



Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica

Tomada de Decisão *Fuzzy* e Busca Tabu Aplicadas ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão

Autor: Aldir Silva Sousa

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos - USP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada (Presidente)	EESC / USP
Prof. Dr. Alysson Machado Costa	ICMC / USP
Prof. Dr. Rubén Romero	DEE-FEIS / UNESP

São Carlos, 2 de março de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

*Ao homem e à mulher mais dignos, honestos
e sábios que conheci, minha querida mãe e
ao meu saudoso mas sempre querido pai.
À Lidiane Lima Santos Sousa por ser
presente em minha vida e ao meu querido
filhinho Caio.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Dr. Eduardo Nobuhiro Asada pela excelente orientação e ajuda durante a elaboração deste trabalho.
- Ao pessoal do LASEE: Aline, Cristiane, Fernando, Guilherme, Vanusa, pelas trocas de idéias, pelo apoio e principalmente pela amizade.
- Ao inestimado amigo Ricardo de Andrade L. Rabêlo pela amizade e incontáveis ajudas.
- A minha amada e muito querida esposa e grande amiga Lidiane por ter sido forte para suportar os problemas e ainda me dar suporte de que tanto preciso.
- A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP pela colaboração.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES , e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo apoio financeiro, equipamentos e materiais concedidos.

RESUMO

Neste trabalho é proposto uma nova técnica de solução para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão estático através da introdução da tomada de decisão *fuzzy*. Na técnica apresentada neste trabalho, a tomada de decisão *fuzzy* é aplicada para o desenvolvimento de um algoritmo heurístico construtivo. O sistema *fuzzy* é utilizado para contornar alguns problemas críticos das heurísticas que utilizam o índice de sensibilidade como guia para inserção de novas linhas. A heurística apresentada nesse trabalho é baseada na técnica dividir para conquistar. Verificou-se que a deficiência das heurísticas construtivas é decorrente da decisão de inserir novas linhas baseada em valores não seguros encontrados através da solução do modelo utilizado. Para contornar tal deficiência, sempre que surgirem valores não seguros divide-se o problema original em dois subproblemas, um que analisa a qualidade da resposta para o caso em que a linha é inserida e outro para verificar a qualidade da resposta para o caso em que a linha não é inserida. A tomada de decisão *fuzzy* é utilizada para decidir sobre quando dividir o problema em dois novos subproblemas. Utilizou-se o modelo cc com a estratégia de Villasana-Garver-Salon para realizar a modelagem da rede elétrica para os problemas da expansão de sistemas de transmissão aqui propostos. Ao serem realizados testes em sistemas de pequeno, médio e grande portes certificou-se que o método pode encontrar a solução ótima de sistemas de pequeno e médio portes. Porém, a solução ótima dos sistemas de grande porte testados não foi encontrada. Para melhorar a qualidade da solução encontrada utilizou, em uma segunda fase, a metaheurística busca tabu. A busca tabu utiliza o modelo cc. Os resultados se mostraram bastante promissores. Os testes foram realizados em alguns sistemas reais brasileiros e com o sistema real colombiano.

Palavras-chave: Planejamento da Expansão da Transmissão, Tomada de Decisão *Fuzzy*, Algoritmo Heurístico Construtivo, Metaheurística, Busca Tabu.

ABSTRACT

A new solution technique to solve the long-term static transmission expansion planning (TEP) problem based on fuzzy decision making is proposed. The technique applies the concepts of fuzzy decision making in a constructive heuristic algorithm. The fuzzy system is used to circumvent some critical problems of heuristics that use sensitivity indices as a guide for insertion and construction of new lines. The heuristic algorithm proposed in this work is based on the divide and conquer technique. It has been verified that the deficiency of the constructive heuristics is due to the decision of inserting new lines based only on information given by the index, which usually is calculated from a relaxed mathematical representation of the problem and can become less accurate during the solution process. In order to be able to deal with such problem, whenever the quality of the index decreases, the original problem is divided into two sub-problems: one examines the quality of the solution when the transmission line indicated by the sensitivity index is inserted and the other subproblem checks the opposite. Fuzzy Decision-making is used to decide the moment to divide the problem into two subproblems based on other information. The hybrid linear model is used to model the long-term transmission expansion planning problem and is used in the proposed algorithm. Tests was done with systems of small-term, medium-term and long-term. The optimal solution of small-term and medium-term was foundo using just the construtive heuristic algorithm with fuzzy decision-making. To deal with long-term systems was used the solutions of the construtive heuristic algorithm with fuzzy decision-making to init a tabu search. The tabu search uses the dc model. The results are very promising. The test was done with some real Brazilian systems and with the real Colombian system.

keywords: Transmission expansion planning, Fuzzy Decision Making, Constructive Heuristic Algorithm,Heuristic, Metaheuristic, Tabu Search.

Sumário

Sumário	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Símbolos e Abreviaturas	xi
1 Introdução	1
1.1 Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura do Trabalho	5
2 Planejamento da expansão da transmissão	7
2.1 Introdução	7
2.2 Modelagem Matemática	8
2.2.1 Modelo de Transportes	9
2.2.2 Modelos Híbridos	11
2.2.3 Modelo CC	14
2.3 Técnicas de Otimização	16
2.3.1 Algoritmos de Otimização Clássica	16
2.3.2 Algoritmos Heurísticos	18
2.3.3 Metaheurísticas	19
2.3.4 A Técnica de Solução Proposta Neste Trabalho	20
3 Algoritmos Heurísticos Construtivos - AHC	21
3.1 Introdução	21
3.2 AHC Aplicado ao Modelo de Transportes	23
3.2.1 Algoritmo de Garver	23
3.3 Heurísticas Construtivas Aplicadas a Modelos Híbridos	26

3.3.1	O Algoritmo de Villasana-Garver-Salon(VGS)	26
3.4	Heurísticas Construtivas Aplicadas ao Modelo CC	28
3.4.1	AHC do Mínimo Esforço	30
3.4.2	AHC de Mínimo Corte de Carga	30
4	Sistemas <i>Fuzzy</i>	33
4.1	Introdução	33
4.2	Conceitos e Aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i>	35
4.3	Conjuntos <i>Fuzzy</i>	37
4.3.1	Função de Pertinência	37
4.3.2	Extensões do Conceitos Algébricos Para os Conjuntos <i>Fuzzy</i>	38
4.4	Operadores de Agregação	40
4.5	Relações <i>Fuzzy</i>	40
4.5.1	Composição de Relações <i>Fuzzy</i>	42
4.6	Inferência <i>Fuzzy</i>	43
4.6.1	Variáveis Lingüísticas	43
4.6.2	Regras <i>Fuzzy</i>	44
4.6.3	Processo de Inferência <i>Fuzzy</i>	45
4.7	Defuzzificação	46
4.7.1	Centro de Área	46
4.7.2	Média dos Máximos	47
4.7.3	Primeiro Máximo ou Menor Máximo	47
4.8	Tomada de Decisão <i>Fuzzy</i>	48
4.9	Conclusão	49
5	AHC com Tomada de Decisão <i>Fuzzy</i>	51
5.1	Introdução	51
5.2	Algoritmo Heurístico Construtivo	52
5.2.1	Deficiências do AHC	52
5.3	Sistemas <i>Fuzzy</i> Aplicada ao Planejamento da Expansão	53
5.4	Detalhes do Algoritmo Heurístico Construtivo Proposto	54
5.4.1	Modelagem Matemática	55
5.4.2	Detalhes do Sistema <i>Fuzzy</i> Utilizado	55
5.4.3	O algoritmo	59
5.5	Conclusão	70
6	Testes e Resultados - AHC-CTDF	71
6.1	Introdução	71
6.2	Metodologia Para Verificação da Eficiência Computacional	72

6.3	Sistema Proposto por Garver	72
6.3.1	Garver Com Redespacho	72
6.3.2	Garver Sem Redespacho	72
6.4	Sistema Sul Brasileiro	73
6.4.1	Sul Brasileiro Com Redespacho	75
6.4.2	Sul Brasileiro Sem Redespacho	75
6.5	Sistema Norte-Nordeste Brasileiro	75
6.6	Análise dos Resultados	77
7	Busca Tabu	79
7.1	Introdução	79
7.2	Conceitos Básicos	80
7.2.1	Intensificação	81
7.2.2	Diversificação	81
7.2.3	Oscilação Estratégica	81
7.2.4	<i>Path Relinking</i>	82
7.3	Aplicação da Busca Tabu ao Planejamento da Expansão da Transmissão	82
7.3.1	Ciclo interno	84
7.3.2	Ciclo externo	90
7.3.3	Remoção de linhas desnecessárias	90
8	Testes e Resultados com a Busca Tabu	91
8.1	Introdução	91
8.2	Sistema Colombiano	91
8.3	Norte-Nordeste Brasileiro	93
8.4	Análise dos Resultados	95
9	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	97
9.1	Trabalho Futuros	98
	Referências Bibliográficas	98
A	Regras <i>Fuzzy</i>	105
B	Dados dos Sistemas Elétricos Testados	107
B.1	Sistema de Garver 6 Barras	107
B.2	Dados do Sistema Sul Brasileiro	109
B.3	Dados do Sistema Colombiano	114
B.4	Dados do Sistema Norte-Nordeste Brasileiro	121

Lista de Tabelas

5.1	Comparação da eficiência dos métodos de defuzzificação	58
5.2	Sistema 4 barras - Dados de Barras	60
5.3	Sistema 4 barras - Dados de Linhas	61
6.1	Resumo dos resultados, número de PLs e tempo computacional.	77
6.2	Comparação entre a metodologia proposta e a de Haffner.	77
6.3	Comparação entre a metodologia proposta e a de Rider.	78
7.1	Corte de carga de cada barra após resolver o modelo.	88
7.2	Custos da linha e índices de sensibilidade.	89
7.3	Distribuição da nota de cada linha.	89
8.1	Colombiano - resultados com corte de carga menor ou igual a 1 MW.	92
8.2	Norte-Nordeste - resultados com corte de carga zero.	93
8.3	Norte-Nordeste - resultados com corte de carga menor ou igual a 1 MW.	93
8.4	Norte-Nordeste - resultados com corte de carga menor ou igual a 2 MW.	94
8.5	Norte-Nordeste - resultados com corte de carga menor ou igual a 3 MW.	94
8.6	Norte-Nordeste - resultados com corte de carga menor ou igual a 3,5 MW.	95
8.7	Comparação dos resultados com alguns encontrados na literatura.	96
B.1	Garver - Dados de Barras	107
B.2	Garver - Dados de Linhas	108
B.3	Sul - Dados de Barras	109
B.4	Sul - Dados de Barras (continuação)	110
B.5	Sul - Dados de Linhas	111
B.6	Sul - Dados de Linhas (continuação)	112
B.7	Sul - Dados de Linhas (continuação)	113
B.8	Sistema Colombiano - Dados de Barras	114
B.9	Sistema Colombiano - Dados de Barras (continuação)	115
B.10	Sistema Colombiano - Dados de Barras (continuação)	116
B.11	Sistema Colombiano - Dados de Linhas	117

B.12 Sistema Colombiano - Dados de Linhas (continuação)	118
B.13 Sistema Colombiano - Dados de Linhas (continuação)	119
B.14 Sistema Colombiano - Dados de Linhas (continuação)	120
B.15 Norte-Nordeste - Dados de Barras	121
B.16 Norte-Nordeste - Dados de Barras (continuação)	122
B.17 Norte-Nordeste - Dados de Barras (continuação)	123
B.18 Norte-Nordeste - Dados de Linhas	124
B.19 Norte-Nordeste - Dados de Linhas (continuação)	125
B.20 Norte-Nordeste - Dados de Linhas (continuação)	126
B.21 Norte-Nordeste - Dados de Linhas (continuação)	127
B.22 Norte-Nordeste - Dados de Linhas (continuação)	128

Lista de Figuras

4.1	Diagrama esquemático de um sistema <i>fuzzy</i>	35
4.2	Ilustração de conjunto convexo (a) e conjunto não convexo (b).	38
4.3	Convexidade segunda a lógica <i>fuzzy</i>	39
4.4	Variável <i>fuzzy</i> custo da linha $i - j$	44
4.5	Valor da saída resultante da defuzzificação pelo método MCA.	46
4.6	Valor da saída resultante da defuzzificação pelo método MMM.	47
4.7	Valor da saída resultante da defuzzificação pelo método MPM.	48
5.1	Divisão do problema original em dois subproblemas	54
5.2	Variável <i>fuzzy</i> valor de n_{ij}	56
5.3	Variável <i>fuzzy</i> custo da linha $i - j$	56
5.4	Variável <i>fuzzy</i> ramificar.	56
5.5	Sistema de 4 barras - Rede Inicial.	61
5.6	Sistema de 4 barras - Após a adição da linha 1 – 2.	63
5.7	Sistema de 4 barras - Após a adição da linha 2 – 3.	65
5.8	Sistema de 4 barras - Após a Terceira Iteração.	67
5.9	Árvore gerada durante a solução do sistema de 4 barras.	69
5.10	Sistema de 4 barras - Configuração ótima do sistema de 4 barras.	70
6.1	Sistema Garver - Configuração Inicial.	73
6.2	Sistema Sul Brasileiro - Rede Inicial.	74
6.3	Sistema Norte-Nordeste Brasileiro - Configuração Inicial.	76
7.1	Representação das principais estratégias da busca tabu: (a) intensificação, diversificação, <i>path relink</i>	
7.2	Busca tabu com AHC-CTDF.	85
7.3	Sistema de 4 barras - Rede Inicial.	87

Lista de Símbolos e Abreviaturas

AHC	: Algoritmo Heurístico Construtivo;
AHC-CTDF	: Algoritmo Heurístico Construtivo com Tomada de Decisão <i>Fuzzy</i> ;
AHCs	: Algoritmos Heurísticos Construtivos;
B&B	: <i>Branch-and-Bound</i> ;
c_{ij}	: custo da adição de um circuito no caminho $i - j$;
CA	: Corrente Alternada;
CC	: Corrente Contínua;
d	: vetor de demanda nas barras;
f_{ij}	: fluxo de potência total através dos circuitos do ramo $i - j$;
f_0	: vetor dos fluxos nos circuitos existentes na configuração base;
f'	: vetor de fluxos dos circuitos adicionados;
g	: vetor com os elementos g_k ;
g_k	: geração na barra k ;
\bar{g}	: valor máximo de g ;
IS	: Índice de Sensibilidade;
IS_{ij}^{mc}	: indicador de sensibilidade;
LCK	: Lei da Correntes de Kirchhoff;
LTK	: Lei das Tensões de Kirchhoff;
MCA	: Método Centro de Área;
MMM	: Método Média dos Máximos;
MPM	: Método Primeiro Máximo;
n_{ij}	: número de circuitos adicionados no ramo $i - j$;
n_{ij}^0	: número de circuitos existentes na topologia básica;
\bar{n}_{ij}	: número máximo de circuitos que podem ser adicionados ao ramo $i - j$;
PL	: Programação Linear;
PLIM	: Programação Linear Inteiro Misto;
PNL	: Programação Não-Linear;
PNLIM	: Programação Não-linear Inteiro Misto;
S_0	: matriz de incidência nó-ramo transposta existente na configuração base;

\mathbf{S}	: matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema completo;
v	: investimento total;
VGS	: Villasana-Garver-Salon;
γ_{ij}	: susceptância de um circuito no caminho $i - j$;
θ_j	: ângulo de tensão da barra j ;
Ω	: todos os ramos em que podem ser adicionados novos circuitos;
Ω_1	: conjunto de circuitos existentes na configuração base;
Ω_2	: conjunto de circuitos correspondentes aos novos caminhos;
Ω_3	: conjunto de barras que fazem parte da configuração base;
π	: multiplicador de Lagrange;

Capítulo 1

Introdução

1.1 Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão

Uma das áreas mais tradicionais e antigas da engenharia elétrica é a que trata dos sistemas de energia. Esta matéria lida com o fornecimento de energia elétrica, que é dividida em três setores: geração, transmissão e distribuição. Neste trabalho lidaremos com o sistema de transmissão, no que diz respeito ao planejamento da expansão do sistema de transmissão a longo prazo. 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 maneiras eficiente (Miasaki, 2006).

O planejamento da expansão do sistema de transmissão visa encontrar um plano de expansão ótimo do sistema elétrico. Assim, com a realização do planejamento pretende-se especificar os circuitos (linhas e/ou transformadores) que devem ser instalados na rede para permitir operação viável num horizonte de planejamento especificado. Este horizonte de planejamento refere-se ao tempo em que se fará a projeção no planejamento, o qual poderia ser 10, 12 ou 15 anos (no planejamento estático e de longo prazo), ou horizontes sucessivos de 4 ou 5 anos (quando se trata do planejamento de múltiplos estágios e de curto prazo). O planejamento deve satisfazer as necessidades do mercado de energia elétrica com certas especificações de qualidade nos serviços e com menor custo possível (Silva Junior, 2005).

Para solução desse problema geralmente são usados modelos matemáticos relaxados usando apenas a parte ativa (potência ativa e ângulos das tensões complexas). São três os modelos mais utilizados: modelo de Transportes, modelo cc e modelos Híbridos. Modelos ca também têm sido usados, porém com menos frequência, uma vez que o problema de planejamento da expansão é um problema que lida com um elevado número de variáveis (inteiras e contínuas) e restrições.

A prática mais comum tem sido resolver o problema com um dos modelos relaxados e a fase de adequação ao modelo ca tem sido realizado em uma etapa posterior. Rider (2006) apresenta de forma detalhada as dificuldades do uso do modelo cc e do modelo ca. É consenso considerar o modelo cc como sendo o modelo ideal para a área de planejamento da expansão da transmissão a longo prazo (Asada et al., 2005).

Quanto ao período de análise do problema de planejamento, o planejamento pode ser abordado considerando-se apenas um estágio ou vários estágios. A abordagem com apenas um estágio é denominada de planejamento estático. Quando se consideram vários estágios, trata-se do problema de planejamento multiestágio da expansão de sistemas de transmissão.

O problema do planejamento da expansão da transmissão é um problema matemático de programação não-linear inteiro misto (PNLIM). Devido à grande complexidade de um problema com estas características, foram introduzidas relaxações ao problema tornando-o em um problema de programação linear inteiro misto (PLIM). Sendo assim, os modelos ca e cc são caracterizados como sendo PNLIM, e os modelos de transporte e híbridos lineares são PLIM.

Mesmo com as relaxações o problema do planejamento da expansão é um problema de difícil resolução devido a duas características: é um problema de programação não-linear inteiro e é um problema que geralmente lida com um elevado número de variáveis e restrições, podendo ter uma característica combinatória. Para a solução deste problema, dois tipos de abordagens têm sido usados pelos pesquisadores da área: 1) métodos exatos e 2) métodos aproximados. Os métodos do primeiro tipo são de convergência finita comprovada e em geral obtém-se facilmente a solução ótima para sistemas de pequeno e médio porte. Porém, para sistemas de grande porte, apresentam problemas de convergência e custo computacional elevado (Romero, Asada, Carreno e Rocha, 2007).

Dentre os métodos exatos, o algoritmo *branch-and-bound* e o método de decomposição de Benders estão entre os mais utilizados (Haffner et al., 2000; Alguacil et al., 2003). Os métodos aproximados utilizam heurísticas com o objetivo de encontrar soluções de boa qualidade a um custo computacional aceitável, porém sua convergência para a solução ótima não é provada. Entre os métodos aproximados mais utilizados destacam-se os algoritmos heurísticos construtivos (Garver, 1970; Monticelli et al., 1982; Villasana et al., 1985; Pereira e Pinto, 1985; Romero et al., 2005; Romero, Asada, Carreno e Rocha, 2007; Sousa e Asada, 2008) e as metaheurísticas (algoritmos genéticos, busca tabu, *simulated annealing*, dentre outros) (Romero et al., 1996; Gallego et al., 1998; Binato et al., 2001; Da Silva et al., 2001; Faria et al., 2005).

As metaheurísticas têm ganho grande destaque para solução do problema de planejamento da expansão da transmissão. A aceitação das metaheurísticas se dá devido a basicamente três fa-

tores: apresentam soluções de boa qualidade; têm baixo custo computacional e são relativamente fáceis de programar. As melhores soluções conhecidas até o momento para os sistemas de grande porte conhecidos foram encontradas aplicando as metaheurísticas (Romero et al., 1996; Gallego et al., 1998; Sleem et al., 2000).

Dentre os métodos aproximados, os algoritmos heurísticos construtivos (AHCs) estão entre os mais utilizados. Um AHC é um método passo-a-passo que, depois das devidas relaxações, é direcionado por um índice de sensibilidade para encontrar soluções de boa qualidade. Rider (2006) acrescenta que geralmente são feitas transformações e considerações com o objetivo de contornar a não-linearidade do problema e resolver apenas problemas de programação linear (PL) em cada passo do AHC. Sánchez et al. (2005) e Rider (2006) usam um AHC que trabalha diretamente com o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão usando o modelo cc. Porém como o modelo cc é formulado como um problema de programação não-linear (PNL), faz-se necessário usar técnicas de programação não-linear para resolver os PNL em cada passo do AHC. Com essa abordagem, torna-se possível o tratamento de outras não-linearidades no problema do planejamento da expansão como, por exemplo, a representação das perdas ativas da rede de transmissão.

Desde que Garver (1970) apresentou uma heurística construtiva usando o modelo de transportes, diversos outros AHC foram desenvolvidos com o objetivo de resolver o problema de planejamento. Entre esses algoritmos, destacam-se as metodologias de mínimo esforço (Monticelli et al., 1982) e o método de mínimo corte de carga (Pereira e Pinto, 1985), sendo que a grande diferença entre os algoritmos heurísticos está relacionada com o índice de sensibilidade que guiará o algoritmo para a solução e o modelo matemático utilizado para modelagem do problema. Os AHCs encontram uma solução de boa qualidade a um custo computacional aceitável, porém não encontram soluções de alta qualidade para sistemas de médio e grande porte.

Romero et al. (2003) identificaram as causas que levam o processo de busca a se afastar do ótimo global:

1. Linhas com custo elevado são selecionadas.
2. A seleção de novas linhas é baseada em valores pequenos das variáveis que representam a linha de transmissão (n_{ij}).

Portanto, um algoritmo que consiga evitar de forma eficiente esses problemas pode aumentar a qualidade da solução dada por um AHC. Porém, pelos resultados encontrados em Asada et al. (2005), deduz-se que o conceito de linha custosa e valor n_{ij} baixo, além de serem de difícil definição, variam muito de sistema para sistema. Essa variação ocorre até no mesmo sistema quando se trata o problema com ou sem redespacho da geração. A lógica *fuzzy* é uma boa

estratégia para lidar com informações imprecisas e incertas como são as informações supracitadas. Por isso, neste trabalho, propomos a introdução da tomada de decisão *fuzzy* para decidir se uma linha é custosa ou se um dado valor de n_{ij} é pequeno. Além da lógica *fuzzy*, far-se-á uso da técnica dividir para conquistar no intuito de apresentar um algoritmo eficiente que visa encontrar soluções de boa qualidade a um baixo custo computacional.

O algoritmo proposto neste trabalho visa encontrar soluções de boa qualidade com um custo computacional baixo. Embora possa encontrar a solução ótima de sistemas de médio porte, como se verá nos teste realizados, o objetivo principal do trabalho é encontrar soluções de boa qualidade de sistemas de grande porte que servirão como ponto inicial para algoritmos mais elaborados como é o caso das metaheurísticas.

Com as soluções geradas pelo algoritmo proposto neste trabalho, pretende aplicar uma metaheurística para encontrar soluções mais próximas da solução ótima de sistemas de grande porte. A metaheurística selecionada para tentar melhorar os resultados gerados pelo algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* proposto neste trabalho, foi a metaheurística busca tabu (Glover e Laguna, 1997).

1.2 Objetivos

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

1. Apresentar e analisar as técnicas e modelos matemáticos para solução do problema do planejamento da expansão da sistema de transmissão;
2. Apresentar e desenvolver um algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* e com a técnica dividir para conquistar, que apresente soluções de boa qualidade que poderão ser usadas como solução inicial de algoritmos mais elaborados;
3. Apresentar e implementar a metaheurística busca tabu com o intuito de melhorar os resultados obtidos pelo algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy*, usando-os para implementar algumas das principais técnicas da busca tabu.
4. Ilustrar, por meio de simulações computacionais, as metodologias propostas utilizando para isso sistemas reais brasileiros e o sistema colombiano;
5. Analisar e comparar a validade dos resultados encontrados nas simulações com as metodologias já propostas.

1.3 Estrutura do Trabalho

Além deste capítulo, este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre os modelos matemáticos e as técnicas utilizados para resolver o problema do planejamento de sistemas de transmissão a longo prazo.

No Capítulo 3 apresentam-se alguns algoritmos heurísticos construtivos usados para resolver o problema da expansão da transmissão destacando-se os modelos matemáticos para os quais foram desenvolvidos.

No Capítulo 4 faz-se uma introdução à lógica *fuzzy* e à tomada de decisão *fuzzy* no intuito de apresentar o conhecimento básico sobre o qual o algoritmo proposto foi desenvolvido.

No Capítulo 5 são apresentados os detalhes do algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* para solução do problema de planejamento da expansão da transmissão.

No Capítulo 6 são realizados os testes do AHC-CTDF com sistemas reais brasileiros para verificar a eficiência do algoritmo proposto. Nesse capítulo também serão analisados e comparados o resultados com outras metodologias existentes na literatura.

No Capítulo 7 é introduzida a busca tabu, detalhando a implementação aplicada ao planejamento da expansão da transmissão.

No Capítulo 8 são realizados testes com os sistemas brasileiros e com o sistema colombiano.

E, finalmente, no Capítulo 9 são apresentadas as considerações finais deste trabalho.

Capítulo 2

Planejamento da expansão de sistemas de transmissão

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos e as técnicas mais conhecidos na literatura usados para solução para modelagem e solução do problema de planejamento da expansão da transmissão.

2.1 Introdução

O sistema de transmissão de energia elétrica tem como função fazer com que a potência gerada chegue aos consumidores e possibilitar a interligação entre áreas de maneiras eficiente. Portanto, o planejamento da expansão da transmissão visa determinar o plano de expansão ótimo da capacidade do sistema a fim de, simultaneamente, atender a uma previsão de aumento da demanda e manter o fornecimento contínuo da potência. Este problema, assim como todo outro problema de otimização, é composto de duas etapas consecutivas e claramente definidas: a *modelagem matemática* e a *técnica de solução* escolhida para resolução do modelo matemático.

O problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão é um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM) que deve encontrar um plano de expansão ótimo, ou seja, deve especificar os circuitos (linhas e/ou transformadores) que devem ser instalados na rede para permitir uma operação viável em um horizonte de planejamento especificado. Uma vez dada a configuração inicial, os dados de geração e a demanda do horizonte de planejamento, o plano ótimo é aquele que atende completamente à demanda sem que haja cortes de carga e ao menor custo de investimento possível.

Quanto ao período de análise do problema de planejamento, este pode ser abordado considerando-se apenas um estágio ou vários. Quando se considera apenas um estágio, todos os investimentos são realizados de uma só vez. Esta abordagem é denominada de planejamento estático. Com o planejamento estático visa-se determinar o local e o tipo de equipamento que deve ser instalado na rede.

Quando se consideram vários estágios, ou quando o horizonte de planejamento pode ser dividido em vários estágios, trata-se do problema de planejamento multiestágio da expansão de sistemas de transmissão. Neste planejamento, além do local e tipo, deve-se determinar quando instalar o dispositivo.

Quanto à modelagem matemática, existem vários modelos matemáticos propostos na literatura que podem ser aplicados ao problema do planejamento da expansão da transmissão. Na Seção 2.2 serão apresentados os principais modelos aplicados ao modelo estático.

