoritmo genético (GALLEGO, MONTICELLI E ROMERO, 1998) (BINATO E ROMERO, 1998), (PATERNI ET AL., 1999) (GERBEX, CHERKAoui E GERMOND, 2001) o Greedy Randomized Adaptive Search Procedure-GRASP (BINATO E OLIVEIRA, 2001) (BINATO, OLIVEIRA E ARAÚJO, 2001) e a busca tabu (GALLEGO, ROMERO E MONTICELLI, 2000) (DA SILVA ET AL., 2001).

Os métodos *metaheurísticos* apresentam a característica geral de que convergem para soluções ótimas ou quase ótimas, mas com grande esforço computacional..

As metaheurísticas são técnicas de otimização que fazem uso de mecanismos de melhoria da vizinhança e de estratégias inteligentes com o objetivo de criar um processo eficiente capaz de sair de um ponto ótimo local e encontrar a solução ótima global ou uma solução próxima do ótimo global de uma função de muitas variáveis independentes, analisando apenas um conjunto reduzido de um espaço de busca absurdamente grande. Portanto, uma metaheurística é uma estratégia, de alto nível, que parte de uma solução ou de um conjunto de soluções, e impõe um mecanismo inteligente de transição guiado por heurísticas em busca de possíveis soluções dentro do espaço de busca. A diferença entre as metaheurísticas está na estratégia usada por cada uma delas.

Em um método metaheurístico, para realizar o processo de busca é preciso resolver alguns problemas que são comuns a todas as metaheurísticas. A forma de resolver cada um

desses problemas depende da metaheurística utilizada, sendo necessário adaptá-la de acordo com as características do problema a ser resolvido.

De maneira geral, para implementar as metaheurísticas deve-se adotar os seguintes procedimentos:

- Especificar uma forma de representar uma proposta de solução dentro do espaço de busca do problema (codificação);
- Definir a forma de encontrar a função objetivo ou seu equivalente para cada proposta de solução;
- Descrever com minúcia a vizinhança da solução corrente;
- Determinar de forma precisa e explícita se a forma de realizar as transições deve ser realizada a partir de um único ponto ou de um conjunto de pontos;
- Definir se o processo de busca deve ser realizado através de soluções factíveis ou podem ser consideradas também soluções infactíveis.

Na otimização de problemas de planejamento da expansão de sistemas de transmissão é mais adequado considerar as propostas de solução infactíveis no processo de transição porque nesse tipo de problema as propostas factíveis representam uma parcela muito reduzida no espaço de busca do problema.

Existe um conjunto de metaheurísticas que representam um marco inicial na criação de novos algoritmos híbridos, pois combinam diferentes conceitos derivados da evolução biológica e da genética, sendo mencionados por alguns autores como algoritmos evolutivos.

Na classe dos algoritmos evolutivos, estão incluídos os algoritmos genéticos, a programação evolutiva, as estratégias evolutivas, os sistemas classificadores e a programação genética.

Os algoritmos evolutivos realizam as transições de uma solução para outra, na busca de uma solução ótima, utilizando um conjunto de soluções. Por outro lado, existem metaheurísticas que realizam as transições utilizando apenas uma solução, é o caso do simulated annealing e da busca tabu.

4.4.1 Algoritmos Evolutivos

Faz parte dos objetivos deste trabalho, o desenvolvimento e a implementação de métodos metaheurísticos baseado nos algoritmos evolutivos capazes de minimizar os custos de investimentos no planejamento da expansão do sistema de transmissão.

Os algoritmos evolutivos são baseados nos princípios e modelos da evolução biológica natural e tentam abstrair e imitar alguns dos mecanismos evolutivos para aplicá-los à resolução de problemas que requerem adaptação, busca e otimização (COELHO, 2003). Tiveram enorme aceitação por parte da comunidade científica devido a sua habilidade em resolver problemas com alto grau de complexidade, pois não exigem o conhecimento das características do problema de otimização, além de não dependerem das propriedades da função objetivo, tais como convexidade ou diferenciabilidade. O desenvolvimento de modelos computacionais inspirados nos mecanismos evolutivos caracteriza-se pela obtenção de métodos de otimização robustos.

Segundo Von Zuben (VON ZUBEN, 2002):

A maioria dos algoritmos evolutivos são procedimentos computacionais para a solução de problemas de otimização ou modelagem de processos evolutivos, resultantes da aplicação de técnicas heurísticas baseadas na seguinte seqüência básica comum: realização de reprodução com herança genética, imposição de variações aleatórias em uma população de indivíduos, promoção de competição e execução de seleção de indivíduos de uma dada população.

Nos algoritmos evolutivos, os pontos no espaço de busca são modelados através de indivíduos que interagem em um ambiente artificial. São guiados pela avaliação da função de aptidão dos indivíduos, sendo os melhores indivíduos retidos e refinados e os piores são descartados.

A forma de representar uma proposta de solução e a definição da função objetivo ou equivalente, para cada solução, são os pontos mais críticos no algoritmo evolutivo. Mas, seu desempenho também depende de um conjunto de decisões tomadas em todas as etapas de definição do algoritmo. Além disso, a atribuição de valores aos parâmetros envolvidos também influi no desempenho do processo evolutivo.

Este trabalho enfoca o algoritmo genético, um método metaheurístico que faz parte da família dos algoritmos evolutivos, cujas características serão apresentadas em detalhes na próxima seção.

4.5 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos são uma classe de algoritmos evolutivos que tiveram sua origem no início da década de 70, através dos trabalhos desenvolvidos na universidade de Michigan pelo professor John Holland e seus alunos ([HOLLAND, 1975](#)).

O professor Holland tinha duas metas: apresentar uma teoria capaz de abstrair e explicar os processos adaptativos que ocorrem nos sistemas naturais; desenvolver simulações computacionais capazes de imitar o mecanismo de evolução das espécies através da seleção natural proposto por Charles Darwin e o mecanismo de transferência de fatores hereditários dos ancestrais para seus descendentes, proposto por Gregor Mendel. Neste processo evolutivo, os indivíduos geneticamente melhores adaptados ao ambiente terão maior chance de sobreviver e de se reproduzir e, como consequência, transmitir suas características para as próximas gerações.

Os trabalhos desenvolvidos por Holland deram origem a publicação em 1975 ao livro “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”, considerado por muitos pesquisadores como a bíblia de algoritmos genéticos. Depois da publicação deste livro, a evolução pôde ser encarada como um processo de otimização e os algoritmos genéticos foram utilizados com sucesso em diversos problemas de otimização ([FONSECA, 2002](#)).

Os algoritmos genéticos utilizam um processo iterativo que emprega uma estratégia aleatória de busca e, exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperadas melhores soluções. Cada iteração é chamada de geração.

Por meio de um mecanismo de transição adequado, o algoritmo genético gerencia uma população de indivíduos na tentativa de encontrar os melhores resultados, a cada iteração. Passa de um conjunto de soluções para outro conjunto de acordo com regras de seleção e outros operadores, denominados de operadores genéticos, tais como a recombinação e a mutação. Durante o processo, sempre existe a melhor solução corrente armazenada, e chamada de incumbente. O processo termina quando a população estabiliza, indicando não ser possível encontrar indivíduos melhores. Desta forma, é encontrada uma solução subótima para o problema.

O comportamento do algoritmo genético é controlado de maneira adequada através de um conjunto de parâmetros. Segundo Goldberg ([GOLDBERG, 1989](#)) é um algoritmo robusto, eficiente e eficaz para vários tipos de problemas.

Para resolver um problema de otimização complexo, por exemplo, um problema combinatório, o algoritmo genético deve satisfazer as seguintes etapas:

- Representar adequadamente uma proposta de solução para o problema;
- Encontrar uma forma adequada para avaliar a função objetivo ou seu equivalente. As melhores propostas de solução são aquelas que apresentam funções objetivo de melhor qualidade;
- Definir o processo de seleção que norteará a estratégia de escolha das soluções candidatas com direito a participar na conformação das configurações da nova população;
- Implementar um mecanismo que permita o uso do operador genético de recombinação;
- Desenvolver um mecanismo que permita implementar o operador genético mutação. Pesquisas recentes mostram que este operador é muito mais importante do que se imaginava inicialmente;

- Especificar o tamanho da população, isto é, a quantidade de soluções candidatas que devem participar do processo a cada geração.

Caso todas as etapas citadas anteriormente sejam realizadas para um determinado problema, diz-se que foi aplicado um algoritmo genético básico.

4.5.1 Representação de uma Configuração Candidata

No algoritmo genético é necessário codificar uma configuração candidata, isto é, deve-se fazer a representação de uma configuração candidata através de uma cadeia cromossômica.

Existem três formas de representar a cadeia cromossômica (binária, inteira ou real). A codificação mais popular é a representação binária. Entretanto, quando as variáveis de decisão do problema são inteiras ou reais, a codificação binária pode apresentar problemas de desempenho. Assim, recomenda-se que a codificação seja feita de acordo com as características específicas de cada problema, já que o tipo de representação de uma solução candidata afeta o desempenho computacional do algoritmo genético ([ROMERO E MANTOVANI, 2004](#)).

4.5.2 Função Objetivo

A função objetivo mede a qualidade dos indivíduos de uma população. Entretanto, é comum o uso de uma função equivalente com a intenção de permitir uma maior diferenciação da qualidade entre os diferentes indivíduos da população. A função objetivo ou seu equivalente deve ter a capacidade de identificar as configurações de melhor qualidade, sendo seu valor utilizado para implementar o operador de seleção. Normalmente, utiliza-se o termo função de adaptação para a função objetivo verdadeira ou para um equivalente da função objetivo.

Nos problemas de engenharia relacionados com o planejamento, a população inicial geralmente possui configurações factíveis e infactíveis. Durante o processo iterativo existe a

necessidade de encontrar uma forma de contornar a configurações infactíveis que aparecem após passar pelos operadores genéticos. Duas estratégias são utilizadas para manipular as configurações infactíveis geradas: penalizar a função objetivo que contém infactibilidade ou a implementação de uma heurística para transformar em factíveis as configurações infactíveis geradas.

4.5.3 População Inicial

A escolha da população inicial afeta a qualidade da solução e o número de gerações necessárias para encontrar uma boa solução. Isto ocorre porque as características das soluções candidatas que pertencem a população inicial são transferidas para seus descendentes nas gerações subseqüentes ([SAIT E YOUSSEF, 1999](#)).

Para alguns problemas reais, a população inicial pode ser gerada de forma aleatória e encontrar soluções ótimas ou quase ótimas. Mas, nos problemas de engenharia, como o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão, convém utilizar propostas alternativas como gerar uma população inicial utilizando um processo aleatório controlado ou um algoritmo heurístico construtivo rápido e eficiente.

4.5.4 Ciclo Geracional

É o mecanismo cíclico composto pelos operadores de seleção, recombinação e mutação que permitem encontrar as configurações da nova geração a partir da população corrente.

4.5.4.1 Seleção

A seleção é o operador genético que permite comparar e selecionar dentro da população corrente as soluções candidatas que participarão da formação da nova geração. O processo de

seleção tem como objetivo destacar os melhores indivíduos de uma população na esperança de obter descendentes mais bem adaptados que seus antecedentes.

Na literatura existem diversos tipos de seleção, dentre os quais se destacam: seleção proporcional, seleção determinística, seleção estocástica de resíduo, seleção usando ordenamento e seleção por torneio.

A seleção por torneio é uma das formas mais utilizadas devido a sua eficiência e simplicidade na implementação de problemas de maximização ou minimização. Essa seleção preserva melhor a diversidade da população porque a escolha é realizada apenas comparando o valor da função objetivo. Embora seja muito simples, a seleção por torneio é muito atrativa devido ao fato de ser computacionalmente muito rápida e eficiente.

4.5.4.2 Recombinação

Após serem escolhidas pelo mecanismo de seleção, as configurações devem ser submetidas à recombinação.

A recombinação é considerada o principal operador de um algoritmo genético, pois procura simular, através de algumas regras, o processo de troca de material genético entre seus cromossomos (diversidade genética), gerando um novo indivíduo na população. Em outras palavras, busca simular o fenômeno genético do *crossing over*.

Existem diversos tipos de recombinação, sendo os mais conhecidos: a recombinação de um ponto, de dois pontos, multipontos e uniforme. Na recombinação de um ponto, escolhe-se, de forma aleatória, um ponto de recombinação que servirá de elo de duas novas soluções candidatas, cada qual contendo uma parcela de cada uma das topologias geradoras.

Um número gerado aleatoriamente, comparado com uma taxa de recombinação, determina se duas configurações selecionadas serão submetidas à recombinação.

4.5.4.3 Mutação

O operador de mutação busca restituir a perda de material genético ou inserir material genético inexplorado com o intuito de evitar a convergência prematura do algoritmo.

Na implementação da mutação também existe a necessidade de gerar números aleatórios introduzindo, novamente, um componente aleatório na implementação do algoritmo genético. Uma taxa de mutação indica se uma determinada posição no cromossomo irá se modificar.

4.5.5 Critério de Parada

Há diversos tipos de critérios de parada que podem ser utilizados para finalizar um algoritmo genético, dentre eles podem ser citados:

- Quando for executado um número especificado de gerações;
- A incumbente não melhora durante um número especificado de gerações;
- A incumbente assume um valor pelo menos de igual qualidade que um valor previamente especificado;
- As configurações da população ficam muito homogêneas, isto é, as configurações são muito parecidas e praticamente já não existe evolução;
- Usando um critério que depende do tipo de problema analisado.

Deve-se salientar que pode ser utilizado mais de um critério de parada ([ROMERO E MANTOVANI, 2004](#)).

4.5.6 Parâmetros de Controle

A qualidade de um algoritmo genético está relacionada com a maneira de se escolher a população inicial, com o critério de parada e com a definição dos parâmetros de controle. São considerados parâmetros de controle no algoritmo genético o tamanho da população, a taxa de recombinação e a taxa de mutação.

Capítulo 5

Modelos Matemáticos Usando Controladores FACTS

É de grande importância para o setor elétrico o desenvolvimento de novos modelos e estratégias que incluam novos equipamentos, para que se possa fazer o planejamento e a análise do sistema de transmissão. Neste contexto, este trabalho visa mostrar a possibilidade de instalar transformadores defasadores e dispositivos de compensação série no modelo matemático que representa o problema de planejamento da transmissão. Desta forma, neste capítulo tem-se a finalidade de apresentar novos modelos matemáticos para serem aplicados ao problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica.

Neste trabalho propõe-se alocar, de maneira otimizada, os transformadores defasadores e/ou dispositivos de compensação série com o objetivo de melhorar o nível de utilização do sistema e, conseqüentemente, obter uma redução do custo de investimentos em novas linhas de transmissão. Esses equipamentos tornam possível o redirecionamento dos fluxos de potência ativa. Entretanto, vale ressaltar que a proposta considera somente o planejamento estático, isto é, a alocação dos controladores FACTS é feita em um único ano horizonte de planejamento.

5.1. Introdução

Diante da importância do problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão e da dificuldade em solucioná-lo, faz-se necessário desenvolver, de maneira hábil e eficaz, modelos matemáticos e técnicas para que possam ser aplicados na sua solução.

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento e a implementação de novos modelos matemáticos com a presença de transformadores defasadores e/ou dispositivos de compensação série, para resolver o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão. Em outras palavras, é analisada a possibilidade de incorporar linhas de transmissão e dispositivos direcionadores de fluxo de potência ativa na rede, como parte do processo de expansão do sistema elétrico.

Muitas vezes, as linhas de transmissão utilizam somente uma fração de seus limites devido a restrições que cercam a rede. Nos sistemas de transmissão interligados por linhas paralelas, a potência transferida é parcelada entre as linhas. Porém, uma vez definidos os valores das gerações e demandas nas barras, o fluxo de potência se divide entre os circuitos de acordo com suas impedâncias e as duas leis de Kirchhoff. Este fato impede o controle do fluxo, como consequência, a potência entregue por cada uma das linhas não é, necessariamente, a potência desejada. Assim, em algumas circunstâncias pode ocorrer uma circulação indesejável de blocos de potência através de linhas paralelas ocasionando sobrecarga em alguns trechos do sistema e subutilização em outros ([MUTALE E STRBAC, 2000](#)) ([PEREIRA, 2000](#)) ([PIN, 2004](#)).

A limitação do fluxo de potência em uma linha de transmissão está relacionada aos seguintes fatores: estabilidade, limites de tensão, limites térmicos nas linhas ou equipamentos, e fluxos de malha ou fluxos paralelos.

Portanto, percebe-se a necessidade de buscar novas estratégias para o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão que considerem nos modelos de planejamento a utilização mais eficiente das linhas de transmissão, através do controle do fluxo de potência.

No planejamento de expansão da transmissão, pelo método tradicional, presume-se uma rede inflexível, operando de modo preventivo. Havendo necessidade de se redirecionar o fluxo de potência, a metodologia mais comum é a mudança do padrão de geração como, por exemplo, aumentar a geração em alguns locais e diminuir em outros. Isso incorre em custos de geração e também em problemas relacionados com a estabilidade. Por outro lado, os controladores FACTS trazem uma flexibilidade no controle do fluxo de potência ativa sobre o sistema.

Com a implementação de controladores FACTS, mais energia chega aos consumidores com um mínimo impacto ambiental, com custo de investimento reduzido, se comparado à alternativa de construir novas linhas de transmissão e usinas para geração de energia que iriam requerer mais tempo para entrar em operação ([ABB, 2002](#)).

Uma quantia significativa de trabalhos tem sido publicada a respeito da presença de controladores FACTS no sistema com o intuito de melhorar sua operação. Esse tipo de estratégia é chamada de planejamento da operação. Alguns trabalhos que realizaram este tipo de planejamento são citados a seguir.

Watanabe ([WATANABE ET AL., 1998](#)) apresenta em seu trabalho um tutorial sobre esses controladores. Mostra e discute também a importância da localização desses equipamentos no sistema.

Em Taranto ([TARANTO ET AL., 1992](#)), é apresentada uma metodologia para representar dois controladores FACTS, os transformadores defasadores e a compensação série no problema de despacho econômico.

Em Paterni ([PATERNI ET AL., 1999](#)), é estudado a influência de um conjunto de transformadores defasadores na rede francesa com o objetivo de reduzir o custo de geração e aumentar o carregamento da rede, sendo utilizado um algoritmo genético para encontrar a melhor localização desses equipamentos na rede.

O trabalho de Gerbex ([GERBEX, CHERKAOUI E GERMOND, 2001](#)) tenta maximizar o carregamento do sistema através da alocação de múltiplos controladores FACTS. Mostra que o uso simultâneo de vários tipos de controladores é a solução mais eficiente para aumentar o carregamento do sistema. Para otimizar a alocação desses equipamentos também foi utilizado um algoritmo genético.

Existem referências que abordam a melhor localização desses equipamentos. Os trabalhos de Sing ([SING E DAVID, 2001](#)) e Orfanogianni ([ORFANOIANNI E BACHER, 2003](#)) utilizam diferentes índices de sensibilidade para mostrar as melhores opções para alocação dos controladores FACTS para reduzir o fluxo de potência ativa sobre uma linha específica ou as perdas totais do sistema, com a diminuição dos problemas de fluxo de malha.

Em Oliveira ([OLIVEIRA E MARANGON LIMA, 1998](#)) é apresentado um caso especial onde os controladores FACTS são usados para otimizar um problema de coordenação hidrotérmica.

Com a adição destes controladores no sistema as vantagens conseguidas são um menor número de linhas de transmissão que devem ser adicionadas no sistema e, em consequência, uma redução do custo de investimento na expansão, o aumento da confiabilidade e da segurança no sistema, a redução da operação, a melhoria da estabilidade do sistema e o aumento da capacidade de transferência ([TARANTO, PINTO E PEREIRA, 1992](#)).

Nesta seção são apresentados novos modelos matemáticos para o problema de planejamento da expansão da transmissão, com capacidade de alocar linhas de transmissão, transformadores defasadores e/ou dispositivos de compensação série. O motivo de incluir esses dois últimos equipamentos no modelo é devido ao fato de estarem entre os mais estudados, quando se trata de controle do fluxo de potência.

Não serão levados em conta os problemas de estabilidade, os níveis de tensão, os critérios de segurança e as perdas do sistema. Assim, os transformadores defasadores e os dispositivos de compensação série serão usados como parâmetro da rede e controle dos fluxos de potência, eliminando ou atenuando os problemas causados por um fluxo de malha ou fluxo paralelo.

5.2. Modelos Matemáticos com Controladores FACTS

Normalmente, no planejamento estático da expansão do sistema de transmissão os componentes do sistema que devem ser modelados e definidos corretamente na formulação matemática são as linhas de transmissão, as unidades de geração e de carga, os transformadores, os fluxos, as reatâncias e os ângulos das barras. Entretanto, nada impede de que sejam inseridos novos equipamentos.

Em Miasaki ([MIASAKI, 2002](#)) é proposto um modelo que adiciona transformadores defasadores no planejamento da expansão da transmissão, sendo que neste caso foi usado um modelo mais simplificado e para resolvê-lo utiliza um algoritmo heurístico de duas fases. A primeira fase encontra a solução ótima do modelo de transporte por meio da alocação de circuitos na configuração base para resolver o problema de capacidade de transmissão. Com o auxílio dos resultados obtidos na etapa anterior, procura-se a alocação ótima dos transformadores defasadores na segunda fase. Para isso faz alterações no modelo DC. Um algoritmo *branch-and-bound* e de programação linear são utilizados para resolver os modelos da primeira e segunda fase, respectivamente.

Tendo em vista que há pouca literatura que considera os controladores FACTS como um componente do problema de planejamento da transmissão, este trabalho propõe novos modelos que empregam controladores FACTS, com o propósito de contribuir para a geração de novas idéias nesta área pouco explorada. Esses controladores podem fornecer as correções necessárias de funcionalidade da transmissão para utilizar completamente os sistemas de transmissão existentes ([VERMA, SRIVIDYA E DEKA, 2004](#)).

Em uma linha de transmissão, os controladores FACTS controlam a impedância da linha, as tensões terminais e/ou os ângulos de defasagem entre as tensões terminais.

Deve-se salientar que nos modelos propostos são ignorados o efeito da resistência na linha e as perdas nas equações de fluxo de potência na hipótese que a resistência de uma linha é muito menor em magnitude que a sua reatância.

5.2.1. Modelo Matemático com Transformadores Defasadores

Como mencionado anteriormente, os transformadores defasadores têm a capacidade de redirecionar o fluxo de potência ativa no sistema elétrico. Essa habilidade permite que o sistema tenha maior capacidade de transmissão, porque permite que os circuitos que se encontram operando abaixo de seus limites possam ter o seu fluxo de potência aumentado.

O modelo matemático que representa o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão tem como objetivo minimizar os custos de investimento e de operação do sistema, e está sujeito a um conjunto de restrições operacionais como equações da rede, limites de fluxos no circuito e limites de geração.

Embora seja considerado ideal para representar o problema de planejamento, o modelo DC tradicional não permite a adição de transformadores defasadores no sistema. O modelo matemático proposto está baseado no modelo DC convencional e admite a possibilidade de serem adicionados transformadores defasadores de impedância desprezível, em série com uma linha de transmissão. O modelo proposto apresenta um grau de não linearidade maior que o modelo DC e será chamado de modelo PS.

O ângulo de defasagem entre as tensões terminais de uma linha de transmissão pode ser alterado com a instalação de transformadores defasadores. Portanto, as equações do fluxo de potência (lei de Kirchhoff para tensão) são afetadas quando esses equipamentos são instalados.

A instalação de transformadores defasadores em uma ou mais linhas pode ser representada como uma combinação dos ângulos das barras com o ângulo fornecido pelo equipamento.

Quando os transformadores defasadores são considerados no problema de planejamento de sistemas de transmissão, pode-se escrever o modelo matemático através do conjunto de equações e inequações apresentado a seguir:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \sum_{(i,j)} d_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \delta_{ij} + \alpha \sum_{k \in \Gamma} r_k \quad (5.1)$$

s.a.

$$S \cdot f + g + r = d \quad (5.2)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot (\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij} \cdot \delta_{ij}) = 0 \quad (5.3)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (5.4)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (5.5)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (5.6)$$

$$0 \leq r_k \leq d_k \quad (5.7)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (5.8)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (5.9)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (5.10)$$

$$\varphi_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (5.11)$$

$$\delta_{ij} \quad \text{Binário} \quad (5.12)$$

A função objetivo (5.1) corresponde ao custo de investimentos. As duas primeiras parcelas se referem, respectivamente, ao custo pela inclusão das linhas de transmissão e dos transformadores defasadores. O último termo refere-se a uma penalidade da configuração sob análise, devido a presença de corte de carga. O parâmetro d_{ij} representa o custo fixo do transformador defasador no caminho i-j.

Neste modelo, o corte de carga é representado pelo vetor r e, as variáveis desse vetor vão permitir que o problema possa ser resolvido por um algoritmo genético.

O parâmetro α transforma o corte de carga em valores financeiros. A definição deste parâmetro é um fator crítico, pois pode levar ao sucesso ou fracasso de um algoritmo genético. Um ajuste ruim deste parâmetro pode causar convergência prematura do algoritmo e pode produzir uma solução pobre.

O conjunto de restrições (5.2) corresponde à primeira Lei de Kirchhoff (para correntes).

No conjunto de restrições (5.3) aparece a função do transformador defasador cuja inclusão no sistema permite modificar as relações da segunda Lei de Kirchhoff (para tensão). A presença do transformador defasador permite que os fluxos de potência ativa no sistema sejam melhores distribuídos, pois esse equipamento redireciona os fluxos de uma maneira mais efetiva. O símbolo φ_{ij} representa o ângulo do transformador defasador no caminho i-j.

A presença das variáveis δ_{ij} e φ_{ij} na equação (5.3) torna essa relação ainda mais não linear se comparada com o modelo DC e, portanto, mais complexa porque existe a multiplicação das variáveis n_{ij} , φ_{ij} e δ_{ij} .

O modelo PS é caracterizado como um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM), devido à presença de variáveis inteiras, binárias e contínuas e, portanto, as restrições (5.3) são não lineares.

O conjunto de restrições (5.4), (5.5), (5.6) e (5.7) se referem à capacidade de transmissão dos circuitos, aos limites das barras de geração, aos limites de circuitos adicionados em cada caminho candidato i-j e aos limites das barras de geração artificial, respectivamente. As restrições (5.8) a (5.12) são restrições próprias das características das variáveis.

Nos modelos tradicionais, uma linha de transmissão ou um transformador convencional em um caminho k-m pode ser representado pela figura 5.1.

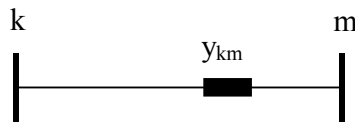


Figura 5.1: Linha de transmissão.

A figura 5.2 representa a modelagem proposta, isto é, adicionar transformadores defasadores de impedância desprezível em série com uma linha de transmissão no caminho k-m.

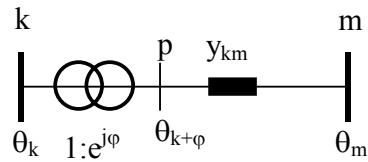


Figura 5.2: Linha de transmissão com transformador defasador.

5.2.1.1. Exemplo Ilustrativo

Um sistema com 3 barras e 3 circuitos, encontrado na figura 5.3, é utilizado como exemplo para ilustrar o efeito dos transformadores defasadores no sistema. Os dados deste sistema são mostrados nas tabelas 5.1 e 5.2:

Tabela 5.1
Dados das linhas do sistema de 3 barras.

Linha	Reatância (p.u.)	Fluxo máximo (MW)	Custo (\$)
1-2	1/3	35	3,0
1-3	1/2	40	2,0
2-3	1/2	40	2,0

Tabela 5.2
Dados das barras do sistema de 3 barras.

Barras	Geração (MW)	Demanda (MW)
1	80	-
2	-	60
3	-	10

Para avaliar o desempenho do sistema sem transformadores defasadores foi utilizado um algoritmo de fluxo de carga DC, cujo resultado se encontra representado na figura 5.3.

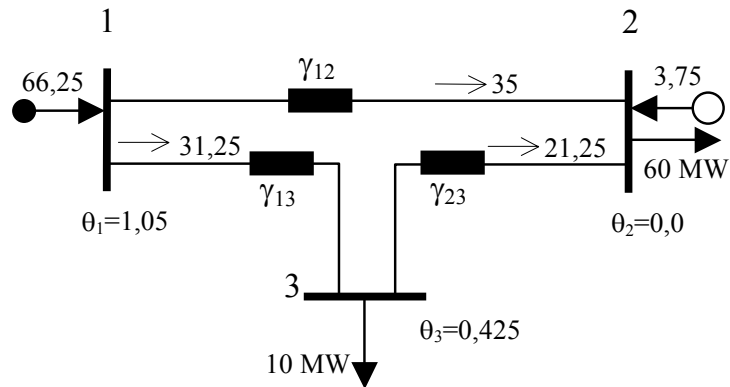


Figura 5.3: Sistema de 3 barras.

Nesta situação, o resultado encontrado indica a presença de corte de carga de 3.75 MW na barra 2. Conclui-se que o sistema não opera adequadamente e deve-se adicionar novas linhas de transmissão. Porém, observa-se que as linhas 1-3 e 2-3 estão operando abaixo de suas capacidades de transmissão. Nesse contexto, não é possível aumentar o fluxo nessas linhas de transmissão sem sobrecarregar a linha 1-2.

Uma forma bastante interessante de resolver o problema seria adicionar um defasador ideal em série com 1-3. A figura 5.4 mostra a operação do sistema elétrico ao utilizar essa estratégia.

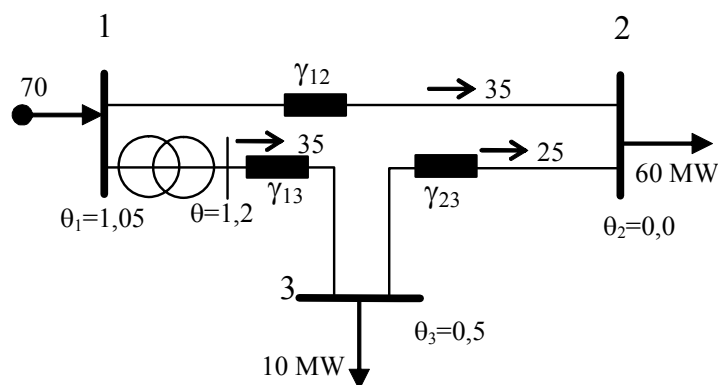


Figura 5.4: Solução do sistema com transformador defasador.

O exemplo ilustra a eficiência do modelo proposto para eliminar o corte de carga com a adição de um defasador dispensando a adição de linhas de transmissão. Neste caso, a inclusão de um defasador na linha 1-3 eliminou o corte de carga de 3,75 MW na barra 2. Portanto, com a inclusão de um defasador no caminho 1 – 3, verifica-se que o sistema opera adequadamente, isto é, sem corte de carga.

O exemplo comprova que é possível alocar transformadores defasadores para redirecionar o fluxo de potência ativa no sistema elétrico de forma a permitir a sua operação adequada. Assim, o problema de planejamento da expansão do sistema da figura 5.3 se resolve com a adição de um transformador defasador. Como mencionado anteriormente, outra opção seria adicionar novas linhas de transmissão para eliminar o corte de carga.

5.2.2. Modelo Matemático com Compensação Série

Com o intuito de analisar a possibilidade de considerar os dispositivos de compensação série como um componente candidato à adição no processo de expansão de um sistema de transmissão também é proposto um modelo matemático.

A idéia principal da compensação série está em modificar parte da reatância indutiva da linha com a inclusão de capacitores em série ou dispositivos que apresentam essas características. Neste trabalho, de maneira semelhante aos defasadores, a instalação de dispositivos de compensação série no sistema tem como objetivo obter uma melhor distribuição dos fluxos de potência ativa por meio da redução ou eliminação dos problemas de fluxo de malha e fluxo paralelo.

Em um sistema de transmissão, a transferência de potência ativa entre duas barras é inversamente proporcional a reatância indutiva série. Ao compensar a reatância indutiva série em um determinado valor, por meio de um capacitor série, há uma redução da impedância elétrica do ramo e existe a possibilidade de aumentar a transferência de potência ativa nesse caminho (ABB, 2002).

Nota-se que ao instalar um dispositivo de compensação série em uma linha de transmissão, o equipamento se comporta como uma reatância variável. É justamente através do controle dessa reatância na linha que o fluxo de potência ativa pode ser controlado (VERMA, SRIVIDYA E DEKA, 2004). Conclui-se que ao instalar dispositivos de compensação série numa linha, sua reatância não pode mais ser considerada uma constante. Para contornar esse problema é desenvolvido um modelo matemático, que admite a presença de dispositivos de compensação série e está baseado no modelo DC.

O modelo matemático proposto, que admite a presença de compensação série, será denominado de modelo SC e tem como meta minimizar os custos de investimento e de operação do sistema. É composto por uma função objetivo, que está sujeita a um conjunto de restrições operacionais. O modelo SC é um problema de otimização não-linear inteiro misto (PNLIM), formulado da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} + \sum_{(i,j)} h_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \beta_{ij} + \alpha \sum_{k \in \Omega_k} r_k \quad (5.13)$$

s.a.

$$S \cdot f + g + r = d \quad (5.14)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} (1 + \rho_{ij} \cdot \beta_{ij}) \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (5.15)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (5.16)$$

$$|\rho_{ij}| \leq \lambda_{ij} \cdot \beta_{ij} \quad (5.17)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (5.18)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (5.19)$$

$$0 \leq r_k \leq d_k \quad (5.20)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (5.21)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (5.22)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (5.23)$$

$$\rho_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (5.24)$$

$$\beta_{ij} \quad \text{Binário} \quad (5.25)$$

A equação (5.13) indica o custo de investimentos. A primeira parcela se refere ao custo considerando a adição das linhas de transmissão; a segunda parcela se refere ao custo da adição de dispositivos de compensação série. A última parcela refere-se a uma penalidade da função objetivo devido a presença de corte de carga na configuração sob análise.

O parâmetro h_{ij} representa o custo do equipamento que realiza a compensação série.

As variáveis β_{ij} são binárias e indicam a presença ou não de compensação série no circuito $i - j$; ρ_{ij} representa o valor da compensação série no caminho $i - j$.

No conjunto de restrições (5.15) está incluída a variável que representa a compensação série. Ao instalar um dispositivo de compensação série na linha, a susceptância dessa linha passa a ser uma combinação da susceptância original com a susceptância variável do equipamento.

Neste trabalho, a susceptância do equipamento é uma porcentagem da susceptância original da linha. Assim, especificou-se que a susceptância do equipamento irá variar entre $[0,7 ; 1,3]$ da susceptância original da linha. O símbolo λ_{ij} especifica uma taxa de compensação (intervalo de variação) que para este caso assume o valor de 30%.

De forma análoga ao modelo anterior, a presença da variável $\beta_{ij} \in \{0,1\}$ na equação (5.15) torna essa relação ainda mais não-linear e, portanto, mais complexa porque existe a multiplicação de quatro tipos de variáveis (n_{ij} , θ_j , ρ_{ij} e β_{ij}).

Percebe-se um aumento na complexidade do problema de planejamento da transmissão com a inclusão de dispositivos de compensação série devido a algumas considerações feitas e relacionadas a seguir:

- Há um aumento no número de variáveis do problema, as que indicam a presença do dispositivo de compensação em determinado caminho e as que indicam o valor da compensação;

- Os dispositivos de compensação operam dentro de um intervalo de compensação, limitados por uma porcentagem do valor da susceptância original da linha. Este fato restringe a região factível, dificultando a busca por uma solução;
- O fluxo de potência ativa em um circuito pode ser escrito através da equação $f_{ij} = \gamma_{ij}(\theta_i - \theta_j)$, que indica que o fluxo de potência no circuito é diretamente proporcional a susceptância no caminho $i - j$. Note que a compensação série pode modificar a susceptância no caminho $i - j$ e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de transferência de potência nesse caminho. Porém, com a adição da compensação série na equação anterior, há um aumento da não-linearidade devido ao produto da variável de compensação ρ e a variável θ . O conjunto de restrições (5.15) representa este fato.
- Para identificar as soluções infactíveis, isto é, com corte de carga, foram adicionados nas barras que possuem carga, geradores fictícios com o intuito de facilitar o processo de resolução do problema.
- Este trabalho considera a compensação série como um dispositivo de expansão do sistema elétrico e como uma variável de controle que pode ser representada como uma variação da reatância do circuito. Entretanto, para representar a compensação série no problema de fluxo de potência, utilizou-se a susceptância (inversa da reatância) do equipamento como uma variável da rede, com uma taxa de compensação λ_{ij} , sendo seus limites representados através do conjunto de restrições (5.17).

Com a finalidade de esclarecer a troca sugerida na última consideração, isto é, a mudança da reatância pela susceptância no modelo proposto é apresentado o desenvolvimento das manipulações algébricas considerando uma taxa de compensação $\lambda_{ij} = 30\%$.

$$x_{km}^{Nova} = x_{km} \pm 0,3.x_{km} = (1 \pm 0,3).x_{km} \quad (5.26)$$

Note que pela expressão (5.26) pode-se aumentar ou diminuir a reatância de uma linha. Como a susceptância é a inversa da reatância, tem-se:

$$\gamma_{km}^{Nova} = \frac{1}{(1 \pm 0,3).x_{km}} = \frac{1}{x_{km}} \frac{1}{(1 \pm 0,3)} = \gamma_{km} \cdot \frac{1}{(1 \pm 0,3)} \quad (5.27)$$

$$\gamma_{km}^{Nova} = \left[\frac{1}{1,3} ; \frac{1}{0,7} \right] = [0,77 ; 1,43] \quad (5.28)$$

Ao analisar os resultados, verifica-se que a nova susceptância irá variar no intervalo de $[0,77 ; 1,43]$ da susceptância original da linha. Porém, nas simulações computacionais utilizou-se o intervalo de $[0,70 ; 1,30]$.

Desta forma, na restrição (5.15), caso o sinal do parâmetro ρ_{ij} seja negativo, haverá uma diminuição da susceptância (aumento da reatância) e tem-se uma compensação indutiva.

Por outro lado, caso o sinal de ρ_{ij} seja positivo haverá um aumento da susceptância (diminuição da reatância) e tem-se uma compensação capacitiva.

5.2.3. Modelo Matemático com Transformadores Defasadores e Compensação Série

Nos modelos matemáticos propostos anteriormente é adicionado apenas um tipo de controlador de fluxo em cada modelo, isto é, cada equipamento foi modelado de forma independente. Assim, propõe-se um terceiro modelo matemático, mais elaborado, com a capacidade de inserir mais de um tipo de equipamento FACTS no sistema.

Neste novo modelo, que será denominado de modelo PS+SC, são possíveis adicionar linhas de transmissão, transformadores defasadores e dispositivos de compensação série no sistema.

Dentre os modelos propostos, este modelo é o que apresenta maior grau de não-linearidade, e conseqüentemente, de maior complexidade.

A modelagem do problema de planejamento de sistemas de transmissão, usando transformadores defasadores e compensação série, pode ser escrita através do conjunto de equações e inequações apresentados a seguir:

$$\text{Minimizar } v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} + \sum_{(i,j)} d_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \delta_{ij} + \sum_{(i,j)} h_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \beta_{ij} + \alpha \sum_{k \in \Omega_k} r_k \quad (5.29)$$

s.a.

$$S \cdot f + g + r = d \quad (5.30)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} (1 + \rho_{ij} \cdot \beta_{ij}) \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot (\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij} \cdot \delta_{ij}) = 0 \quad (5.31)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (5.32)$$

$$|\rho_{ij}| \leq \lambda_{ij} \cdot \beta_{ij} \quad (5.33)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (5.34)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (5.35)$$

$$0 \leq r_k \leq d_k \quad (5.36)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (5.37)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (5.38)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (5.39)$$

$$\rho_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (5.40)$$

$$\beta_{ij} \quad \text{Binário} \quad (5.41)$$

$$\varphi_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (5.42)$$

$$\delta_{ij} \quad \text{Binário} \quad (5.43)$$

Sendo λ_{ij} um valor escolhido.