2.2 Modelagem Matemática

Na literatura podem ser encontrados diversos modelos matemáticos para solução do problema de planejamento da expansão. Os mais conhecidos e usados pelos pesquisadores são o modelo cc, modelos híbridos e o modelo de transporte. Porém, o modelo cuja solução seria a mais viável para a operação do sistema elétrico a longo prazo é o modelo ca. Embora seja um modelo cujas soluções são as mais viáveis para operação, o modelo ca tem sido pouco usado pelos pesquisadores para modelar o problema de planejamento da expansão. Abaixo listam-se algumas das principais dificuldades desse modelo:

1. A maioria dos sistemas utilizados no planejamento da transmissão apresenta uma configuração inicial não conexa (Miasaki, 2006), dificultando a convergência para o ótimo global e até mesmo apresentando problemas de convergência.
2. Não existe um método robusto e suficientemente confiável para solução de PNLIM de grande porte como é o caso do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão.
3. O modelo ca é de difícil implementação computacional.

Devido às dificuldades de lidar com o modelo ca, nas últimas quatro décadas de pesquisas foram propostos vários modelos matemáticos, lineares e não-lineares, para representar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão (Miasaki, 2006; Silva Junior, 2005; Rider, 2006). Dentre os modelos que mais têm sido usados pelos pesquisadores destacam-se

o modelo de transportes, modelos híbridos e o modelo cc. Miasaki (2006) destaca que esses modelos não consideram as potências reativas, as magnitudes das tensões nodais e nem os *taps* dos transformadores.

No momento, é consenso considerar o modelo cc como sendo ideal para representar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, e os principais motivos para essa consideração são:

1. Testes experimentais mostraram que os resultados obtidos usando o modelo cc apresentam resultados muito próximos aos resultados obtidos usando o fluxo de carga ca (Rider, 2006; Asada et al., 2005; Haffner, 2000) em relação à distribuição dos fluxos de potência ativa.
2. Existem várias técnicas de otimização que resolvem de maneira adequada os problemas de planejamento que usam o modelo cc (Miasaki, 2006).

O modelo cc é um PNLIM menos complexo do que o modelo ca e, portanto, de mais fácil implementação e convergência. O modelo cc considera as duas leis de Kirchhoff. O modelo de transportes e os modelos híbridos são versões relaxadas lineares do modelo cc. A seguir são apresentados a formulação matemática e a importância dos modelos de transportes, cc e híbridos.

2.2.1 Modelo de Transportes

Devido à grande complexidade dos modelos ca e cc, modelos relaxados foram desenvolvidos. Garver (1970) propôs a modelagem do problema da expansão da transmissão de tal forma que se considerasse apenas a capacidade de operação dos circuitos e geradores e atendendo apenas a restrição equivalente à Lei das Correntes de Kirchhoff (LCK) - o somatório dos fluxos de potência que entram em uma barra deve ser igual ao somatório dos fluxos que saem dessa mesma barra. Nesse contexto, a modelagem matemática passa a ser um problema de PLIM.

O modelo de transportes assume a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (2.1)$$

sujeito a

$$\mathbf{S}f + g = d \quad (2.2)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{f}_{ij} \quad (2.3)$$

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

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

$$n_{ij} \text{ inteiro}; f_{ij} \text{ irrestrito}; (i, j) \in \Omega$$

Onde:

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

Neste modelo, a restrição (2.2) representa as equações correspondentes à Lei das Correntes de Kirchhoff, uma equação para balanço de potência em cada barra do sistema (Romero et al., 2003; Rider, 2006). As inequações estão relacionadas aos limites das variáveis. É importante frisar que na Equação (2.3) o valor absoluto significa que os fluxos podem fluir nos dois sentidos.

A grande vantagem do modelo de transportes é a supressão da não-linearidade dos problemas da expansão da transmissão. Ao ser modelada apenas a Lei das Correntes Kirchhoff, o modelo é caracterizado como um problema de PLIM. Essa característica faz com que praticamente não exista diferença entre resolver sistemas conexos ou sistemas ilhados (Rider, 2006). O modelo de transportes é geralmente mais fácil de se resolver do que o modelo cc. Porém, ainda é um modelo de grande complexidade devido à restrição n_{ij} inteiro, especialmente para sistemas de grande porte.

A principal desvantagem do modelo de transportes reside no fato de suas soluções frequentemente não serem factíveis em relação ao modelo cc. Romero et al. (2003) acentuam que, quando se usa o modelo de transportes, é mais importante encontrar uma topologia ou solução que seja factível em relação ao modelo cc do que encontrar a solução ótima para o modelo de transportes.

2.2.2 Modelos Híbridos

Villasana et al. (1985) apresentaram a primeira proposta de um modelo híbrido para solução do problema de planejamento da expansão da transmissão. Com esse modelo, pretende-se encontrar soluções próximas às do modelo cc porém sem a complexidade deste. Assim, ao contrário do modelo de transportes, no modelo híbrido a Lei das Tensões de Kirchhoff (LTK) é considerada; porém, não para todos os circuitos. Os modelos híbridos podem ser divididos em modelo híbrido não-linear e modelo híbrido linear.

Modelo Híbrido Não-Linear

O modelo híbrido foi desenvolvido para contornar as dificuldades encontradas pelos modelos de transportes e cc, sem abrir mão das suas respectivas vantagens. A grande vantagem do modelo cc é apresentar soluções factíveis para a operação do sistema elétrico. Isso advém do fato do modelo cc considerar a LTK em sua modelagem. Já a grande vantagem do modelo de transportes está relacionada ao fato desse modelo lidar de forma eficiente com redes não conexas. Isso se deve ao fato de não considerar a LTK em sua modelagem. Assim, com o intuito de contornar as dificuldades e manter as vantagens dos dois modelos, o modelo híbrido especifica que a parcela do sistema elétrico correspondente aos caminhos nos quais já existem circuitos na configuração base deve satisfazer às duas leis de Kirchhoff. A outra parcela, correspondente aos caminhos novos em que não existem circuitos na configuração base, deve satisfazer somente à LCK.

A solução encontrada pelo modelo híbrido deve satisfazer as duas leis de Kirchhoff na parte do sistema onde existem circuitos na configuração base, e somente a LCK na parte do sistema onde não existem circuitos na configuração base.

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

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (2.4)$$

sujeito a

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

$$f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.6)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{f}_{ij} \quad (2.7)$$

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

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

$$n_{ij} \text{ inteiro}; f_{ij} \text{ irrestrito}; \theta_j \text{ irrestrito } \forall j \in \Omega_3$$

Onde:

- c_{ij} é o custo para adicionar um circuito ao ramo $i - j$;
- n_{ij} é o número de circuitos adicionados no ramo $i - j$;
- \bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos que podem ser adicionados ao ramo $i - j$;
- n_{ij}^0 é o número de circuitos existentes na topologia básica;
- f_{ij} é o fluxo de potência total através dos circuitos do ramo $i - j$;
- \bar{f}_{ij} é o fluxo de potência máximo em um circuito no ramo $i - j$;
- v é o investimento total;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico;
- g é o vetor com os elementos g_k (geração na barra k) no qual o máximo valor é \bar{g} ;
- d é o vetor de demanda;
- γ_{ij} é a susceptância de um circuito no caminho $i - j$;
- Ω representa todos os ramos em que podem ser adicionados novos circuitos;
- Ω_1 representa o conjunto de circuitos existentes na configuração base;
- Ω_2 representa o conjunto de circuitos correspondentes aos novos caminhos;
- Ω_3 representa o conjunto de barras que fazem parte da configuração base;
- θ_j é o ângulo das barras existentes na configuração base.

A Equação (2.5) representa as equações correspondentes à LCK. A Equação (2.6) indica que somente os laços existentes na configuração base devem satisfazer a LTK.

Esse modelo corresponde a um problema de PNLIM devido à Equação (2.6) e da restrição de integralidade das variáveis n_{ij} . Portanto, apresenta complexidade bem próxima à do modelo cc. As técnicas para resolver os dois modelos são iguais, porém, como modelo híbrido não-linear considera a LTK somente para os circuitos da configuração base, ele apresenta menos restrições do que o modelo cc o que o torna mais fácil de ser resolvido. Tem sido pouco usado pelos pesquisadores.

Modelo Híbrido Linear

Há uma forma alternativa de considerar a modelagem híbrida que pode ser mais fácil de ser resolvida, uma vez que esta modelagem representa um problema de PLIM. Esta modelagem é usada em Villasana et al. (1985) e Haffner (2000) com diferentes aplicações. Nesta modelagem, todas as novas adições de circuitos devem cumprir somente a LCK, ou seja, os circuitos adicionados em caminhos onde já existem circuitos e onde não existem, devem satisfazer somente a LCK. Já a LTK deve ser respeitada somente nos laços existentes na configuração base, considerando apenas os circuitos existentes nesta.

O modelo híbrido linear modela o problema de planejamento da expansão da transmissão como se existissem dois sistemas superpostos: a configuração base, que deve satisfazer as duas leis de Kirchhoff; e uma rede completa formada pelos circuitos possíveis de serem adicionados ao sistema que deve satisfazer somente a LCK. A seguir é feita a representação matemática do modelo híbrido linear:

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

sujeito a

$$\mathbf{S}f' + \mathbf{S}_0 f_0 + g = d \quad (2.9)$$

$$f_{ij}^0 - \gamma_{ij} n_{ij}^0 (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.10)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.11)$$

$$|f'_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega \quad (2.12)$$

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

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

$$n_{ij} \text{ inteiro; } f_{ij} \text{ irrestrito; } \theta_j \text{ irrestrito } \forall j \in \Omega_3$$

Onde:

- c_{ij} é o custo para adicionar um circuito ao ramo $i - j$;
- n_{ij} é o número de circuitos adicionados no ramo $i - j$;

- \bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos que podem ser adicionados ao ramo $i - j$;
- n_{ij}^0 é o número de circuitos existentes na topologia básica;
- f_{ij} é o fluxo de potência total através dos circuitos do ramo $i - j$;
- \bar{f}_{ij} é o fluxo de potência máximo em um circuito no ramo $i - j$;
- γ_{ij} é a susceptância de um circuito no caminho $i - j$;
- v é o investimento total;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico;
- g é o vetor com os elementos g_k (geração na barra k) no qual o máximo valor é \bar{g} ;
- d é o vetor de demanda;
- \mathbf{S}_0 é a matriz de incidência nó-ramo transposta existente na configuração base;
- f_0 é o vetor dos fluxos nos circuitos existentes na configuração base;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema completo ;
- f' é o vetor de fluxos dos circuitos adicionados;
- θ_j são os ângulos de fase das barras que estão ligadas ao sistema elétrico na configuração base.

O modelo híbrido linear é um problema de PLIM, tem complexidade próxima à do modelo de transportes e apresenta soluções de qualidade melhor do que as daquele modelo.

2.2.3 Modelo CC

O modelo cc 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). O modelo cc encontra soluções que apresentam bom desempenho quando avaliadas com as soluções dadas pelos modelos tradicionais de operação de sistema de energia elétrica, como o fluxo de carga CA. Atualmente, é consenso entre os pesquisadores considerar o modelo cc como ideal para realizar trabalhos de planejamento de sistemas de transmissão, sendo que os outros modelos apresentados anteriormente são versões relaxadas deste modelo.

No modelo cc todos os circuitos devem obedecer as duas leis de Kirchhoff. Este é um problema de PNLIM de grande complexidade, principalmente quando lida com sistemas de grande porte.

A formulação matemática do modelo cc para o problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão é feita como segue:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (2.13)$$

sujeito a

$$\mathbf{S}f + g = d \quad (2.14)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.15)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{f}_{ij} \quad (2.16)$$

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

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

n_{ij} inteiro; f_{ij} irrestrito; θ_j irrestrito

Onde:

- c_{ij} é o custo para adicionar um circuito ao ramo $i - j$;
- n_{ij} é o número de circuitos adicionados no ramo $i - j$;
- γ_{ij} é a susceptância de um circuito que pode ser adicionado ao ramo $i - j$;
- \bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos que podem ser adicionados ao ramo $i - j$;
- n_{ij}^0 é o número de circuitos existentes na topologia básica;
- f_{ij} é o fluxo de potência total através dos circuitos do ramo $i - j$;
- \bar{f}_{ij} é o fluxo de potência máximo em um circuito no ramo $i - j$;
- v é o investimento total;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema elétrico;
- g é o vetor com os elementos g_k (geração na barra k) no qual o máximo valor é \bar{g} ;
- d é o vetor de demanda;
- f é o vetor com os elementos f_{ij} ;
- θ_j é o ângulo de operação da barra j .
- Ω é o conjunto de todos os ramos do sistema.

A restrição referente à Equação (7.2) representa a conservação de potência em cada nó, ou seja, é equivalente à LCK. A restrição representada pela Equação (7.3) é uma expressão da lei de Ohm. É esta restrição que torna o modelo cc em um problema de PNLIM. O problema de expansão da transmissão quando formulado como um PNLIM, é um problema de natureza combinatória de difícil solução, que pode levar à explosão combinatória em relação ao número

de alternativas que têm que ser pesquisadas (Romero et al., 2002).

Percebe-se que a principal diferença entre os três modelos apresentados está na restrição representada pela Equação (7.3). No modelo de transportes ela não é considerada; no modelo híbrido, só é considerada para as linhas que estão na configuração base. Já para o modelo cc é considerada para todas as linhas do sistema. É a satisfação pelos circuitos da topologia base final dessa restrição que define se a solução é ou não compatível com a operação.

2.3 Técnicas de Otimização

As abordagens utilizadas pelos pesquisadores para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão podem se dividir em dois grandes grupos: (1) as que utilizam algoritmos exatos ou de otimização clássica e (2) as que utilizam algoritmos aproximados, dentre os quais os mais usados têm sido os algoritmos heurísticos e as metaheurísticas.

Os algoritmos clássicos de otimização têm sua convergência para o ótimo global comprovada, porém exigem um esforço computacional e tempo de processamento altos quando lidam com sistemas de grande porte. Já os algoritmos aproximados têm dificuldades de encontrar a solução ótima de sistemas de grande porte. Nas seções que seguem serão detalhadas as principais técnicas de solução destacando as vantagens e desvantagens de cada uma.

2.3.1 Algoritmos de Otimização Clássica

Como já foi detalhado, o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão é um problema de grande complexidade. Tal complexidade advém das seguintes características do problema:

- É um problema não-linear;
- É um problema com restrição de integralidade para algumas variáveis, ou seja, trata-se de um problema inteiro misto, o que lhe confere natureza combinatória;
- Lida com um elevado número de variáveis e restrições;
- Por ser um problema não conexo, possui diversos ótimos locais.

A maioria das soluções propostas para resolver esse problema tem dificuldade de se contornar a não convexidade do problema, o qual leva o processo de busca a parar em um ótimo local.

Dentre os algoritmos de otimização clássica os que mais têm sido usados para solução do problema de planejamento da expansão da transmissão são os algoritmos *Branch-and-Bound* (B&B) e as técnicas de decomposição de Benders (Romero e Monticelli, 1994; Alguacil et al., 2003).

Algoritmo *Branch-and-Bound*

O algoritmo *Branch-and-Bound* é um algoritmo enumerativo que visa percorrer toda a região viável, implícita ou explicitamente, a fim de encontrar a solução inteira ótima. O método inicia considerando o problema original relaxando restrições de integralidade. Esse problema relaxado é chamado de problema raiz (Nowak, 2005). Da solução desse problema relaxado, obtêm-se as variáveis cujos valores são contínuos. Restrições de limite superior e limite inferior são adicionadas à uma das variáveis contínuas, seguindo algum critério de seleção, a fim de encontrar uma solução inteira. Em Salkin (1975), Wolsey (2000), Bockmayr e Dimopoulos (2000), Eiselt e Sandblom (2000), Farwell (2006) e Li e Sun (2006). Após a inserção das restrições de limites, deve-se dividir o problema e verificar qual dos subproblemas levará à melhor solução inteira. Ao se encontrar uma solução factível que obedeça as restrições de integralidade do problema original esta solução é considerada como solução incumbente. Neste momento pode-se fazer uma varredura na lista de subproblemas e verificar quais não levarão a uma solução melhor do que a incumbente e descartá-los de ante-mão. O processo continua até todos os subproblemas terem sido verificados, direta ou indiretamente. Ao final da verificação de todos os subproblemas tem-se que a solução incumbente é a solução ótima.

Pelo descrito no parágrafo anterior, o algoritmo *Branch-and-Bound* se divide nas seguintes etapas:

- Relaxar - desconsideram-se as restrições de integralidade.
- Separar ou dividir (*Branch*) - quando a solução inteira não é encontrada somente com a relaxação, divide-se o problema em dois ou mais subproblemas descendentes, gerando uma lista de subproblemas candidatos.
- Determinar limites (*Bound*) - após separar, determina-se restrições de limites para uma das variáveis que não obedecerem à restrição de integralidade.
- Sondar - determinam-se quais os problemas descendentes devem ser examinados e quais devem ser descartados por se ter certeza de que não levarão a uma solução melhor do que a incumbente.

Esta técnica foi aplicada para solução do problema de planejamento em Lee et al. (1974), Haffner et al. (2000), Haffner et al. (2001), Choi et al. (2005) e Romero, Asada, Carreno e Rocha (2007) dentre outros.

Decomposição de Benders

Os métodos de decomposição resolvem problemas de grande proporções dividindo-os em vários subproblemas menores que são acoplados a um problema Mestre. O método está intimamente relacionado com o princípio da dualidade *simplex*, que ainda é um dos métodos mais eficientes para resolver problemas de programação linear (Nowak, 2005). Dentre os métodos de decomposição destacam-se os métodos duais, os métodos primais de planos de corte, o método de geração de colunas e o método de decomposição de Benders. Dos métodos citados o que mais tem sido aplicado ao problema de planejamento da expansão da transmissão é o método de decomposição de Benders.

A decomposição de Benders explora a decomposição natural do problema da expansão em duas partes, (1) um subproblema de investimento (em que se escolhe um plano de expansão candidato e calcula-se então o custo de investimento associado ao plano de expansão escolhido) e (2) um subproblema de operação (onde é testado o plano de expansão candidato em termos do adequado atendimento da carga).

O método de decomposição de Benders encontra a solução ótima para sistemas de pequeno e médio porte. Porém para sistemas de complexos, o algoritmo tem se mostrado ineficiente porque seu o custo computacional é muito elevado.

As principais aplicações do método de decomposição de Benders para solução do problema da expansão da transmissão são encontradas em Pereira e Pinto (1985), Romero e Monticelli (1994) e Binato (2000). Romero e Monticelli (1994) propuseram o planejamento hierarquizado com decomposição de Benders para o modelo cc. O mérito desse trabalho foi ter encontrado soluções ótimas para sistemas pequenos e de médio porte que até então não eram conhecidas (Rider, 2006). Os detalhes teóricos e de implementação dos métodos de otimização exatos fogem do escopo desse trabalho. Em Salkin (1975), Eiselt e Sandblom (2000), Wolsey (2000), Nowak (2005) e Conejo (2006) encontram-se tais detalhes.

Com o intuito de encontrar soluções de boa qualidade a um custo computacional baixo, muitos pesquisadores têm aplicado heurísticas e metaheurísticas para solução do problema de expansão da transmissão.

2.3.2 Algoritmos Heurísticos

A dificuldade ou mesmo impossibilidade prática de encontrar a solução de problemas combinatorios de larga escala por meio dos algoritmos exatos, levou ao desenvolvimento e utilização

dos algoritmos heurísticos ou aproximados. Reeves (1993) define algoritmo heurístico como sendo uma técnica que procura soluções em um custo computacional razoável sem garantir uma solução factível ou uma solução global, nem mesmo afirmar o quão próximo da solução ótima uma solução factível está.

As vantagens de utilização de métodos heurísticos podem ser destacadas como segue:

- Possibilitam a flexibilização para manejar as variáveis ou características do problema;
- Podem apresentar mais de uma solução, possibilitando ao analista verificar qual tem melhor qualidade para o problema analisado;
- A maioria dos métodos consegue alcançar soluções de boa qualidade sem recorrer ao formalismo matemática aumentando a facilidade de implementação;

Os algoritmos heurísticos construtivos (AHCs) têm sido os mais utilizados para a expansão da transmissão. O algoritmo heurístico construtivo mais proeminente para solução do problema de planejamento da expansão da transmissão foi desenvolvido na década de setenta por Garver (1970). Seu uso intensivo para encontrar soluções factíveis com pouco esforço computacional fez desse algoritmo um dos mais usados pelas pesquisadores e empresas especializadas. O AHC de Garver (1970) também tem sido usado como partida para o surgimento de outros algoritmos heurísticos construtivos. Por sua importância para o planejamento da expansão, os principais AHCs bem como seus respectivos detalhes são estudados mais a fundo no Capítulo 3.

Os artigos de (Garver, 1970; Monticelli et al., 1982; Pereira e Pinto, 1985; Villasana et al., 1985; Asada et al., 2005) são exemplos de alguns trabalhos que usam métodos heurísticos para solução do problema da expansão da transmissão.

2.3.3 Metaheurísticas

As metaheurísticas representam um conjunto de técnicas de otimização aplicadas principalmente a problemas de natureza combinatória no intuito de encontrar soluções de boa qualidade a um custo computacional pequeno. A idéia principal de uma metaheurística consiste em analisar ou visitar apenas um conjunto reduzido do espaço de busca, considerando que o espaço de busca é muito grande (Romero e Mantovani, 2004). O processo de busca de uma metaheurística precisa ser eficiente para que possa encontrar a solução ótima ou uma solução de boa qualidade, ou seja, precisa ser uma busca inteligente. Nesse contexto, a grande diferença entre as metaheurísticas está no algoritmo de pesquisa da vizinhança. As técnicas *simulated annealing*, algoritmo genético e evolutivo, *tabu search*, GRASP, *particle swarm*, todos os algoritmos de colônias estão entre as metaheurísticas mais usadas atualmente.

Uma grande vantagem das metaheurísticas é que o estilo de resolver um problema varia pouco quando se altera a modelagem matemática. Assim, para o problema de planejamento da transmissão, a forma usada para resolver o modelo de transportes, o modelo híbrido ou o modelo cc é praticamente igual. Devido a isso, em todas as aplicações de metaheurísticas para o problema de planejamento da expansão é usado o modelo cc. Os trabalhos (Gallego et al., 1998; Romero et al., 1996; Da Silva et al., 2000; Binato et al., 2001; Romero, Rider e Silva, 2007) estão entre as principais aplicações de metaheurísticas no problema de planejamento.

As pesquisas apresentadas usando metaheurísticas indicam que, quando se pretende encontrar soluções de boa qualidade a um custo computacional relativamente baixo, as metaheurísticas são a melhor alternativa no momento. As metaheurísticas apresentam as vantagens de serem fáceis de implementar computacionalmente; de serem flexíveis em relação ao modelo computacional e de apresentar soluções de boa qualidade. Porém, quando se deseja soluções de excelente qualidade, as metaheurísticas podem apresentar tempos de processamento equivalentes aos dos algoritmos exatos.

2.3.4 A Técnica de Solução Proposta Neste Trabalho

Como foi visto na Seção 2.3.3, para encontrar soluções de excelente qualidade, as metaheurísticas apresentam um tempo de processamento elevado. Porém, quando se usam as metaheurísticas ou até mesmo o algoritmo *branch-and-bound*, partir de uma solução de boa qualidade pode diminuir muito o tempo de processamento para encontrar soluções de excelente qualidade. Portanto, neste trabalho, aplicou-se uma técnica inteligente, a lógica *fuzzy*, ao algoritmo original de Garver (1970) para desenvolver um algoritmo construtivo com tomada de decisão *fuzzy*. Os detalhes desse algoritmo são apresentados no Capítulo 5. O objetivo do algoritmo é encontrar a solução ótima de sistemas de pequeno e médio portes e apresentar soluções de boa qualidade para sistemas complexos a um custo computacional baixo.

Portanto, para sistemas simples ou de complexidade média, propõe-se o uso direto da metodologia para encontrar a solução ótima. Para sistemas complexos, propõe-se o uso da técnica para gerar a configuração inicial para as metaheurísticas, ou a solução incumbente inicial do algoritmo *branch-and-bound*, no intuito de iniciar com uma solução de boa qualidade e diminuir o tempo computacional para encontrar soluções de melhor qualidade.

Para lidar com sistemas de grande porte, utilizou-se da metaheurística busca tabu. Assim, utilizou-se das soluções encontradas pelo AHC-CTDF como soluções iniciais, e a partir daí, aplicou-se a busca tabu para encontrar soluções melhores.

Capítulo 3

Algoritmos Heurísticos Construtivos - AHC

Como foi visto no capítulo anterior, muitos modelos matemáticos e técnicas de solução já foram propostos para modelar e resolver o problema de planejamento da expansão da transmissão. Os modelos se dividem em dois grupos (1) problemas de PLIM (transportes e híbrido linear) e (2) problemas de PNLIM (híbrido não-linear e modelo cc). Ambos os grupos são de grande dificuldade de solução principalmente quando se lida com sistemas de grande porte. Técnicas que visam diminuir a complexidade do problema foram propostas, sendo a mais bem sucedida a técnica que propõe o uso dos algoritmos heurísticos construtivos. Neste capítulo, será feita uma análise desses algoritmos heurísticos destacando suas vantagens e desvantagens e dividindo-os de acordo com o modelo para o qual cada um dos algoritmos heurísticos construtivos foi inicialmente proposto.

3.1 Introdução

Um AHC é um processo passo-a-passo em que, de maneira iterativa, se constrói uma proposta factível de expansão do sistema. Assim, após partir da configuração inicial, procura-se adicionar uma linha a cada passo até que o conjunto de linhas adicionadas possibilite uma operação adequada do sistema elétrico. A cada iteração, a configuração do sistema é modificada, pois a soma das linhas da configuração inicial com as linhas adicionadas nas iterações anteriores forma a configuração base ou configuração corrente. Porém, muito provavelmente a inserção aleatória dos circuitos não levará a uma boa configuração de tal forma que possibilitasse a operação adequada

do sistema. Por isso, a inserção de cada linha deve ser motivada por um indicador confiável e que de fato levará à satisfação de todas as restrições do problema em poucas iterações. Esse indicador é chamado de indicador de sensibilidade, ou índice de sensibilidade (IS) ou, ainda, índice de desempenho. A diferença principal entre os vários algoritmos heurísticos construtivos está no índice de sensibilidade adotado por cada um e no modelo matemático usado. O índice de sensibilidade é um parâmetro indicador da taxa de variação da função objetivo devido a alguma alteração na configuração corrente.

O índice de sensibilidade apresenta as seguintes características:

- Identifica qual das linhas candidatas cuja inserção na configuração base levará à convergência mais rápida do problema, ou seja, identifica a linha mais atrativa para realizar a adição na configuração corrente.
- Leva a um mínimo local, uma vez que quando da seleção da linha mais atraente se leva em conta somente a configuração corrente.

Portanto, um AHC nem sempre converge para o ótimo global, principalmente para sistemas de médio e grande porte, sendo mais comum encontrar apenas configurações boas, factíveis, para tais sistemas. Entretanto, os algoritmos heurísticos construtivos são de grande interesse dos pesquisadores pelos seguintes motivos:

- Quando da sua origem (décadas de 60 e 70)
 1. Eram a única ferramenta existente para resolver o problemas de planejamento de sistemas elétricos de grande porte.
 2. Apresentam robustez e são fáceis de entender e implementar.
 3. Apresentam baixo esforço computacional e convergência rápida.
- Nos dias atuais
 1. Têm sido usados como ponto inicial para o desenvolvimento de outros AHCs e de algoritmos mais complexos como as metaheurísticas.
 2. A solução dada pelo AHC pode ser usada como configuração inicial para algoritmos mais complexos, como as metaheurísticas e até mesmo como solução incumbente inicial do algoritmo B&B.
 3. São os mais usados pelas empresas do setor elétrico ainda hoje.