Capítulo 6

Algoritmos Genéticos Especializados

Neste capítulo será abordada a técnica de solução utilizada para resolver os modelos matemáticos com controladores FACTS, os quais foram propostos para resolver o problema de planejamento da expansão da transmissão. O trabalho propõe o uso de algoritmos genéticos especializados, tendo em vista que esses métodos apresentam desempenhos aceitáveis na solução de problemas dessa natureza. Assim, serão descritos, com detalhes, três algoritmos genéticos com o objetivo de ilustrar e esclarecer o leitor quanto à técnica de solução adotada.

6.1. Introdução

Como mencionado anteriormente, existe um grande interesse na apresentação de novos modelos matemáticos que incluam novos componentes no problema de planejamento da transmissão. Neste contexto, este trabalho sugere novas opções para se modelar o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão.

Os modelos propostos resolvem apenas o problema de fluxo de potência ativa e contém simplificações nas equações da rede, isto é, todos os modelos são relaxados. Entretanto, todas as propostas admitem a adição de controladores FACTS no sistema.

Nos modelos propostos, a possibilidade de adicionar controladores FACTS está representada através do conjunto de restrições correspondentes à lei de Kirchhoff para as tensões. A presença desses equipamentos, nesse conjunto de restrições, acarreta um incremento da não-linearidade e, conseqüentemente, há um aumento na complexidade do problema.

Devido a esta complexidade, nota-se que a maioria das técnicas convencionais de programação linear e não-linear, utilizadas para resolver o problema sem a presença desses equipamentos são inadequadas e insuficientes para encontrar uma solução satisfatória.

Os problemas propostos são não convexos, assim teoricamente só podem ser encontradas soluções sub-ótimas. Então, nesses casos, algoritmos baseados em metaheurísticas podem melhorar a probabilidade para encontrar a solução ótima global. Além disso, as metaheurísticas possuem flexibilidade, robustez e facilidade de adaptação ao problema de planejamento da expansão da transmissão. Assim, a proposta deste trabalho para resolver o problema de planejamento da expansão da transmissão, com a adição de controladores FACTS no sistema, é utilizar técnicas metaheurísticas.

Dentre as metaheurísticas existentes, neste trabalho de pesquisa escolheu-se desenvolver algoritmos genéticos (AG) para implementá-los no problema de planejamento da transmissão. O algoritmo genético é uma metodologia que resolve problemas de otimização altamente complexos obtendo soluções excelentes, especialmente para problemas de médio e grande porte com muitas soluções ótimas locais.

De acordo com Soares (Soares, 1997), os algoritmos genéticos são adequados para o tratamento de problemas não lineares que possuem variáveis mistas. Também existe uma vasta literatura que explicam toda a estrutura e funcionamento de um AG, sendo bastante citados, nos artigos, as obras de Holland ([HOLLAND, 1975](#)), Goldberg ([GOLDBERG, 1989](#)), Michalewicz ([MICHALEWICZ, 1996](#)) e Sait ([SAIT E YOUSSEF, 1999](#)).

Na sequência são expostos os algoritmos genéticos especializados desenvolvidos para o problema de planejamento da transmissão com controladores FACTS.

6.2. Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Modelo Matemático que Adiciona Transformadores Defasadores no Sistema.

Nesta seção são apresentadas, de forma detalhada, as principais características do algoritmo genético especializado proposto para resolver o problema de planejamento com adição de transformadores defasadores.

6.2.1 Codificação

No algoritmo genético proposto para resolver o modelo PS, a de representação de uma configuração candidata à solução do problema de planejamento da transmissão é realizada apenas para as variáveis inteiras e binárias. Um detalhe que deve ser mencionado é o uso de uma codificação decimal para as variáveis inteiras.

A adição de linhas de transmissão e de transformadores defasadores no sistema são as variáveis de decisão representadas em uma solução candidata neste modelo. Para codificar as linhas de transmissão e os transformadores convencionais utiliza-se a codificação decimal que adota a notação n_{ij} , ao passo que os transformadores defasadores são codificados como variáveis binárias e indicados por δ_{ij} .

Após serem codificadas as variáveis de investimentos n_{ij} e δ_{ij} , os valores exatos das demais variáveis de operação, não inteiras, são encontrados por meio da resolução de um problema de programação linear (PL).

A figura 6.1 ilustra um vetor de dimensão $2nl$ que representa a proposta de codificação, na qual nl indica o número de caminhos no sistema.

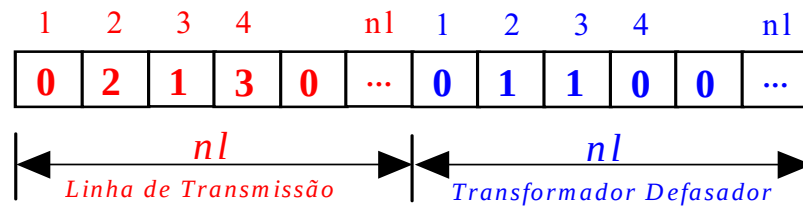


Figura 6.1: Codificação do modelo PS.

Em cada proposta de solução, as primeiras nl posições indicam o número de linhas de transmissão adicionadas e as demais posições indicam em quais caminhos foram adicionados transformadores defasadores. Note que apesar das linhas de transmissão existentes na configuração base não estarem explicitamente codificadas, elas são consideradas no cálculo das variáveis de operação e na adição de defasadores em série com as linhas de transmissão.

Com a idéia de esclarecer a proposta de codificação de uma solução candidata, são detalhados os passos de cada caminho da configuração representada pela figura 6.1. No caminho 1 não foram adicionadas linhas de transmissão nem defasadores. No caminho 2 foram adicionadas duas linhas de transmissão e defasadores em número adequado. No caminho 3 foram adicionadas uma linha de transmissão e defasadores em número suficiente. No caminho 4 foram adicionadas 3 linhas de transmissão, e assim por diante.

Caso seja decidido alocar transformador defasador num caminho i - j , aparecerá de forma explícita na modelagem a exigência de alocar transformador defasador em todas as linhas de transmissão deste caminho. Assim, o número de transformadores defasadores em cada caminho pode ser representado pela relação $ntd_{ij} = (n_{ij}^0 + n_{ij})$, isto é, pode-se alocar transformadores defasadores nas linhas existentes e/ou nas novas linhas adicionadas no processo de otimização.

Em Gallego (GALLEGO, MONTICELLI E ROMERO, 1998), um excelente desempenho foi obtido com essa proposta de codificação para o problema de planejamento tradicional (sem transformadores defasadores). A codificação implementada também está de acordo com as propostas sugeridas nos algoritmos evolutivos apresentados por Chu (CHU E BEASLEY, 1997), Da Silva (DA SILVA, GIL E AREIZA, 2000) e Escobar (ESCOBAR, GALLEG0 E ROMERO, 2004).

6.2.2 Função de Adaptação e Infactibilidades

Para medir a qualidade de um indivíduo da população deve ser proposta uma função de adaptação. No modelo PS, propõe-se a resolução de um PL para obter a função de adaptação de qualquer solução candidata, na qual podem ser obtidas soluções factíveis e infactíveis. O PL determina o valor exato das variáveis de operação para uma determinada proposta de investimento e verifica se o sistema está operando adequadamente, isto é, se o sistema não apresenta corte de carga.

Ao considerar que uma proposta de investimento k no algoritmo genético, caracterizada através dos valores das variáveis n_{ij}^k e δ_{ij}^k , que representam, respectivamente, as linhas adicionadas e a presença ou não de transformadores defasadores, o corte de carga pode ser obtido por meio da resolução do problema de programação linear modelado a seguir.

$$\text{Minimizar } w^k = \sum_{k \in \Gamma} r_k \quad (6.1)$$

s.a.

$$S.f + g + r = d \quad (6.2)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \cdot (\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij} \cdot \delta_{ij}^k) = 0 \quad (6.3)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (6.4)$$

$$0 \leq g \leq \overline{g} \quad (6.5)$$

$$0 \leq r \leq d \quad (6.6)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (6.7)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (6.8)$$

$$\varphi_{iji} \quad \text{Irrestrito} \quad (6.9)$$

Para uma determinada proposta de investimento k , a função de adaptação é obtida por meio da relação (6.10):

$$v^k = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij}^k + \sum_{(i,j)} d_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \cdot \delta_{ij}^k + \alpha \cdot w^k \quad (6.10)$$

No algoritmo genético, todas as propostas de solução são consideradas para participar do processo evolutivo. As soluções infactíveis, isto é, as que apresentam corte de carga são eliminadas de forma lenta pelo algoritmo genético, embora a função de adaptação seja adequadamente penalizada pelo parâmetro α , cujo valor é elevado.

6.2.3 População Inicial

No modelo PS, a população inicial é gerada de forma aleatória controlada. O controle se baseia em fixar dois valores, a quantidade máxima de linhas de transmissão e de transformadores defasadores que podem ser adicionados no sistema. A experiência em planejamento mostra que deve ser pequeno o número de caminhos escolhidos para adicionar linhas de transmissão e menor ainda o número de caminhos necessários para adicionar transformadores defasadores.

Por meio de processos aleatórios e consecutivos, são escolhidos: o número de caminhos que poderão receber novas linhas de transmissão, quais serão esses caminhos e o número de linhas a ser adicionado em cada caminho respeitando o número máximo de adições permitidas em cada caminho. Para os transformadores defasadores serão escolhidos o número de caminhos e em quais caminhos deverão ser adicionados transformadores defasadores.

Com o intuito de dar preferência às linhas que contêm os melhores desempenhos, com relação à quantidade de fluxos transmitidos, propõe-se um critério de sensibilidade das linhas que separa os circuitos em dois grupos de tamanho diferentes (75% e 25%), sendo que o maior grupo contém as linhas com melhor desempenho. Para isto se faz uso da seguinte relação:

$$Co_{ij} = \frac{\overline{f_{ij}} \gamma_{ij}}{c_{ij}} \quad (6.11)$$

sendo:

- $\overline{f_{ij}}$ Fluxo máximo de uma linha no caminho $i - j$;
- γ_{ij} Susceptância de uma linha no caminho $i - j$;
- c_{ij} Custo de um circuito no caminho $i - j$;

Assim, implementa-se a idéia de adicionar linhas de transmissão com melhor desempenho na população inicial. Numa primeira etapa serão escolhidos 80% das linhas, utilizando apenas o maior grupo. O restante das linhas pode ser escolhido em qualquer grupo. Portanto, a população inicial é composta de 80 a 100% dos elementos do melhor grupo.

6.2.4 Seleção

O tipo de seleção utilizada no modelo PS é a seleção baseada em torneio com $k = 2$, isto é, em cada jogo participam dois indivíduos da população corrente. A seleção por torneio pode ser eficiente desde que o valor de k seja adequadamente escolhido. A maioria dos pesquisadores utiliza valores de $k = \{2, 3\}$.

6.2.5 Recombinação

Após o processo de seleção é implementado o mecanismo de recombinação. Para o modelo PS, o algoritmo evolutivo proposto adotou a recombinação com um ponto de corte, na qual são escolhidas duas soluções candidatas para gerar dois descendentes. O processo se inicia com a escolha aleatória de um ponto de recombinação que irá gerar seus descendentes, com uma parcela de cada uma das topologias geradoras separadas pelo ponto de recombinação.

No algoritmo implementado, apesar do vetor de codificação ter tamanho $2nl$, o ponto de recombinação foi escolhido por meio de um número aleatório gerado entre 1 e $(nl - 1)$. O motivo é que este modelo considera apenas a primeira metade do vetor de codificação. Assim, na recombinação, a segunda parcela do vetor de codificação acompanha a lógica da primeira parcela conforme demonstrada na figura 6.2.

A estratégia fundamental consiste em repassar a informação existente em cada caminho (presente nos dois setores do vetor de codificação) para um único descendente e, desta forma, evitar a degradação da qualidade da informação existente no vetor de codificação.

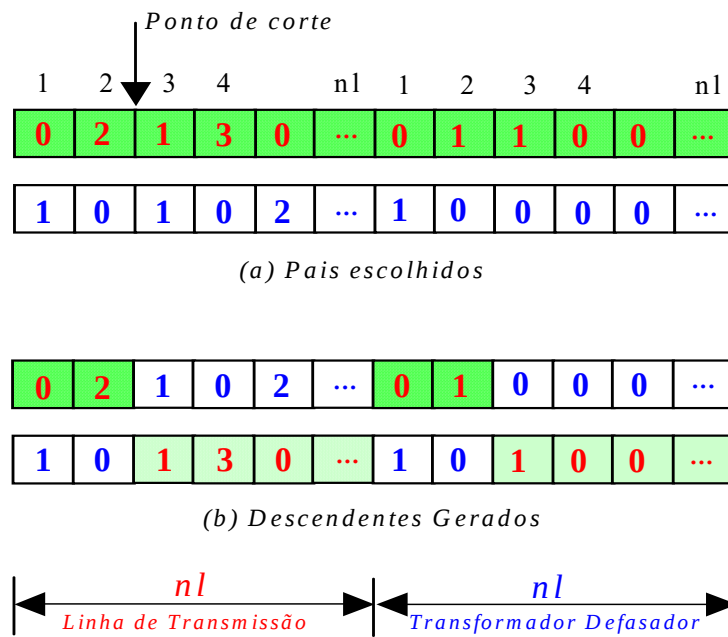


Figura 6:2 Processo de recombinação.

6.2.6 Mutação

No modelo PS, existem dois tipos de mutação, de um ponto e de vários pontos. A escolha do tipo de mutação depende da taxa de diversificação da população corrente, cuja fórmula será apresentada mais adiante. Caso a taxa de diversificação calculada fique acima de 50 % o algoritmo realiza a mutação de um ponto, em caso contrário é realizada a mutação de vários pontos.

Na mutação de um ponto, para cada indivíduo da população corrente é resolvido um problema subsidiário, no caso, um problema de programação linear. Após, as linhas são classificadas em quatro grupos de acordo com o nível de carga de cada circuito e separadas em intervalos de 25, 50, 75 e 100% de sua capacidade.

O nível de carga é calculado pela relação:

$$Cf_{ij} = \frac{f_{ij}}{(n_{ij}^0 + n_{ij}) \cdot \overline{f_{ij}}} \quad (6.12)$$

Sendo:

Cf_{ij} Coeficiente de aproveitamento de um circuito no caminho i-j;

f_{ij} Fluxo de um circuito no caminho i-j;

$(n_{ij}^0 + n_{ij})$ Total de linhas (existentes+adicionadas) no caminho i-j;

$\overline{f_{ij}}$ Fluxo máximo permitido de um circuito no caminho i-j.

Com a idéia de diminuir os custos de investimentos de uma solução candidata, a operação de mutação de um ponto é executada baseada na probabilidade de 70% ser favorável à retirada das linhas adicionadas ou defasador, e em 30% a possibilidade de colocar novas linhas de transmissão. Este processo probabilístico obedece a seguinte ordem de prioridade:

- Retirar linha de transmissão e/ou transformador defasador;
- Retirar transformador defasador;
- Colocar linha de transmissão.

A mutação de um ponto depende da parcela escolhida no cromossomo. Caso seja escolhido um caminho da parcela correspondente às linhas de transmissão então, deve-se aumentar ou diminuir uma linha de transmissão nesse caminho ($n_{ij} + 1$ ou $n_{ij} - 1$). Caso seja escolhido um caminho da parcela correspondente aos defasadores, deve-se trocar o número binário correspondente a esse caminho, isto é, deve-se adicionar ou retirar defasadores no caminho escolhido.

Vale frisar que, caso seja escolhido adicionar linha, as linhas devem estar localizadas nos grupos com capacidade de carga superior a 75%. Para o caso de retirada de linha, a busca se inicia considerando o grupo com os menores níveis de capacidade. Esta estratégia foi adotada com a intenção de retirar as linhas com baixo índice de aproveitamento e colocar linhas nos caminhos com altos índices. Ao obedecer a esses critérios fundamentais, o operador de mutação se torna eficiente.

O processo de mutação de um ponto deve ser realizado de forma coerente levando em conta as seguintes exigências:

- Deve-se respeitar o número máximo de linhas de transmissão a ser adicionado em cada caminho;
- Caso seja decidido adicionar defasador, deve-se verificar a existência de linhas de transmissão no caminho escolhido. Caso não existam linhas, deve-se adicionar uma linha juntamente com o defasador, caso contrário, apenas o defasador;
- Caso seja decidido retirar uma linha de transmissão, deve-se retirar também, caso exista, o defasador correspondente.

Portanto, essa mutação não deve produzir adições incoerentes, isto é, a inclusão de defasadores em um caminho está condicionada a existência de linhas e o número de defasadores deve ser igual ao número de linhas de transmissão nesse caminho.

A figura 6.3 ilustra dois casos de mutação de um ponto. No primeiro caso foi escolhido aleatoriamente o caminho 3 para adicionar defasador e, como existe linha nesse caminho, deve-se adicionar apenas o defasador. No outro caso foi escolhido o caminho 2 para retirar a linha de transmissão e supondo que não existe linhas na configuração base deve-se retirar também o defasador do caminho 2 para manter a coerência do processo.

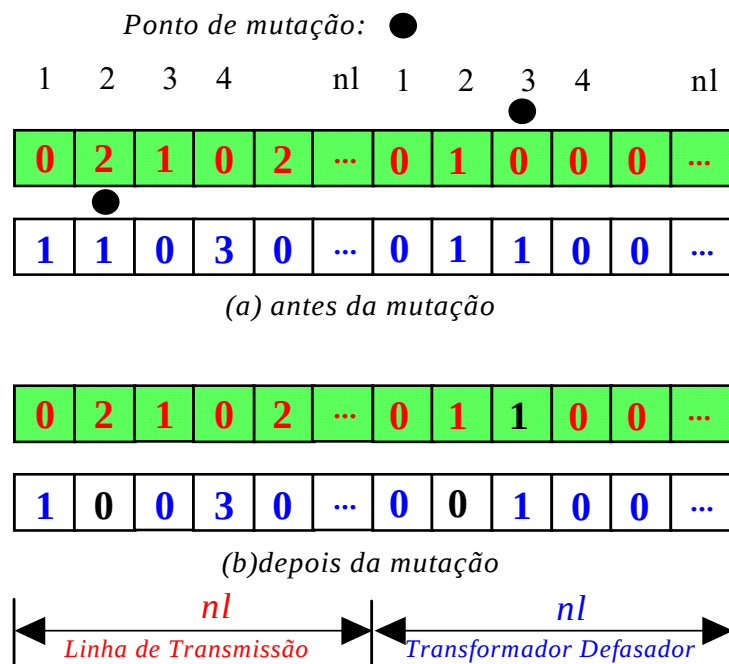


Figura 6:3 Processo de mutação.

Por outro lado, a mutação de vários pontos é realizada apenas com os descendentes que possuem uma ou mais configurações idênticas na população corrente. Além disso, para cada configuração candidata, os pontos sujeitos a mudança não devem exceder 20% dos bits da configuração em estudo.

6.2.7 Detalhes Específicos do Algoritmo Genético Proposto

A seguir são apresentados detalhes importantes do algoritmo, isto é, as melhorias feitas, no algoritmo evolutivo proposto e aplicado no modelo PS.

6.2.7.1 Parâmetros de Controle

Vale a pena lembrar que os valores atribuídos aos parâmetros envolvidos no processo evolutivo influenciam no desempenho e na eficiência do algoritmo genético e, conseqüentemente, na sua qualidade.

O algoritmo genético especializado proposto para resolver o modelo PS adotou como taxa de recombinação o valor de $T_R=0,8$.

O fato de existir dois tipos de mutação, induziu a aplicação de duas taxas de mutação: $T_M=0,1$ ou $T_M=0,6$, sendo que o valor da taxa a ser aplicada depende do nível de diversificação da população corrente. A taxa de mutação foi definida de uma maneira diferente do conceito clássico. Por exemplo, uma taxa de $T_M=0,1$ significa que há uma probabilidade de 0,1 da topologia sofrer uma mutação. O tamanho da população variou entre 40 e 200 elementos.

6.2.7.2 Critério de Parada

Para o modelo PS, o algoritmo genético proposto utilizou dois critérios de parada. O processo evolutivo termina quando for atingido um número máximo de iterações previamente especificado ou quando a incumbente não melhorar após um número especificado de iterações.

6.2.7.3 Elitismo

Com o objetivo de preservar e repassar as melhores topologias da população corrente a próxima geração, utilizou-se o mecanismo de elitismo. O processo de elitismo implementado compara os pais com seus descendentes gerados, escolhendo os dois melhores para passar para a próxima geração.

6.2.7.4 Mecanismo de Diversidade Populacional

Existe um controle da diversificação da população que altera a taxa de mutação quando o cálculo de uma taxa de diversificação fica abaixo de um valor especificado. A taxa de diversificação calcula a porcentagem de configurações diferentes de uma determinada geração, sendo realizada após a mutação. Assim, caso $Td \geq 0,5$, na próxima geração, aplica-se uma taxa de mutação de $T_M=0,1$. Caso contrário uma taxa de $T_M=0,6$ é aplicada.

A taxa de diversificação é dada pela equação (6.13):

$$Td = \left(\frac{npop - nrep}{npop} \right) \times 100 \quad (6.13)$$

sendo:

Td = taxa de diversificação;

$nrep$ = número de topologias repetidas;

$npop$ = tamanho da população.

6.3. Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Modelo Matemático que Adiciona Dispositivos de Compensação Série no Sistema.

Para resolver o problema de otimização combinatória do planejamento de sistemas de transmissão com a inclusão da compensação série nas linhas, também foi aplicado um algoritmo genético especializado, o qual busca otimizar a alocação dos dispositivos de compensação série e das linhas de transmissão, além do valor compensado.

A seguir encontram-se explicadas as principais características do algoritmo genético especializado, sendo a codificação o primeiro tópico a ser tratado.

6.3.1 Codificação

De maneira semelhante a codificação anterior, o modelo CS utiliza um vetor de tamanho $2nl$. A primeira parcela, referente às linhas de transmissão, permanece idêntica a codificação anterior. A diferença se encontra na segunda parcela que, neste modelo, indicam a porcentagem de compensação em cada caminho. São representadas por variáveis contínuas e denotadas por ρ_{ij} .

Com a intenção de facilitar a compreensão da codificação proposta ilustra-se por meio da figura 6.4 a topologia de um sistema fictício.

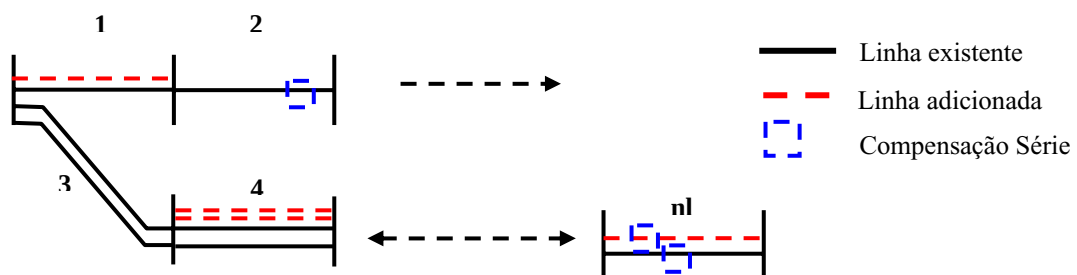


Figura 6.4. Topologia de um sistema fictício.

Uma proposta de codificação da topologia desse sistema fictício se encontra ilustrada na figura 6.5.

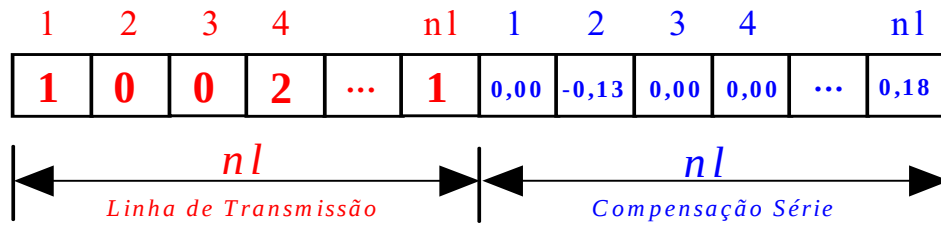


Figura 6.5: Codificação do modelo SC.

Adotou-se que os dispositivos de compensação série operam dentro de um intervalo de compensação que varia entre $\pm 30\%$ do valor da susceptância original da linha. Por exemplo, de acordo com a figura 6.5, em relação a parcela referente a compensação, a interpretação seria de que houve uma redução de 13% na susceptância do caminho 2 e que no último caminho codificado houve um aumento de 18% na susceptância.

Da mesma forma que o caso apresentado no algoritmo anterior, foram consideradas que:

- As linhas de transmissão existentes não são codificadas, mas serão levadas em conta no cálculo das variáveis de operação e na adição de dispositivos de compensação série com as linhas de transmissão;
- Pode-se alocar dispositivos de compensação série nas linhas existentes e/ou nas novas linhas adicionadas;
- Deve-se resolver um problema de programação linear após serem conhecidos os valores das variáveis n_{ij} e ρ_{ij} para encontrar os valores exatos das demais variáveis de operação do problema.

6.3.2 População Inicial

Um mecanismo de controle foi utilizado para gerar os indivíduos da população inicial. Para cada indivíduo da população, foram fixados: a quantidade máxima de linhas de transmissão adicionada (10 para cada descendente e 2 em cada *bit*) e o número máximo de

caminhos com compensação série (3 caminhos). Utilizou-se um processo aleatório composto por duas etapas para escolher o local e a quantidade de linhas de transmissão a serem adicionadas. Para os dispositivos de compensação série são escolhidos o local e a porcentagem de compensação.

Os resultados de alguns testes preliminares indicam que no planejamento de sistema de transmissão de energia elétrica deve ser alocado um número reduzido de dispositivos de compensação série nos circuitos, até mesmo para sistemas de grande porte.

Com o objetivo de adicionar as linhas mais interessantes nas soluções candidatas da população inicial é proposto o mesmo coeficiente utilizado no algoritmo que resolve o modelo PS.

A compensação série realizada na população inicial também são calculadas dentro de um intervalo de $\pm 30\%$ do valor da susceptância original.

6.3.3 Função de Adaptação e Infactibilidades

Em uma determinada proposta de investimento k , após serem identificados os valores das variáveis n_{ij}^k , β_{ij}^k e ρ_{ij}^k através do algoritmo genético especializado sugerido, deve-se resolver um PL para obter o corte de carga w^k .

O valor da função de adaptação para cada proposta de solução do modelo SC é obtido através da relação abaixo, sendo composta de três parcelas, duas referentes a custos de investimentos (linhas de transmissão e dispositivos de compensação série) e uma parcela correspondente ao corte de carga produzido por uma determinada configuração.

$$v^k = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} \cdot n_{ij}^k + \sum_{(i,j)} h_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \cdot \beta_{ij}^k + \alpha \cdot w^k \quad (6.14)$$

Não existe distinção no algoritmo genético especializado proposto, pois todas as propostas de solução são consideradas para participar do processo evolutivo. Assim, este modelo considera que o sistema opera de forma adequada quando não existe corte de carga na

solução candidata em estudo. Caso uma solução candidata que apresente corte de carga, um parâmetro α , com valor elevado e, adequadamente escolhido, é utilizado para penalizá-la.

O problema de programação linear é composto de uma função objetivo e de restrições, sendo estruturado da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } w^k = \sum_{k \in \Gamma} r_k \quad (6.15)$$

s.a.

$$S.f + g + r = d \quad (6.16)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij}(1 + \rho_{ij}^k \cdot \beta_{ij}^k) \cdot (n_{ij}^o + n_{ij}^k) \cdot (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (6.17)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^o + n_{ij}^k) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (6.18)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (6.19)$$

$$0 \leq r_i \leq d_i \quad (6.20)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (6.21)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (6.22)$$

6.3.4 Seleção

Neste modelo também foi empregado a seleção baseada em torneio, sendo gerada aleatoriamente uma sub-população composta de 2 indivíduos. Dentre eles é escolhido o indivíduo com melhor função de adaptação. Este processo é repetido até que a população esteja completa.

6.3.5 Recombinação

Para o modelo SC foi implementada a recombinação com um ponto de corte, com as mesmas características do modelo PS. A figura 6.6. mostra um exemplo desta estratégia.

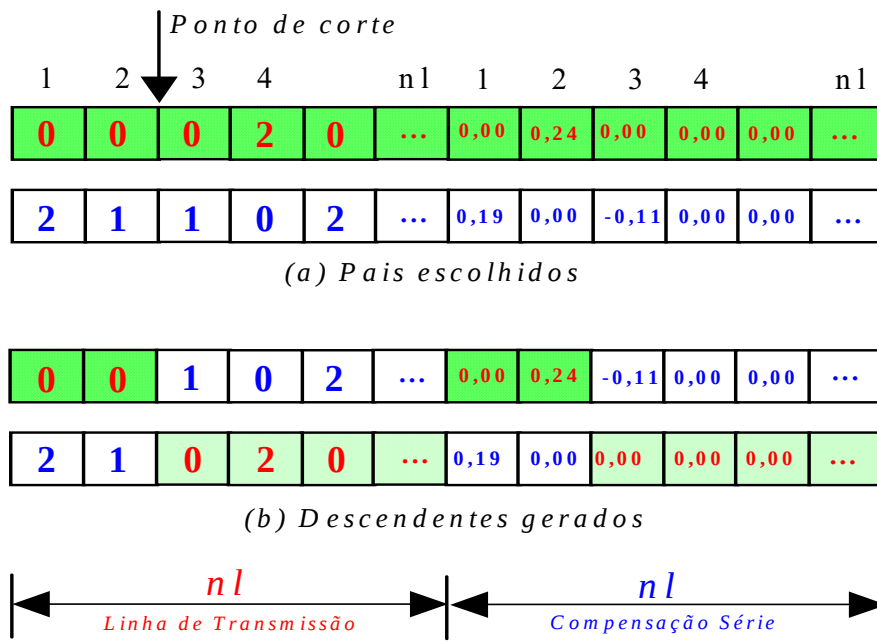


Figura 6.6: Processo de recombinação.

6.3.6 Mutação

A mutação utilizada no algoritmo genético proposto para resolver o problema de planejamento com a adição de compensação série apresenta características em comum com o algoritmo genético aplicado ao modelo PS. Desta forma, serão apresentadas nesta seção apenas as diferenças existentes entre essas duas mutações.

Na mutação de um ponto aplica-se um processo probabilístico com a seguinte ordem de prioridade:

- Retirar de linhas e/ou dispositivos de compensação série;
- Colocar ou retirar dispositivos de compensação série;
- Trocar o valor compensado;
- Colocar linha de transmissão (com baixa chance de ocorrer).

O motivo desta estratégia é inverter a tendência de adicionar linhas porque a maioria dos elementos do vetor de codificação se encontra com valor igual a zero, o que, neste caso, aumentaria o custo de investimento.

Para ilustrar o processo de mutação aplicado ao modelo SC ilustra-se dois casos na figura 6.7.

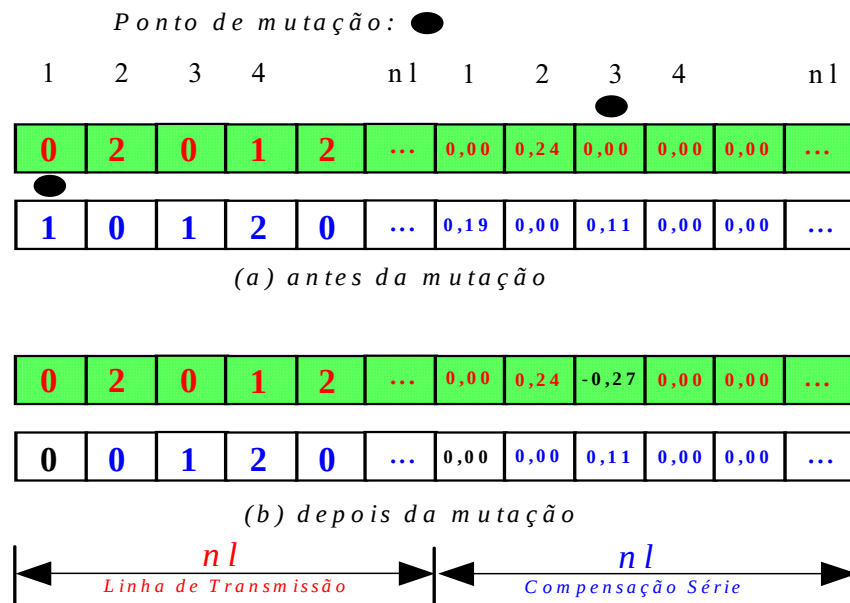


Figura 6.7: Processo de mutação.

O ponto de mutação é escolhido aleatoriamente. No primeiro caso foi escolhido o caminho 3 que se refere a compensação série. Embora não ocorra adição de linhas, há um determinado número de linhas na configuração base e, portanto, o número de dispositivos de compensação série instalado deve ser igual ao número de linhas existentes na configuração base.

No segundo caso foi escolhido o caminho 1 que faz menção a retirada da linha de transmissão. Supondo que não exista linha na configuração base, a retirada desta única linha faz com seja necessário retirar também a compensação série no caminho 1.

6.3.7 Detalhes Específicos do Algoritmo Evolutivo Proposto

As características relatadas abaixo fazem referência a um conjunto de parâmetros que contribuem para um melhor desempenho do algoritmo genético proposto.

6.3.7.1 Parâmetros de Controle

Os parâmetros de controle utilizados nos testes realizados com o modelo SC foram uma taxa de recombinação de $T_R=0,8$, uma taxa da mutação de $T_M=0,1$ ou $T_M=0,6$ e tamanho da população variando entre 40 e 150 indivíduos.

6.3.7.2 Critério de Parada

O algoritmo termina quando for atingido um número máximo de iterações previamente especificado e depende do tamanho e da complexidade do problema. Por exemplo, no sistema elétrico utilizado neste trabalho, adotou-se 500 iterações.

6.3.7.3 Elitismo

Com a finalidade de que as melhores topologias da população corrente fossem preservadas e repassadas para a próxima geração foi utilizado o mecanismo de elitismo. No modelo SC, o processo de elitismo repassa os 30% melhores indivíduos da população corrente para a próxima geração.

6.3.7.4 Mecanismo de Diversidade Populacional

O objetivo do cálculo da diversificação é produzir novos indivíduos na expectativa de encontrar melhores soluções.

No algoritmo genético especializado, aplicado ao problema de planejamento da expansão da transmissão com adição de dispositivos de compensação série foi utilizado o mesmo mecanismo de controle da diversidade da população.

6.4. Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Modelo Matemático que Adiciona Transformadores Defasadores e Dispositivos de Compensação Série no Sistema

Com o objetivo de encontrar a alocação ótima das linhas de transmissão, dos transformadores defasadores e dos dispositivos de compensação série juntamente com a porcentagem de compensação série, foi proposto o uso de um algoritmo genético especializado.

6.4.1 Codificação

Neste modelo, a representação de uma solução candidata é mais complexa que as codificações anteriores, pois faz referência a três variáveis de decisão: as linhas de transmissão adicionadas, os transformadores defasadores adicionados e o valor compensado na linha.

Este modelo pode ser considerado uma generalização dos dois modelos anteriores. Propõe-se que as linhas de transmissão adicionadas no sistema sejam indicadas por meio de variáveis inteiras; a presença ou ausência de transformadores defasadores indicadas por variáveis binárias e os valores compensados nos circuitos indicados por meio de variáveis contínuas. As variáveis acima serão denotadas por n_{ij} , β_{ij} e ρ_{ij} , respectivamente.

Assim como nos dois modelos anteriores, são feitas as seguintes considerações: as linhas de transmissão existentes na configuração base não estarão representadas no cromossomo, mas serão levadas em conta no cálculo das variáveis de operação e na adição dos controladores FACTS em série com as linhas de transmissão; pode-se alocar os controladores FACTS nas linhas existentes e/ou nas novas linhas adicionadas no processo de otimização; deve-se resolver um problema de programação linear após serem conhecidos os valores das variáveis n_{ij} , β_{ij} e ρ_{ij} para encontrar os valores exatos das demais variáveis de operação do problema; os dispositivos de compensação série operam dentro de um intervalo de compensação que varia entre $\pm 30\%$ do valor da susceptância original da linha.

Para facilitar a compreensão da codificação proposta para uma solução candidata do problema de planejamento da transmissão com adição de transformadores defasadores e dispositivos de compensação série, faz-se uso de um sistema fictício que está ilustrado na figura 6.8.

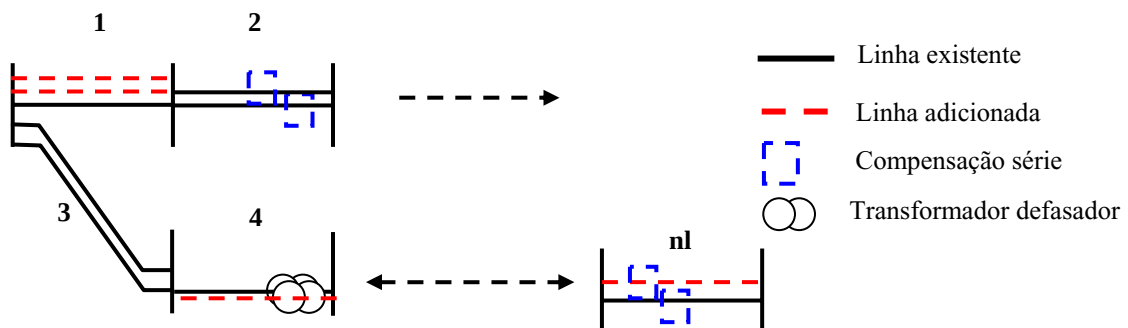


Figura 6.8. Topologia de um sistema fictício.

A figura 6.9 ilustra a proposta de codificação do exemplo indicado através da figura 6.8. Em cada proposta de solução está relacionado um vetor de tamanho $3nl$ em que as primeiras nl posições indicam o número de linhas de transmissão adicionadas. As nl posições intermediárias indicam a presença ou não de transformadores defasadores nas linhas e as demais posições indicam a porcentagem de compensação em cada caminho.

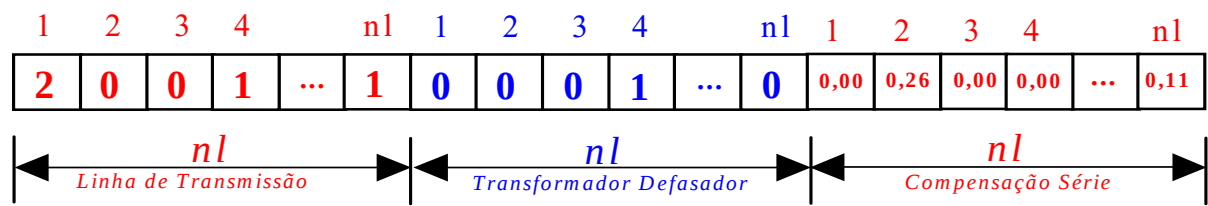


Figura 6.9: Codificação do modelo PS+SC.

6.4.2 População Inicial

A geração de indivíduos da população inicial também foi realizada por meio de um processo aleatório com controle. O controle consiste em fixar, para cada indivíduo da população, quatro parâmetros: o número máximo de linhas de transmissão adicionadas por caminho, o número máximo de linhas adicionadas no sistema, o número máximo de caminhos com transformadores defasadores adicionados no sistema e o número máximo de caminhos com compensação série. Neste trabalho, para o sistema elétrico usado nos testes, esses valores foram fixados em 2, 10, 2 e 3, respectivamente.

O processo aleatório com controle é composto de três etapas. Primeiramente são escolhidos o local e a quantidade de linhas de transmissão a serem adicionadas. Na sequência são escolhidos os locais para os transformadores defasadores e, finalmente, para os dispositivos de compensação série escolhe-se o local e o valor compensado.

Este algoritmo também faz uso das mesmas estratégias utilizadas pelos dois algoritmos anteriores para gerar a população inicial.

6.4.3 Função de Adaptação e Infactibilidades

No modelo matemático com adição de linhas de transmissão, transformadores defasadores e dispositivos de compensação série, o valor da função de adaptação em uma determinada proposta de investimento k é obtida através da resolução de um PL, após serem identificados os valores das variáveis n_{ij}^k , δ_{ij}^k , β_{ij}^k e ρ_{ij}^k da equação abaixo.

$$v^k = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} \cdot n_{ij}^k + \sum_{(i,j)} d_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \cdot \delta_{ij} + \sum_{(i,j)} h_{ij} \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \cdot \beta_{ij}^k + \alpha \cdot w^k \quad (6.23)$$

A equação é composta de quatro parcelas, sendo que a última parcela se refere ao corte de carga produzido por uma determinada configuração e as demais parcelas referem-se aos custos de investimentos (linhas de transmissão, transformadores defasadores e dispositivos de compensação série).