Como já exposto, para solução problema de planejamento da expansão da transmissão, são necessárias duas etapas: (1) a seleção da modelagem matemática e (2) a escolha da técnica usada para solução do modelo selecionado. Assim, nas próximas seções serão apresentados os principais

AHCs propostos para solução dos principais modelos matemáticos usados no planejamento de sistemas de transmissão.

3.2 Heurísticas Construtivas Aplicadas ao Modelo de Transportes

O primeiro AHC proposto e largamente usado no planejamento de sistemas de transmissão foi aplicado originalmente para solução do modelo de transportes. Este AHC foi desenvolvido por Garver (1970) que sugeriu uma forma sistemática de realizar o planejamento de sistemas de transmissão introduzindo técnicas diferentes das usadas na análise de operação de sistemas elétricos. Dessa forma, sugeriu o uso do modelo de transportes como a formulação mais adequada para realizar trabalhos de planejamento, em detrimento de modelos mais precisos, e por isso mais complexos, como o fluxo de carga cc e ca.

O AHC de Garver não foi desenvolvido para encontrar a solução ótima, assim como nenhum outro AHC, o intuito é encontrar soluções de boa qualidade, ou mesmo somente encontrar soluções factíveis. Encontrar a solução ótima do modelo de transportes, que é um PLIM, exige recursos (como processadores velozes e disponibilidade de memórias em grande quantidade) que não existiam quando do surgimento desse algoritmo.

3.2.1 Algoritmo de Garver

Garver (1970) propôs o modelo de transportes como sendo o modelo matemático mais adequado para resolver problemas de planejamento. No Capítulo 2 pode ser encontrada uma discussão mais detalhada sobre o modelo de transportes. O modelo de transportes assume a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij}$$

sujeito a

$$\mathbf{S}f + g = d$$

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

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

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

$$n_{ij} \text{ inteiro}; f_{ij} \text{ irrestrito}; (i, j) \in \Omega$$

Neste modelo somente a Lei das Correntes de Kirchhoff é levada em consideração. Assim, não existe nenhuma restrição que force os circuitos a considerar a Lei das Tensões Kirchhoff. Por isso é possível que soluções geradas através do modelo de transportes sejam ineficazes em relação aos modelos que levam em conta a Lei das Tensões de Kirchhoff.

O modelo de transportes é um problema de PLIM. A restrição de integralidade das variáveis n_{ij} decorre do fato delas representarem as linhas existentes no ramo $i - j$, o que obviamente não pode ser um valor fracionário. No trabalho de Garver, propõe-se a remoção da restrição de integralidade com o intuito de relaxar o problema de transportes para um problema de programação linear.

No algoritmo de Garver, o modelo matemático unido do índice de sensibilidade (IS) servem somente como guia para seleção das novas linhas que irão fazer parte da configuração base. Para calcular o índice de sensibilidade usam-se os valores de n_{ij} encontrados pela solução do PL. Com esses valores pode-se identificar qual é a linha mais promissora para ser adicionada ao sistema. A linha que deve ser adicionada é a que tiver valor de $n_{ij} \neq 0$ que entrega ao sistema o maior fluxo. Em vista disso, o índice de sensibilidade pode ser calculado de acordo com a Equação (3.1). Sendo assim, a restrição de integralidade de n_{ij} se torna completamente desnecessária, o que justifica a sua remoção.

$$IS = \max\{n_{ij}\bar{f}_{ij}; n_{ij} \neq 0\} \quad (3.1)$$

O algoritmo de Garver consiste em adicionar um circuito na configuração base no caminho mais atrativo, indicado pelo IS, e atualizar a configuração base de acordo com o circuito selecionado. Esse processo é feito iterativamente até que $n_{ij} = 0, \forall(ij)$ o que significa que não é mais necessário adicionar nenhuma linha à configuração base, ou seja, que todas as restrições do problema foram satisfeitas. A configuração base final é considerada a resposta gerada pelo algoritmo de Garver. Portanto, o algoritmo de Garver pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Assumir a configuração base n_{ij}^0 como configuração corrente ou base;
2. Resolver o modelo de transportes para a configuração atual, removendo a restrição de integralidade para n_{ij} .
3. Se a função objetivo v é igual a zero, pare, a solução foi encontrada (mais uma vez enfatiza-se que essa é a solução dada pelo algoritmo de Garver, o que não necessariamente significa

ser a solução ótima).

4. Se existe algum n_{ij} diferente de zero, calcula-se o índice de sensibilidade para saber em que caminho adicionar um novo circuito. Uma vez selecionada a linha, adiciona-se esta à configuração base e volta-se ao passo 2.

Em testes verificou-se que o algoritmo de Garver pode adicionar mais linhas do que o necessário. Portanto, para melhorar a solução dada pelo algoritmo, deve-se varrer a solução apresentada pelo algoritmo simulando a remoção de cada uma das linhas adicionadas durante o processo iterativo. Em outras palavras, procura verificar se ao remover uma determinada linha o valor de função objetivo continua igual a zero; se verdadeiro, remove-se definitivamente a linha.

Portanto, o algoritmo pode ser dividido em duas fases, a que adiciona linha até a convergência ($v = 0$), e ao que simula a remoção das linhas adicionadas enquanto $v = 0$.

- Fase I

1. Assumir a configuração base n_{ij}^0 como configuração corrente ou base;
2. Resolver o modelo de transportes para a configuração atual removendo a restrição de integralidade para n_{ij} .
3. Se a função objetivo v é igual a zero, pare, a solução foi encontrada (Mais uma vez enfatiza-se que essa é a solução dada pelo algoritmo de Garver, o que não necessariamente significa ser a solução ótima).
4. Se existe algum n_{ij} diferente de zero, calcula-se o índice de sensibilidade para saber em que caminho adicionar um circuito. Uma vez selecionada a linha, adiciona-se esta à configuração base e volta-se ao passo 2.

- Fase II

1. Ordena-se a solução por ordem descendente dos custos das linhas.
2. Para cada circuito adicionado durante a Fase I, deve-se simular sua remoção. Se uma vez removido o circuito, o valor de v continuar igual a 0 seleciona o próximo circuito a ser removido. Se após a remoção de um determinado circuito o valor de v for diferente de 0, readiciona-se o circuito e seleciona o próximo circuito a ser simulada sua remoção.

Assim, o algoritmo de Garver encontra com facilidade, em poucas iterações, as configurações ótimas de sistemas pequenos para o modelo de transportes, mas em sistemas de grande porte essas configurações podem ficar muito afastadas da configuração ótima.

3.3 Heurísticas Construtivas Aplicadas a Modelos Híbridos

Os modelos híbridos são uma alternativa para diminuir a complexidade do modelo cc e concomitantemente melhorar a qualidade das soluções do modelo de transportes. Muitos trabalhos usam essa modelagem (Levi e Calovic, 1991; Taranto et al., 1992; Latorre-Bayona e Perez-Arriaga, 1994; Asada et al., 2005; Sousa e Asada, 2008) uma vez que suas soluções são factíveis com o modelo cc e porque os modelos híbridos têm complexidade menor do que o modelo cc. A seguir é detalhado o algoritmo de Villasana et al. (1985).

3.3.1 O Algoritmo de Villasana-Garver-Salon(VGS)

Na proposta de Villasana et al. (1985), são usadas duas redes superpostas, uma rede elétrica real que corresponde aos circuitos existentes na configuração base e uma rede artificial que corresponde aos circuitos que podem ser inseridos na configuração base, ou seja, os circuitos candidatos.

No modelo apresentado por Villasana et al. (1985) todos os circuitos da rede elétrica real devem satisfazer as duas leis Kirchhoff e obedecer aos limites de fluxos nos circuitos. Já aos circuitos da rede fictícia cabe satisfazer somente a Lei das Correntes de Kirchhoff. Portanto, esse modelo é considerado híbrido por que a rede real é equivalente ao modelo cc enquanto a rede fictícia é equivalente ao modelo de transportes. Essa estratégia tem duas grandes vantagens: (1) é possível modelar o problema de planejamento da expansão da transmissão como um modelo linear (rede real) e com menos restrições do que o modelo cc, pois nem todos os circuitos devem satisfazer a Lei das Tensões de Kirchhoff; e (2), é possível lidar de forma eficiente com sistemas não conexos com o auxílio da rede fictícia.

O modelo utilizado no algoritmo Villasana-Garver-Salon assume o seguinte formato:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (3.2)$$

sujeito a

$$\begin{aligned}
\mathbf{S}f' + \mathbf{S}_0f_0 + g &= d \\
f_{ij}^0 - \gamma_{ij}n_{ij}^0(\theta_i - \theta_j) &= 0 \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \\
|f_{ij}^0| &\leq n_{ij}^0\bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \\
|f'_{ij}| &\leq n_{ij}\bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega \\
0 &\leq g \leq \bar{g} \\
0 &\leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
n_{ij} &\text{ inteiro; } f_{ij} \text{ irrestrito;} \\
\theta_j &\text{ irrestrito } \forall j \in \Omega_3
\end{aligned}$$

onde:

- \mathbf{S}_0 é a matriz de incidência nó-ramo transposta existente na configuração base;
- f_{ij}^0 é o vetor dos fluxos nos circuitos existentes na configuração base;
- \mathbf{S} é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema completo ;
- f'_{ij} é o vetor de fluxos dos circuitos adicionados;
- θ_j são os ângulos de fase das barras que estão ligadas ao sistema elétrico na configuração base.
- Ω representa todos os ramos em que podem ser adicionados novos circuitos.
- Ω_1 representa o conjunto de circuitos existentes na configuração base.

Para o cálculo do índice de sensibilidade deve-se desconsiderar a restrição de integralidade, resolvendo-se somente o problema de programação linear. Após feitas as devidas relaxações, o índice de sensibilidade é definido como o fluxo de potência através dos circuitos com $n_{ij} \neq 0$ obtidos da solução do PPL. A cada iteração um circuito é selecionado através do índice de sensibilidade representado pela Equação (3.3).

$$IS = \max\{IS_{ij} = n_{ij}\bar{f}_{ij}, \forall n_{ij} \neq 0\} \quad (3.3)$$

Como os demais AHC, o algoritmo de VGS é um algoritmo passo-a-passo. Assim, em cada passo a topologia corrente é atualizada, ou seja, ela passa a ser composta pelos circuitos existentes na configuração corrente do passo anterior mais o circuito adicionado no passo atual. Por usar o modelo híbrido linear, cada circuito adicionado deve satisfazer a Lei das Tensões de Kirchhoff, ou seja, sua proposta de expansão é factível para o modelo cc. Embora encontre uma solução

factível para o modelo cc, não significa que esta solução seja a solução ótima, o que pode acontecer somente para sistemas de pequena complexidade.

É importante ressaltar que a justificativa usada para selecionar o circuito mais promissor a entrar na configuração corrente é empírica. Portanto, não há uma justificativa matemática rigorosa, mas uma observação experimental de que a rede fictícia identifica os caminhos mais atrativos.

O algoritmo de VGS pode ser resumido nos seguintes passos:

- Fase I:
 1. Assumir a configuração inicial, sem nenhuma adição, como configuração corrente e montar o problema (3.2) para essa configuração.
 2. Resolver o PL correspondente ao problema (3.2) para a configuração corrente. Se $\{n_{ij} = 0; \forall n_{ij}\}$, pare. Caso contrário, vá para o passo 3
 3. Selecionar o circuito mais promissor para entrar na configuração corrente através do cálculo do índice de sensibilidade dado pela Equação (3.3). Após selecionar o circuito mais promissor, adiciona-se-o à configuração corrente e volta-se ao passo 2.
- Fase II:
 1. É possível que existam alguns circuitos desnecessários adicionados durante a fase I devido a outras adições mais importantes realizadas posteriormente. Portanto, ordenam-se os circuitos adicionados em ordem decrescente de seus custos e eliminam-se aqueles que mesmo após sua remoção todos $n_{ij} = 0$.

Deve-se observar que a principal importância do AHC de VGS está no fato de que mesmo resolvendo somente problemas de programação linear, ser capaz de fornecer soluções factíveis para o modelo cc que é um modelo não-linear.

3.4 Heurísticas Construtivas Aplicadas ao Modelo CC

Em decorrência do trabalho de Garver, algumas pesquisas sugeriram a aplicação de algoritmos heurísticos construtivos para solução do modelo cc, uma vez que esse modelo tem uma representação mais adequada do problema de planejamento da expansão de sistemas transmissão. Porém dificuldades surgem quando da utilização desse modelo por suas restrições não-lineares.

É importante ressaltar que mesmo o modelo cc é um modelo relaxado. Portanto, é possível que suas soluções não sejam compatíveis com a operação de sistemas de energia elétrica. O

modelo cujas soluções são compatíveis com a operação de sistemas elétricos é modelo de fluxo de carga ac. As soluções encontradas pelo modelo cc são as que mais se aproximam das do modelo ac. Em virtude disso, as soluções encontradas pelos modelos relaxados devem ser testadas usando o modelo ac. O modelo cc apresenta a seguinte formulação:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (3.4)$$

sujeito a

$$\mathbf{S}f + g = d \quad (3.5)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (3.6)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{f}_{ij} \quad (3.7)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (3.8)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (3.9)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro}; f_{ij} \text{ irrestrito}; \theta_j \text{ irrestrito} \quad (3.10)$$

Onde:

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

Os algoritmos heurísticos construtivos que usam o modelo cc e são muito usados pelos pesquisadores são o *algoritmo de mínimo esforço* e o *algoritmo de mínimo corte de carga*. Ambos são bem parecidos sendo que sua principal diferença está no índice de sensibilidade utilizado. A seguir são analisados os detalhes desses algoritmos.

3.4.1 AHC do Mínimo Esforço

O algoritmo apresentado por Monticelli et al. (1982) é formulado usando o modelo cc e seu critério de seleção de novos circuitos é determinado por uma análise de sensibilidade denominada de mínimo esforço.

O critério de seleção de novos circuitos a serem adicionados na configuração corrente é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta Z_{ij}^* = -\frac{1}{2}(\theta_i^* - \theta_j^*)^2 \Delta \gamma_{ij} \quad (3.11)$$

onde $\Delta \gamma_{ij}$ é a variação da susceptância de um circuito do ramo $i - j$ e θ_j^* é encontrado resolvendo o modelo cc.

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

O algoritmo também consegue lidar de forma satisfatória com sistemas não conexos. Para isso, adota-se uma rede fictícia superposta à configuração do sistema constituída por ligações com susceptâncias baixas (10^{-4} , por exemplo) colocada em todos os ramos onde se podem inserir novos circuitos. A baixa capacidade de transmissão da rede fictícia faz com que esta só seja utilizada quando não houver possibilidade de transporte de potência pela rede real, ou seja, onde a rede real é desconexa (Silva Junior, 2005).

3.4.2 AHC de Mínimo Corte de Carga

Este algoritmo foi desenvolvido em Pereira e Pinto (1985). Assim como o AHC de Garver, em cada iteração é adicionado um circuito à configuração corrente. Em cada passo do algoritmo de mínimo corte de carga se resolve o seguinte PL:

$$\begin{aligned} \min w &= \sum r_i \\ \text{s.a.} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} B\theta + g + r &= d \\ |\theta_i - \theta_j| &\leq \bar{\phi}_{ij} \\ 0 &\leq g \leq \bar{g} \\ 0 &\leq r \leq d \\ \theta_j &\text{ irrestrito} \end{aligned}$$

O critério de seleção de novos circuitos é baseado na seguinte expressão:

$$IS_{ij}^{mc} = \frac{\partial Z}{\partial \gamma_{ij}} = -(\pi_i - \pi_j)(\theta_i - \theta_j) \quad (3.13)$$

Onde:

- IS_{ij}^{mc} é o indicador de sensibilidade;
- π_i é o multiplicador de Lagrange da i -ésima restrição do sistema ($B\theta + g + r = d$);
- θ_j é o ângulo de tensão das barras do sistema obtido ao resolver (3.12).

Assim como o algoritmo de mínimo esforço, o algoritmo de mínimo corte de carga também faz uso de uma rede fictícia para contornar problemas de rede não conexa. Portanto, é definida uma rede fictícia constituída por circuitos com valores de n_{ij} muito pequenos, mas com uma capacidade de transmissão muito maior que um circuito normal, ou seja, o circuito fictício deve ter uma abertura angular maior que a abertura angular máxima permitida para um circuito normal. Para exemplificar para os circuitos fictícios, poderíamos determinar $n_{ij} = 10^{-4}$ e aberturas angulares máximas de $|\theta_i - \theta_j| \leq 10\bar{\phi}_{ij}$. Com n_{ij} pequeno possibilita-se dispor de um sistema conexo, evitam-se problemas numéricos e produz-se uma modificação mínima no sistema. Com as aberturas angulares máximas pretende-se forçar que a abertura angular de um circuito fictício seja suficientemente grande para que as diferenças angulares nos laços artificiais gerados pelos circuitos fictícios não modifiquem as aberturas angulares nos circuitos normais.

Capítulo 4

Sistemas *Fuzzy*

Neste capítulo será feita uma introdução à lógica *fuzzy* e apresentada a teoria por volta dos conjuntos *fuzzy* no intuito de introduzir o conhecimento básico usado para o desenvolvimento da tomada de decisão *fuzzy*. Na Seção 4.8 serão apresentados os conceitos de tomada de decisão e detalhado o uso da lógica *fuzzy* para a tomada de decisão.

4.1 Introdução

O raciocínio humano é complexo porque se baseia em informações não precisas. Assim, para um ser humano não é difícil tomar uma decisão baseada apenas em informações abstratas ou imprecisas, ou seja, em variáveis lingüísticas. Desta forma, para o cérebro humano, informações como "muito quente", "quase exato", "mal passado", podem ser suficientes para tomar uma decisão satisfatória. Os sistemas *fuzzy* são sistemas computacionais que visam aproximar o processo de decisão computacional da decisão humana.

A tomada de decisão computacional antes dos sistemas *fuzzy* era baseada somente na lógica clássica, a qual parte do princípio de que um elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto. Para a lógica clássica, não existe um grau de pertinência intermediário. Assim, não há outra possibilidade, apenas pertence ou não pertence. Por exemplo, para a lógica clássica, 1 pertence ao conjunto dos números inteiros; já 1,001 não pertence ao conjunto dos números inteiros.

Para a grande maioria das aplicações reais não é possível aplicar a lógica clássica, pois ela precisa de exatidão quando da separação e pertinência dos elementos em conjuntos. Se houver

a intenção de tomar decisões a partir da altura das pessoas usando lógica clássica, por exemplo, deveríamos separar as pessoas em conjuntos precisos de tal forma que uma pessoa poderia pertencer ou não a cada conjunto. E, uma vez pertencendo, não poderia haver graus de pertinência. Assim, por exemplo, uma pessoa de 1,80m seria alta da mesma forma que uma pessoa de 2,10m.

Suponha que o intuito de separar as pessoas em conjuntos de altura fosse fabricar roupas. Criariam-se então três conjuntos de altura: "baixo", "médio", "alto". Pessoas "altas" seriam todas com mais de 1,80m. Desta forma, roupas para pessoas altas seriam fabricadas a partir dessa classificação. Logo se percebe que esse sistema não funcionaria, pois ir-se-ia fabricar roupas do mesmo tamanho para pessoas de 2,10m e pessoas de 1,81m.

Digamos que, para solucionar o impasse, um projetista do sistema criasse outros conjuntos para basear o sistema na tomada de decisão sobre que tamanho as roupas deveriam ter. Para isso, criariam-se os conjuntos "alto baixo", "alto médio", "alto" e "muito alto". Ainda assim, haveria problemas pois as pessoas têm tamanho de esqueleto e pesos diferentes, ou seja, as roupas poderiam até servirem na altura, mas ficariam ou apertadas ou folgadas demais. Assim, teimando em não abandonar a lógica clássica, o projetista do sistema criaria mais três grupos: "magro", "normal" e "gordo". Ótimo, agora parece que o sistema vai fabricar roupas em dimensões corretas. Só que surge mais um problema: que dimensões, em centímetros, deve ter uma roupa feita para um "gordo alto"?

Como se pode ver, até que foi possível separar as pessoas em grupos abstratos usando a lógica clássica, porém não é possível transformar esses conjuntos em valores concretos para decidir sobre as dimensões das roupas.

Em muitos problemas da vida real precisa-se tomar decisões satisfatórias a partir de informações inexatas. Para citar mais um exemplo, considere um sistema de refrigeração que tenha por objetivo manter a temperatura de um ambiente "agradável". A tomada de decisão deverá se basear em fatores não exatos como, por exemplo, se o ambiente já está "agradável", se há "muitas pessoas" no ambiente, etc. Porém, como já foi dito, essas informações são inexatas, pois não é possível informar com exatidão o que é um ambiente "agradável" ou quantas pessoas são necessárias para considerar que no ambiente estão presentes "muitas pessoas", uma vez que depende se o ambiente é "espaçoso", "apertado" ou "mais ou menos suficiente". Porém, a partir dessas informações inexatas dever-se-á tomar uma decisão pontual: aumentar, manter ou diminuir a temperatura do ambiente. No exemplo do sistema de determinação de medidas de roupas, informar em alguma unidade de comprimento a altura e largura das roupas. Usando a lógica clássica não é possível modelar um sistema com tamanha complexidade, ou seja, que se baseia em variáveis lingüísticas. A lógica *fuzzy* foi desenvolvida com o intuito de possibilitar a modelagem de um sistema computacional de tal forma que o sistema possa tomar decisões

baseadas em informações abstratas.

Os sistemas *fuzzy* apresentam as seguintes características:

- Expressam indecisões e incertezas ("quente", "frio", "bonito", "alto").
- São baseados em regras lingüísticas (regras *Se-Então*).
- As conclusões são obtidas de forma paralela.

Neste capítulo serão dados os conceitos e aplicações dos sistemas baseados na lógica *fuzzy*. Além disso, na Seção 4.8 serão apresentados os conceitos e aplicabilidade da tomada de decisão *fuzzy* e será detalhado como esses conceitos podem ser aplicados ao problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

4.2 Conceitos e Aplicação da Lógica *Fuzzy*

Os sistemas *fuzzy* são baseados em quatro componentes: regras, fuzzificação, sistema de inferência e defuzzificação (Mendel, 1995).

Um sistema *fuzzy* pode ser representado de acordo com a Figura 4.1.

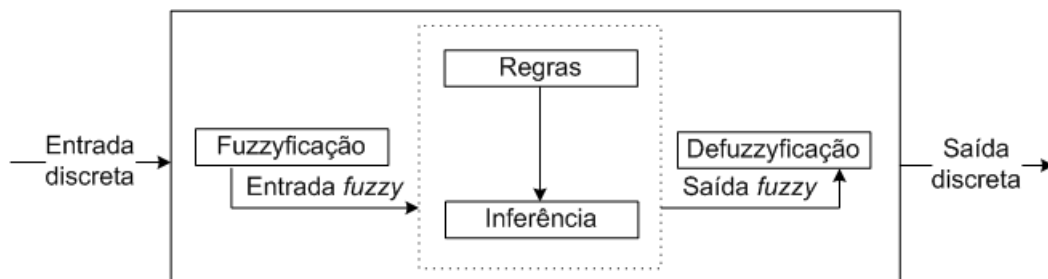


Figura 4.1: Diagrama esquemático de um sistema *fuzzy*.

As regras são fornecidas por especialistas ou podem ser extraídas de dados numéricos. Em cada um dos casos, as regras são expressas por um conjunto de cláusulas *Se...Então*. Por exemplo, em planejamento da expansão da transmissão, podemos ter: **Se** *Custo da Linha é Baixo* e *Valor de n_{ij} é Grande* e *Fluxo da linha é grande* **Então** *Inseria uma linha em $i - j$* . Portanto, para projetar um sistema de regras *fuzzy* são necessários os seguintes conceitos:

- Diferença entre variáveis lingüísticas e variáveis numéricas (diferença entre custo grande e R\$ 10^8).

- Conexão lógica entre as variáveis lingüísticas ("E", "OU", "Não" , etc)
- Implicação ("Se A Então B").
- Como combinar mais de uma regra.

A fuzzyficação é o processo em que os valores concretos são mapeados em conjuntos *fuzzy*. Isto é necessário para que as regras *fuzzy*, que estão em termos de variáveis lingüísticas, possam ser ativadas.

A inferência *fuzzy* é o processo em que se mapeia conjuntos *fuzzy* em conjuntos *fuzzy* sendo guiada pela combinação das regras *fuzzy*. Assim combinam-se as diferentes regras *fuzzy* ativas com o intuito de fazer a inferência *fuzzy*.

A defuzzificação é o último processo do sistema *fuzzy*. Neste processo, objetiva-se transformar o resultado inferência, que ainda é um conjunto, em um número concreto. Este número pode ser, por exemplo, a temperatura em graus em que uma sala deve estar para que as pessoas não sintam desconforto, ou as dimensões em centímetros que deve ter uma roupa.

Ressalta-se que no contexto dos sistemas *fuzzy*, valores discretos significam valores numéricos, podendo ser inteiros ou reais.

Algumas das principais aplicações dos sistemas *fuzzy* são:

- Controle
 1. Aéreo
 2. Trens
 3. Náutico
- Escalonamento e Otimização
 1. Escalonamento de elevadores
 2. Análise de ações do mercado financeiro
 3. Otimização linear e não-linear
- Análise de sinais
 1. Ajuste de imagens: Câmeras de vídeos e fotográficas
 2. Auto focagem de câmeras de vídeo
 3. Estabilização de imagens
- Tomada de decisão
 1. Engenharias
 2. Economia e Finanças

3. Teoria dos jogos

- Reconhecimento de padrões

Para informações sobre outras muitas aplicações, consulte (Lee et al., 1974; Mamdani, 1976; Kosko, 1994; Lee, 1990; Ramirez-Rosado et al., 1999; Ustundag et al., 2002).

4.3 Conjuntos *Fuzzy*

Nesta seção será apresentada uma noção sobre os conjuntos *fuzzy* que servirá como ponto de partida para o desenvolvimento do algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy*. Para melhor compreensão dos conjuntos *fuzzy* serão apresentadas as suas definições e operações bases.

Nos conjuntos *fuzzy* a idéia de inclusão é flexível, o que possibilita que um determinado elemento pertença a um ou mais conjuntos e determina o grau de inclusão em cada conjunto. Assim, na lógica *fuzzy*, um elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto e pertencer a mais de um conjunto.

4.3.1 Função de Pertinência

A função que define o grau de pertinência de um determinado elemento a um determinado conjunto *fuzzy* é denominada de função de pertinência. Um conjunto *fuzzy* A no universo de discurso X é caracterizado pela função de pertinência $f_A(x)$ que associa cada ponto em x a um número real no intervalo de $[0, 1]$, sendo que o valor de $f_A(x)$ em x representa o "grau de pertinência" de x em A . Assim, quanto mais próximo do valor unitário estiver o valor de $f_A(x)$, maior será o grau de pertinência de x ao conjunto A (Zadeh, 1965). Aqui está uma das principais diferenças entre os conjuntos *fuzzy* e os conjuntos da álgebra clássica. Na álgebra clássica, um elemento só pode ter dois graus de pertinência em relação a um conjunto: 0 ou 1. O que significa que ou o elemento pertence (1) ou não pertence (0) ao conjunto. Na lógica *fuzzy* um elemento pode pertencer parcialmente ao conjunto.