O PL a ser resolvido possui a seguinte estrutura:

$$\text{Minimizar } w^k = \sum_{k \in \Gamma} r_k \quad (6.24)$$

s.a.

$$S \cdot f + g + r = d \quad (6.25)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} (1 + \rho_{ij}^k \cdot \beta_{ij}^k) \cdot (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \cdot (\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij} \cdot \delta_{ij}^k) = 0 \quad (6.26)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \cdot \overline{f_{ij}} \quad (6.27)$$

$$0 \leq g_i \leq \overline{g_i} \quad (6.28)$$

$$0 \leq r_i \leq d_i \quad (6.29)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (6.30)$$

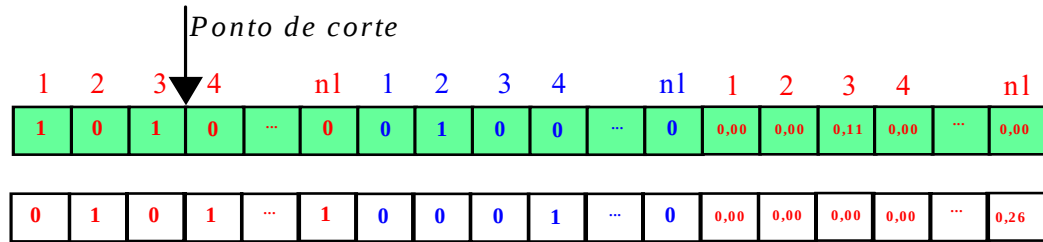
$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (6.31)$$

6.4.4 Seleção

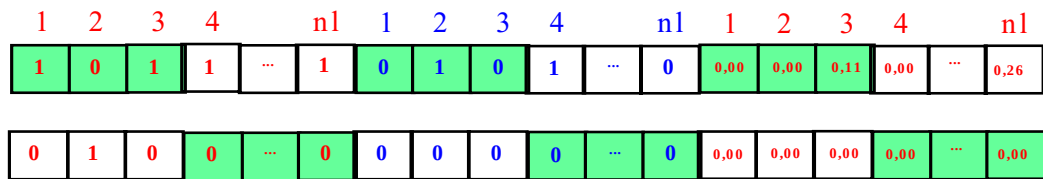
No algoritmo genético proposto para resolver este último modelo também foi empregada a seleção baseada em torneio.

6.4.5 Recombinação

Nesta seção apresenta-se o mecanismo de recombinação aplicado ao modelo que admite a adição de linhas de transmissão e dois tipos de controladores FACTS. A recombinação possui as mesmas características dos modelos anteriores. Propõe-se depois de escolher duas configurações, que o processo de recombinação seja executado conforme a figura 6.10.



(a) Pais escolhidos



(b) Descendentes gerados

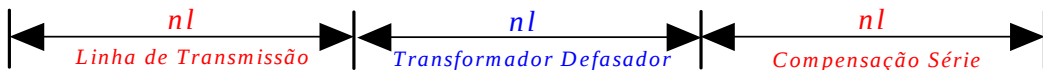


Figura 6.10: Processo de recombinação.

6.4.6 Mutação

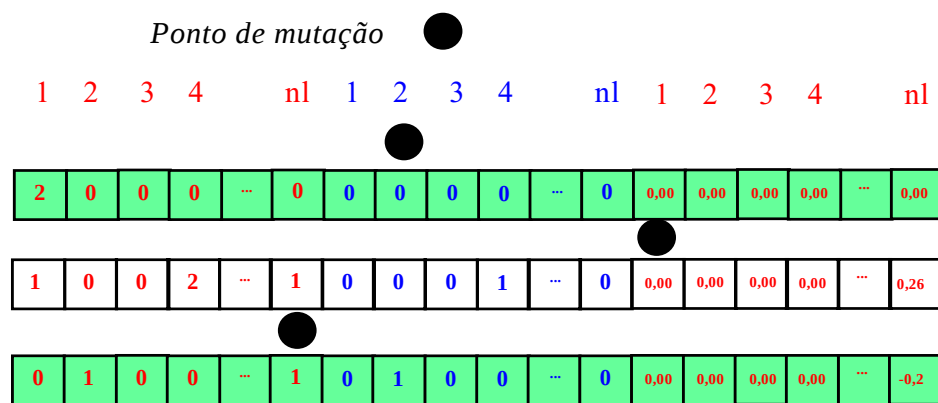
A mutação, proposta neste modelo, é muito semelhante às mutações aplicadas nos modelos anteriores. Desta forma, serão relatadas, a seguir, apenas as alterações desta mutação em relação as outras.

Um diferencial importante desta mutação se refere a taxa de diversificação utilizada. Caso a taxa fique acima de 40%, o algoritmo realiza a mutação em um ponto. Caso contrário, realiza a mutação em vários pontos. A mutação em um ponto também se baseia num processo

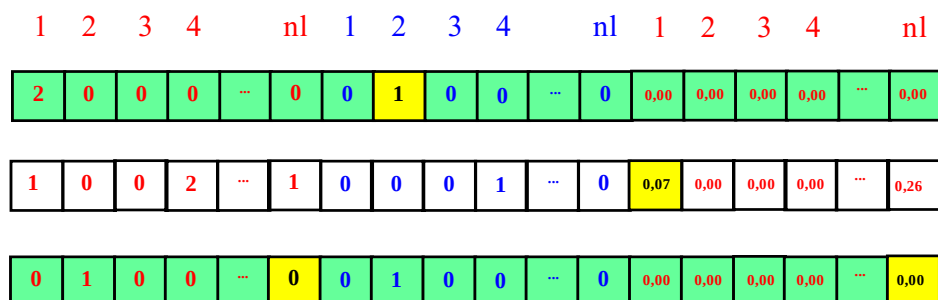
probabilístico e deve obedecer a uma escala de preferência. Assim, são expostas, a seguir, a ordem de prioridade das ações com a sua respectiva possibilidade de ocorrência.

- 1) Retirada de linhas com possível retirada de controladores FACTS (40%);
- 2) Retirada de dispositivos de compensação série ou troca do valor compensado ou alocação de dispositivos de compensação série (30%);
- 3) Retirada ou alocação de transformadores defasadores(20%);
- 4) Alocação de linhas (10%).

Deve-se enfatizar que na mutação de um ponto proposta, apenas uma dessas etapas é realizada.



(a) Antes da mutação



(b) Depois da mutação

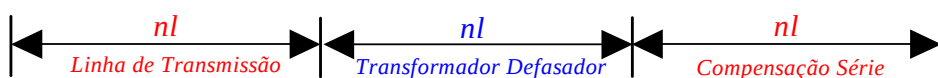


Figura 6.11: Processo de mutação.

O processo de mutação em um ponto está ilustrado na figura 6.11. São mostrados três exemplos de mutação aplicados à codificação proposta para o problema de planejamento da transmissão que admite a adição de linhas de transmissão, transformadores defasadores e dispositivos de compensação série.

A mutação em vários pontos também é realizada somente com as configurações idênticas. Porém, a possibilidade das linhas de transmissão e dos transformadores defasadores sofrerem mutação é de 20% cada. Assim, procura-se dar preferência à alteração na parcela referente aos dispositivos de compensação série, quando se realiza uma mutação mais radical.

6.4.7 Detalhes Específicos do Algoritmo Evolutivo Proposto

Este trabalho utilizou um algoritmo genético para resolver o modelo que representa o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão com adição de linhas de transmissão e dois diferentes dispositivos FACTS. São apresentados nesta seção alguns detalhes importantes deste algoritmo.

6.4.7.1 Parâmetros de Controle:

O algoritmo genético especializado aplicado para o modelo PS+SC utiliza como parâmetros de controle: taxa de recombinação $T_R=0,8$, taxa da mutação de $T_M=0,1$ ou $T_M=0,6$ e tamanho da população variando entre 40 e 500 indivíduos para testes no sistema escolhido.

6.4.7.2 Critério de Parada

O critério utilizado para encerrar o algoritmo foi especificar um número máximo de iterações que, para o sistema usado em testes, foi de 500.

6.4.7.3 Elitismo

Para selecionar as melhores configurações, este algoritmo recorreu a técnica de elitismo. O processo de elitismo adotado repassa para a próxima geração os 30% melhores indivíduos da população corrente. Os indivíduos que fazem parte do grupo de elite são todos distintos, isto é, não existem configurações iguais.

6.4.7.4 Mecanismo de Diversidade Populacional

O algoritmo genético especializado, aplicado ao problema de planejamento da expansão da transmissão com adição de transformadores defasadores e dispositivos de compensação série, aplicou o mesmo mecanismo de controle da diversidade da população dos algoritmos anteriores.

A figura 6.12 representa um fluxograma do algoritmo genético proposto para resolver o problema de planejamento da transmissão com adição de transformadores defasadores e dispositivos de compensação série.

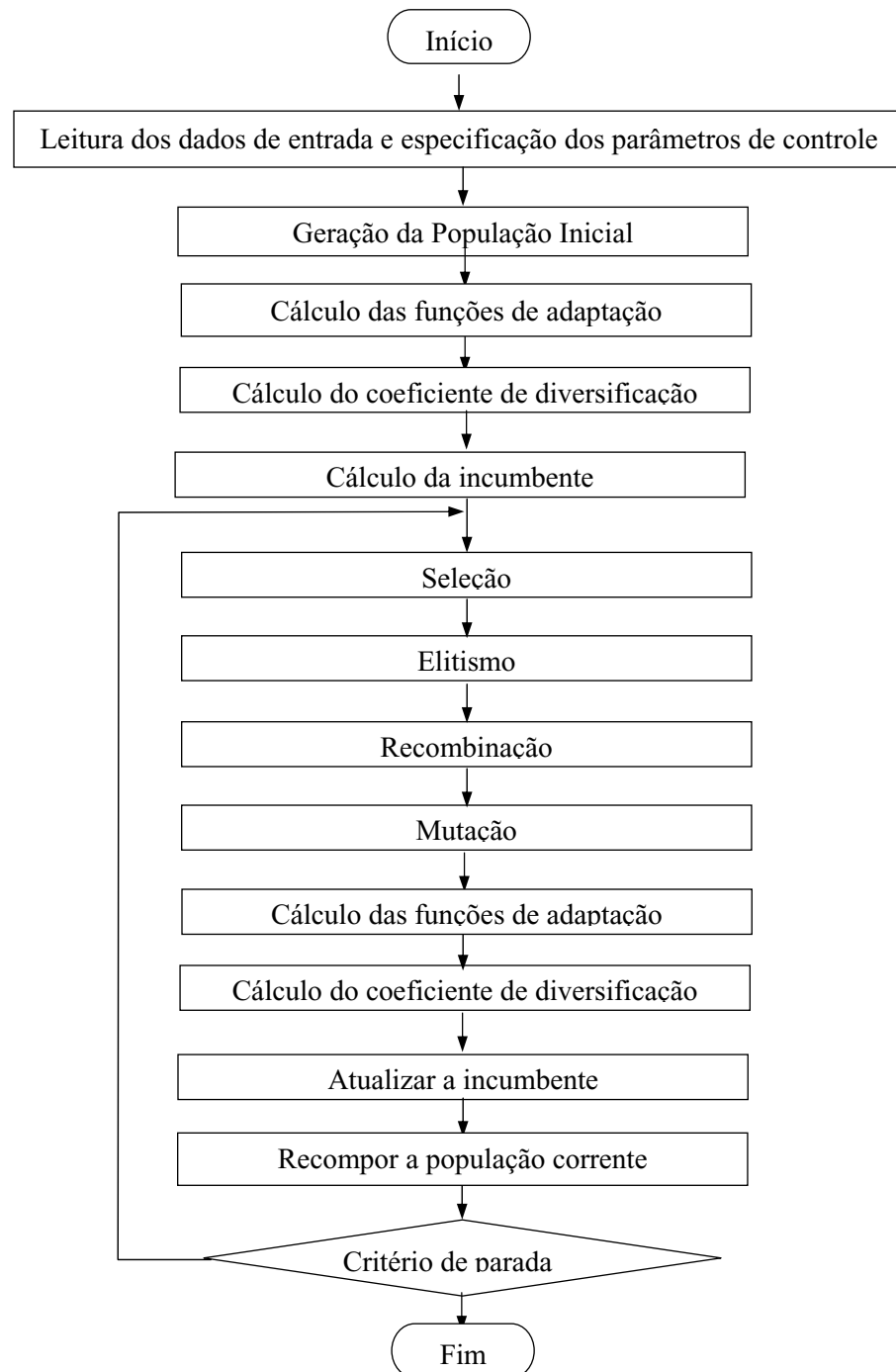


Figura 6.12: Fluxograma do modelo PS+SC.

Capítulo 7

TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo tem-se como finalidade mostrar os resultados obtidos pelos programas computacionais implementados neste trabalho. Os programas simulam os novos modelos matemáticos propostos nesta tese, que admitem a possibilidade de adicionar transformadores defasadores e dispositivos de compensação série no problema de planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica. O estudo dessas informações contribuirá para a análise dessas novas formulações matemáticas.

Vale lembrar que o objetivo da otimização proposta nesta tese é minimizar os custos de investimentos na expansão do sistema de transmissão. O trabalho também faz uso de técnicas evolutivas na intenção de encontrar a melhor alocação para os transformadores defasadores, dispositivos de compensação série e linhas de transmissão no sistema.

7.1 Introdução

A partir dos novos modelos matemáticos sugeridos no capítulo 5, para resolver o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica, foram desenvolvidos e implementados programas computacionais para a solução desses modelos. Os

algoritmos genéticos especializados, detalhados no capítulo 6, foram utilizados para resolver os modelos propostos. Desta forma, pode-se dizer que neste capítulo se faz a junção dos conhecimentos apresentados nos dois capítulos anteriores.

Com a finalidade de analisar o desempenho dos algoritmos genéticos especializados propostos e provar a viabilidade técnica dos modelos matemáticos com controladores FACTS foram realizados testes computacionais. O sistema teste utilizado para ilustrar os estudos desenvolvidos nesta tese foi o sistema IEEE 24 barras, com cinco planos diferentes de geração. Dentre esses planos, existe um que corresponde ao planejamento com reprogramação da geração, nos demais planos as gerações são previamente especificadas (sem reprogramação da geração). Este sistema é composto de 24 barras e 41 caminhos com demanda de 8.550 MW e capacidade de geração de 10.215 MW. Os demais dados referentes a esse sistema se encontram em Fang e Hill ([FANG E HILL, 2003](#)) e no apêndice A.

O computador utilizado foi um Pentium IV, 996 MHz com 256Mbytes de memória RAM, plataforma Windows XP. Os programas computacionais implementados foram elaborados na linguagem de programação Fortran e na estrutura GAMS (do inglês, *General Algebraic Modeling System*).

A linguagem Fortran é mais bem adaptada para a computação numérica que a maioria das linguagens de programação, sua estrutura permite um bom tempo de processamento e cálculos numéricos robustos e bem definidos. Adicionalmente, existe na literatura um grande número de arquivos fontes de alta qualidade disponíveis em linguagem Fortran.

Além disso, todos os problemas de programação linear deste trabalho foram resolvidos por meio de uma sub-rotina comercial de PL, em linguagem Fortran desenvolvido pela Universidade de Stanford, que faz parte do software conhecido como MINOS (*Modular Incore Nonlinear Optimization Systems*), versão 5.4.

O GAMS é um sistema de modelagem de alto nível, composto por diversos “solvers” capazes de resolver diversos problemas de otimização (linear, não-linear, inteira, etc.). ([BROOKE, KENDRICK E MEERAUS, 1996](#))

Nos testes foram usados valores de custos diferentes para os controladores FACTS com a finalidade de verificar o desempenho desses dispositivos do ponto de vista teórico e também porque não existem valores de custo confiáveis para esse tipo de dispositivos. Assim, para cada tipo de simulação adotou-se um custo fixo para o transformador defasador (d_{ij}) especificado em cada teste. Nas simulações com o modelo SC e PS+SC, fixou-se o custo do dispositivo de compensação série (h_{ij}) em 2 milhões de dólares.

Adotou-se um custo da geração artificial (r_k) de um milhão de dólares por MW (10^6 US/MW). A estratégia de escolher esse valor, para o custo do corte de carga, foi feita com a intenção de tornar mais atrativa a utilização dos controladores FACTS e a adição de linhas de transmissão, além de encontrar planos de expansão sem corte de carga.

No quesito custo dos controladores FACTS deve-se enfatizar que há uma variedade de preços devido a existência de diversos tipos de equipamentos com as mais variadas especificações técnicas. Também contribui para a variação de preço o fato de existir uma boa quantidade de equipamentos disponíveis comercialmente, outros estarem em fase de projeto, e alguns apenas em estudos iniciais.

Neste trabalho os custos dos controladores FACTS não estão baseados em informações reais, pois se tornariam inadequados, do ponto de vista econômico, para serem adicionados no sistema elétrico. Assim, foram escolhidos apenas valores técnicos suficientemente atrativos para tornar interessante a adição desses controladores.

Os modelos matemáticos propostos, nesta tese, possuem uma complexidade bastante elevada, pois são problemas de otimização não-linear inteiro misto que levam ao fenômeno da explosão combinatória.

Nas próximas seções serão ilustrados os principais resultados de programas computacionais aplicados ao problema de planejamento da expansão da transmissão. São mostrados os resultados obtidos com dois modelos tradicionais e com os novos modelos propostos neste trabalho.

Também são descritos o número de PL's resolvidos, que servirão de base para avaliar o esforço computacional dos algoritmos genéticos propostos.

7.2 Planejamento da Expansão com Adição de Linhas de Transmissão

Com a idéia de apresentar informações esclarecedoras que contribuam para uma melhor análise dos novos modelos propostos por parte do leitor, serão apresentados inicialmente os modelos que fazem uso da estratégia de adicionar apenas linhas de transmissão no problema de expansão da rede. Assim, serão apresentadas as topologias obtidas em simulações feitas com os modelos de transportes e DC.

7.2.1 Modelo de Transportes

Os resultados dos testes realizados com o sistema IEEE 24 barras, quando se faz o planejamento da expansão utilizando o modelo de transportes, são apresentadas na tabela 7.1. Os valores encontrados para as cinco topologias constantes nesta tabela foram obtidos por meio da estrutura GAMS com os “solvers” de programação inteira mista, que são idênticos aos encontrados no trabalho de Haffner ([HAFFNER ET AL., 2001](#)). O custo total está em milhões de dólares.

Tabela 7.1. Planos de expansão utilizando o modelo de transportes.

	Plano P_0	Plano P_1	Plano P_2	Plano P_3	Plano P_4
Circuitos	LT	LT	LT	LT	LT
n_{03-24}			1		
n_{06-10}	1	1	1	1	1
n_{07-08}	2	2	1	2	2
n_{10-12}			1		1
n_{13-14}				1	
n_{14-16}	1	1	1		1
n_{16-17}		2	2		1
n_{16-19}		1	1		
n_{17-18}		1	1		
Custo Total	102	226	310	110	188

O plano denotado por P_0 representa o planejamento com reprogramação da geração. Em outras palavras, neste plano o planejamento é feito sem fixar previamente os valores da geração. Nos planos P_1 , P_2 , P_3 e P_4 os valores de geração já estão fixados.

A menor proposta de investimento encontrada para o plano P_0 foi $v = 102.000.000,00$ (US\$), que adicionou 4 linhas de transmissão no sistema.

Por outro lado, a maior proposta de investimento, o plano P_2 , adicionou 9 linhas de transmissão que totalizaram um investimento $v = 310.000.000,00$ (US\$).

Nota-se que para todos os planos da tabela 7.1 foram alocados linhas de transmissão nos circuitos 6 – 10, 7 – 8 e 14 – 16. A única exceção foi o plano P_3 que não adicionou linha no circuito 14 – 16.

7.2.2 Modelo DC

Os resultados apresentados na tabela 7.2. mostram os planos de expansão do sistema IEEE 24 barras quando se utiliza o modelo DC.

Tabela 7.2. Planos de expansão utilizando o modelo DC.