Conjuntos *Fuzzy* Convexos

Na álgebra clássica, um conjunto S em E_n é dito convexo se a linha unindo dois pontos do conjunto S também pertence ao conjunto (Bazaraa et al., 1990; Bazaraa e Shetty, 1993). Em

outras palavras, se x_1 e x_2 estão em S , então $\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2$ também deve pertencer a S para todo $\lambda \in [0, 1]$. A Figura 4.2 apresenta exemplo de conjunto convexo e não convexo.

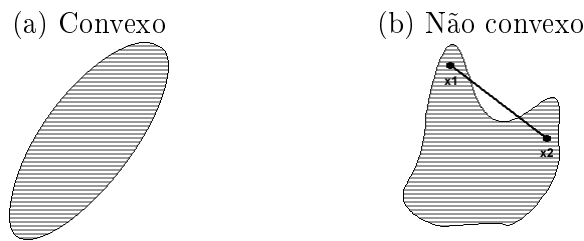


Figura 4.2: Ilustração de conjunto convexo (a) e conjunto não convexo (b).

Para a lógica *fuzzy*, um conjunto é considerado convexo se for observada a seguinte desigualdade:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)] \quad (4.1)$$

onde x_1 e $x_2 \in X$ e $\lambda \in [0, 1]$.

Para que uma determinada função seja considerada uma função de pertinência é preciso que a mesma satisfaça o conceito de convexidade *fuzzy*.

A Figura 4.3(a) é um exemplo de função convexa segundo a lógica *fuzzy* uma vez que esta satisfaz a Equação (4.1). A Figura 4.3(b) apresenta um exemplo de uma função não convexa para a lógica *fuzzy*. A Figura 4.3(c) ilustra a não convexidade da função segundo a Equação (4.1).

4.3.2 Extensões do Conceitos Algébricos Para os Conjuntos *Fuzzy*

Apresentaremos algumas definições envolvendo conjuntos *fuzzy* que são extensões das definições correspondentes aos conjuntos da álgebra clássica.

Conjunto Vazio

Um conjunto *fuzzy* é considerado *vazio* se e somente se sua função de pertinência é zero em X . Formalmente, se e somente se $f_A(x) = 0, \forall x \in X$.

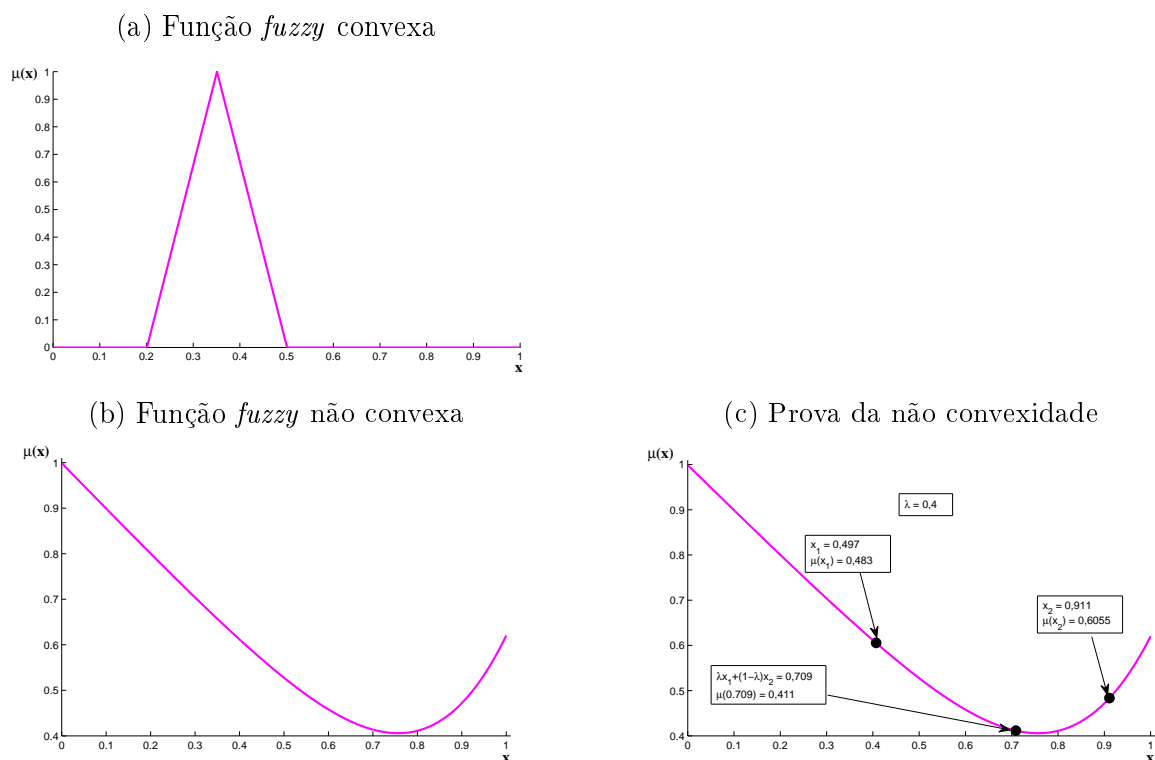


Figura 4.3: Convexidade segundo a lógica *fuzzy*.

Igualdade Entre Conjuntos

Dois conjuntos *fuzzy* A e B são considerados *iguais* se, e somente se, $f_A(x) = f_B(x)$ para todo x em X (por simplificação costuma-se escrever $f_A = f_B$).

Complemento

O complemento de um conjunto *fuzzy* A é denotado por A' e definido por:

$$f_{A'} = 1 - f_A. \quad (4.2)$$

União

A união de dois conjuntos *fuzzy* A e B é formada por todos os valores máximos entre $f_A(x)$ e $f_B(x)$. Formalmente:

$$f_{A(x) \cup B(x)} = \max[f_A(x), f_B(x)], \quad x \in X. \quad (4.3)$$

Interseção

A interseção de dois conjuntos *fuzzy* A e B é formada por todos os valores mínimos entre $f_A(x)$ e $f_B(x)$. Formalmente:

$$f_{A(x) \cap B(x)} = \min[f_A(x), f_B(x)], \quad x \in X. \quad (4.4)$$

4.4 Operadores de Agregação

As operações de agregação consistem em combinar dois ou mais conjuntos *fuzzy* visando a obtenção de um único conjunto *fuzzy*.

Sejam os conjuntos A_1, A_2, \dots, A_N , definidos no universo de discurso X . A função de pertinência $\mu_B(x)$ é dada por:

$$\mu_B(x) = \text{AGR}(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x), \dots, \mu_{A_N}(x)) \quad (4.5)$$

Os operadores de agregação podem ser agrupados em compensatórios e medianos. Em Zimmermann (2001) encontram-se mais detalhes sobre os tipos de operadores além dos critérios normalmente utilizados para seleção deles.

As operações *Min* e *Max* podem ser classificadas como funções de agregação e têm sido de grande aceitação principalmente devido ao seu baixo custo computacional.

4.5 Relações *Fuzzy*

Uma relação matemática indica como estão relacionados os elementos de um conjunto em relação aos elementos de um outro conjunto. As relações *fuzzy* representam um grau de presença

ou ausência de associação, interação ou interconexão entre os elementos de dois ou mais conjuntos (Mendel, 1995). De forma geral, uma relação é definida com um conjunto de pares ordenados (Halmos, 1974), por exemplo, o conjunto de todos os pares ordenados dos números reais x e y tais que $x \geq y$. No contexto dos conjuntos *fuzzy*, relações *fuzzy* são subconjuntos *fuzzy* de $X \times Y$, ou seja, são mapeamentos de $X \rightarrow Y$ (Zadeh, 1965; Zimmermann, 2001). As relações *fuzzy* representam uma regra muito importante para os sistemas *fuzzy*.

Exemplo 4.1: Para exemplificação, sejam U e V dois universos de discursos. Como já foi mencionado, uma relação *fuzzy* $R(U, V)$ é um conjunto *fuzzy* no espaço $U \times V$, ou seja, é um subconjunto *fuzzy* de $U \times V$ sendo caracterizado pela função de pertinência $\mu_R(x, y)$ onde $x \in U$ e $y \in V$. Assim, $R(U, V)$ pode ser definida como sendo $(U, V) = \{(x, y), \mu_R(x, y) | (x, y) \in U \times V\}$. A diferença entre a relação entre os conjuntos da álgebra clássica e os conjuntos *fuzzy* é que para os conjuntos *fuzzy* $\mu_R(x, y) \in [0, 1]$ enquanto que para a álgebra clássica $\mu_R = 0$ ou 1 .

Exemplo 4.2: Para exemplo numérico, sejam $U = \{x_1, x_2, x_3\}$ e $V = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$. A função de pertinência $\mu_{ML}(x, y)$ e $\mu_{VC}(y, x)$ são assumidas como sendo as seguintes matrizes relacionais (Mendel, 1995):

$$\mu_{ML}(x, y) = \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0,8 & 1 & 0,1 & 0,7 \\ 0 & 0,8 & 0 & 0 \\ 0,9 & 1 & 0,7 & 0,8 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

e

$$\mu_{VC}(y, x) = \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0,4 & 0,9 & 0,3 \\ 0 & 0,4 & 0 \\ 0,9 & 0,5 & 0,8 \\ 0,6 & 0,7 & 0,5 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Assim, por exemplo, $\mu_{ML \cap VC}(x_3, y_4) = \min[\mu_{ML}(x_3, y_4), \mu_{VC}(y_4, x_3)] = \min(0,8; 0,5) = 0,5$. A função de pertinência completa para $\mu_{ML \cap VC}(x, y)$ pode ser definida como sendo

$$\mu_{ML}(x, y) = \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0,4 & 0 & 0,1 & 0,6 \\ 0 & 0,4 & 0 & 0 \\ 0,3 & 0 & 0,7 & 0,5 \end{pmatrix}.$$

As operações referentes às relações *fuzzy* são iguais às definidas para os conjuntos *fuzzy*. Na Seção 4.3.2 foram especificadas as principais operações que se podem ser aplicadas aos conjuntos *fuzzy*.

4.5.1 Composição de Relações *Fuzzy*

Uma aplicação muito importante para os sistemas *fuzzy* é a combinação de diversas relações *fuzzy* definidas em espaços diferentes, com o objetivo de formar apenas um conjunto *fuzzy*.

Existem diversos operadores que permitem a combinação das relações *fuzzy*, sendo que os principais são: composição *max – min*, composição *max – prod* e composição *max-média*.

Composição *max – min*

A composição *max – min* das relações *fuzzy* $P(U, V)$ e $Q(V, W)$, definidas respectivamente nos produtos cartesianos $U \times V$ e $V \times W$, é composta pela função de pertinência $\mu_{P \circ Q}(x, y)$, onde:

$$\mu_{P \circ Q}(x, z) = \{(x, z), \max_x [\min(\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z))]\} \quad (4.8)$$

Composição *max – prod*

A composição *max – prod* das relações *fuzzy* $P(U, V)$ e $Q(V, W)$, definidas respectivamente nos produtos cartesianos $U \times V$ e $V \times W$, é composta pela função de pertinência $\mu_{P \times Q}(x, y)$, onde:

$$\mu_{P \times Q}(x, z) = \{(x, z), \max_x [\mu_P(x, y) \times \mu_Q(y, z)]\} \quad (4.9)$$

Composição *max-média*

A composição *max-média* das relações *fuzzy* $P(U, V)$ e $Q(V, W)$, definidas respectivamente nos produtos cartesianos $U \times V$ e $V \times W$, é composta pela função de pertinência $\mu_{P \oplus Q}(x, y)$, onde:

$$\mu_{P \oplus Q}(x, z) = \left\{ (x, z), \max_x \left[\frac{1}{2} (\mu_P(x, y) + \mu_Q(y, z)) \right] \right\} \quad (4.10)$$

A matriz resultante, das três composições *fuzzy* apresentadas acima será definida no produto cartesiano $U \times W$.

Exemplo 4.3: Para exemplificação, sejam as relações *fuzzy* dadas por:

$$\mu_{P(x,y)} = \begin{pmatrix} 0,8 & 1 & 0,1 & 0,7 \\ 0 & 0,8 & 0 & 0 \\ 0,9 & 1 & 0,7 & 0,8 \end{pmatrix}$$

e

$$\mu_{Q(y,z)} = \begin{pmatrix} 0,4 & 0,9 & 0,3 \\ 0 & 0,4 & 0 \\ 0,9 & 0,5 & 0,8 \\ 0,6 & 0,7 & 0,5 \end{pmatrix}.$$

Usando a composição *max – min*, Equação (4.8), $\mu_{P_oQ}(x_1, z_1)$ é calculado como segue:

$$\begin{aligned} \mu_{P_oQ}(x_1, z_1) &= \max[\min(0,8;0,4), \min(1;0), \min(0,1;0,9); \min(0,7;0,6)] \\ \mu_{P_oQ}(x_1, z_1) &= \max[0,4;0;0,1;0,6] \\ \mu_{P_oQ}(x_1, z_1) &= 0,6. \end{aligned}$$

A composição *max – min* completa é dada abaixo (Mendel, 1995):

$$\mu_{P_oQ}(x, z) = \begin{pmatrix} 0,6 & 0,8 & 0,5 \\ 0 & 0,4 & 0 \\ 0,7 & 0,9 & 0,7 \end{pmatrix}.$$

4.6 Inferência *Fuzzy*

A etapa de inferência do sistema *fuzzy* visa modelar o problema sobre o qual só se tenha informações qualitativas. Para tanto, o sistema *fuzzy* faz uso das variáveis *fuzzy*, ou variáveis lingüísticas, para expressar o comportamento do sistema.

4.6.1 Variáveis Lingüísticas

Os sistemas *fuzzy* permitem o desenvolvimento de um sistema computacional que lida eficientemente com informações disponibilizadas de forma qualitativa. Para tanto, essas informações qualitativas são armazenadas computacionalmente por meio das variáveis *fuzzy*, ou variáveis

lingüísticas. As variáveis lingüísticas são compostas pelos seguintes atributos:

- Nome - é o rótulo associado à variável lingüística.
- Conjunto de termos lingüísticos - são os nomes associados aos valores lingüísticos da variável lingüística.
- Universo de discurso - é o domínio de definição da variável lingüística.
- Função de pertinência - é o conjunto *fuzzy* que representa cada termo lingüístico.

Exemplo 4.4: Considerando a variável lingüística da Figura 4.4 como exemplo, observam-se os seguintes atributos:

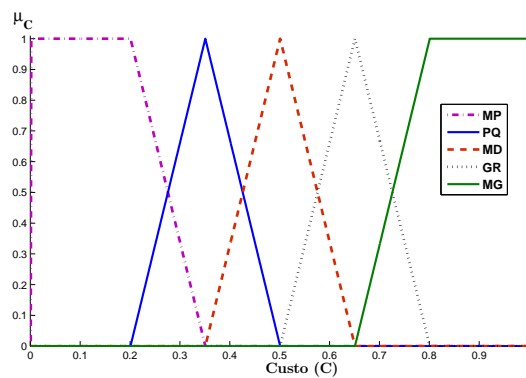


Figura 4.4: Variável *fuzzy* custo da linha $i - j$.

- Nome - Custo da linha $i - j$.
- Conjunto de termos lingüísticos - Muito Pequeno (MP), Pequeno (PQ), Médio (MD), Grande (GR), Muito Grande (MG).
- Universo de discurso - $[0,1]$.
- Função de pertinência - Triangular para PQ, MD e GR; trapezoidal para MP e MG.

4.6.2 Regras *Fuzzy*

As regras *Fuzzy* são compostas de conjuntos de SE-ENTÃO, e expressam a relação lógica entre as variáveis *fuzzy* do sistema. As regras *fuzzy* podem ser expressas como segue:

$$R^{(l)} : \mathbf{Se} (u_1 \text{ é } F_1^l) \text{ e } (u_2 \text{ é } F_2^l) \text{ e } \dots (u_p \text{ é } F_p^l) \mathbf{Então} v \text{ é } G^l \quad (4.11)$$

onde $l = 1, 2, \dots, N$ representando o conjuntos de todas as regras *fuzzy*; F_i^l e G^l são conjuntos *fuzzy*; u e v são variáveis lingüísticas.

O desenvolvimento das regras *fuzzy* é a etapa que mais precisa do especialista no tipo de aplicação para a qual se deseja desenvolver o sistema *fuzzy*. Somente um especialista na área saberá dar as informações necessárias para a construção das variáveis lingüísticas e das regras necessárias para que o sistema apresente respostas aceitáveis. Esta etapa é fundamental para a eficiência e exatidão do sistema *fuzzy*.

4.6.3 Processo de Inferência *Fuzzy*

No processo de inferência *fuzzy* a lógica *fuzzy* é usada para combinar as regras *fuzzy* com o intuito de mapear os conjuntos *fuzzy* de entrada nos conjunto *fuzzy* de saída. Cada regra é interpretada como uma implicação (Mendel, 1995), e esta pode ser transformada numa relação *fuzzy* $R_{A \rightarrow B}(x, y)$.

O processo de inferência é baseado no seguinte esquema:

Fato: x é A'
 Regra: **Se** x é A **Então** y é B
 Conseqüência: y é B'

onde x e y são um valores discreto e A , B e B' são conjuntos

Para obter B' faz-se uma composição do conjunto A' , denotado por um fato observável, com a relação de implicação $R_{A \rightarrow B}(x, y)$. O conjunto B' é a saída *fuzzy* do sistema.

Relações de Implicação

Existem diversos operadores de implicação que possibilitam a obtenção da função de pertinência relativa à implicação $R_{A \rightarrow B}(x, y)$. Abaixo são listados alguns dos principais operadores de implicação.

a) Operador de implicação de Zadeh (1965):

$$\mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y) = \max\{1 - \mu_A(x), \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]\} \quad (4.12)$$

b) Operador de implicação de Mamdani e Assilian (1975):

$$\mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (4.13)$$

c) Operador de implicação de Larsen (1980):

$$\mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y) = \mu_A(x) \times \mu_B(y) \quad (4.14)$$

4.7 Defuzzificação

A defuzzificação é o processo que visa transformar o conjunto *fuzzy* de saída resultante do processo de inferência *fuzzy* em valores discretos. Muitos métodos de defuzzificação têm sido propostos na literatura. A eficiência de cada um desses métodos depende de cada aplicação. Um dos principais critérios para selecionar um método de defuzzificação é a sua simplicidade computacional. Abaixo são apresentados alguns dos métodos mais usados na literatura.

4.7.1 Centro de Área

Este método apresenta o centro de área (MCA), \bar{y} , de B' e usa esse valor como resposta do sistema *fuzzy*. O centro de área pode ser calculado através da Equação (4.15) e ilustrado pela Figura 4.5.

$$MCA = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{B'}(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^N \mu_{B'}(x_i)} \quad (4.15)$$

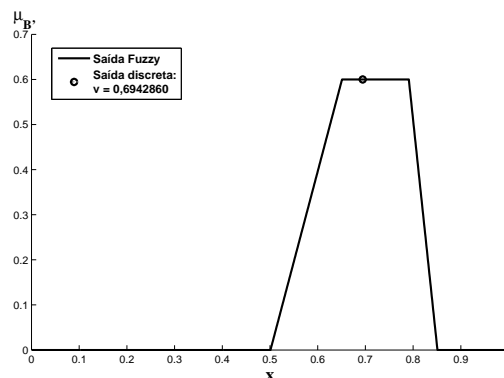


Figura 4.5: Valor da saída resultante da defuzzificação pelo método MCA.

onde N é o número de pontos de discretização da variável de saída B' e x_i são os valores do universo de discurso de B' .

4.7.2 Média dos Máximos

O método Média dos Máximos (MMM) primeiro procura-se qual é o máximo $\mu_{B'}$ de B' . Depois de descoberto este máximo, faz-se uma média aritmética dos valores de x cujo valor no universo de discurso seja igual ao máximo. O método Média dos Máximos pode ser definido pela Equação (4.16) e ilustrado pela Figura 4.6.

$$MMM = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{Maximo} \quad (4.16)$$

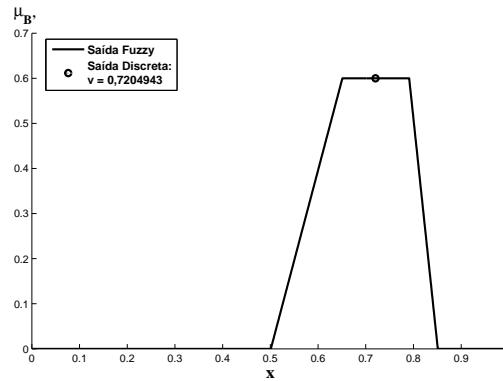


Figura 4.6: Valor da saída resultante da defuzzificação pelo método MMM.

onde x_i são os valores do universo de discurso de B' que contêm graus de pertinência máximos e M é a quantidade desses elementos.

4.7.3 Primeiro Máximo ou Menor Máximo

No método de Primeiro Máximo ou Menor Máximo (MPM) seleciona-se o x equivalente ao valor do universo de discurso onde ocorre o primeiro máximo de B' . Este método pode ser definido pela Equação (4.17) e ilustrado pela Figura 4.7.

$$MPM = \min_x \{\max(\mu_{B'})\} \quad (4.17)$$

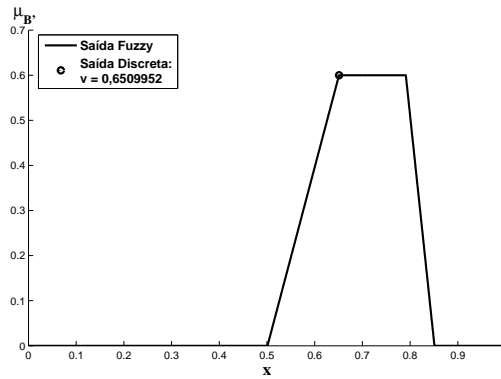


Figura 4.7: Valor da saída resultante da defuzzificação pelo método MPM.

4.8 Tomada de Decisão *Fuzzy*

Um tomador de decisão está freqüentemente diante do problema de selecionar uma alternativa dentro de um conjunto (normalmente finito) de outras alternativas satisfazendo um conjunto de critérios (objetivo) e observando (não violando) um conjunto de restrições (O'Hagan, 1993).

Desde que o artigo de Zadeh (1965) foi publicado, a teoria dos conjuntos *fuzzy* tem sido considerada como uma boa maneira de modelar problemas reais de tomada de decisão (Rommelfanger, 2002).

Para a tomada de decisão *fuzzy*, três conceitos são de fundamental importância: objetivo *fuzzy*, restrição *fuzzy* e decisão *fuzzy*.

- Por um objetivo *fuzzy* entende-se um objetivo que pode ser caracterizado como um conjunto *fuzzy* em um espaço apropriado (Bellman e Zadeh, 1970).
- Uma restrição *fuzzy* é um limite que deve ser observado por uma variável *fuzzy*. Este limite deve ser representado por meio de conjuntos *fuzzy*.
- A tomada de decisão *fuzzy* é definida através do conjunto *fuzzy* que satisfaz simultaneamente o objetivo e todas as restrições *fuzzy*.

Exemplo 4.5: Como ilustração, suponha existir um objetivo *fuzzy* G e uma restrição *fuzzy* C expressas como segue (Bellman e Zadeh, 1970):

- G : x deve ser substancialmente maior do que 10, com $\mu_G(x)$ dada pela Equação (4.18) e

$$\begin{aligned}\mu_G &= 0, \quad x < 10, \\ &= (1 + (x - 10)^{-2})^{-1}, \quad x \geq 10\end{aligned}\tag{4.18}$$

- C : x deve estar na vizinhança de 15, sendo que $\mu_C(x)$ é expressa pela Equação (4.19).

$$\mu_C = (1 + (x - 15)^4)^{-1}.\tag{4.19}$$

Note que G e C são conectados por meio do conectivo E . Isso implica que no exemplo em consideração, o efeito da combinação entre objetivo e a restrição *fuzzy* deve ser representado pela interseção $G \cap C$. A função de pertinência da interseção entre G e C é dada pela Equação (4.20).

$$\mu_{G \cap C} = \min[\mu_G(x), \mu_C(x)]\tag{4.20}$$

Note que $G \cap C$ é uma conjunto *fuzzy* convexo, uma vez que é formado por conjuntos convexos.

Dessa forma, o conjunto de decisão D é formado pelo conjunto resultante da interseção entre o objetivo e a restrição *fuzzy*.

$$D = G \cap C\tag{4.21}$$

Sobre o conjunto D poderá ser aplicado algum dos métodos de defuzzificação para obter uma resposta discreta que representará a tomada de decisão.

4.9 Conclusão

Neste capítulo, foi feito o detalhamento da lógica *fuzzy* apresentando a teoria dos conjuntos *fuzzy* e suas aplicações. Além disso, foi feita uma breve apresentação do uso de sistemas *fuzzy* para tomada de decisão. Essas informações são de fundamental importância para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho para solução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Capítulo 5

Algoritmo Heurístico Construtivo com Tomada de Decisão *Fuzzy*

Neste capítulo será apresentado de forma detalhada o algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* aplicado ao problema de planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica.

5.1 Introdução

O problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão é um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM) que deve encontrar um plano de expansão ótimo, ou seja, deve especificar os circuitos (linhas e/ou transformadores) que devem ser instalados na rede para permitir uma operação viável em um horizonte de planejamento especificado. Uma vez dada a configuração inicial, os dados de geração e a demanda do horizonte de planejamento, o plano ótimo é aquele que atenda completamente à demanda sem que haja cortes de carga e ao menor custo de investimento possível.

Devido à grande complexidade de um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM), foram introduzidas relaxações ao problema tornando-o em um problema de programação linear inteiro misto (PLIM). Mesmo com as relaxações, o problema do planejamento da expansão é um problema de difícil resolução devido a duas características: é um problema de programação inteira e é um problema que geralmente lida com um elevado número de variáveis e restrições, levando, portanto, a uma natureza combinatória. Dois tipos de abordagens têm sido usados para solução deste problema: 1) métodos exatos e 2) métodos aproximados. Os méto-

dos do primeiro tipo são de convergência finita comprovada conseguindo encontrar a solução ótima para sistemas de pequeno e médio porte. Porém, para sistemas de grande porte apresenta problemas de convergência e custo computacional proibitivos.

Neste trabalho é proposto um algoritmo que aplica a tomada de decisão *fuzzy* ao algoritmo de Garver com o objetivo de encontrar a solução ótima de sistemas de pequeno e médio porte e soluções de boa qualidade de sistemas de grande porte. Nas próximas seções serão dados os detalhes do algoritmo proposto.

5.2 Algoritmo Heurístico Construtivo

Desde que Garver (1970) apresentou uma heurística construtiva usando o modelo de transportes, diversos outros AHC foram desenvolvidos com o objetivo de resolver o problema do planejamento da expansão. Dentre esses algoritmos, destacam-se as metodologias de mínimo esforço (Monticelli et al., 1982) e o método de mínimo corte de carga (Pereira e Pinto, 1985). A grande diferença entre os algoritmos heurísticos está relacionada com o índice de sensibilidade que guiará o algoritmo para a solução.

Um AHC é um método passo-a-passo que, depois das devidas relaxações, é direcionado por um índice de sensibilidade para encontrar soluções de boa qualidade. A cada iteração um PL ou PNL, dependendo do modelo escolhido, é resolvido e um circuito adicionado ao problema até que o valor do investimento seja igual a zero. Para calcular o índice de sensibilidade, por exemplo, usam-se os valores de n_{ij} encontrados pela solução do PL, ou PNL. Com esses valores pode-se identificar qual é a linha mais promissora para ser adicionada ao sistema. A linha que deve ser adicionada é a que com valor de $n_{ij} \neq 0$ tal que entregue ao sistema o maior fluxo. Portanto, o índice de sensibilidade pode ser calculado de acordo com a Equação (5.1).

$$IS = \max\{n_{ij}\bar{f}_{ij}; n_{ij} \neq 0\} \quad (5.1)$$

Os circuitos da topologia básica e os circuitos adicionados durante o processo iterativo formam a topologia corrente. Portanto, em cada passo do AHC a topologia corrente é atualizada.