	Plano P_0	Plano P_1	Plano P_2	Plano P_3	Plano P_4
Circuitos	LT	LT	LT	LT	LT
n_{01-05}		1	1		
n_{03-24}		1	1		1
n_{06-10}	1	1	1	1	1
n_{07-08}	2	2	1	2	2
n_{09-11}					1
n_{10-12}	1		1	1	1
n_{11-14}					1
n_{14-16}	1	1	1	1	1
n_{15-24}		1	1		
n_{16-17}		2	2	1	1
n_{16-19}		1			
n_{17-18}		2	2		
n_{20-23}				1	
Custo Total	152	390	392	218	346

As informações da tabela 7.2 foram obtidas por meio da estrutura GAMS com os “solvers” de programação inteira mista. Essas informações também podem ser encontradas na tese de Mantovani (MANTOVANI, 2004) que obteve os resultados através de um algoritmo

genético. Uma contribuição desta tese foi ter encontrado soluções de melhor qualidade que as obtidas no artigo de Fang e Hill (FANG E HILL, 2003).

Pode-se verificar na tabela 7.2 que para todos os planos de expansão foram alocados linhas de transmissão nos circuitos 6 – 10, 7 – 8 e 14 – 16. Ao comparar os resultados do modelo de transportes e DC, percebe-se uma grande necessidade de reforço nesses três circuitos, independente do plano de expansão escolhido.

Nota-se também que para todos os cinco planos de geração do sistema IEEE 24 barras, as propostas de investimentos encontradas pelo modelo de transportes são muito inferiores às propostas encontradas pelo modelo DC. A justificativa é que o modelo de transportes apresenta uma complexidade menor que o modelo DC, pois deve satisfazer apenas a lei de Kirchhoff das correntes, ao passo que o modelo DC deve satisfazer as duas leis de Kirchhoff, no caso, das correntes e das tensões.

7.3 Planejamento da Expansão com Adição de Transformadores Defasadores

Conforme proposto no capítulo 5, a adição de transformadores defasadores no sistema pode ser representada por um modelo matemático, cuja estrutura representa um problema não-linear inteiro misto. Para resolver o modelo PS é proposto um algoritmo genético especializado.

Com relação aos custos de investimentos, deve-se enfatizar novamente que esta tese propôs valores fixos para os transformadores defasadores. As simulações computacionais do modelo PS foram divididas em três etapas. Na primeira etapa foram adicionados equipamentos de baixo valor, com custo fixo de 2 milhões de dólares. Na etapa seguinte, foram adicionados equipamentos de valor elevado, com custo fixo de 120 milhões de dólares. Finalmente, na última etapas foram adotados custos intermediários, isto é, para três planos escolhidos foram fixados valores diferentes para os transformadores defasadores. Neste caso, os valores escolhidos foram 20, 55 e 90 milhões de dólares.

Na próxima subseção serão mostrados os resultados das simulações feitas com a modelagem que incorpora transformadores defasadores de baixo custo e linhas de transmissão no sistema.

7.3.1 Testes com transformadores defasadores de custo reduzido

Como mencionado na seção anterior, fixou o custo unitário de um transformador defasador em 2 milhões de dólares.

Tabela 7.3. Planos de expansão utilizando o modelo PS e transformadores defasadores de custo reduzido.

	Plano P ₀		Plano P ₁		Plano P ₂		Plano P ₃		Plano P ₄	
Circuitos	LT	TD	LT	TD	LT	TD	LT	TD	LT	TD
n ₀₁₋₀₃								1		
n ₀₃₋₀₉						1				1
n ₀₄₋₀₉						1				
n ₀₃₋₂₄					1					
n ₀₆₋₁₀	1		1		1		1		1	
n ₀₇₋₀₈	2		2		1		2		2	
n ₀₈₋₀₉		1		1						
n ₀₈₋₁₀								1		
n ₁₀₋₁₂					1				1	
n ₁₁₋₁₄		1		1						
n ₁₂₋₂₃				1				1		
n ₁₃₋₂₃										1
n ₁₄₋₁₆	1		1		1				1	
n ₁₅₋₁₆								1		
n ₁₆₋₁₇			2		2			1	1	
n ₁₆₋₁₉			1		1					
n ₁₇₋₁₈			1		1					
n ₁₇₋₂₂								1		
n ₁₉₋₂₀						2				
n ₁₃₋₁₄							1	1		
Custo Parcial	102	4	226	6	310	8	110	14	188	4
Custo Total	106		232		318		124		192	

A tabela 7.3 mostra o desempenho do algoritmo genético especializado. São ilustrados os resultados obtidos por meio de simulações computacionais que encontra, para cada um dos 5 planos, uma topologia que permite ao sistema operar de forma adequada.

Um fato bastante interessante a ser relatado nas simulações com transformadores defasadores de baixo custo se refere às linhas de transmissão. Para os cinco planos de expansão do sistema IEEE 24 barras ilustrados na tabela 7.3, percebe-se que as linhas, adicionadas pelo algoritmo genético especializado proposto, são as mesmas da solução ótima do modelo de transportes, obtidas por Haffner (HAFFNER ET AL., 2001) utilizando um algoritmo *branch-and-bound*.

Este fato também vem a confirmar a análise teórica que a solução ótima do modelo de transportes é infactível para o modelo DC, pois viola as restrições referentes à lei de Kirchhoff das tensões. Entretanto, este problema pode ser superado com a adição de transformadores defasadores de baixo custo alocados em locais estratégicos.

Nota-se que a maioria dos planos aloca uma quantidade reduzida de transformadores defasadores, a exceção é o plano 3, em que foram alocados 7 equipamentos.

A coluna do plano P_0 corresponde ao caso que admite a reprogramação da geração, e que nesta simulação apresentou o menor custo de investimento como era esperado.

A tabela 7.4 mostra o número de PL's que foram necessários para encontrar as soluções de cada um dos cinco planos ilustrados na tabela 7.3.

Tabela 7.4. Número de PL's resolvidos nos planos de expansão utilizando o modelo PS e transformadores defasadores de custo reduzido.

	Plano P_0	Plano P_1	Plano P_2	Plano P_3	Plano P_4
Quantidade de PL's resolvidos	19.100	19.040	16.104	11.592	23.200

O plano P_3 foi o que apresentou o menor número de PL's resolvidos para encontrar a solução para o problema de planejamento da transmissão com adição de transformadores defasadores de baixo custo e, portanto, realizou o menor esforço computacional.

7.3.2 Testes com transformadores defasadores de custo elevado

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações que adotaram um custo de 120 milhões de dólares para cada transformador defasador adicionado no sistema. Para mostrar o desempenho do algoritmo genético especializado são realizadas simulações, com o sistema teste, cujos resultados são ilustrados na tabela 7.5.

Tabela 7.5. Planos de expansão utilizando o modelo PS e transformadores defasadores de custo elevado.

	Plano P ₀		Plano P ₁		Plano P ₂		Plano P ₃		Plano P ₄	
Circuitos	LT	TD	LT	TD	LT	TD	LT	TD	LT	TD
n ₀₁₋₀₅			1		1					
n ₀₃₋₂₄			1		1				1	
n ₀₆₋₁₀	1		1		1		1		1	
n ₀₇₋₀₈	2		2		1		2		2	
n ₀₉₋₁₁									1	
n ₁₀₋₁₂	1				1		1		1	
n ₁₁₋₁₄									1	
n ₁₄₋₁₆	1		1		1		1		1	
n ₁₅₋₂₄			1		1					
n ₁₆₋₁₇			2		2		1		1	
n ₁₆₋₁₉			1							
n ₁₇₋₁₈			2		2					
n ₂₀₋₂₃							1			
Custo Parcial	152	0	390	0	392	0	218	0	346	0
Custo Total	152		390		392		218		346	

Novamente, a alocação de linhas merece destaque. As simulações realizadas com transformadores defasadores de custo elevado, ilustradas na tabela 7.5, indicam que não houve adição de transformador defasador em nenhuma das cinco topologias de expansão do sistema IEEE 24 barras.

A justificativa pela ausência de transformadores defasadores em todas as topologias é seu alto custo. Conseqüentemente, há uma tendência de se adicionar apenas linhas de transmissão.

Outro fato interessante, que merece ênfase, é relatar que as topologias encontradas para os cinco planos de expansão do sistema são todas melhores que as encontradas no trabalho de Fang e Hill (FANG E HILL, 2003).

O número de PL's necessários para obter as soluções de cada um dos cinco planos, quando se faz o planejamento da expansão com transformadores defasadores de custo elevado estão ilustrados na tabela 7.6.

Tabela 7.6. Número de PL's resolvidos nos planos de expansão utilizando o modelo PS e transformadores defasadores de custo elevado.

	Plano P ₀	Plano P ₁	Plano P ₂	Plano P ₃	Plano P ₄
Quantidade de PL's resolvidos	13.600	14.260	16.120	15.900	15.252

7.3.3 Testes com transformadores defasadores de custo intermediário

Nesta subseção foram empregados custos intermediários para os transformadores defasadores com a intenção de produzir propostas de expansão com valores intermediários quando comparados às soluções extremas obtidas nas seções 7.3.1 e 7.3.2. e que adicionam linhas de transmissão e transformadores defasadores.

Em outras palavras, a idéia é considerar a proposta de investimento do modelo de transportes como um limitante inferior para o problema e a proposta de investimento do modelo DC como um limitante superior. Desta forma, espera-se que a proposta de investimento, encontrada nos testes utilizando transformadores defasadores com custo intermediário, fique entre esses dois valores.

Para os testes com o plano P₁ foi adotado um custo de 55 milhões de dólares para cada equipamento adicionado no sistema.

As topologias encontradas pelo algoritmo genético especializado para o plano P₁ são ilustradas na tabela 7.7.

Tabela 7.7. Soluções com o plano P_1 do sistema IEEE 24 barras que utiliza o modelo PS e transformadores defasadores de custo intermediário.

	Solução 1		Solução 2		Solução 3	
Circuitos	LT	TD	LT	TD	LT	TD
n_{03-24}		1		1		1
n_{06-10}	1		1		1	
n_{07-08}	2		2		2	
n_{08-10}		1				
n_{09-12}				1		
n_{10-11}	1		1			
n_{10-12}					1	
n_{12-23}						1
n_{14-16}	1		1		1	
n_{16-17}	2		2		2	
n_{16-19}	1		1		1	
n_{17-18}	1		1		1	
Custo Parcial	276	110	276	110	276	110
Custo Total	386		386		386	

Com relação as linhas adicionadas, observa-se que os circuitos 10-11 e 10-12 que não estavam presentes nas topologias encontradas nos casos anteriores (transformadores defasadores com baixo e alto custo) aparecem agora.

Embora o algoritmo proposto tenha encontrado soluções ótimas alternativas para o plano P_1 , com custo de investimento da ordem de 386 milhões de dólares, o número de PL's resolvidos em cada caso foram bastantes distintos. Dentre elas, o menor esforço computacional ocorreu na solução 3 que resolveu 14.110 PL's, ao passo que nos dois casos restantes foram resolvidos 29.970 e 43. 898 PL's.

Nota-se também que nas três topologias encontradas para o plano P_1 foram adicionadas a mesma quantidade de transformadores defasadores no sistema.

Para as simulações com o plano P_3 foi adotado um custo de 20 milhões de dólares para cada equipamento adicionado no sistema. A solução encontrada pelo algoritmo genético especializado para este plano está ilustrada na tabela 7.8.

Tabela 7.8. Soluções com o plano P_3 do sistema IEEE 24 barras que utiliza o modelo PS e transformadores defasadores de custo intermediário.

Circuitos	Solução	
	LT	TD
n_{06-10}	1	
n_{07-08}	2	
n_{10-12}	1	
n_{14-16}	1	
n_{17-18}		1
n_{20-23}	1	
Custo Parcial	182	20
Custo Total	202	

O algoritmo genético especializado encontrou uma única solução com custo de investimento da ordem de 202 milhões de dólares. Para encontrar esta solução foram resolvidos 23.490 PL's.

Neste caso, observa-se que apenas o circuito 16-17 não constava nas topologias encontradas nos casos anteriores (transformadores defasadores com baixo e alto custo). Também ocorreu a adição de um transformador defasador no caminho 17-18.

Para o plano P_4 foi adotado um custo de 90 milhões de dólares para cada equipamento adicionado no sistema. A solução encontrada para este plano está ilustrada na tabela 7.9.

O algoritmo genético proposto encontrou uma única solução com custo de investimento da ordem de 328 milhões de dólares e para isso foi necessário resolver 42.000 PL's.

Tabela 7.9. Soluções com o plano P₄ do sistema IEEE 24 barras que utiliza o modelo PS e transformadores defasadores de custo intermediário.

Circuitos	Solução	
	LT	TD
n ₀₆₋₁₀	1	
n ₀₇₋₀₈	2	
n ₀₉₋₁₂	1	
n ₁₀₋₁₁	1	
n ₁₁₋₁₄		1
n ₁₄₋₁₆	1	
n ₁₆₋₁₇	1	
Custo Parcial	238	2
Custo Total	328	

Observa-se que os circuitos 09-12 e 10-11 não faziam parte das topologias encontradas nos casos anteriores (transformadores com baixo e alto custo).

7.4 Planejamento da Expansão com Adição de Dispositivos de Compensação Série

Nas simulações realizadas com o modelo SC, o custo unitário do equipamento foi fixado em 2 milhões de dólares.

Em comparação com o modelo PS, o algoritmo genético especializado proposto é mais complexo e, conseqüentemente, encontrará mais dificuldade para resolvê-lo. Uma das dificuldades se encontra no fato deste algoritmo genético possuir em suas codificações, variáveis contínuas que representa a porcentagem de compensação realizada em um determinado caminho.

O desempenho da metodologia proposta para o modelo SC no sistema está ilustrado na tabela 7.10, sendo apresentado os resultados das cinco topologias de expansão do sistema IEEE 24 barras.

Tabela 7.10. Planos de expansão utilizando o modelo SC.

	Plano 0		Plano 1		Plano 2		Plano 3		Plano 4	
Circuitos	LT	CS	LT	CS	LT	CS	LT	CS	LT	CS
n ₀₁₋₀₅				-0,24						
n ₀₃₋₂₄		-0,26		-0,29		-0,28				-0,24
n ₀₆₋₁₀	1		1		1		1		1	
n ₀₇₋₀₈	1		2		1		2		2	
n ₀₉₋₁₂						0,12				
n ₁₀₋₁₁		0,12	1		1					
n ₁₀₋₁₂	1						1		1	
n ₁₁₋₁₄				0,25	1	0,27				0,13
n ₁₂₋₁₃										-0,22
n ₁₄₋₁₆	1		1		2		1		1	
n ₁₅₋₂₄						-0,24				-0,27
n ₁₆₋₁₇			2		2			-0,11	1	
n ₁₆₋₁₉			1							
n ₁₇₋₁₈			1					-0,20		
n ₂₀₋₂₃							1			
Custo Parcial	136	4	276	6	340	10	182	4	188	8
Custo Total	140		282		350		186		196	

Verifica-se que todas as cinco propostas de investimentos encontradas com o modelo SC se encontram abaixo das soluções encontradas com o modelo DC tradicional que adicionam apenas linhas de transmissão.

No caso específico do plano P₀, percebe-se que as linhas de transmissão são adicionadas nos mesmos circuitos que o modelo DC tradicional, com a diferença que foi retirada 1 linha no caminho 07-08 e substituída por dispositivos de compensação série nos caminhos 03-24 e 10-11. O custo de investimento encontrado pelo algoritmo genético é de 140 milhões de dólares. Há uma redução de 26% na susceptância original da linha no caminho 03-24 e um aumento de 12% na susceptância original da linha no caminho 10-11.

A redução mais sensível de custo de investimento ocorreu no plano P₄, houve uma diferença de 150 milhões de dólares quando comparado com o modelo DC tradicional. Ao avaliar os resultados obtidos com esses dois modelos, nota-se a exclusão de três linhas do modelo DC que estavam nos caminhos 3-24, 9-11 e 11-14, que foram trocadas por dispositivos de compensação série alocados estrategicamente no sistema. Deve-se observar

que, neste caso, as linhas de transmissão adicionadas são as mesmas do plano ótimo para o modelo de transportes.

Como mencionado anteriormente, o modelo SC foi resolvido através da aplicação de um algoritmo genético. Para cada um dos cinco planos, o algoritmo encontrou a solução e, conseqüentemente, o número de PL's necessários para resolvê-los. Esses valores estão ilustrados na tabela 7.11.

Tabela 7.11. Número de PL's resolvidos nos planos de expansão utilizando o modelo SC.

	Plano P ₀	Plano P ₁	Plano P ₂	Plano P ₃	Plano P ₄
Quantidade de PL's resolvidos	26.094	17.671	22.692	23.607	39.935

7.5 Planejamento da Expansão com Adição de Transformadores Defasadores e Dispositivos de Compensação Série

Com o objetivo de avaliar o modelo matemático que incorpora transformadores defasadores e dispositivos de compensação série juntamente com linhas de transmissão, foram fixados, respectivamente, em 10 e 2 milhões, os custos unitários para o dispositivo de compensação série e para o transformador defasador. Os custos unitários referentes às linhas de transmissão estão relacionados no apêndice B.

Um algoritmo genético especializado foi implementado com a intenção de fornecer como solução o número de linhas de transmissão, transformadores defasadores e dispositivos de compensação série que devem ser adicionados. Também fornece o local onde devem ser alocados esses equipamentos no sistema, além da porcentagem de compensação dos dispositivos de compensação série. As codificações possuem variáveis inteiras e contínuas na sua estrutura.

Dentre todos os algoritmos genéticos propostos para resolver os novos modelos matemáticos, este foi o que apresentou a maior complexidade na sua resolução, pois a sua

codificação apresenta características do transformador defasador, do dispositivo de compensação série e das linhas de transmissão.

Os impactos da adição desses equipamentos no sistema podem ser mostrados através dos resultados das simulações que se encontram nas tabelas 7.12 e 7.13.

Tabela 7.12. Planos P₁, P₂ e P₃ de expansão utilizando o modelo PS+SC.

Circuitos	Plano 0			Plano 1			Plano 2		
	LT	TD	CS	LT	TD	CS	LT	TD	CS
n ₀₁₋₀₃						0,2939		1	
n ₀₁₋₀₅							1		
n ₀₃₋₂₄							1		
n ₀₆₋₁₀	1			1			1		
n ₀₇₋₀₈	2			2			1		
n ₀₈₋₀₉		1			1				
n ₀₈₋₁₀								1	
n ₀₉₋₁₂			-0,087						
n ₁₂₋₂₃						0,2857			
n ₁₄₋₁₆	1		0,1334	1			1		
n ₁₅₋₁₆				1					
n ₁₅₋₂₁				1			1		
n ₁₅₋₂₄		1			1		1		
n ₁₆₋₁₇			-0,295	1			1		-0,2763
n ₁₆₋₁₉				1					
n ₁₇₋₁₈					1				
Custo Parcial	102	20	8	262	30	4	334	20	4
Custo Total	130			296			358		

Neste caso, para os cinco planos de expansão com o modelo que adiciona linhas de transmissão, transformadores defasadores e dispositivos de compensação série, os custos de investimentos estão dentro do intervalo das soluções encontradas com os modelos de transportes e DC tradicionais, que adicionam apenas linhas de transmissão.

Tabela 7.13. Planos P₄ e P₅ de expansão utilizando o modelo PS+SC.

	Plano 3			Plano 4		
Circuitos	LT	TD	CS	LT	TD	CS
n ₀₁₋₀₃			0,2894			
n ₀₃₋₂₄					1	
n ₀₆₋₁₀	1			1		
n ₀₇₋₀₈	2			2		
n ₀₈₋₀₉		1				
n ₁₀₋₁₂				1		
n ₁₁₋₁₃	1					
n ₁₂₋₁₃		1				-0,2002
n ₁₃₋₂₃		1				
n ₁₄₋₁₆				1		
n ₁₅₋₂₄						
n ₁₆₋₁₇			-0,2789	1		
n ₁₇₋₂₂			0,1466			
n ₁₉₋₂₀			-0,2642			
Custo Parcial	114	30	10	188	10	2
Custo Total	154			200		

Para cada um dos cinco planos testados, o algoritmo genético especializado utilizado para resolver o modelo PS+SC encontram uma solução após resolver um determinado número de PL's. O número de PL's resolvidos em cada plano estão ilustrados na tabela 7.14.