5.2.1 Deficiências do AHC

O AHC pode encontrar a solução ótima ou sub-ótima para sistemas de pequeno ou de médio porte e com um custo computacional baixo. Porém, para sistemas de grande porte, o AHC e

outros baseados em índices de sensibilidade apresentam solução muito longe da solução ótima. Romero et al. (2003) identificaram as causas que levam o processo de busca a parar em um ótimo local:

1. Linhas com custo elevado são selecionadas.
2. A seleção de novas linhas é baseada em valores pequenos de n_{ij} .

Os problemas críticos citados acima tendem a ocorrer principalmente em dois momentos do processo iterativo. Inicialmente, nas primeiras iterações, quando as linhas de custo mais elevado, por geralmente também terem grande capacidade de transmissão, são selecionadas. Porém, o ideal seria selecionar uma linha com grande capacidade de transmissão e custo pequeno. O segundo momento onde os pontos críticos surgem é nas últimas iterações, quando os valores de n_{ij} se aproximam de zero, uma vez que a seleção de uma nova linha baseada em um valor de n_{ij} pequeno não é confiável. Diante do exposto, este trabalho propõe um AHC com tomada de decisão *fuzzy* com o objetivo de contornar esses dois pontos críticos a fim de evitar, com um baixo custo computacional, a convergência para um mínimo local.

5.3 Sistemas *Fuzzy* Aplicada ao Planejamento da Expansão

Uma vez conhecidos os problemas que levam o AHC a falhar, procurou-se desenvolver um algoritmo que levasse em conta as dificuldades encontradas pelo AHC a fim de contornar suas deficiências. Como foi visto na seção anterior, o AHC falha porque não leva em conta o custo da linha nem o fato do valor de n_{ij} ser pequeno. Devido a isso, usamos a tomada de decisão *fuzzy* para decidir se o custo da linha é elevado ou se o valor de n_{ij} é pequeno. Caso positivo para pelo menos um dos casos, divide-se o problema original em dois subproblemas: um que segue a seqüência natural do AHC, ou seja, que insere a linha escolhida pelo índice de sensibilidade; e um outro subproblema em que é criada a restrição de não inserir a linha escolhida pelo índice de sensibilidade. A Figura 5.1 demonstra a divisão do problema original em subproblemas.

Na aplicação ao AHC, a decisão fuzzy precisa ser tomada para saber se a linha selecionada não tem um custo elevado ou que o valor de n_{ij} referente àquela linha não é pequeno. Sendo custo da linha elevado ou o valor de n_{ij} referente àquela linha pequeno, o problema precisa ser dividido em dois subproblemas, um que verifica a convergência para o caso em que essa linha seja inserida e outro para o caso em que a linha não é inserida. Dessa forma, o algoritmo faz uso da técnica dividir para conquistar, que consiste em dividir um problema complexo em subproblemas menores e de mais fácil solução (Cormen et al., 2001).

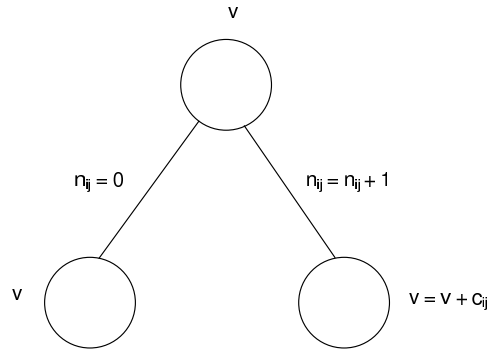


Figura 5.1: Divisão do problema original em dois subproblemas (n_{ij} é o número de linhas em ij , c_{ij} é o custo da linha ij e v é o valor atual da função objetivo).

5.4 Detalhes do Algoritmo Heurístico Construtivo Proposto

Um AHC geralmente converge em poucas iterações. Porém, para sistemas de grande porte, o AHC não apresenta soluções de boa qualidade. Já os algoritmos clássicos de otimização encontram soluções de melhor qualidade, porém a um custo computacional elevado. As metaheurísticas oferecem uma opção intermediária, uma vez que apresentam uma solução de boa qualidade, porém com complexidade matemática e de programação não tão elevados quanto os apresentados pelos algoritmos clássicos de otimização.

As principais vantagens do AHC estão na simplicidade de implementação e rápida convergência. Dessa forma, é desejável desenvolver algoritmos capazes de encontrar soluções de boa qualidade depois de revolver apenas uma pequena quantidade de PLs (Asada et al., 2005; Romero, Rider e Silva, 2007; Sousa e Asada, 2008). Um algoritmo com essas características pode ser desenvolvido fazendo-se um misto entre os dois principais métodos de abordagem desse problema. Com essa finalidade propomos o desenvolvimento de um AHC com tomada de decisão fuzzy para encontrar soluções de boa qualidade a um custo computacional baixo.

Um tomador de decisão está frequentemente diante do problema de selecionar uma alternativa dentro de um conjunto (normalmente finito) de outras alternativas satisfazendo um conjunto de critérios (objetivo) e observando (não violando) um conjunto de restrições (O'Hagan, 1993). Na aplicação ao AHC, a tomada de decisão fuzzy precisa ser feita para saber se a linha selecionada não tem um custo elevado ou que o valor de n_{ij} referente àquela linha não é pequeno, ou seja, para decidir se o problema original deve ou não se dividido em dois subproblemas.

5.4.1 Modelagem Matemática

O algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* (AHC-CTDF) é inspirado no algoritmo de Garver, porém diferentemente daquele, o AHC-CTDF não é baseado em nenhum modelo matemático específico. A grande atuação do algoritmo é no auxílio ao índice de sensibilidade com o objetivo de selecionar as melhores linhas para uma convergência rápida e de boa qualidade. Portanto, o algoritmo proposto é independente do modelo matemático adotado.

5.4.2 Detalhes do Sistema *Fuzzy* Utilizado

Para encontrar soluções de boa qualidade usando um AHC é necessário considerar a possibilidade de ocorrência dos problemas identificados por Romero et al. (2003), ou seja, precisa-se verificar se o índice de sensibilidade selecionou uma linha com custo elevado ou se se selecionou uma linha baseado em um valor de n_{ij} pequeno. Um algoritmo que consiga evitar de forma eficiente esses problemas pode aumentar a qualidade da solução dada por um AHC. Porém, pelos resultados encontrados em Asada et al. (2005), deduz-se que o conceito de linha custosa e valor n_{ij} baixo é difícil de ser definido, pois varia muito de sistema para sistema. Essa variação ocorre até no mesmo sistema quando se trata o problema com ou sem redespacho da geração.

A lógica *fuzzy* é a melhor forma de lidar com informações imprecisas e incertas como são as informações supracitadas. Por isso, neste trabalho, propomos a introdução da tomada de decisão *fuzzy* para decidir se uma linha é custosa ou se um dado valor de n_{ij} é pequeno. Além da lógica *fuzzy*, far-se-á uso da técnica dividir para conquistar no intuito de apresentar um algoritmo eficiente que visa encontrar soluções de boa qualidade a um baixo custo computacional.

Variáveis Fuzzy

O sistema *fuzzy* é baseado em três variáveis lingüísticas: *valor de n_{ij}* (N), *custo da linha $i - j$* (C) e a variável *ramificar*, que define se deve-se ou não ramificar. O conjunto de termos para *valor de n_{ij}* e *custo da linha $i - j$* é formado por Muito Pequeno (MP), Pequeno (PQ), Médio (MD), Grande (GR) e Muito Grande (MG), representadas computacionalmente por meio de um vetor com números reais cujos valores estão entre 0 e 1. Cada elemento do vetor é chamado de ponto de discretização. Neste trabalho todas as variáveis fuzzy têm 1000 pontos de discretização. A variável *ramificar* tem apenas dois termos *fuzzy*: *Ramificar* e *Não Ramificar*. As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 demonstram as variáveis *valor de n_{ij}* , *custo da linha $i - j$* e *ramificar*, respectivamente.

Abaixo é apresentado o domínio de definição, universo de discurso, de cada variável fuzzy:

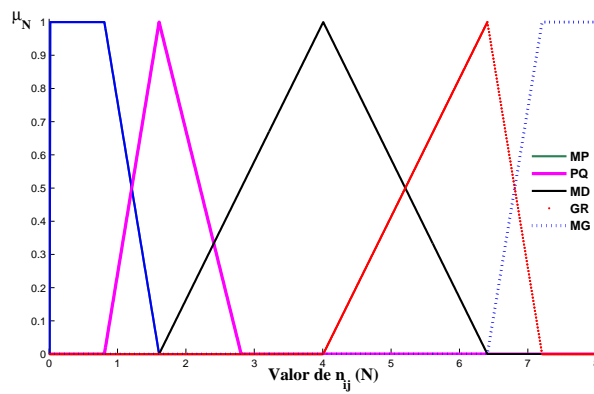


Figura 5.2: Variável *fuzzy* valor de n_{ij} .

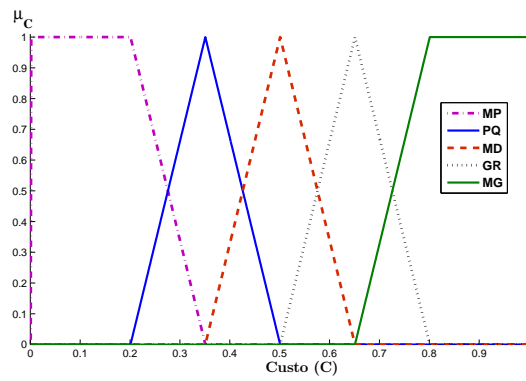


Figura 5.3: Variável *fuzzy* custo da linha $i - j$.

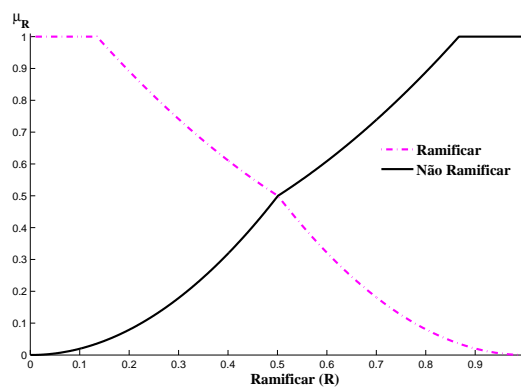


Figura 5.4: Variável *fuzzy* ramificar.

- *valor de $n_{ij} \in [0, \max\{\bar{n}\}]$* - o limite de $\max\{\bar{n}\}$ foi obtido empiricamente.
- *custo da linha $\in [0, 1]$* - os custos das linhas são normalizados com o intuito de ficarem nesse intervalo.
- *Ramificar $\in [0, 1]$* - onde 0 significa a certeza de que o problema não pode ser ramificado e 1 é a certeza de que o problema deve ser ramificado.

Regras Fuzzy

As regras *Fuzzy* são compostas de conjuntos de SE-ENTÃO, e expressam a relação lógica entre as variáveis fuzzy do sistema. O sistema utilizado é composto por 25 regras *fuzzy* que usam as combinações possíveis entre as três variáveis. No Apêndice A são listadas todas as regras *fuzzy* usadas.

Implicação

O operador de implicação usado foi o operador de Mamdani e Assilian (1975) definido pela Equação (5.2).

$$\mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (5.2)$$

Inferência

O processo de inferência *fuzzy* visa combinar as regras ativas para uma determinada entrada no intuito de criar o conjunto *fuzzy* de saída. Assim, depois de verificado entre todas as regras as que estão ativas, faz-se uma operação de agregação destas visando obter o conjunto *fuzzy* de saída. Devido ao seu baixo custo computacional, foram usados os operadores de agregação máximo e mínimo.

O operador de agregação máximo pode ser definido pela Equação (5.3).

$$agreg_j = \max(\mu_i(x_j)) \quad (5.3)$$

para $i = 1..$ número de regras *fuzzy* e $j = 1..$ número de pontos de discretização.

O operador de agregação mínimo pode ser definido pela Equação (5.4).

$$agreg_j = \min(\mu_i(x_j)) \quad (5.4)$$

para $i = 1..$ número de regras *fuzzy* e $j = 1..$ número de pontos de discretização.

Em testes, o operador de agregação mínimo não gerou subproblemas em nenhum dos sistemas testados, fazendo o método funcionar como o algoritmo de Garver (1970). Isso não ocorreu com o operador de agregação máximo.

Defuzzificação

A defuzzificação é o processo que visa transformar o conjunto fuzzy de saída resultante do processo de inferência fuzzy em valores discretos. Neste trabalho, foram feitos testes com os três métodos de defuzzificação analisados no Capítulo 4: centro de área (*MCA*), média dos máximos (*MMM*) e primeiro máximo (*MPM*). As equações (5.5), (5.6) e (5.7) definem os três métodos, respectivamente.

$$MCA = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{B'}(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^N \mu_{B'}(x_i)} \quad (5.5)$$

$$MMM = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{Maximo} \quad (5.6)$$

$$MPM = \min_x \{ \max(\mu_{B'}) \} \quad (5.7)$$

A Tabela 5.1 apresenta uma comparação entre os três métodos de defuzzificação utilizados neste trabalho. Onde PLs é o número total de PLs executados para convergência, e T é o tempo computacional em segundos. Os dados foram obtidos através da solução do sistema Sul Brasileiro com redespacho, no Capítulo 6 são dados mais detalhes desse sistema. Os três métodos de defuzzificação encontraram a solução ótima do sistema.

Tabela 5.1: Comparação da eficiência dos métodos de defuzzificação

Método	PLs	T
MPM	271	4
MCA	482	8
MMM	734	12

Como se pode ver na Tabela 5.1, o método de defuzzificação que apresentou os melhores resultados foi o método primeiro máximo (*MPM*). Esse comportamento foi similar em todos os

sistemas testados.

5.4.3 O algoritmo

O algoritmo é dividido em duas fases:

1. Fase I : São acrescentadas linhas até que o valor de $v = 0$;
2. Fase II: Nesta fase, removem-se as linhas excedentes. Assim, simula-se a remoção de uma linha, caso o valor de v continue igual a zero, significa que esta linha é desnecessária. Portanto, a linha removida pode ficar permanentemente fora da solução. Caso após a remoção de uma linha o valor de v seja diferente de zero, significa que esta linha não pode ser removida da topologia final. Portanto, deve-se readicioná-la à topologia final. Faz-se assim com todas as linhas da topologia final.

Algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy*

1. Fase I:
 - (a) Adota-se um modelo matemático (Modelo CC, Modelo de Transporte ou algum Modelo Híbrido). Inicia-se a lista de subproblemas.
 - (b) Resolve-se o PL ou PNL (de acordo com o modelo escolhido no passo (1a)). Se $v = 0$, e se a lista de subproblemas estiver vazia então pare. A solução incumbente é a melhor solução da Fase I.
 - (c) Se $v = 0$, e a lista não estiver vazia, então faz-se desta solução a incumbente caso ela seja melhor do que a incumbente atual. Seleciona-se um subproblema e volta-se para o passo (1b). Neste trabalho, a estratégia que apresentou os melhores resultados foi selecionar os subproblemas de acordo com a ordem primeiro a entrar primeiro a sair (*First In First Out* - FIFO) (Cormen et al., 2001).
 - (d) Se $v \neq 0$, calcula-se o índice de sensibilidade de acordo com a Equação (5.1) que indicará qual será a nova linha que deverá ser inserida à configuração corrente.
 - (e) Com o valor de n_{ij} e o custo da linha selecionada no passo (1d), chama-se o sistema *fuzzy*. Se $MPM < 0,5$, então acrescenta-se uma linha no caminho $i - j$ e adiciona-se a lista de subproblemas o subproblema com a restrição $n_{ij} = 0$. Se $MPM \geq 0,5$ adiciona-se uma linha ao caminho $i - j$ e volta-se para o passo (1b).
2. Fase II
 - (a) Simula-se a remoção de cada linha adicionada à topologia básica. Para tanto, ordenam-se as linhas adicionadas na ordem inversa de seus custos e simula-se a remoção de cada uma delas.

Exemplo 5.1: Sistema de 4 barras

O algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* será usado para realizar o planejamento no sistema fictício de 4 barras apresentado na Figura 5.5.

Os dados das barras encontram-se na Tabela 5.2 onde são apresentadas a geração (g) e demanda (d) de cada barra em p.u. com base de 100 MVA. Os dados das linhas (existentes e candidatas) encontram-se na Tabela 5.3, onde n_{ij}^0 é o número de linhas existentes na configuração inicial, x_{ij} é a reatância do ramo $i - j$, \bar{f}_{ij} é o fluxo máximo de potência entre $i - j$ em MW e c_{ij} é o custo de instalação do equipamento de transmissão e está em (10^3 US\$).

Tabela 5.2: Sistema 4 barras - Dados de Barras

Barra	\bar{g}	d
1	2,0	0,00
2	0,0	0,60
3	0,0	1,2
4	1,0	0,25

Assumindo que não existam limites para as adições de circuitos em cada caminho, o modelo matemático associado é representado pelo sistema (5.8).

Tabela 5.3: Sistema 4 barras - Dados de Linhas

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
1	2	0	0,33	0,35	3,00
1	3	1	0,50	0,40	2,00
1	4	0	0,50	0,60	2,00
2	3	0	0,50	0,40	2,00
2	4	0	0,50	0,35	3,00
3	4	0	0,33	0,40	2,00

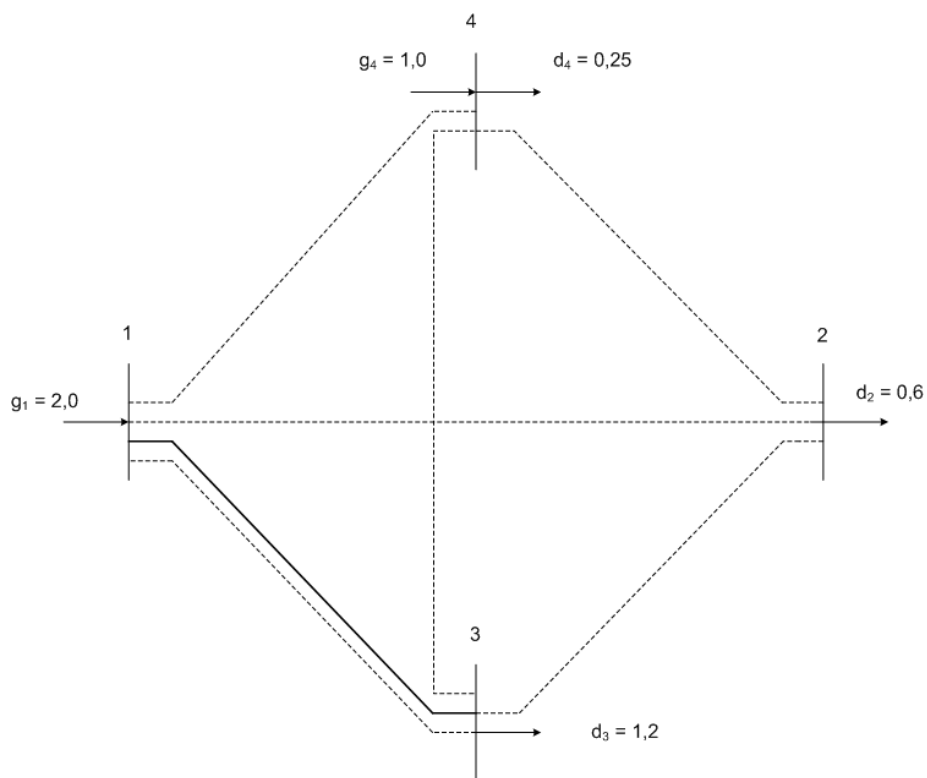


Figura 5.5: Sistema de 4 barras - Rede Inicial.

$$\min v = 3n_{12} + 2n_{13} + 2n_{14} + 2n_{23} + 3n_{24} + 2n_{34} \quad (5.8)$$

sujeito a

$$-f'_{12} - f'_{13} - f'_{14} - f'_{13} + g_1 = 0$$

$$f'_{12} - f'_{23} - f'_{24} = 0,60$$

$$f'_{13} + f'_{23} - f'_{34} + f'_{13} = 1,2$$

$$f'_{14} + f'_{24} + f'_{34} + g_4 = 0,25$$

$$f'_{13} = 2(\theta_1 - \theta_3)$$

$$|f'_{13}| \leq 0,40$$

$$|f'_{12}| \leq 0,35n_{12}$$

$$|f'_{13}| \leq 0,40n_{13}$$

$$|f'_{14}| \leq 0,60n_{14}$$

$$|f'_{23}| \leq 0,40n_{23}$$

$$|f'_{24}| \leq 0,35n_{24}$$

$$|f'_{34}| \leq 0,40n_{34}$$

$$0 \leq g_1 \leq 2,00$$

$$0 \leq g_4 \leq 1,00$$

Primeira iteração

Passo 0: Neste passo são feitas as devidas inicializações do sistema:

- O custo de cada linha deve estar no intervalo $[0,1]$. Para isso, neste trabalho, divide-se o custo de cada linha pelo custo da linha mais custosa. Sendo,

$$c_{12} = 3,0, c_{13} = 2,0, c_{14} = 2,0, c_{23} = 2,0, c_{24} = 3,0, c_{34} = 2,0,$$

após a divisão, tem-se:

$$c_{12} = 1,0, c_{13} = 0,67, c_{14} = 0,67, c_{23} = 0,67, c_{24} = 1,0, c_{34} = 0,67.$$

- Construir a variável *fuzzy valor de* n_{ij} . O universo de discurso dessa variáveis pode ser o intervalo $[0,8]$.
- Construir a variável *fuzzy custo da linha* $i - j$. O universo de discurso dessa variável é o intervalo $[0,1]$.
- Construir a variável *fuzzy ramificar*. O universo de discurso dessa variável é o intervalo $[0,1]$.

Passo 1: A configuração base com $n_{13} = 1$ e $n_{12} = n_{14} = n_{23} = n_{24} = n_{34} = 0$ permite montar o sistema (5.8) e representa a configuração corrente.

Passo 2: Ao resolver o PL equivalente ao sistema (5.8), tem-se: $n_{12} = 1,14$, $n_{13} = 0,00$, $n_{14} = 0,50$, $n_{23} = 0,40$, $n_{24} = 0,00$, $n_{34} = 0,20$ e $v = 4,42$. Como $v > 0$, seleciona-se, através do índice de sensibilidade, uma nova linha a ser inserida. Para o caso, $IS = 1$, ou seja, o índice de sensibilidade está informando que se deve inserir uma linha no caminho 1 – 2. Para saber se essa escolha não foi baseada em um valor pequeno de n_{12} , ou se o custo c_{12} não é elevado, chama-se o sistema *fuzzy* passando como parâmetro $n_{12} = 1,14$ e $c_{12} = 1,0$.

Passo 3: Para os dados passados, $MDM = 0,80$. Portanto, como $MDM \geq 0,5$, o problema precisa ser dividido em dois, ou seja, deve-se inserir uma nova linha no ramo 1 – 2 e adicionar o subproblema com a restrição $n_{12} = 0$ na lista de subproblemas. A decisão por dividir o problema em dois era esperada, uma vez que, embora $n_{12} = 1,14$ seja a variável com maior valor dado pela solução do PL, o custo dessa linha é muito elevado em comparação ao custo das demais linhas.

Segunda iteração

Após a primeira iteração, a configuração corrente pode ser representada pela Figura 5.6.

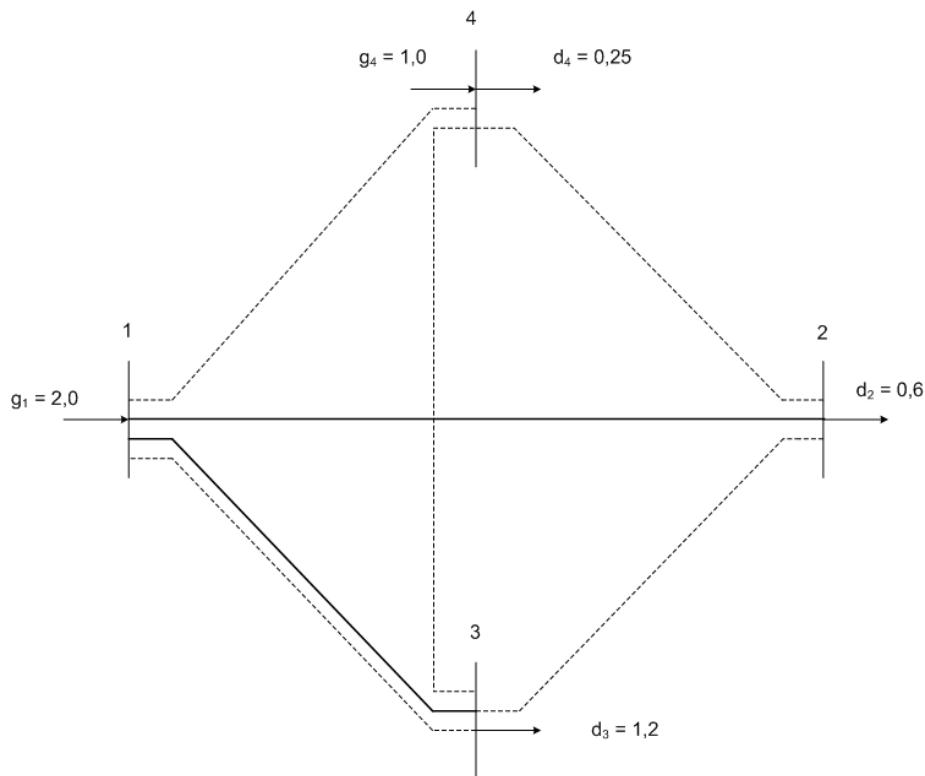


Figura 5.6: Sistema de 4 barras - Após a adição da linha 1 – 2.

Com a adição de um circuito em 1 – 2, a modelagem matemática passa a ser como segue:

$$\begin{aligned}
 \min v = & 3n_{12} + 2n_{13} + 2n_{14} + 2n_{23} + 3n_{24} + 2n_{34} & (5.9) \\
 \text{sujeito a} & \\
 & -f'_{12} - f'_{13} - f'_{14} - f''_{12} - f''_{13} + g_1 = 0 \\
 & f'_{12} - f'_{23} - f'_{24} + f''_{12} = 0,60 \\
 & f'_{13} + f'_{23} - f'_{34} + f''_{13} = 1,2 \\
 & f'_{14} + f'_{24} + f'_{34} + g_4 = 0,25 \\
 & f''_{12} = 3(\theta_1 - \theta_2) \\
 & f''_{13} = 2(\theta_1 - \theta_3) \\
 & |f''_{12}| \leq 0,35 \\
 & |f''_{13}| \leq 0,40 \\
 & |f'_{12}| \leq 0,35n_{12} \\
 & |f'_{13}| \leq 0,40n_{13} \\
 & |f'_{14}| \leq 0,60n_{14} \\
 & |f'_{23}| \leq 0,40n_{23} \\
 & |f'_{24}| \leq 0,35n_{24} \\
 & |f'_{34}| \leq 0,40n_{34} \\
 & 0 \leq g_1 \leq 2,00 \\
 & 0 \leq g_4 \leq 1,00
 \end{aligned}$$

Passo 2: Ao resolver o PL equivalente ao sistema (5.9), tem-se: $n_{12} = 0,14$, $n_{13} = 0,00$, $n_{14} = 0,05$, $n_{23} = 0,50$, $n_{24} = 0,00$, $n_{34} = 0,20$ e $v = 1,43$. Como $v > 0$, seleciona-se, através índice de sensibilidade, uma nova linha a ser inserida. Para o caso, $IS = 3$, ou seja, o índice de sensibilidade está informando que se deve inserir uma linha no caminho 2 – 3. Para saber se essa escolha não foi baseada em um valor pequeno de n_{23} , ou se o custo c_{23} não é elevado, chama-se o sistema *fuzzy* passando como parâmetro $n_{23} = 0,50$ e $c_{23} = 0,67$.