Tabela 7.14. Número de PL's resolvidos nos planos de expansão utilizando o modelo PS+SC.

	Plano P ₀	Plano P ₁	Plano P ₂	Plano P ₃	Plano P ₄
Quantidade de PL's resolvidos	39.078	38.984	22.496	43.700	21.042

Na tabela 7.15 são mostrados os fluxos encontrados na solução do plano P_0 , quando se utilizam os dois modelos clássicos (DC e Transportes) e os três novos modelos com a finalidade de avaliar o impacto que produz a adição de controladores FACTS no sistema.

Tabela 7.15 Fluxo de potência (MW) encontrados nas simulações com os modelos testados e aplicados ao sistema IEEE 24 barras.

Nº da Linha	Circuito	Modelo de Transportes	Modelo DC	Modelo TD	Modelo CS	Modelo TD+CS
1	1-2	65,00	-21,88	-23,86	-17,25	-15,25
2	1-3	12,00	87,81	100,86	95,67	93,89
3	1-5	175,00	175,00	175,00	173,58	173,35
4	2-4	175,00	154,77	152,67	160,79	163,10
5	2-6	175,00	108,33	108,46	106,94	106,64
6	3-9	-128,00	-52,18	-79,65	-53,94	-46,10
7	3-24	-400,00	-400,00	-359,47	-390,37	-400,00
8	4-9	-47,00	-67,22	-69,32	-61,20	-58,89
9	5-10	-38,00	-38,00	-38,00	-39,41	-39,64
10	6-10	-233,00	-299,66	-299,53	-301,05	-301,35
11	7-8	525,00	525,00	525,00	350,00	525,00
12	8-9	-44,00	8,73	-122,93	-73,62	-161,06
13	8-10	56,00	3,26	134,93	-89,37	173,06
14	9-11	-344,00	-319,65	-398,45	-359,78	-391,05
15	9-12	-400,00	-316,01	-398,45	-353,99	-400,00
16	10-11	-400,00	-308,89	-393,80	-368,84	-352,94
17	10-12	-400,00	-610,50	-393,80	-646,00	-400,00
18	11-13	-500,00	-493,58	-500,00	-489,79	-500,00
19	11-14	-244,00	-134,95	-292,26	-238,83	-244,00
20	12-13	-320,00	-500,00	-500,00	-500,00	-417,05
21	12-23	-480,00	-426,52	-292,26	-500,00	-382,94
22	13-23	-500,00	-201,18	-51,24	-283,23	-198,15
23	14-16	-826,00	-716,95	-874,26	-820,83	-826,00
24	15-16	88,00	98,51	136,26	135,29	241,38
25	15-21	-794,00	-804,51	-847,17	-847,64	-947,38
26	15-24	400,00	400,00	359,47	390,37	400,00
27	16-17	-500,00	-443,24	-500,00	-500,00	-497,76
28	16-19	-73,00	-10,20	-73,00	-20,53	78,14
29	17-18	-500,00	-385,85	-441,28	-441,31	-427,90
30	17-22		-57,39	-58,71	-58,68	-69,86
31	18-21	-906,00	-338,09	-294,10	-293,66	-226,90
32	19-20	-616,00	-553,20	-616,00	-563,53	-464,85
33	20-23	-1000,00	-937,20	-1000,00	-947,53	-848,85
34	21-22	-500,00	57,39	58,71	58,68	25,71

Para entender a tabela 7.15, são mostrados dois dados da linha 1, a título de exemplo. Ao fazer a intersecção desta linha com a coluna do modelo de transportes tem-se o valor 65, que significa a passagem de fluxo de 65 MW da barra 1 para a barra 2. Nesta mesma linha tem-se o valor negativo $-21,88$, que denota um fluxo de 21,88MW da barra 2 para a barra 1. Assim sendo, o sinal indica apenas o sentido do fluxo.

Ao comparar os resultados do modelo DC com os modelos propostos, contidos na tabela 7.15, nota-se uma diferença significativa em relação ao fluxo do caminho 8 – 9. A adição de transformadores defasadores afetou o sentido neste caminho. Para o caso que adiciona dispositivos de compensação série afetou o sentido do fluxo nos caminhos 8 – 9 e 8 - 10. No caso de adição dos dois tipos de equipamentos, mudou o sentido do fluxo nos caminhos 8 – 9 e 16 – 19. Outra observação pertinente é que em alguns caminhos os fluxos variam significativamente.

7.6 Comentários Sobre os Resultados

Deve-se observar que os modelos que adicionam controladores FACTS, propostos nesta tese, se mostraram eficientes, pois os resultados obtidos com o sistema teste para todos os planos são coerentes (aceitáveis). Os modelos conseguiram resolver o problema de conflito de fluxo no sistema, gerado pela lei de Kirchhoff das tensões, ao adicionar controladores FACTS em lugares estratégicos.

Neste trabalho, as simulações referentes ao modelo que adiciona somente transformadores defasadores, que consideram os custos mais elevados, tem o comportamento mais homogêneo em relação ao número de PL's resolvidos pelos planos.

Ao comparar os resultados obtidos com as simulações, para avaliar o esforço computacional dos algoritmos genético especializados, para os cinco planos dos três modelos propostos, observa-se que o maior esforço ocorre no modelo que considera a adição dos dois tipos de controladores FACTS. Por outro lado, o menor esforço computacional aplicado se refere ao modelo PS.

Observa-se que em todos os resultados obtidos com os três modelos (que adicionam transformadores defasadores de custo reduzido, dispositivos de compensação série e transformadores defasadores e dispositivos de compensação série juntos), os custos de investimentos encontrados ficaram abaixo do obtido com o modelo DC e acima do modelo de transportes. As figuras 7.1, 7.2 e 7.3 ilustram este fato.

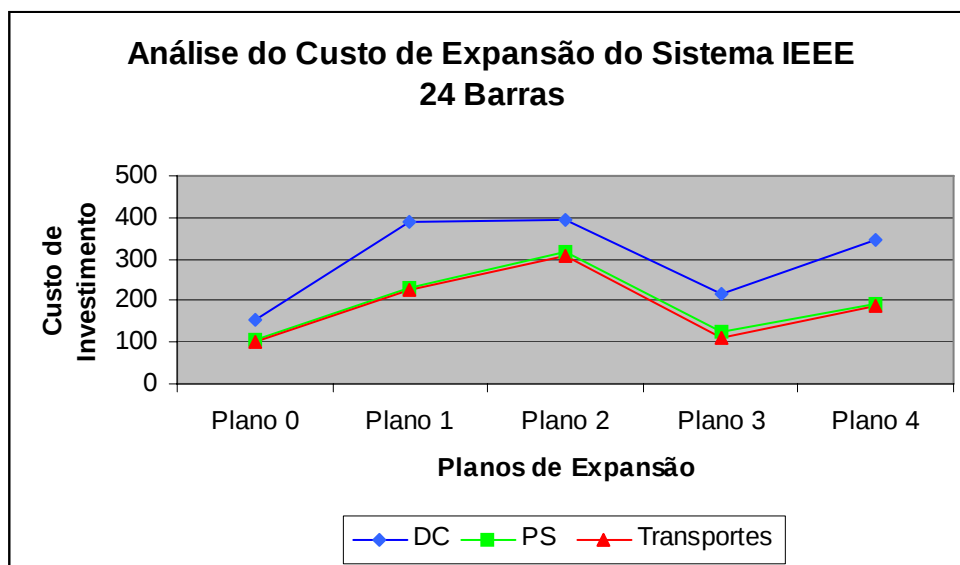


Figura 7.1 Análise comparativa entre os modelos DC, PS e de transportes.

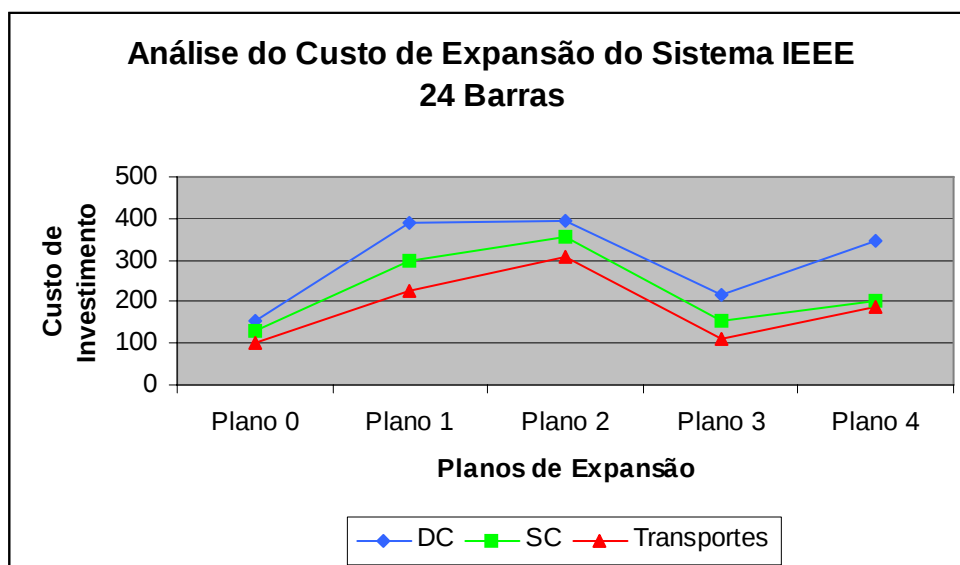


Figura 7.2 Análise comparativa entre os modelos DC, SC e de transportes.

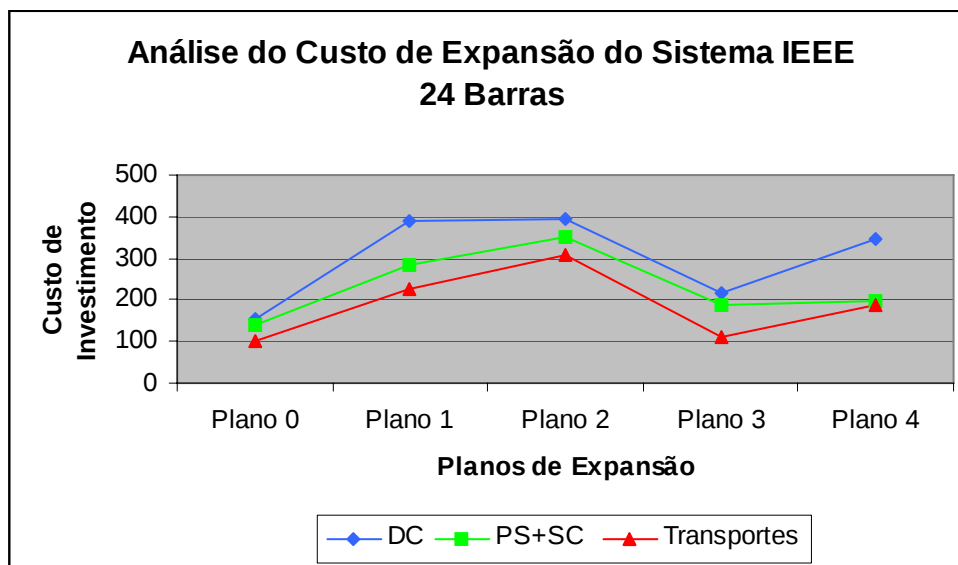


Figura 7.3 Análise comparativa entre os modelos DC, PS+SC e de transportes.

Nos modelos DC e de Transportes, a presença de geração fictícia indica a necessidade de adicionar circuitos.

Vale relembrar novamente, que os controladores FACTS se tornaram atrativos porque neste trabalho foram considerados custos apropriados para os testes e que não refletem valores reais, pois não são fáceis de encontrar. A finalidade foi analisar o comportamento do modelo matemático e do algoritmo proposto com a inserção desses equipamentos na rede.

Quando se aplica algoritmos heurísticos, um aspecto crítico é a falta de robustez com respeito a diferentes entradas de dados. Então, deve-se enfatizar que os algoritmos genéticos especializados propostos neste trabalho se mostraram bastantes robustos para os cinco planos do sistema IEEE 24 barras testados.

Capítulo 8

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo visa-se apresentar uma síntese dos pontos mais significativos desta tese, obtidos através dos resultados das simulações computacionais com modelos matemáticos inéditos, aplicados ao problema de planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica a longo prazo, bem como fornecer sugestões para pesquisas e pretensões de trabalhos futuros.

Antes de enunciar as conclusões acerca deste trabalho, é preciso esclarecer suas principais motivações e suas áreas de abrangência dentro do ambiente acadêmico, para melhor compreensão dos procedimentos de pesquisa e da análise dos resultados.

Esta tese foi desenvolvida em um ambiente de engenharia de sistema de potência que, de maneira informal, pode ser entendida como uma junção das áreas da matemática aplicada, computação científica e engenharia propriamente; com a finalidade de analisar qualitativamente processos de tomadas de decisões, estabelecer modelos matemáticos que as auxiliem e resolvê-los através de ferramentas computacionais.

8.1 Conclusões Finais

No presente trabalho descreve-se o desenvolvimento de novas metodologias para o problema de planejamento da transmissão, cuja relevância se encontra na possibilidade de considerar controladores FACTS como componentes da expansão de um sistema elétrico.

Foram realizadas comparações dos modelos propostos com dois modelos, transportes e DC, já existentes na literatura. Os novos modelos matemáticos de natureza estática propostos para a resolução do problema de planejamento do sistema de transmissão, que consideram a inclusão de dispositivos de compensação série e transformadores defasadores, individualmente e integrados são originais, e consistentes.

A instalação de transformadores defasadores e/ou dispositivos de compensação série no sistema afeta as equações do fluxo de carga. Ao introduzir um controlador FACTS no modelo matemático que representa o problema de planejamento da expansão da transmissão ocorreu um aumento da não-linearidade do modelo e, conseqüentemente, a complexidade no processo de resolução.

Neste trabalho, para os modelos propostos, a instalação de controladores FACTS acarretou alterações na função objetivo e no conjunto de equações referentes à lei de Kirchhoff para as tensões.

As simulações computacionais realizadas com os modelos matemáticos propostos por meio do sistema IEEE 24 barras permitiram obter análises sobre o impacto da incorporação de transformadores defasadores e dispositivos de compensação série para vários tipos de operação.

Apesar dos modelos desconsiderarem alguns itens técnicos, os resultados obtidos levam a indicação da viabilidade técnica dos modelos propostos. Portanto, pode-se generalizar os modelos que representam o problema de planejamento da transmissão com a adição de transformadores defasadores e/ou dispositivos de compensação série.

Os transformadores defasadores e os dispositivos de compensação série podem ser utilizados como elementos candidatos à expansão no problema de planejamento da rede, pois representam uma nova opção para redução do custo de investimento.

Os testes computacionais também mostraram a eficiência de desempenho dos transformadores defasadores e dos dispositivos de compensação série no sistema, pois a presença desses equipamentos fez com que os fluxos fossem redirecionados de tal forma que melhoraram a operação do sistema ao atenuar a intensidade dos fenômenos de fluxo de malha e paralelo. Além disso, foi possível fazer uma análise detalhada de alguns parâmetros do sistema como: o ângulo nas barras, geração nas barras, fluxo nas linhas, número de linhas de transmissão e equipamentos adicionados.

Os resultados obtidos através do modelo PS com transformadores defasadores de baixo custo foram bastante significativos, pois para todos os cinco planos testados alocaram as mesmas linhas encontradas nas soluções do modelo de transportes. As violações das restrições referentes à lei de Kirchhoff das tensões foram superadas com a adição, em locais adequados, de transformadores defasadores.

Durante a pesquisa também foram desenvolvidos e implementados algoritmos evolutivos para resolver os modelos propostos. Com relação aos algoritmos evolutivos desenvolvidos, pode-se mencionar as seguintes conclusões:

- Os algoritmos genéticos especializados propostos para resolver os novos modelos matemáticos são robustos, eficazes e eficientes.
- O mecanismo de geração da população inicial, o operador de mutação e a calibração dos parâmetros foram os pontos mais relevantes dos algoritmos propostos nesta tese.
- O mecanismo de geração da população inicial tem grande influência na busca por uma solução de boa qualidade nos modelos que permitem a adição de controladores FACTS. Nos modelos propostos foi utilizada uma heurística para gerar a população inicial que se mostrou bastante eficiente.
- Em todos os algoritmos propostos, a realização do mecanismo de mutação (de um ponto ou vários pontos) sofre influência de uma taxa de diversificação. Um fator que merece destaque no operador de mutação é a lista de prioridades de ações (heurísticas) aplicadas em cada algoritmo genético proposto.

Nesta tese, as análises qualitativas dos modelos matemáticos propostos merecem mais destaque que as análises quantitativas das simulações computacionais.

Apesar de não serem referidos explicitamente no trabalho, é obvio que vários modelos e algoritmos foram propostos e testados, mas não apresentaram resultados satisfatórios. Assim, para se chegar aos modelos e algoritmos propostos nesta tese, um caminho árduo e espinhoso teve de ser percorrido. Tem-se a convicção que os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados.

8.2 Sugestões de Melhorias Para Futuros Trabalhos

Deve-se salientar a necessidade de mais estudos sobre a adição de controladores FACTS no problema de planejamento do sistema de transmissão. Desta forma são apresentadas, a seguir, sugestões para que as idéias relatadas neste trabalho possam auxiliar outros pesquisadores no seu aperfeiçoamento e/ou na sua continuidade.

- Pesquisar e implementar novas melhorias na técnica de solução, tornando-a mais eficiente em termos de resultados, com relação ao número de PL's resolvidos;
- Utilizar outras técnicas de solução para resolver os modelos matemáticos propostos nesta tese, para fazer a análise dos resultados;
- Propor modelos matemáticos alternativos utilizando outros dispositivos FACTS, com custos variáveis;
- Realizar o planejamento de alocação ótima de potência reativa. A seguir, as propostas de expansão encontradas devem ser posteriormente avaliadas utilizando as técnicas usadas no planejamento da operação, tais como fluxo de carga AC, análise de estabilidade, análise de curto-circuito, etc;
- Fazer simulações com os novos modelos e algoritmos propostos nesta tese utilizando sistemas de maior porte;

-
- Propor uma representação mais exata dos controladores FACTS nos modelos matemáticos propostos;
 - Aplicar os modelos e as técnicas em modelos de operação mais complexos tais como o planejamento multi-estágio e no mercado competitivo usando as mesmas idéias sugeridas nesta tese.
 - Avaliar o impacto da utilização de dispositivos FACTS na segurança do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB Group Overview about FACTS Applying to your Electric Power System, 2002, Disponível em: < <http://www.abb.com/facts>> Acesso em 25/05/2002.
- AN, S.; GEDRA, T.W. **Estimation of UPFC Value Using Sensitivity Analysis**, Proceedings of the Midwest Symposium on Circuits & Systems, Tulsa, OK, pp.1-4, 2002.
- ARRILLAGA J.; ARNOLD C.P. **Computer Modelling of Electrical Power Systems**, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- ASADA, E.N.; CARRENO, E.; ROMERO, R.; GARCIA, A.V.; **A Branch-and-Bound Algorithm for the Multi-stage Transmission Expansion Planning** IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp.17–22, Junho 2005.
- BINATO, S. **Expansão Ótima de Sistemas de Transmissão Através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes**, 2000, 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- BINATO, S.; OLIVEIRA, G. C. **A Reactive GRASP for Transmission Network Expansion Planning**, in Essays and Surveys on Metaheuristics, C. C. Ribeiro and P. Hansen, Eds. Norwell, MA: Kluwer, pp. 81–100, 2001.
- BINATO, S.; OLIVEIRA, G. C.; ARAUJO, J. L. **A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Network Expansion Planning**, IEEE Transactions Power System, vol. 16, pp. 247–253, Maio 2001.

- BINATO, S.; ROMERO, S. P. **Power Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Genetic Algorithm**, in Proc. IX Latin-IberoAmerican Congress on Operations Research (IX CLAIO), Buenos Aires, Argentina, July/Aug. 1998.
- BROSDA, J.; HANDSCHIN, E. **Congestion Management Methods with a Special Consideration of FACTS-Devices**, in Proc. IEEE Porto Power Tech Conference (PPT 2001), Porto, Portugal, Set. 2001.
- BROOKE, A.; KENDRICK, D; MEERAUS, A. **GAMS: A User's Guide**: GAMS Development Co, 1996.
- CAI, L. J.; ERLICH, L. STAMTSIS, G. **Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices in Deregulated Electricity Market Using Genetic Algorithms**, in Proc. IEEE Power Systems Conference and Exposition (PSCE 2004), New York, EUA, Out. 2004.
- CASTRO, R.M.G.; BATISTA, F.M.R.; MEDEIROS PINTO, J.M. **Application of FACTS in the Portuguese Transmission System: Investigation on the Use of Phase-shift Transformers**, IEEE Porto Power Tech Conference, Vol.4, pp. 10-13, setembro 2001.
- CAVALIERI, C. A. C. **Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados**, 2001, 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2001
- CHU, P. C.; BEASLEY, J. E. **An Genetic Algorithm for the Generalized Assignment Problem**, Computers Operations Research, vol. 24, nº 1, pp. 17–23, 1997.
- COELHO, L. S. Fundamentos, Potencialidades e Aplicações de Algoritmos Evolutivos, SBMAC, São Carlos, 2003. Disponível em: <http://www.sbmec.org.br/boletim/pdf_2003/livro_02_2003.pdf> Acesso em: 10/11/2004
- DA SILVA, E. L.; GIL, H. A.; AREIZA, J. M. **Transmission Network Expansion Planning Under an Improved Genetic Algorithm**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, pp. 1168–1175, 2000.

- DA SILVA, E. L.; ORTIZ, J. M. A.; DE OLIVEIRA, G. C.; BINATO, S. **Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach**, IEEE Transactions Power Apparatus System, vol. 16, pp. 62–68, fevereiro 2001.
- DIAZ, A.; GLOVER, F.; GHAZIRI, H. M.; LAGUNA, M.; MOSCATO, P.; TSENG, F. T. **Optimización Heurística y Redes Neuronales**, Editorial Paraninfo S.A., Madri, 1996.
- DORIGO, MJ. Metaheuristics Network, IRIDIA/Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, 2002. Disponível em: <<http://www.metaheuristics.net/index.php?main=1>> Acesso em 08/03/2005
- ELGERD, O. **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976. 604 p.
- ESCOBAR, A.; GALLEGO, R. A.; ROMERO, R. **Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of the Transmission Systems**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, nº 2, pp. 735–744, 2004.
- FANG, R.; HILL, D. **A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, Nº 1, pp. 374–380, 2003.
- FARDANESH, B. **Optimal Utilization, Sizing, and Steady-State Performance Comparison of Multiconverter VSC-Based FACTS Controllers**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.3, pp. 1321-1327, 2004.
- FONSECA, I. M. Algoritmos Genéticos, DEM/INPE, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://www2.dem.inpe.br/ijar/gene1.html>> Acesso em 20/11/2004
- GALLEGO, R. A.; ALVES, A. B.; MONTICELLI, A.; ROMERO, R. **Parallel Simulated Annealing Applied to Long Term Transmission Expansion Planning**, IEEE Transactions Power System, vol. 12, pp. 181–187, 1997.

- GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A.; ROMERO, R. **Transmission System Expansion Planning by an Extended Genetic Algorithm**, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 145, pp. 329–335, 1998.
- GALLEGO, R. A.; ROMERO, R.; MONTICELLI, A. J. **Tabu Search Algorithm for Network Synthesis**, IEEE Transactions Power System, vol. 15, pp. 490–495, 2000.
- GARVER L.L. **Transmission Network Estimation Using Linear Programming**, IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-89, pp. 1688-1697, 1970.
- GERBEX, S.; CHERKAoui, R.; GERMOND, A. J.: **Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 3, pp. 537-544, 2001.
- GERBEX, S.; CHERKAoui, R.; GERMOND, A. J.: **Optimal Location of FACTS Devices to Enhance Power System Security**, in Proc. IEEE Bologna Power Tech Conference (BPT 2003), Bologna, Itália, Jun. 2003.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**, Reading: Addison Wesley, 1989.
- GRANVILLE, S.; PEREIRA, M. V. F. **Analysis of the Linearized Power Flow Model in Benders Decomposition** EPRI-Report RP 2473-6, University de Stanford, fevereiro 1985.
- GRÜMBAUM, R.; PERNOT, J. **Thyristor Controlled Series Compensation: a State of the Art Approach for Optimization of Transmission Over Power Links**, ABB Review, 2001.
- HAFFNER, S. L. **O Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos no Contexto de um Ambiente Competitivo**, 2000, 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

- HAFFNER, S.; MONTICELLI, A.; GARCIA, A.; ROMERO, R. **Specialized Branch and Bound Algorithm for Transmission Network Expansion Planning**, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, n° 5, pp. 482-488, 2001.
- HINGORANI, N. G. **Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronic in Future Power Systems**, Proceedings of IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, 1988.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- HUANG, C.N. **Feature Analysis of Power Flows Based on the Allocations of Phase-Shifting Transformers**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, No. 1, pp. 266-272, 2003.
- HUANG, C.N. **The Optimal Allocation Pattern of Phase Shifting Transformers for Unwinding Parallel Flows**, IEEE/PES T&D 2002 Conference Proceeding, Vol. 1, pp. 68-73, 2002.
- IRAVANI, M.R.; DANDENO, P.L.; NGUYEN, K.H.; ZHU, D.; MARATUKULAM, D. **Applications of Static Phase Shifters in Power Systems**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No. 3, pp.1600-1608, 1994.
- KUROKAWA, R.A. **Algoritmo de Branch-and-Bound para o Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão Usando o Modelo de Transportes**, 1999, 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 1999.
- LEVI, V.A.; CALOVIC, M.S.; **A New Decomposition Based Method for Optimal Expansion Planning of Large Transmission Networks**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No. 3, pp. 937-943, 1991.
- LIMA, F.G.M.; GALIANA, F.D.; KOCKAR, I.; MUNOZ J. **Phase Shifter Placement in Large-Scale Systems via Mixed Integer Linear Programming**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, No. 3, pp. 1029-1034, 2003.

- MANTOVANI, M. A. **Desenvolvimento de Algoritmos Evolutivos Para o Problema de Planejamento da Expansão a Longo Prazo de Sistemas de Transmissão**, 2004, 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- MIASAKI, C. T. **Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Usando Transformadores Defasadores**, 2002, 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + Data Structures = Evolution Programs**, 3ª edição, Springer-Verlag, 1996.
- MILLER, T. J. E. **Reactive Power Control in Electric Systems**, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- MONTICELLI, A.J.: **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 1983.
- MONTICELLI, A., SANTOS Jr, A., PEREIRA, M.V.F.; CUNHA, S.H.F., PARKER, B.J., PRAÇA, J.C.G., **Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion**, IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-101, pp. 3919-3925, 1982.
- MUTALE J.; STRBAC G. **Transmission Network Reinforcement Versus FACTS: An Economic Assessment**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.15, No. 3, pp. 961-967, 2000.
- NILSON, G.; BAHRMAN, J. **Power Flow Control**. Panel Session on FACTS Changes Power System Control, IEEE/PES Winter Power Meeting, pp. 1-15, 1994.
- NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. **Power Flow Control by Use of Controllable Series Components**, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 8, Nº 3, pp. 1420-1429, Julho 1993.

- OLIVEIRA E. J.; MARANGON LIMA J. W. **FACTS: Localização Ótima e Impacto no Preço da Transmissão**, XII Congresso Brasileiro de Automática, vol.III, Uberlândia, MG, pp. 1035-1042, 1998.
- OLVERA, R.T. Un Criterio Óptimo para Coordinar Estabilizadores Enfocado Mediante una Técnica Global Heurística, 2002, 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Investigación y Estudios Avanzados Del IPN – Unidad Guadalajara, Guadalajara, Agosto 2002. Disponível em: <http://www.gdl.cinvestav.mx/~jramirez/Tesis_RTO.pdf>. Acesso em 11 jul. 2005.
- ORFANOIANNI, T.; BACHER, R. **Steady-State Optimization in Power Systems With Series FACTS Devices**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, No. 1, pp. 19-26, 2003.
- PATERNI, P.; BENA, M.; GIARD, A.; YOKOYAMA, A. **Optimal Set of Phase Shifters in Transmission Network for Solving Thermal Constraints Using Genetic Algorithm**, National Convention Record IEE Japan, 1997.
- PATERNI, P.; VITET, S.; BENA, M.; YOKOYAMA, A. **Optimal Location of Phase Shifters in the French Network by Genetic Algorithm**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 37-42, 1999.
- PEREIRA, J. L. R. **Modelagem de Dispositivos de Controle FACTS em Sistemas de Potência para Análise em Regime Permanente**, Mini-curso do XIII Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis, SC, 2000.
- PEREIRA, M.V.; PINTO, L.M.V.G.; **Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning**, IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-104, pp. 381-389, 1985.
- PIN, R. M. **Utilização de Conversores com Fonte de Tensão no Controle de Fluxo de Potência**, 2004, 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

- REED, G.; PASERBA, J.; SALAVANTIS, P. **The FACTS on Resolving Transmission Gridlock**, IEEE Power & Energy Magazine, pp 41-46, 2003.
- REZA, M.; KLING, W.L. **Solving Network Constraints (Congestions) by Investigating Impact of Phase Shifters on the Flows**, Proceedings of the Second IASTED International Conference Power and Energy Systems, pp.189-193, 2002.
- RIDER, M.J.; CASTRO, C.A.; PAUCAR, V.L.; GARCIA, A.V. **Higher Order Interior-point Method for Minimising Load-shedding in a Competitive Electric Power Market** IEE Proceedings – Generation Transmission and Distribution, Vol.151, No. 4, pp. 433-440, 2004.
- ROCHA, C. R. **Algoritmo Heurístico Integrado Aplicado ao Planejamento de Sistemas de Transmissão a Longo Prazo**, 1999, 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 1999.
- ROMERO R.; MONTICELLI A. **A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.09, No. 1, pp 373-380, 1994.
- ROMERO, A.; MANTOVANI, J. R. S. **Introdução a Metaheurísticas**, Mini-curso do III Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC, Ilha Solteira, SP, Junho 2004.
- ROMERO, R.; GALLEG0, R. A.; MONTICELLI, A. **Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing**, IEEE Transactions Power System, vol. 11, pp. 364–369, 1996.
- ROMERO, R.A. **Planejamento a Longo Prazo da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**, 1999, 138 f. Tese (Livre – Docência) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 1999.

- SAIT, S.M.; YOUSSEF H. **Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering : Solving Combinatorial Optimization Problems**, IEEE Computer Society, Los Alamitos, Califórnia, 1999.
- SÁNCHEZ CHURA, I. G. **Algoritmo de Pontos Interiores Usado no Planejamento a Longo Prazo da Expansão de Sistemas de Transmissão**, 2004, 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- SÁNCHEZ CHURA, I. G; ROMERO, R.; MANTOVANI, J.R.S; RIDER, M.J. **Transmission-expansion planning using DC model and nonlinear programming technique** IEE Proceedings – Generation Transmission and Distribution, Vol.152, No. 6, pp. 763-769, 2005.
- SHARIFNIA, A.; AASHTIANI, M. H. **Transmission Network Planning: a Method for Synthesis of Minimum Cost Secure Networks**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.104, No. 8, Agosto 1985.
- SILVA, I. J; RIDER, M.J.; ROMERO, R.; GARCIA, A.V; MURARI, C.A. **Transmission Network Expansion Planning with Security Constraints** IEE Proceedings – Generation Transmission and Distribution, Vol.152, No. 6, pp. 828-836, 2005.
- SING, S. N.; DAVID, A. K. **A New Approach for Placement of FACTS Device in Open Power Markets**, IEEE Power Engineering Review, Vol.21, No. 9, pp. 58-60, 2001.
- SOARES NETO, J. B. G. Planejamento Soma Competência em Novos Projetos, em entrevista exclusiva para Revista Furnas [abril 2005]. Disponível em: <http://www.furnas.com.br/arqtrab/ddppg/revistaonline/linhadireta/rf319_entrev.pdf>. Acesso em 11 jul. 2005.
- SOARES, G. L. **Algoritmo Genético: Estudo, Novas Técnicas e Aplicações**, Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 1997.
- SONG, Y. H.; e JOHNS A. T. **Flexible AC Transmission Systems (FACTS)**, IEE Power Energy Series 30, Outubro 1999.

- TARANTO, G. N.; PINTO, L. M.V. G.; PEREIRA M. V. F. **Representation of FACTS Devices in Power System Economic Dispatch**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 572-576, 1992.
- TEIVE, R.C.G. **Planejamento da Expansão da Transmissão de Sistemas de Energia Elétrica Utilizando Sistemas Especialistas**, 1997, 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), – Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- VERMA, A. K.; SRIVIDYA, A.; DEKA, C. **Impact of a FACTS Controller on Reliability of Composite Power Generation and Transmission System**, Electric Power Systems Research, Vol. 72, pp. 125-130, 2004.
- VILLASANA R.; GARVER L.L.; SALON S.J. **Transmission Network Planning Using Linear Programming**, IEEE Transactions Power Apparatus, Vol. Pas-104, No. 2, fevereiro 1985.
- VILLASANA R. **Transmission Network Planning Using Linear and Linear Mixed Integer Programming**, 1984, 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), – Ressenlaer Polytechnic Institute, New York, 1984.
- VON ZUBEN, F.J. **Computação Evolutiva: Uma “Nova” Forma de Resolver Problemas**, DCA/FEEC/Unicamp, Campinas, 2002. Disponível em: ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia707_02/topico4_02.pdf
Acesso em 08/11/2004
- WATANABE E. H.; BARBOSA P. G.; ALMEIDA K. C.; TARANTO G. N. **Tecnologia FACTS – Tutorial**, SBA Controle & Automação, Vol. 9, No 1, abril 1998.

APÊNDICE A - Sistema Teste

A.1. Sistema IEEE 24 barras

Vários trabalhos utilizaram o sistema IEEE 24 barras para ilustrar o problema de planejamento da expansão da transmissão. Alguns exemplos fazem parte de artigos recentes de Fang e Hill (2003), Asada et al. (2005), Sánchez et al. (2005) e Silva et al. (2005).

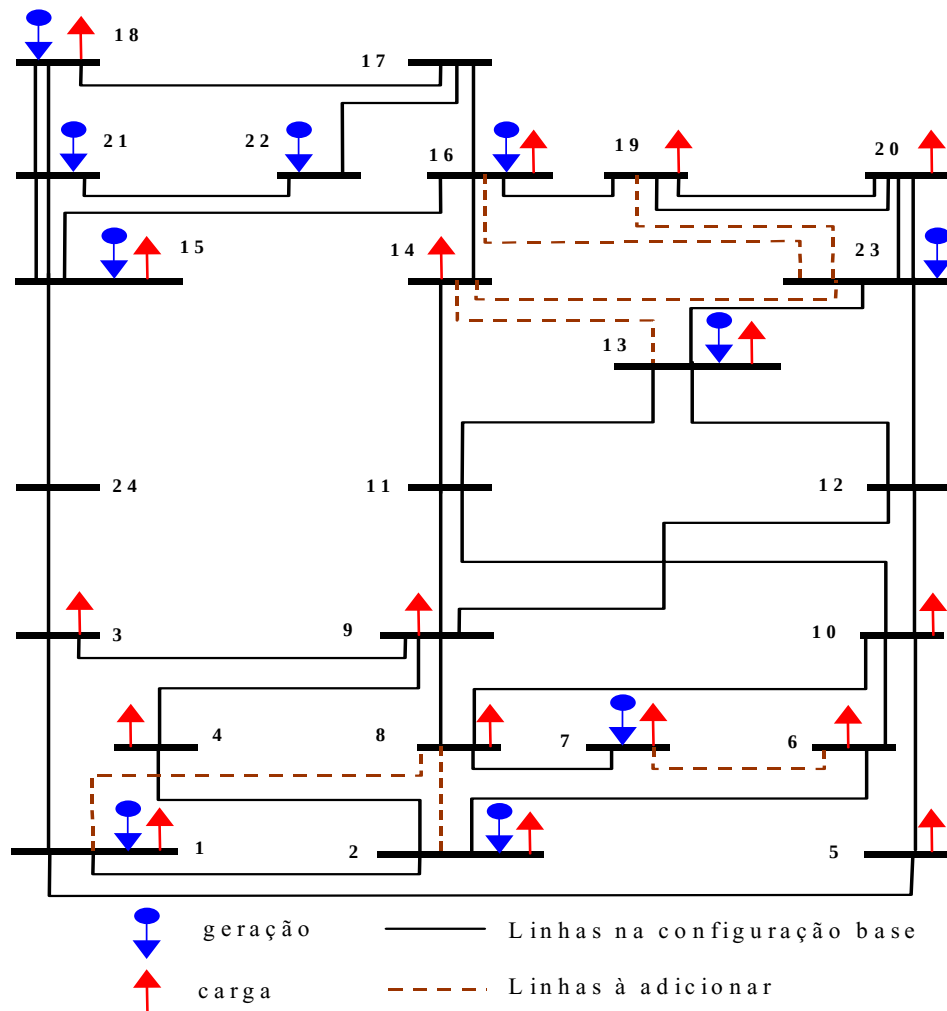


Figura A.1. Sistema IEEE 24 barras

APÊNDICE B – Dados do Sistema Teste

B.1. Dados das Barras

Tabela B.1 Sistema IEEE 24 barras - Geração e Demanda.

Número da barra	Geração (MW)					Carga (MW)
	Plano P ₀	Plano P ₁	Plano P ₂	Plano P ₃	Plano P ₄	
1	576	576	465	576	520	324
2	576	576	576	576	520	291
3	0	0	0	0	0	540
4	0	0	0	0	0	222
5	0	0	0	0	0	213
6	0	0	0	0	0	408
7	900	900	722	900	812	375
8	0	0	0	0	0	513
9	0	0	0	0	0	525
10	0	0	0	0	0	585
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	1773	1773	1424	1457	1599	795
14	0	0	0	0	0	582
15	645	645	645	325	581	951
16	465	465	465	282	419	300
17	0	0	0	0	0	0
18	1200	1200	1200	603	718	999
19	0	0	0	0	0	543
20	0	0	0	0	0	384
21	1200	1200	1200	951	1077	0
22	900	900	900	900	900	0
23	1980	315	953	1980	1404	0
24	0	0	0	0	0	0

B.2. Dados das Linhas

Tabela B.2 Sistema IEEE 24 barras - Dados das Linhas.

Nº da Linha	Circuito	Linhas Existentes	Reatância	Capacidade Transmissão (MW)	Custo US\$10 ³
1	1-2	1	0.0139	175	3000
2	1-3	1	0.2112	175	55000
3	1-5	1	0.0845	175	22000
4	2-4	1	0.1267	175	33000
5	2-6	1	0.1920	175	50000
6	3-9	1	0.1190	175	31000
7	3-24	1	0.0839	400	50000
8	4-9	1	0.1037	175	27000
9	5-10	1	0.0883	175	23000
10	6-10	1	0.0605	175	16000
11	7-8	1	0.0614	175	16000
12	8-9	1	0.1651	175	43000
13	8-10	1	0.1651	175	43000
14	9-11	1	0.0839	400	50000
15	9-12	1	0.0839	400	50000
16	10-11	1	0.0839	400	50000
17	10-12	1	0.0839	400	50000
18	11-13	1	0.0476	500	66000
19	11-14	1	0.0418	500	58000
20	12-13	1	0.0476	500	66000
21	12-23	1	0.0966	500	134000
22	13-23	1	0.0865	500	120000
23	14-16	1	0.0389	500	54000
24	15-16	1	0.0173	500	24000
25	15-21	2	0.0490	500	68000
26	15-24	1	0.0519	500	72000
27	16-17	1	0.0259	500	36000
28	16-19	1	0.0231	500	32000
29	17-18	1	0.0144	500	20000
30	17-22	1	0.1053	500	146000
31	18-21	2	0.0259	500	36000
32	19-20	2	0.0396	500	55000
33	20-23	2	0.0216	500	30000
34	21-22	1	0.0678	500	94000
35	1-8	0	0.1344	500	35000
36	2-8	0	0.1267	500	33000
37	6-7	0	0.1920	500	50000
38	13-14	0	0.0447	500	62000
39	14-23	0	0.0620	500	86000
40	16-23	0	0.0822	500	114000
41	19-23	0	0.0606	500	84000