Passo 3: Para os dados passados, $MDM = 0,70$. Portanto, como $MDM \geq 0,5$, o problema precisa ser dividido em dois, ou seja, deve-se inserir uma nova linha no ramo 2 – 3 e adicionar o subproblema com a restrição $n_{23} = 0$ na lista de subproblemas. A decisão por dividir o problema em dois era esperada, uma vez que $n_{23} = 0,5$ é um valor bastante baixo e, portanto, não é confiável adicionar uma linha baseado somente no índice de sensibilidade. Agora, existem dois

subproblemas na lista de subproblemas.

Terceira iteração

Após a segunda iteração, a configuração corrente pode ser representada pela Figura 5.7.

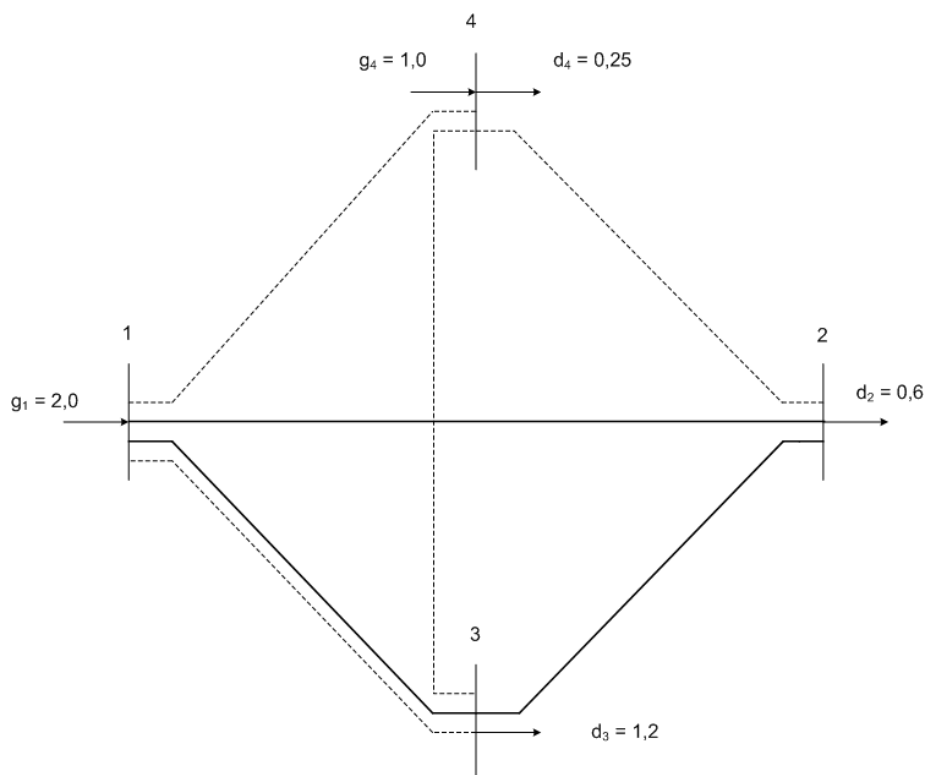


Figura 5.7: Sistema de 4 barras - Após a adição da linha 2 – 3.

Com a adição de um circuito em 2 – 3, a modelagem matemática passa a ser como segue:

$$\min v = 3n_{12} + 2n_{13} + 2n_{14} + 2n_{23} + 3n_{24} + 2n_{34} \quad (5.10)$$

sujeito a

$$-f'_{12} - f'_{13} - f'_{14} - f''_{12} - f''_{13} + g_1 = 0$$

$$f'_{12} - f'_{23} - f'_{24} + f''_{12} - f''_{23} = 0,60$$

$$f'_{13} + f'_{23} - f'_{34} + f''_{13} + f''_{23} = 1,2$$

$$f'_{14} + f'_{24} + f'_{34} + g_4 = 0,25$$

$$f''_{12} = 3(\theta_1 - \theta_2)$$

$$f''_{13} = 2(\theta_1 - \theta_3)$$

$$f''_{23} = 2(\theta_2 - \theta_3)$$

$$|f''_{12}| \leq 0,35$$

$$|f''_{13}| \leq 0,40$$

$$|f''_{23}| \leq 0,40$$

$$|f'_{12}| \leq 0,35n_{12}$$

$$|f'_{13}| \leq 0,40n_{13}$$

$$|f'_{14}| \leq 0,60n_{14}$$

$$|f'_{23}| \leq 0,40n_{23}$$

$$|f'_{24}| \leq 0,35n_{24}$$

$$|f'_{34}| \leq 0,40n_{34}$$

$$0 \leq g_1 \leq 2,00$$

$$0 \leq g_4 \leq 1,00$$

Passo 2: Ao resolver o PL equivalente ao sistema (5.10), tem-se: $n_{12} = 0,67$, $n_{13} = 0,00$, $n_{14} = 0,00$, $n_{23} = 0,23$, $n_{24} = 0,00$, $n_{34} = 0,00$ e $v = 2,00$. Como $v > 0$, seleciona-se, através índice de sensibilidade, uma nova linha a ser inserida. Para o caso, $IS = 1$, ou seja, o índice de sensibilidade está informando que se deve inserir uma linha no caminho 1 – 2. Para saber se essa escolha não foi baseada em um valor pequeno de n_{12} , ou se o custo c_{12} não é elevado, chama-se o sistema *fuzzy* passando como parâmetro $n_{12} = 0,67$ e $c_{12} = 1,0$.

Passo 3: Para os dados passados, $MDM = 0,60$. Portanto, como $MDM \geq 0,5$, o problema precisa ser dividido em dois, ou seja, deve-se inserir uma nova linha no ramo 1 – 2 e adicionar o subproblema com a restrição $n_{12} = 0$ na lista de subproblemas. Agora, existem três subproblemas na lista de subproblemas.

Quarta iteração

Após a Terceira Iteração, a configuração corrente pode ser representada pela Figura 5.8.

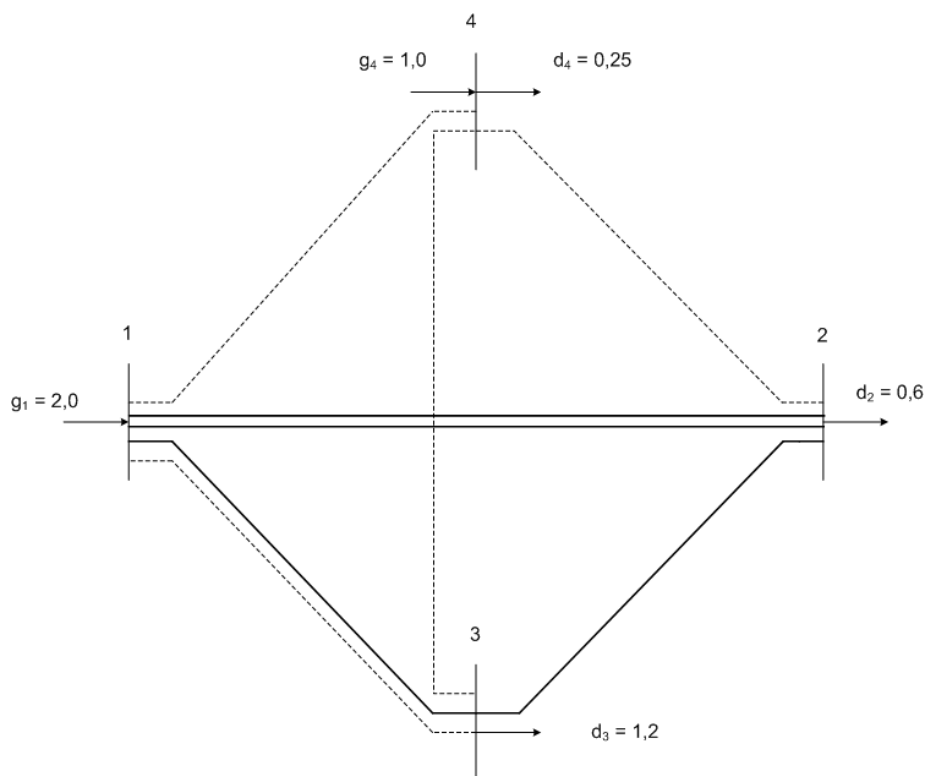


Figura 5.8: Sistema de 4 barras - Após a Terceira Iteração.

Com a adição de mais um circuito em 1 – 2, a modelagem matemática passa a ser como segue:

$$\min v = 3n_{12} + 2n_{13} + 2n_{14} + 2n_{23} + 3n_{24} + 2n_{34} \quad (5.11)$$

sujeito a

$$-f'_{12} - f'_{13} - f'_{14} - f^o_{12} - f^o_{13} + g_1 = 0$$

$$f'_{12} - f'_{23} - f'_{24} + f^o_{12} - f^o_{23} = 0,60$$

$$f'_{13} + f'_{23} - f'_{34} + f^o_{13} + f^o_{23} = 1,2$$

$$f'_{14} + f'_{24} + f'_{34} - f^o_{14} + g_4 = 0,25$$

$$f^o_{12} = 6(\theta_1 - \theta_2)$$

$$f^o_{13} = 2(\theta_1 - \theta_3)$$

$$f^o_{23} = 2(\theta_2 - \theta_3)$$

$$|f^o_{12}| \leq 0,70$$

$$|f^o_{13}| \leq 0,40$$

$$|f^o_{23}| \leq 0,40$$

$$|f'_{12}| \leq 0,35n_{12}$$

$$|f'_{13}| \leq 0,40n_{13}$$

$$|f'_{14}| \leq 0,60n_{14}$$

$$|f'_{23}| \leq 0,40n_{23}$$

$$|f'_{24}| \leq 0,35n_{24}$$

$$|f'_{34}| \leq 0,40n_{34}$$

$$0 \leq g_1 \leq 2,00$$

$$0 \leq g_4 \leq 1,00$$

Passo 2: Ao resolver o PL equivalente ao sistema (5.11), tem-se: $n_{12} = 0,00$, $n_{13} = 0,00$, $n_{14} = 0,00$, $n_{23} = 0,00$, $n_{24} = 0,00$, $n_{34} = 0,00$ e $v = 0,00$. Como $v = 0$ e a lista de subproblemas não está vazia, então seleciona-se um novo subproblema e faz-se dessa solução a solução incumbente. É importante observar que $v = 0$ representa um plano de investimento viável, segundo o modelo híbrido, porém não necessariamente ótimo. Uma vez que a otimalidade não é garantida, deve-se verificar se alguma das outras possibilidades surgidas durante a solução desse plano de investimento apresenta solução melhor que a atual.

Após a verificação dos subproblemas gerados, veja a Figura 5.9, encontra-se a solução ótima de investimento para o sistema de 4 barras após resolver 19 problemas lineares.

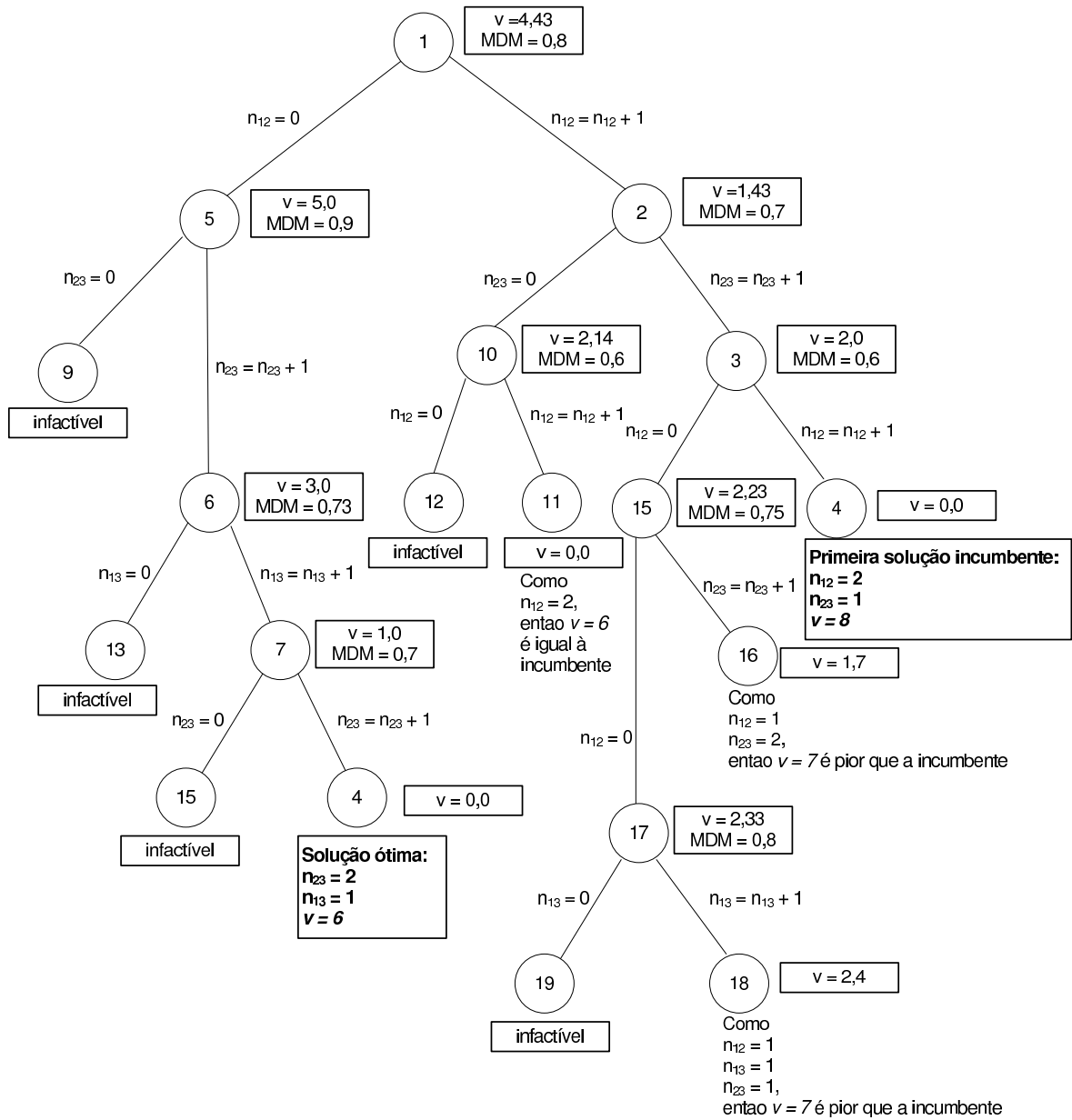


Figura 5.9: Árvore gerada durante a solução do sistema de 4 barras.

A solução é dada pela seguinte proposta de investimento:

$$n_{13} = 1, n_{23} = 2; \text{ e investimento } v = 6.$$

A Figura 5.10 representa a configuração ótima do sistema de 4 barras.

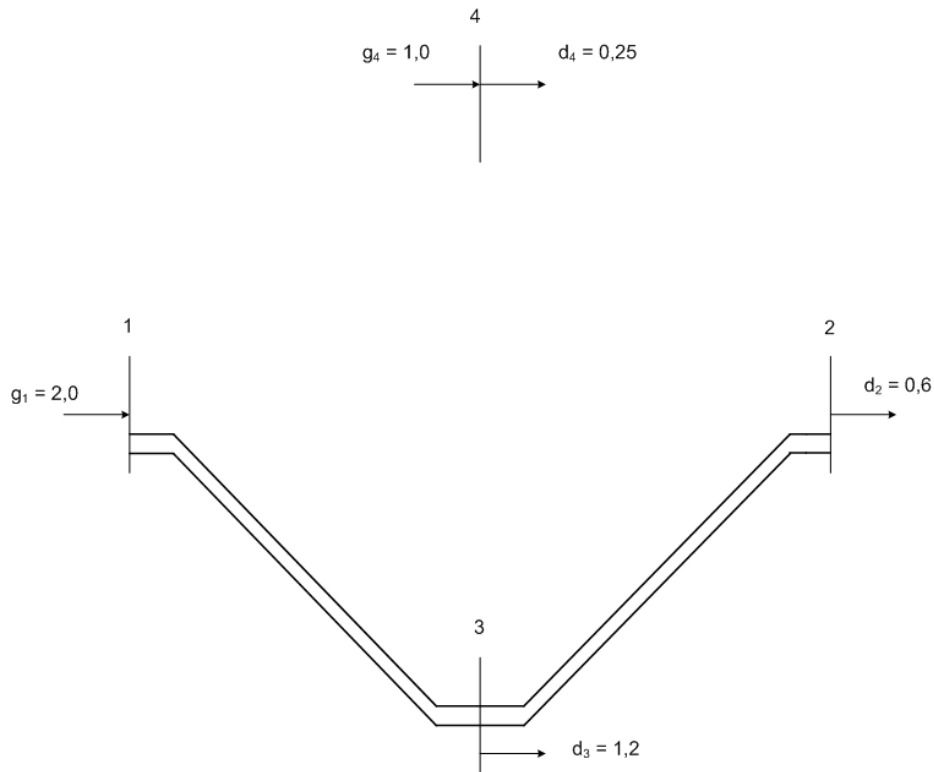


Figura 5.10: Sistema de 4 barras - Configuração ótima do sistema de 4 barras.

5.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os detalhes do algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy*, destacando-se os parâmetros e métodos dos conjuntos *fuzzy* utilizados no algoritmo proposto. Para melhor entendimento da metodologia, foi feito um teste com um sistema fictício de 4 barras apresentando passo-a-passo a execução do algoritmo.

Capítulo 6

Testes e Resultados - AHC-CTDF

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos testes realizados com os sistemas testes brasileiros usando o algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy*.

6.1 Introdução

O algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy*, descrito no Capítulo 5, foi implementado em Fortran 77. Para solução dos problemas de programação linear usou-se o pacote MINOS (Murtagh e Saunders, 1987). Os testes foram executados em um computador com processador Intel(R) Pentium (R) M 2,00 GHz, 1 Gigabyte de memória RAM.

Para verificar a eficiência do método, foram realizados testes usando o sistema de 6 barras de Garver (1970) e em dois sistemas brasileiros reais: (1) o sistema Sul Brasileiro reduzido com 46 barras, 79 linhas e demanda de 6.880 MW (Romero et al., 2003); (2) sistema Norte-Nordeste Brasileiro com 87 barras, 183 linhas e demanda de 20.316 MW (considerando apenas o estágio P1). Usou-se um modelo híbrido (Villasana et al., 1985), descrito na Seção 2.2.2, cujos resultados são factíveis para o modelo cc.

Para os sistemas de Garver e Sul Brasileiro, existem duas situações que podem ser analisadas:

1. Problema com redespacho - existe folga na geração e, assim, os geradores podem ser ajustados da melhor forma possível, dentro dos limites especificados.
2. Problema sem redespacho - não existe folga na geração e os limites máximos são tais que possibilitam atender à demanda de forma mais eqüitativa.

6.2 Metodologia Para Verificação da Eficiência Computacional

O algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* é uma metodologia construtiva que implementa a técnica dividir para conquistar. Portanto, o problema original pode ser dividido em diversos subproblemas, assim como o algoritmo *branch-and-bound*. Portanto, a eficiência do método é dependente do número de subproblemas gerados. A decisão sobre dividir ou não o problema atual em dois subproblemas é de grande importância para a eficiência do método, uma vez que ao se gerar muitos subproblemas o tempo computacional para verificar cada um pode ser muito alto.

A construção das funções de pertinência e das regras *fuzzy* eficientes é de fundamental importância para que a decisão seja acertada, ou seja, para que se gere novos subproblemas somente quando realmente for necessário.

6.3 Sistema Proposto por Garver

O sistema apresentado por Garver (1970) é uma rede de transmissão de 6 barras e 15 linhas. Esse sistema tem sido usado para fins de testes e comparação dos algoritmos. A Figura 6.1 apresenta a configuração inicial do sistema de Garver.

6.3.1 Garver Com Redespacho

A solução ótima desse sistema é de 110 (US\$). O AHC com tomada de decisão *fuzzy* encontrou a solução ótima em 5 iterações e com a inserção das seguintes linhas:

$$n_{2-6} = 1, n_{3-5} = 1, n_{4-6} = 2.$$

6.3.2 Garver Sem Redespacho

A solução ótima desse sistema é de 200 (US\$). O AHC com tomada de decisão *fuzzy* encontrou a solução ótima em 8 iterações e com a inserção das seguintes linhas:

$$n_{2-6} = 4, n_{3-5} = 1, n_{4-6} = 2.$$

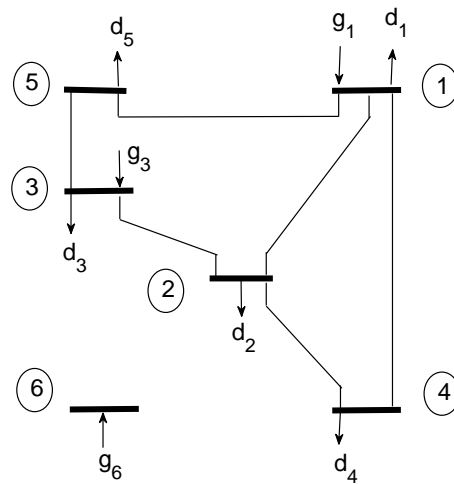


Figura 6.1: Sistema Garver - Configuração Inicial.

6.4 Sistema Sul Brasileiro

Foram realizados testes com redespacho e sem redespacho para o sistema sul Brasileiro. Em ambas situações não foi necessário remover nenhuma linha na Fase II. A Figura 6.2 apresenta a configuração inicial do sistema Sul Brasileiro.

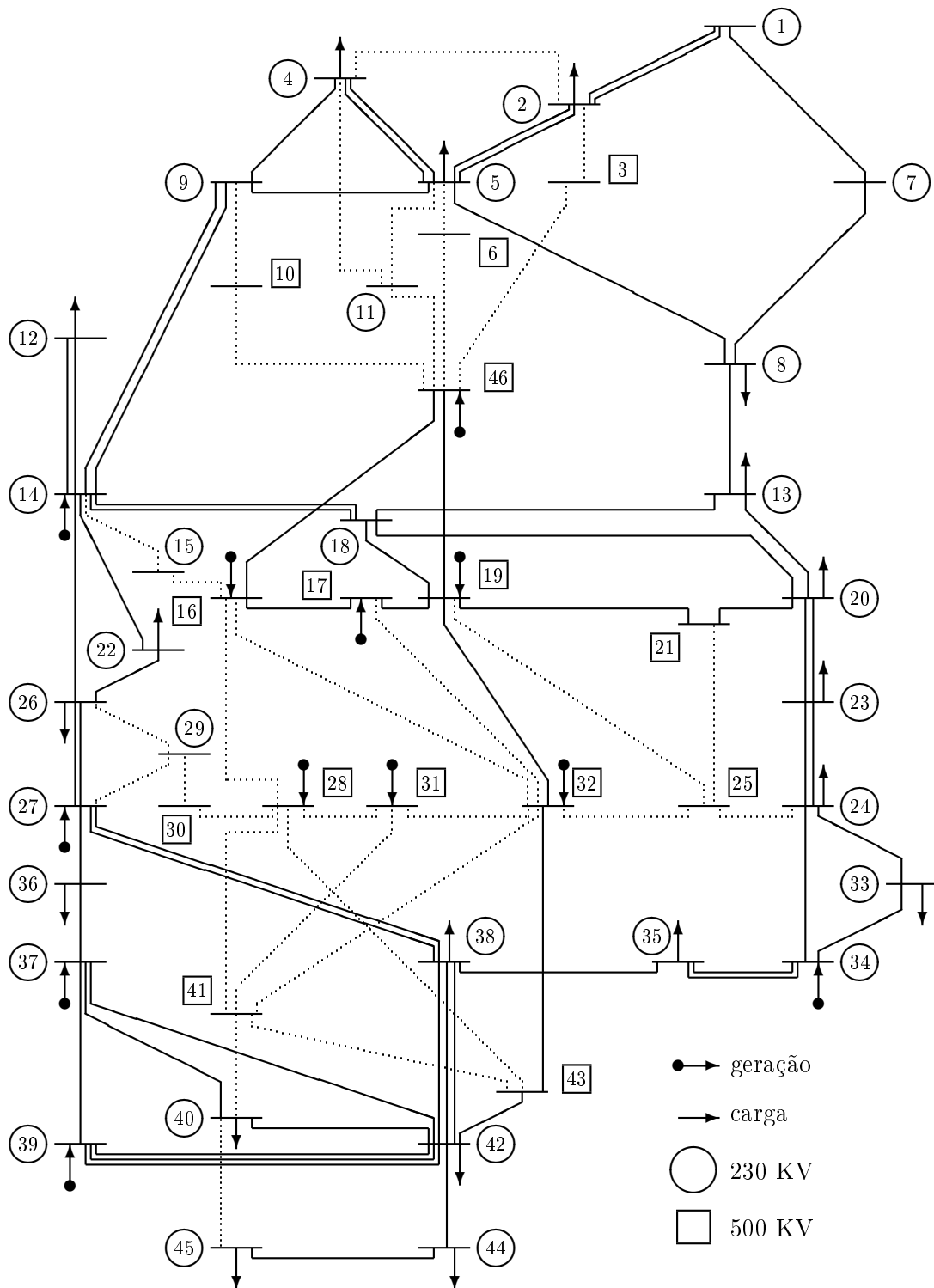


Figura 6.2: Sistema Sul Brasileiro - Rede Inicial.

6.4.1 Sul Brasileiro Com Redespacho

A solução ótima desse problema foi encontrada através da decomposição de Benders após executar milhares de PLs (Romero e Monticelli, 1994). O AHC com tomada de decisão *fuzzy* encontrou uma solução factível em 8 iterações. A solução ótima do modelo cc, com $v = 70.289.000$ (US\$), foi encontrada em 222 iterações e com a seguinte topologia:

$$n_{13-20} = 1, n_{20-23} = 1, n_{20-21} = 2, n_{42-43} = 1, n_{46-06} = 1, n_{05-06} = 2.$$

6.4.2 Sul Brasileiro Sem Redespacho

A solução ótima desse problema é $v = 154.420.000$ (US\$) encontrada através da decomposição de Benders após executar milhares de PLs (Romero e Monticelli, 1994). O AHC com tomada de decisão *fuzzy* encontrou uma solução factível com $v = 166.041.000$ (US\$) em 13 iterações. A solução ótima foi encontrada em 322 iterações com o valor de $v = 154.420.000$ (US\$), e com a seguinte topologia:

$$n_{20-21} = 1, n_{42-43} = 2, n_{46-06} = 1, n_{19-25} = 1, n_{31-32} = 1, n_{28-30} = 1, n_{26-29} = 3, n_{24-25} = 2, \\ n_{29-30} = 2, n_{05-06} = 2.$$

6.5 Sistema Norte-Nordeste Brasileiro

Este sistema permite o planejamento multiestágio em dois estágios, porém somente sem redespacho. Este sistema é de grande complexidade e sua solução ótima ainda é desconhecida (Romero et al., 2003). A melhor solução encontrada até este trabalho para o modelo cc sugere um investimento de $v = 1.360.961.000$ (US\$) encontrado através de metaheurísticas depois de serem resolvidos 330.000 PLs (Escobar et al., 2004). A Figura 6.3 representa a configuração inicial deste sistema.

O AHC com tomada de decisão *fuzzy* encontrou um plano de expansão para o estágio P1 com valor de $v = 1.482.842.000$ (US\$) após resolver 30.545 PLs.

Na Fase II, as linhas n_{69-87} e n_{27-53} foram removidas. O valor final de investimento ficou em $v = 1.455.856.000$ (US\$), com a seguinte topologia:

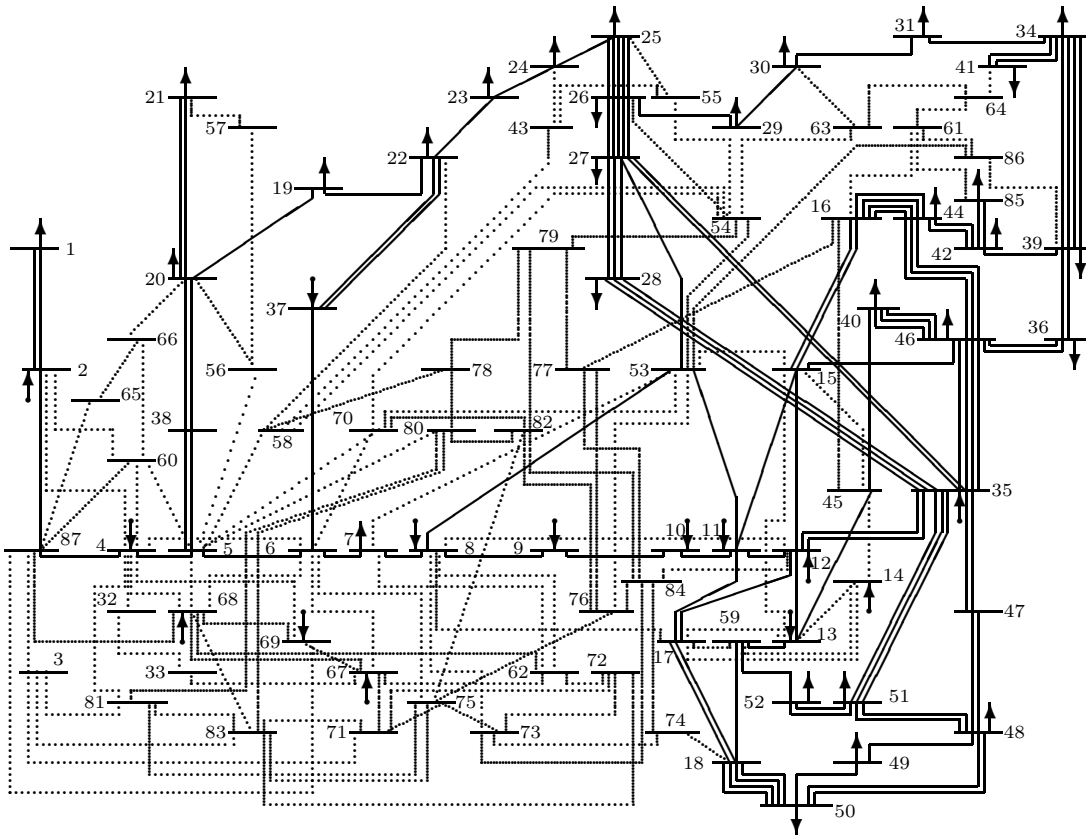


Figura 6.3: Sistema Norte-Nordeste Brasileiro - Configuração Inicial.

$$\begin{aligned}
 n_{02-87} &= 2, n_{03-71} = 1, n_{03-87} = 2, n_{04-05} = 1, n_{04-69} = 1, n_{05-58} = 2, n_{05-68} = 1, n_{13-15} = 3, \\
 n_{14-59} &= 1, n_{15-16} = 2, n_{15-46} = 1, n_{16-44} = 3, n_{16-61} = 1, n_{18-50} = 6, n_{18-74} = 3, n_{20-21} = 2, \\
 n_{20-38} &= 1, n_{22-23} = 1, n_{22-58} = 2, n_{23-24} = 1, n_{25-55} = 2, n_{26-54} = 1, n_{30-31} = 1, n_{30-63} = 2, \\
 n_{36-46} &= 2, n_{40-45} = 1, n_{41-64} = 2, n_{43-55} = 1, n_{43-58} = 1, n_{48-49} = 1, n_{49-50} = 2, n_{52-59} = 1, \\
 n_{53-54} &= 1, n_{54-63} = 1, n_{61-64} = 1, n_{61-85} = 2, n_{67-71} = 2, n_{71-72} = 1, n_{72-73} = 1, n_{73-74} = 1.
 \end{aligned}$$

A Tabela 6.1 resume todos os resultados dos testes realizados. Para todos os valores está se considerando a execução total, ou seja, da Fase I e Fase II.

Os sistemas G1,G2, S1, S2 e N-N referem-se aos sistemas, Garver com redespacho, Garver sem redespacho, Brasileiros Sul com redespacho, Sul sem redespacho e Norte-Nordeste, respectivamente. A coluna v (10^3 US\$) refere-se ao valor final do investimento necessário para esse horizonte de planejamento. A coluna PL refere-se ao número total de PLs executados até a convergência final do algoritmo. A coluna Tempo (s) refere-se ao tempo de processamento em segundos. O tempo computacional de execução para ambos os casos do sistema de Garver foi menor que 1 segundo.

Tabela 6.1: Resumo dos resultados, número de PLs e tempo computacional.

Sistema	v (10^3 US\$)	PLs	Tempo (s)
G1	110	8	-
G2	200	11	-
S1	70.289	271	4
S2	154.420	461	5
N-N	1.455.856	31.350	1.725

Os dados elétricos dos sistemas testados são detalhados no Apêndice B e nas referências (Romero e Monticelli, 1994; Romero et al., 2002; Romero e Monticelli, 1994).

6.6 Análise dos Resultados

A Tabela 6.2 compara os resultados obtidos pela metodologia proposta (AHC-CTDF) com a metodologia de Haffner (2000). Em ambas metodologias, o sistema foi modelado com o modelo híbrido. A metodologia de Haffner (2000) encontrou a solução ótima do modelo híbrido, que não é igual à solução ótima do modelo cc. O AHC-CTDF encontrou a mesma solução do modelo cc. O tempo computacional e o número de iterações da metodologia proposta neste trabalho é bem menor que o tempo da metodologia usada em Haffner (2000).

Tabela 6.2: Comparação entre a metodologia proposta e a de Haffner.

Sistema	AHC-CTDF			Haffner		
	$v(10^3)US\$$	PLs	Tempo	$v(10^3)US\$$	PLs	Tempo
G1	110	8	-	110	59	-
G2	200	11	-	200	125	-
S1	70.289	271	4	63.163	8.419	41
S2	154.420	461	5	141.350	1.850.355	209.463

A Tabela 6.3 compara os resultados obtidos pela metodologia proposta (AHC-CTDF) com a metodologia de Rider (2006). Rider (2006) resolve o problema de planejamento da expansão usando modelo CC, que é um modelo não-linear como já mencionado neste trabalho. O tempo computacional não foi fornecido por Rider (2006) em seu trabalho. Como se pode observar, o algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* encontra a mesma solução do modelo CC, modelo não-linear, mesmo usando o modelo híbrido linear.

O algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* encontrou a solução ótima do sistema de médio porte Sul Brasileiro após resolver poucos PLs. Para o sistema de grande porte Norte-Nordeste Brasileiro, a solução ótima não foi encontrada. Esse resultado já era esperado

Tabela 6.3: Comparação entre a metodologia proposta e a de Rider.

Sistema	AHC-CTDF			Rider		
	$v(10^3)US\$$	PLs	Tempo	$v(10^3)US\$$	PLs	Tempo
G1	110	8	-	110	25	*
G2	200	11	-	200	19	*
S1	70.289	271	4	70.289	379	*
S2	154.420	461	5	154.420	8.081	*

uma vez que o objetivo do algoritmo, para sistemas de grande porte, é encontrar uma solução de boa qualidade em poucas iterações para que esta solução possa ser usada como solução inicial de uma metaheurística ou como a solução incumbente inicial do método *branch-and-bound*.

Capítulo 7

Busca Tabu

Este capítulo faz uma breve introdução das principais características da metaheurística busca tabu e detalha sua aplicação para o problema de planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica bem como sua junção com o AHC-CTDF.

7.1 Introdução

A busca tabu é uma estratégia para resolver problemas complexos originalmente concebida para resolver problemas de otimização combinatória. É um método flexível com a habilidade de fazer uso de outros métodos, tais com algoritmos de programação linear e heurísticas especializadas com o objetivo de evitar as limitações de ótimos locais (Glover, 1989).

A busca tabu está fundamentada nos conceitos de movimento, vizinhança e memória. Dada uma configuração, um movimento pode ser considerado como sendo um passo que leva para uma nova configuração. A vizinhança de uma configuração é formada pelo conjunto de configurações que podem ser encontradas através de um movimento. O uso da memória é de grande importância para a busca tabu. A busca tabu mantém registrado um histórico das regiões visitadas durante execução do método.

O que segue visa fazer apenas uma introdução básica à busca tabu. Mais detalhes sobre esta metaheurística podem ser encontrados nas referências (Glover, 1989; Glover, 1990; Glover e Kochenberger, 2003).

7.2 Conceitos Básicos

As estruturas de memória são usadas para direcionar a busca. Podemos classificar as estruturas de memórias da busca tabu em quatro: memória de curta duração, memória de frequência, memória de qualidade e memória de influência.

- a) A memória de curta duração (memória recente) tem por objetivo evitar ciclos mantendo registrado, por um determinado tempo, os atributos encontrados pelo algoritmo em um tempo recente. Enquanto um determinado atributo estiver na memória recente estes são proibidos de serem modificados. Um conceito importante ligado à memória de curto prazo é o conceito de critério de aspiração. O critério de aspiração visa evitar que atributos muito atraentes sejam descartados por no momento serem tabu (Reeves, 1993). Assim, mesmo que um atributo seja considerado tabu esteja na memória de curta duração, ele pode ser visitado desde que satisfaça um critério de aspiração.
- b) A memória baseada na frequência faz parte dos mecanismos considerados memória de longa duração. A memória baseada na frequência auxilia o algoritmo a decidir visitar ou evitar determinados atributos. Por exemplo, se ao longo da execução, pode-se perceber que sempre que um atributo é encontrado o algoritmo estaciona em um ótimo local, então este atributo deve ser evitado.
- c) A memória baseada na qualidade é utilizada para incentivar o algoritmo a selecionar determinados atributos que têm características consideradas atrativas. Por exemplo, no problema de planejamento da expansão da transmissão, linha de baixo custo e susceptância alta podem ser consideradas linhas de boa qualidade.
- d) A memória baseada na influência leva em conta o impacto que determinado atributo tem em determinada configuração. No problema de planejamento da expansão, linhas que, uma vez removidas, causam um elevado corte de carga, são consideradas linhas de grande impacto. Já linhas que, ao serem removidas, causam um corte de carga pequeno ou um corte de carga nulo são consideradas linhas de grande impacto para a configuração.

Problemas de fácil solução podem ser resolvidos através de uma busca tabu que utiliza apenas os conceitos supracitados. Porém problemas muito complexos, como é o caso do planejamento da expansão da transmissão, os conceitos de intensificação, diversificação e *path relinking* devem ser levados em consideração.

7.2.1 Intensificação

Configurações encontradas durante a pesquisa são armazenadas e sua vizinhança é explorada de forma mais sistemática. As soluções ótimas locais próximas àquela configuração são encontradas durante a fase de intensificação (Lee e El-Sharkawi, 2003; Glover, 1990). A intensificação pode fazer uso da memória de frequência, dando prioridade a atributos que frequentemente têm feito parte de configurações de boa qualidade, e evitando os atributos que frequentemente têm feito parte de configurações de má qualidade; da memória baseada na qualidade, para encontrar um ótimo local de boa qualidade; e da memória baseada na influência para encontrar um ótimo local mais rapidamente.

7.2.2 Diversificação

O objetivo da diversificação é impedir a convergência prematura do algoritmo, forçando-o visitar regiões desconhecidas até o momento, e evitar que a busca entre em ciclo. A diversificação pode fazer uso da memória baseada na frequência, para auxiliá-la na busca de atributos ou que ainda não foram encontrados ou que tenham sido encontrados com baixa frequência. As memórias baseadas na qualidade e na influência podem ser consideradas uma vez que os atributos que não estão contidos nelas poderão levar a regiões bastante diferentes das já visitadas.

7.2.3 Oscilação Estratégica

A oscilação estratégica opera orientando movimentos em relação a um nível crítico, identificado por um intervalo escolhido dos valores funcionais (Glover e Laguna, 1997). Tal nível crítico ou fronteira de oscilação frequentemente representa um ponto onde o método deveria normalmente parar. Em vez de parar quando a fronteira é alcançada, as regras de selecionar movimentos são modificadas para permitir que a região definida pelo nível crítico possa ser ultrapassada.

Lee e El-Sharkawi (2003) afirmam que a oscilação estratégica é baseada em três técnicas diferentes que são usadas alternadamente:

1. Uma estratégia para regiões infactíveis cujo objetivo é alcançar as fronteiras de uma região factível e entrar na região factível;
2. Um estratégia para procurar, na região factível, por um ótimo local;
3. Uma estratégia para deixar a região factível e entrar em regiões infactíveis.

Neste trabalho, a oscilação estratégica foi feita como no item 3. Assim, foram estabelecidas tolerâncias em relação à região factível. Uma região é considerada factível quando o corte de carga (quantidade de demanda que não está sendo suprida) é zero, o que significa que todas as demandas estão sendo completamente supridas. Logo, uma região infactível é aquela em que há uma ou mais demandas que não estão sendo completamente supridas. Portanto, permitiu-se que a busca saísse da região factível, porém considerando uma certa tolerância. A tolerância está relacionada ao corte de carga considerado aceitável.

7.2.4 *Path Relinking*

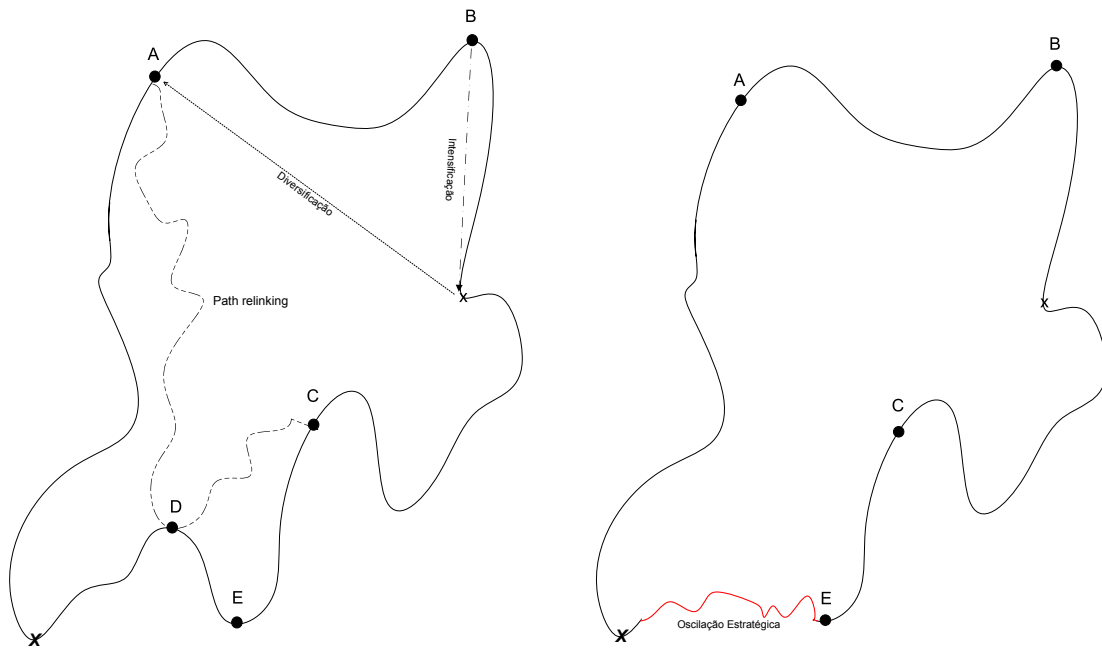
No *path relinking* duas ou mais configurações são usadas para gerar uma nova configuração. As configurações usadas no *path relinking* são chamadas de soluções referência. As soluções referência são chamadas de soluções iniciais ou soluções guia (Lee e El-Sharkawi, 2003). O *path relinking* pode ser usado tanto para intensificação como diversificação. O *path relinking* pode fazer uso de todas as estruturas de memória: baseada no tempo, para diversificar; baseada na frequência, tanto para diversificar como para intensificar; baseada na qualidade e na influência para intensificar.

A Figura 7.1(a) sintetiza a ideia de intensificação, diversificação e *path relinking*. Como visto na Figura 7.1(a), o *path relinking* pode realizar a função de intensificação e diversificação ao mesmo tempo.

Partindo do ponto D, da figura 7.1(a), há grande chance da busca ir para o ponto E. O ponto E pode ser uma região muito difícil de se sair, pois este ponto é um vale profundo. Em outras palavras, o ponto E é o ótimo local da vizinhança de D pela direita e de C pela esquerda. A Figura 7.1(b) representa como a oscilação estratégica poderia tirar a busca de regiões como esta.

7.3 Aplicação da Busca Tabu ao Planejamento da Expansão da Transmissão

Em 1997, Wen e Chang publicaram o primeiro artigo que propunha o uso da busca tabu para solução do planejamento da expansão da transmissão (Wen e Chang, 1997). Após o trabalho de Wen e Chang, surgiram outros excelentes artigos (Gallego et al., 1997; Gallego et al., 2000; Mori e Sone, 2001; Da Silva et al., 2001; Sadegheih e Drake, 2008). Em nossa abordagem, a lista de regiões factíveis gerada pelo AHC-CTDF é utilizada para a implementação da intensificação, diversificação e *path relinking*. A busca tabu usa o modelo cc. O modelo cc usado é representado



(a) Síntese da idéia de Intensificação, diversificação e *path relinking*.

(b) Uma estratégia para deixar a região factível e entrar em regiões infactíveis.

Figura 7.1: Representação das principais estratégias da busca tabu: (a) intensificação, diversificação, *path relinking* e (b) oscilação estratégica.

como segue.

$$\min \omega^k = \sum_{s \in \Gamma} r_s \quad (7.1)$$

sujeito a

$$Sf + g + r = d \quad (7.2)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij}^k)(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (7.3)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}^k) \bar{f}_{ij} \quad (7.4)$$

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

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

$$0 \leq r \leq d$$

n_{ij} inteiro; f_{ij} irrestrito; θ_j irrestrito

onde n_{ij}^k , representa os circuitos adicionados para encontrar a topologia atual k ; r é o vetor de geradores artificiais cujos elementos são r_s em cada barra; Γ é o conjunto de índices das barras de carga. ω^k mede o quão inactível está a topologia k . $\omega^k = 0$ indica que a topologia k é plenamente factível. A Equação 7.3 deixa de ser não-linear quando se conhece os valores de n_{ij}^k . Isto ocorre quando se utiliza as metaheurísticas, uma vez que estas estabelecem, cada uma do seu modo, os valores de n_{ij}^k .

O algoritmo proposto é dividido em dois ciclos, um mais interno e outro mais externo, como se pode ver pela Figura (7.2), onde:

- *listaDeConfiguracoes* é a lista de configurações gerada pelo AHC-CTDF;
- *conta - ci* é uma variável que conta o número de iterações do ciclo interno;
- *mci* é um parâmetro que informa o máximo de iterações do ciclo interno (definido pelo usuário);
- *conta - ce* é uma variável que conta o número de iterações do ciclo externo;
- *mce* é um parâmetro que informa o máximo de iterações do ciclo externo (definido pelo usuário).

7.3.1 Ciclo interno

O ciclo interno é dividido em três fases, inspiradas em Gallego et al. (1997). O ciclo interno é executado durante um determinado número máximo (*mci*) de iterações. A seguir é definido a função de cada uma das fases do ciclo interno.

Fase I

Esta fase tem como objeto encontrar soluções factíveis. Para tanto, linhas são adicionadas até que se encontre uma configuração factível. Além de encontrar configurações factíveis, esta fase define a vizinhança de uma determinada configuração. Nesta fase, uma vizinhança é considerada

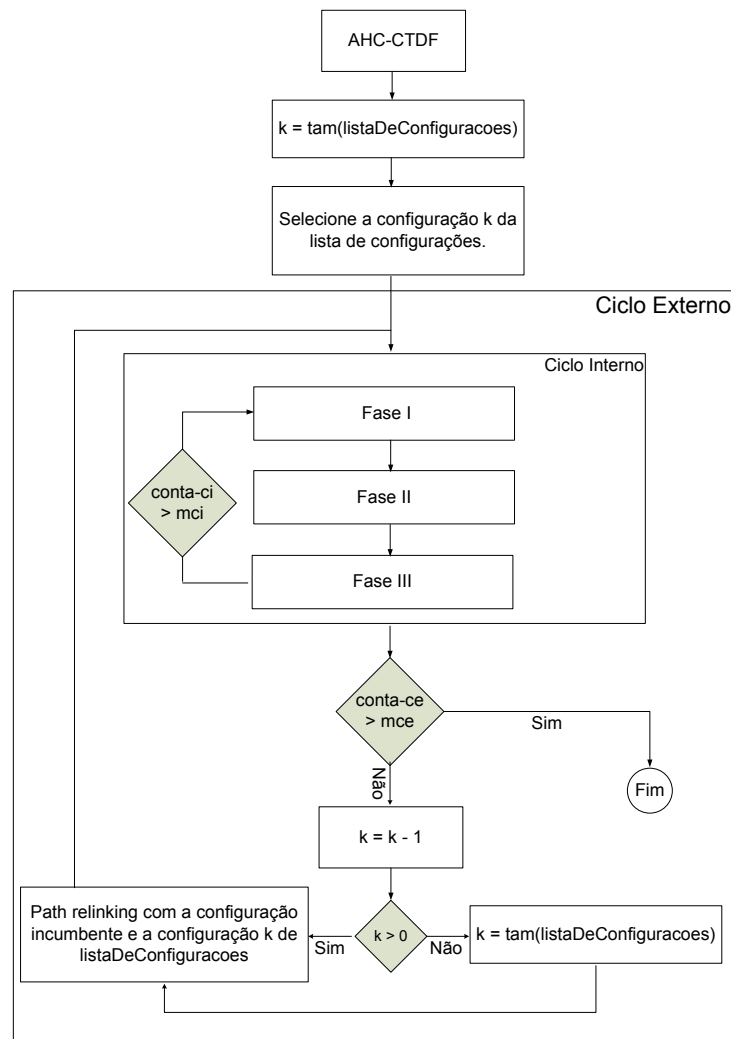


Figura 7.2: Busca tabu com AHC-CTDF.

como sendo uma lista reduzida de circuitos candidatos à adição ou troca (*swap*). A lista é obtida levando em consideração os seguintes atributos:

- Custo da linha: linhas com custo baixo costumam tem pequeno impacto na configuração (Gallego et al., 2000).
- Índice de sensibilidade: corresponde aos multiplicadores de Lagrange do modelo (7.1) com respeito à susceptância das linhas candidatas (Pereira e Pinto, 1985). O índice é calculado de acordo com a Equação (7.5)

$$\sigma_{ij} = (\pi_i - \pi_j)(\theta_i - \theta_j) \quad (7.5)$$

onde π_j é o multiplicador de Lagrange referente à Equação (7.2); θ_j é o valor do ângulo da tensão nodal na solução ótima do modelo (7.1). Utiliza-se a subrotina de solução de PL do Minos (Murtagh e Saunders, 1987) para resolver o modelo (7.1). Este índice estima o impacto na função objetivo em relação às mudanças da susceptância das linhas candidatas. A linha de maior σ_{ij} é a mais atraente quando se deseja adicionar novas linhas. Quando o objetivo é remover linhas de baixo impacto, as que tiver o menor valor de σ_{ij} devem ser consideradas prioritárias.

- c) Distância da barras de maior perda de carga: se uma configuração é infactível, significa que há cortes de carga. Quando se resolver o modelo (7.1), os valores de r maiores que zero indicam em que barras está havendo corte de carga. As linhas ligadas a estas barras podem ser consideradas de grande qualidade, pois a adição dessas linhas levará à convergência mais rápida (Baldwin et al., 1959). Portanto, estas linhas têm maior prioridade para adição e menor prioridade para remoção.

Para cada um dos atributos supracitados, cada linha receberá uma nota dentro intervalo de 1 a número de linhas. Por exemplo, o sistema sul brasileiro tem 79 linhas. Assim, cada linha receberá uma nota dentro do intervalo de 1 a 79. A distribuição das notas é dada da seguinte forma: quanto menor o custo, maior a nota; quanto maior o σ_{ij} , maior a nota; quanto mais próxima a linha estiver da barra de maior corte de carga, maior a nota. A linha de maior nota que não for tabu deve ser adicionada.

Toda linha adicionada ou removida do sistema deve se tornar tabu durante um tempo T determinado ou até satisfazer algum critério de aspiração. O critério de aspiração adotado neste trabalho foi remover da lista tabu todas as linhas pertencentes a uma configuração melhor que as demais.

A Fase I é executada em um conjunto de configurações infactíveis. Portanto, esta fase gera um conjunto de soluções factíveis a partir daquelas. Das soluções da Fase I seleciona-se uma e submete-se-a à Fase II. Neste trabalho submete-se à Fase II ou a configuração mais barata ou uma configuração selecionada aleatoriamente entre a segunda mais barata e uma k -ésima configuração mais barata dentre as encontradas na Fase I. É importante não selecionar sempre a configuração mais barata pois isso pode fazer o algoritmo estacionar prematuramente em um ótimo local.

Exemplo 7.1: Sistema de 4 barras

Para exemplificar a distribuição das notas, considere o Sistema de quatro barras da Figura 7.3, os detalhes deste sistema podem ser encontrados no Capítulo 5.

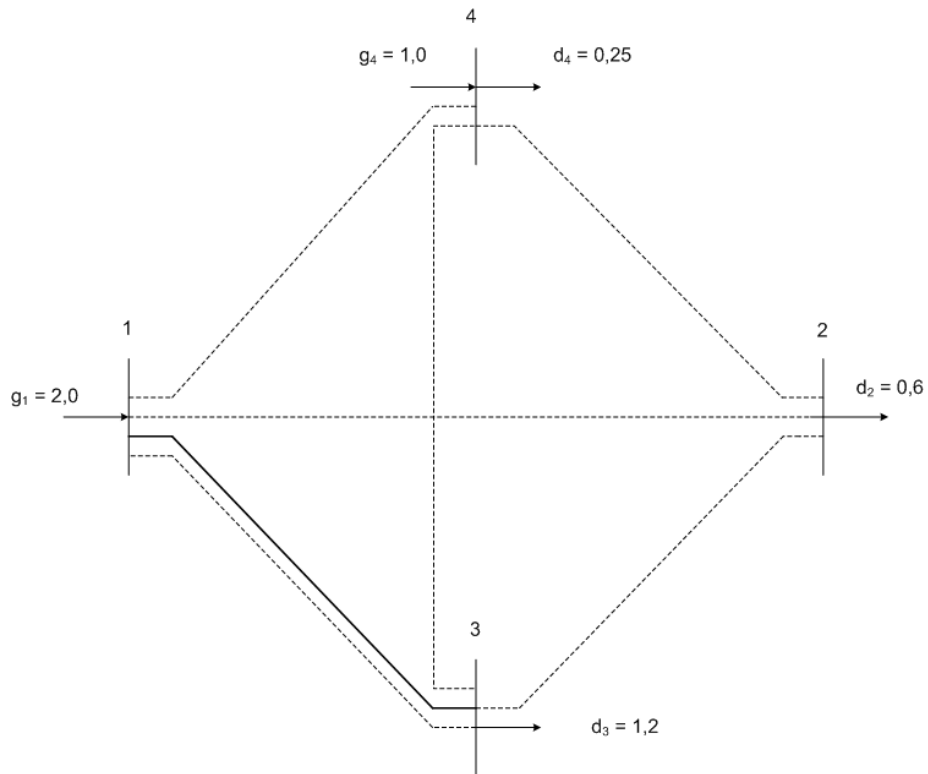


Figura 7.3: Sistema de 4 barras - Rede Inicial.

O sistema de quatro barras pode ser representado pelo PL (7.6).

$$\min \omega = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 \quad (7.6)$$

sujeito a

$$-f_{12} - f_{13} - f_{14} + g_1 + r_1 = 0$$

$$f_{12} - f_{23} - f_{24} + r_2 = 0,60$$

$$f_{13} + f_{23} - f_{34} + r_3 = 1,20$$

$$f_{14} + f_{24} + f_{34} + g_4 + r_4 = 0,25$$

$$f_{13} = 2(\theta_1 - \theta_3)$$

$$|f_{13}| \leq 0,40$$

$$0 \leq g_1 \leq 2,00$$

$$0 \leq g_4 \leq 1,00$$

$$0 \leq r_1 \leq 0,00$$

$$0 \leq r_2 \leq 0,60$$

$$0 \leq r_3 \leq 1,20$$

$$0 \leq r_4 \leq 0,25$$

A Tabela 7.1 apresenta os cortes de cargas resultantes da resolução do PL (7.6).

Tabela 7.1: Corte de carga de cada barra após resolver o modelo.

Barra	Corte de Carga
1	0,00
2	0,60
3	0,7999
4	0,00

A Tabela 7.2 apresenta o custo de cada linha e os índices de sensibilidade após resolver o PL (7.6).

De acordo com a Tabela 7.3, ordenada pelas linha de maior nota, a linha 1 – 3 é a melhor linha a ser adicionada ao sistema. A decisão de adicionar uma linha no ramo 1 – 3 é razoável, por três motivos:

- A linha 1 – 3 não tem custo elevado;
- A adição dessa linha pode diminuir ou eliminar o corte de carga da barra 3;

Tabela 7.2: Custos da linha e índices de sensibilidade.

Linha	Custo da Linha	Índices de Sensibilidade
1-2	3,00	0,20
1-3	2,00	0,20
1-4	2,00	0
2-3	2,00	0
2-4	3,00	0
3-4	2,00	0

- O índice de sensibilidade indica que esta linha é muito promissora.

Tabela 7.3: Distribuição da nota de cada linha. A coluna 'DB-MCC' (vide Fase I, item c) informa a distância da linha em relação à barra de maior corte de carga.

Linha	Custo da Linha	Índice de Sensibilidade	DB-MCC	Total
1-3	6	6	6	18
2-3	6	1	6	13
3-4	6	1	6	13
1-2	1	6	1	8
1-4	6	1	1	8
2-4	1	1	1	3

Fase II

Esta estratégia tem a função de intensificação. O propósito é encontrar configurações vizinhas à configuração atual que sejam melhores que esta. Para isso, na Fase II, deve-se remover/trocar algumas linhas de baixo impacto na configuração com o intuito de encontrar configurações mais baratas. Em nossa abordagem, é feita uma lista de linhas de baixo impacto. A partir daí, cada linha é removida. Se ao remover a linha a configuração for factível, então encontrou uma configuração mais barata. Sempre que uma configuração mais barata for encontrada, uma nova lista deve ser criada (em outras palavras, a Fase II seria chamada recursivamente passando agora a nova configuração encontrada). Se ao remover uma linha a configuração resultante for infactível, pode-se ou chamar a Fase I passando como parâmetro esta configuração infactível ou simplesmente readicionar a linha removida e tentar remover a próxima linha da lista. A Fase II pára quando a lista estiver vazia. Pode-se perceber facilmente que a Fase II vai parar assim que encontrar o menor ótimo local da configuração submetida a ela.

Fase III

Esta fase tem a função de diversificação. A melhor solução encontrada na Fase II é submetida à Fase III. Esta fase cria uma lista de linhas de baixo impacto para a configuração que não sejam tabu e cria um conjunto de configurações inactiváveis ao remover cada uma das linhas. As linhas removidas na Fase III permanecem tabu (para evitar ciclos).

7.3.2 Ciclo externo

O ciclo externo tem por objetivo de executar o *path relinking* entre a melhor solução encontrada durante toda a execução da busca tabu com a seguinte solução da lista gerada pelo AHC-CTDF ainda não utilizada. Após utilizar todas as configurações da lista criada pelo AHC-CTDF, pode-se voltar ao início da lista e continuar a execução do algoritmo até que um número máximo (*mce*) de ciclos externos tenha sido alcançado.

7.3.3 Remoção de linhas desnecessárias

Durante a Fase I e a Fase II, sempre que uma configuração factível for encontrada, pode-se tentar remover todas as linhas desnecessárias. As linhas desnecessárias são aquelas cuja remoção não causa corte de carga. Normalmente ordenam-se as linhas da configuração em ordem decrescente do custo e verifica-se a remoção de cada uma delas.

Capítulo 8

Testes e Resultados com a Busca Tabu

Este capítulo apresenta os resultados dos testes realizados nos sistemas de grande porte utilizando o AHC-CTDF e a busca tabu.

8.1 Introdução

Como já foi visto, o objetivo de introduzir a metaheurística busca tabu é partir das soluções encontradas pelo AHC-CTDF e encontrar soluções superiores para sistemas de grande porte. Portanto, neste capítulo não foram realizados testes com o sistema Sul Brasileiro, uma vez que só o AHC-CTDF é suficiente para encontrar a solução ótima deste sistema. Assim, os testes foram realizados com os sistemas Norte-Nordeste e Colombiano.

Em ambos os sistemas usou-se uma lista tabu de tamanho 20 e o tempo tabu (tempo em que um movimento se mantém tabu) de 8 para memória de curto prazo.

8.2 Sistema Colombiano

O sistema Colombiano é um sistema de grande porte com demanda de 14.559 MW, 93 barras e 155 linhas. A solução ótima desse sistema sugere um investimento de 560.0020×10^6 US\$ (Rider, 2006).

Com este sistema, o AHC-CTDF foi executado até que se gerassem 5 configurações factíveis. Foi atribuído $mci = 2$ (máximo número de iterações no ciclo interno) e $mce = 1$ (máximo número

de iterações no ciclo externo).

O AHC-CTDF encontrou configurações com os seguintes investimentos: (712,2941; 709,6571; 703,1491; 697,1230; 695,3940) $\times 10^6$ US\$. O AHC-CTDF executou 2.234 PLs referentes ao modelo híbrido. A partir desses planos, o plano sub-ótimo com investimento de $560,6920 \times 10^6$ US\$ foi encontrado após executar 638 PLs referentes ao modelo cc com a busca tabu. O algoritmo chegou ao fim após executar 6.123 PLs referentes ao modelo cc. Portanto, o total de PLs executados até o fim do algoritmo foi de 8.366 (soma dos PLs referentes ao modelo híbrido e ao modelo cc), em 87 segundos.

A configuração sub-ótima, com investimento de $560,6920 \times 10^6$ US\$, encontrada tem a seguinte topologia:

$$\begin{aligned} n_{43-88} = 2 \quad n_{15-18} = 1 \quad n_{45-54} = 1 \quad n_{30-65} = 1 \quad n_{30-72} = 1 \quad n_{55-57} = 1 \quad n_{55-84} = 1 \quad n_{56-57} = 1 \\ n_{55-62} = 1 \quad n_{27-29} = 1 \quad n_{29-64} = 1 \quad n_{62-73} = 1 \quad n_{54-56} = 1 \quad n_{72-73} = 1 \quad n_{19-82} = 2 \quad n_{82-85} = 1 \\ n_{68-86} = 1. \end{aligned}$$

A Tabela 8.1 apresenta os melhores custos de investimento quando considerando uma tolerância de corte de carga entre $0 < \omega \leq 1$ MW, onde DT é a demanda total do sistema e Percentagem é a percentagem do corte de carga em relação à demanda total do sistema. ω e DT estão ambos em *pu* em base 100.

Tabela 8.1: Colombiano - resultados com corte de carga menor ou igual a 1 MW.

Investimento ($10^6 U\$$)	ω MW	Percentagem ($100 \times \omega / DT$)
552,1450	0,1980	0,1362
557,1970	0,1416	0,0972
557,8870	0,1416	0,0972
558,9220	0,1717	0,1179

Quando se considera a tolerância de 1 MW, a melhor solução sugere o investimento de $v = 552,1450 \times 10^6$ US\$ e a seguinte configuração:

$$\begin{aligned} n_{43-88} = 2 \quad n_{15-18} = 1 \quad n_{45-54} = 1 \quad n_{30-65} = 1 \quad n_{55-57} = 1 \quad n_{55-84} = 1 \quad n_{56-57} = 1 \quad n_{55-62} = 1 \\ n_{27-64} = 1 \quad n_{50-54} = 1 \quad n_{62-73} = 1 \quad n_{72-73} = 1 \quad n_{19-82} = 2 \quad n_{82-85} = 1 \quad n_{68-86} = 1. \end{aligned}$$

8.3 Norte-Nordeste Brasileiro

O sistema norte-nordeste é um sistema de grande porte de grande complexidade por ser muito ilhado. Os testes foram feitos no plano P1, cuja melhor solução encontrada até este trabalho sugere um investimento de $1.360.961 \times 10^3$ US\$ após resolver 330.000 PLs, como já foi dito no Capítulo 6. O plano P1 tem uma demanda de 20.316 MW, 87 barras e 183 linhas.

Com este sistema, o AHC-CTDF foi executado até que se gerassem 5 configurações factíveis. Foi atribuído $mci = 5$ (máximo número de iterações no ciclo interno) e $mce = 14$ (máximo número de iterações no ciclo externo). O AHC-CTDF encontrou configurações com os seguintes investimentos: (1.649.147; 1.627.934; 1.585.068; 1.553.700; 1.535.126) $\times 10^3$ US\$. O AHC-CTDF executou 1.601 PLs referentes ao modelo híbrido. O algoritmo chegou ao fim após executar 175.262 PLs referentes ao modelo cc. Portanto, o total de PLs executados até o fim do algoritmo foi de 176.863 (soma dos PLs referentes ao modelo híbrido e ao modelo cc), em 1.672 segundos.

Para verificar a estabilidade do método, foram realizados testes considerando quatro tolerâncias de corte de carga: $\omega = 0$ (sem corte de carga); $0 < \omega \leq 1$ MW; $0 < \omega \leq 2$ MW; $0 < \omega \leq 3$ MW e $0 < \omega \leq 3,5$ MW. As Tabelas 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, e 8.6 apresentam os melhores resultados encontrados considerando cada uma das tolerâncias. ω e DT estão ambos em *pu* em base 100.

É importante destacar que neste trabalho foi mantido um histórico de todas as soluções incumbentes geradas durante a execução do algoritmo. Assim, as tabelas apresentadas mostram este histórico de execução, ou seja, foram obtidas de apenas uma execução. Como não são usados critérios aleatórios, os resultados destas tabelas mantêm-se os mesmos independentemente do número de execuções.

Tabela 8.2: Norte-Nordeste - resultados com corte de carga zero.

Investimento ($10^3 U\$$)	ω MW	Porcentagem ($100 \times \omega / DT$)
1.355.222	0	0
1.355.747	0	0
1.356.272	0	0

Tabela 8.3: Norte-Nordeste - resultados com corte de carga menor ou igual a 1 MW.

Investimento ($10^3 U\$$)	ω MW	Porcentagem ($100 \times \omega / DT$)
1.344.772	0,2996	0,14746
1.345.822	0,2996	0,14746
1.347.236	0,1022	0,05030
1.354.746	0,1000	0,04922

Tabela 8.4: Norte-Nordeste - resultados com corte de carga menor ou igual a 2 MW.

Investimento ($10^3 U\$$)	ω MW	Porcentagem ($100 \times \omega/DT$)
1.324.626	1,4153	0,6966
1.325.742	1,8151	0,8934
1.326.792	1,8151	0,8934
1.331.027	1,7113	0,8423

Tabela 8.5: Norte-Nordeste - resultados com corte de carga menor ou igual a 3 MW.

Investimento ($10^3 U\$$)	ω MW	Porcentagem ($100 \times \omega/DT$)
1.310.276	3,0099	1,4815
1.313.741	3,0098	1,4814
1.316.491	2,5910	1,2753
1.324.001	2,6407	1,2998

Como se pode ver na Tabela 8.2, a junção do AHC-CTDF com a busca tabu encontrou soluções melhores do que a melhor solução já encontrada para este sistema quando considerando corte de carga igual a zero. A melhor proposta de expansão indica um investimento igual a $v = 1.355.222.000$ US\$ e apresenta a seguinte configuração:

$$\begin{aligned}
n_{2-60} &= 2 & n_{5-58} &= 2 & n_{5-60} &= 2 & n_{12-13} &= 1 & n_{12-15} &= 2 & n_{14-59} &= 1 & n_{15-16} &= 2 & n_{16-44} &= 4 \\
n_{18-50} &= 6 & n_{18-74} &= 3 & n_{20-21} &= 2 & n_{20-38} &= 1 & n_{22-23} &= 1 & n_{22-58} &= 2 & n_{23-24} &= 1 & n_{25-55} &= 2 \\
n_{26-29} &= 1 & n_{27-53} &= 1 & n_{29-30} &= 1 & n_{34-39} &= 1 & n_{34-41} &= 2 & n_{36-46} &= 1 & n_{39-86} &= 3 & n_{40-45} &= 1 \\
n_{42-44} &= 2 & n_{42-85} &= 1 & n_{48-49} &= 2 & n_{49-50} &= 1 & n_{52-59} &= 1 & n_{53-86} &= 1 & n_{54-55} &= 1 & n_{54-58} &= 1 \\
n_{67-68} &= 1 & n_{67-69} &= 1 & n_{67-71} &= 3 & n_{71-72} &= 1 & n_{72-73} &= 1 & n_{73-74} &= 1.
\end{aligned}$$

A melhor configuração considerando corte de carga menor ou igual a 1 MW sugere um investimento de $v = 1.344.772.000$ US\$ e apresenta a seguinte configuração:

$$\begin{aligned}
n_{2-60} &= 2 & n_{5-58} &= 2 & n_{5-60} &= 2 & n_{12-13} &= 1 & n_{12-15} &= 2 & n_{14-59} &= 1 & n_{15-16} &= 2 & n_{16-44} &= 4 \\
n_{18-50} &= 6 & n_{18-74} &= 3 & n_{20-21} &= 2 & n_{20-38} &= 1 & n_{22-23} &= 1 & n_{22-58} &= 2 & n_{23-24} &= 1 & n_{25-55} &= 2 \\
n_{26-29} &= 1 & n_{27-53} &= 1 & n_{29-30} &= 1 & n_{34-39} &= 1 & n_{34-41} &= 1 & n_{39-86} &= 3 & n_{40-45} &= 1 & n_{42-44} &= 2 \\
n_{42-85} &= 1 & n_{48-49} &= 2 & n_{49-50} &= 1 & n_{52-59} &= 1 & n_{53-86} &= 1 & n_{54-55} &= 1 & n_{54-58} &= 1 & n_{67-68} &= 1 \\
n_{67-69} &= 1 & n_{67-71} &= 3 & n_{71-72} &= 1 & n_{72-73} &= 1 & n_{73-74} &= 1.
\end{aligned}$$

A melhor configuração considerando corte de carga menor ou igual a 2 MW sugere um investimento de $v = 1.324.626.000$ US\$ e apresenta a seguinte configuração:

Tabela 8.6: Norte-Nordeste - resultados com corte de carga menor ou igual a 3,5 MW.

Investimento ($10^3 U\$$)	ω MW	Porcentagem ($100 \times \omega/DT$)
1.280.188	3,4145	1,6807
1.284.423	3,2922	1,6205
1.291.933	3,2689	1,6090
1.296.443	3,3553	1,6515
1.302.548	3,1247	1,5380
1.308.763	3,0921	1,5220

$$\begin{aligned}
n_{2-60} = 2 \quad n_{5-58} = 2 \quad n_{5-60} = 2 \quad n_{12-13} = 1 \quad n_{12-15} = 2 \quad n_{14-59} = 1 \quad n_{15-16} = 2 \quad n_{16-44} = 4 \\
n_{18-50} = 6 \quad n_{18-74} = 3 \quad n_{20-21} = 2 \quad n_{20-38} = 1 \quad n_{22-23} = 1 \quad n_{22-58} = 2 \quad n_{23-24} = 1 \quad n_{25-55} = 2 \\
n_{34-39} = 1 \quad n_{34-41} = 1 \quad n_{39-86} = 3 \quad n_{40-45} = 1 \quad n_{42-44} = 2 \quad n_{42-85} = 1 \quad n_{48-49} = 2 \quad n_{49-50} = 1 \\
n_{52-59} = 1 \quad n_{53-86} = 1 \quad n_{54-55} = 1 \quad n_{54-58} = 1 \quad n_{67-68} = 1 \quad n_{67-69} = 1 \quad n_{67-71} = 3 \quad n_{71-72} = 1 \\
n_{72-73} = 1 \quad n_{73-74} = 1.
\end{aligned}$$

A melhor configuração considerando corte de carga menor ou igual a 3 MW sugere um investimento de $v = 1.310.276.000$ US\$ e apresenta a seguinte configuração:

$$\begin{aligned}
n_{2-60} = 2 \quad n_{5-58} = 2 \quad n_{5-60} = 2 \quad n_{12-13} = 1 \quad n_{12-15} = 2 \quad n_{14-59} = 1 \quad n_{15-16} = 2 \quad n_{16-44} = 3 \\
n_{18-50} = 6 \quad n_{18-74} = 3 \quad n_{20-21} = 2 \quad n_{20-38} = 1 \quad n_{22-58} = 2 \quad n_{25-55} = 2 \quad n_{26-29} = 1 \quad n_{27-53} = 1 \\
n_{29-30} = 1 \quad n_{36-46} = 1 \quad n_{39-42} = 1 \quad n_{39-86} = 3 \quad n_{40-45} = 1 \quad n_{42-44} = 1 \quad n_{42-85} = 1 \quad n_{48-49} = 2 \\
n_{49-50} = 1 \quad n_{52-59} = 1 \quad n_{53-86} = 1 \quad n_{54-55} = 1 \quad n_{54-58} = 1 \quad n_{67-68} = 1 \quad n_{67-69} = 1 \quad n_{67-71} = 3 \\
n_{71-72} = 1 \quad n_{72-73} = 1 \quad n_{73-74} = 1.
\end{aligned}$$

A melhor configuração considerando corte de carga menor ou igual a 3,5 MW sugere um investimento de $v = 1.280.188.000$ US\$ e apresenta a seguinte configuração:

$$\begin{aligned}
n_{2-60} = 2 \quad n_{5-58} = 2 \quad n_{5-60} = 2 \quad n_{12-13} = 1 \quad n_{12-15} = 2 \quad n_{14-59} = 1 \quad n_{15-16} = 2 \quad n_{16-44} = 3 \\
n_{18-50} = 6 \quad n_{18-74} = 3 \quad n_{20-21} = 2 \quad n_{20-38} = 1 \quad n_{22-58} = 2 \quad n_{25-55} = 2 \quad n_{34-39} = 1 \quad n_{34-41} = 1 \\
n_{39-86} = 3 \quad n_{40-45} = 1 \quad n_{42-44} = 2 \quad n_{42-85} = 1 \quad n_{43-55} = 1 \quad n_{43-58} = 1 \quad n_{48-49} = 2 \quad n_{49-50} = 1 \\
n_{52-59} = 1 \quad n_{53-86} = 1 \quad n_{67-68} = 1 \quad n_{67-69} = 1 \quad n_{67-71} = 3 \quad n_{71-72} = 1 \quad n_{72-73} = 1 \quad n_{73-74} = 1.
\end{aligned}$$

8.4 Análise dos Resultados

Nesta seção são apresentadas algumas comparações com outras abordagens encontradas na literatura com o intuito de verificar a qualidade dos resultados encontrados pela fusão do AHC-

Tabela 8.7: Comparação dos resultados com alguns encontrados na literatura.

Trabalho	Sistema	PLs	Tempo	Núm. Máq.	Investimento
Oliveira (2004)	Colombiano NN	50.395	7,9 h	4	560.002.000
		90.707	9,4 h	3	1.448.463.000
Escobar et al. (2004)	Colombiano NN	*	*	*	*
		330.000	*	1	1.360.961.000
Rider (2006)	Colombiano NN	40.797	*	1	560.002.000
		*	*	*	*
AHC-CTDF e Busca Tabu (2009)	Colombiano NN	8.366	87 s	1	560.692.000
		176.863	27,87 min	1	1.355.222.000

CTDF com a busca tabu.

Os trabalhos que serão usados para comparação são os trabalhos de Rider (2006), Escobar et al. (2004) e Oliveira (2004). Os dados referentes ao tempo computacional foram obtidos diretamente dos trabalhos citados, ou seja, não implementamos estes trabalhos nesta pesquisa.

A Tabela 8.7 apresentam as comparações, onde Núm Máq. é o número de computadores computando paralelamente para obter o resultado mostrado. Todos estes resultados apresentam corte de carga igual a zero. * significa que o dado não foi fornecido pelo trabalho citado.

Através da Tabela 8.7 podemos ver que em relação ao sistema Colombiano, a solução ótima não foi encontrada, mas uma solução de boa qualidade foi encontrada após serem resolvidos poucos PLs. Em relação ao Sistema Norte-Nordeste, a melhor solução é a proposta por este trabalho.

Com os dados apresentados na Tabela 8.7 e pelo trabalho de Romero et al. (2002), onde é apresentada a melhor solução para o sistema Norte-Nordeste até este trabalho, nos certificamos que a proposta de investimento apresentada neste trabalho para o Sistema Norte-Nordeste é a melhor já conhecida até o momento. Isto mostra a eficiência da abordagem defendida neste trabalho.

Capítulo 9

Considerações Finais e Trabalhos Futuros

O problema de planejamento da expansão da transmissão é um problema não-linear inteiro misto (quando é utilizado o modelo cc ou o modelo ca para representar a rede de transmissão) com característica combinatória em função do número de opções que crescem exponencialmente com o tamanho da rede. A proposta deste trabalho foi apresentar um algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* no intuito de encontrar soluções de boa qualidade a um baixo custo computacional e utilizar essas soluções com a metaheurística busca tabu.

Foram apresentados os principais modelos de representação do problema de planejamento da expansão e abordagens de solução deles. O algoritmo heurístico construtivo com tomada de decisão *fuzzy* proposto foi desenvolvido usando o Modelo Híbrido de Villasana (Villasana et al., 1985). Além disso, o algoritmo foi baseado no algoritmo heurístico construtivo de Garver. Porém, para sanar as deficiências do algoritmo de Garver, fez-se uso da técnica dividir para conquistar dividindo o problema original sempre que o fluxo de execução levasse aos pontos críticos da escolha de uma nova linha a ser inserida à configuração. Para tomar a decisão sobre quando dividir o problema em subproblemas foi desenvolvido um sistema de tomada de decisão *fuzzy*. Para aplicação busca tabu, utilizou-se do modelo cc.

Foram realizados testes em sistemas de pequeno, médio e grande porte, e a solução ótima foi encontrada após poucas iterações para os sistemas de pequeno e médio porte. Já para o sistema de grande porte, quando utilizando somente o AHC-CTDF, a solução ótima não foi encontrada. Porém, esse resultado já era esperado uma vez o objetivo do AHC com tomada de decisão *fuzzy* é encontrar soluções de alta qualidade a um custo computacional baixo para que a mesma seja

usada como solução inicial de metaheurísticas ou como solução incumbente inicial do algoritmo *branch-and-bound*.

A partir das excelentes soluções factíveis encontradas pelo AHC-CTDF para os sistemas de grande porte (sistema colombiano e sistema norte-nordeste), aplicou-se a busca tabu. Uma solução próxima da solução ótima (conhecida através da literatura) do sistema colombiano foi encontrada. Por ser a busca tabu uma metaheurística não se sabe se a melhor solução encontrada para o sistema norte-nordeste é a solução ótima, porém esta solução é melhor do que todas as soluções encontradas na literatura, mostrando ser esta abordagem muito eficiente.

9.1 Trabalho Futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram feitas algumas anotações que seriam relevantes se considerar em trabalhos futuros. Destacam-se, basicamente, as seguintes extensões futuras:

1. Incluir no problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão usando o modelo cc uma representação das perdas elétricas do sistema de transmissão.
2. Aplicar o AHC-CTDF e busca tabu para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão usando o modelo cc para representar o modelo de rede elétrica mas, adicionalmente, considerar formas de operação mais próximas da realidade tais como incorporar o modelo de expansão para planejamento multiestágio, o modelo de expansão para operação do sistema elétrico em mercado competitivo e o modelo de operação com restrições de segurança.
3. Aplicar outras metaheurísticas como Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989; Holland, 1992) e/ou *Particle Swarm* (Kennedy et al., 2001) para verificar se apresentam desempenho melhor do que a busca tabu partindo das soluções encontradas pelo AHC-CTDF.
4. Considerar uma implementação utilizando programação paralela, o que possibilitará que a busca tabu execute mais PLs em menos tempo, o que poderá melhorar ainda mais a solução ou, pelo menos, diminuir o tempo computacional.

Referências Bibliográficas

Alguacil, N. , Motto, A. L. e Conejo, A. J. - Transmission expansion planning: a mixed-integer lp approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 3, p. 1070–1077, 2003.

Asada, E. , Carreno, E. , Romero, R. e Garcia, A. - A branch-and-bound algorithm for the multi-stage transmission expansion planning, *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*, p. 17–22, 2005.

Baldwin, C. , Hoffman, C. , Desalvo, C. e Ku, W. - A Model for Transmission Planning by Logic, *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 78, n. 4, p. 1638–1643, 1959.

Bazaraa, M. , Jarvis, J. e Sherali, H. - *Linear programming and network flows*, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1990.

Bazaraa, M. e Shetty, C. - *Nonlinear programming: theory and algorithms*, Wiley, 1993.

Bellman, R. e Zadeh, L. - Decision-making in a fuzzy environment, *Management Science*, v. 17, n. 4, p. 141–164, 1970.

Binato, S. - *Expansão Ótima de Sistemas de Transmissão através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes*, Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Abril, 2000.

Binato, S. , Oliveira, G. e Araujo, J. - A greedy randomized adaptive search procedure for transmission expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 2, p. 247–253, 2001.

Bockmayr, A. e Dimopoulos, Y. - Integer Programs and Valid Inequalities for Planning Problems, *Recent Advances in Ai Planning: 5th European Conference on Planning, Ecp'99, Durham, Uk, September 8-10, 1999: Proceedings*, 2000.

- Choi, J. , El-Keib, A. e Tran, T. - A fuzzy branch and bound-based transmission system expansion planning for the highest satisfaction level of the decision maker, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 1, p. 476–484, 2005.
- Conejo, A. - *Decomposition Techniques in Mathematical Programming: Engineering And Science Applications*, Springer Publishing, 2006.
- Cormen, T. , Leiserson, C. , Rivest, R. e others - *Introduction to Algorithms*, MIT Press, 2001.
- Da Silva, E. , Ortiz, J. , De Oliveira, G. e Binato, S. - Transmission network expansion planning under a Tabu Search approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 1, p. 62–68, 2001.
- Da Silva, E. L. , Gil, H. A. e Areiza, J. M. - Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 4, p. 1168–1175, 2000.
- Eiselt, H. e Sandblom, C. - *Integer Programming and Network Models*, Springer, 2000.
- Escobar, A. H. , Gallego, R. A. e Romero, R. - Multistage and coordinated planning of the expansion of transmission systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, p. 735–744, 2004.
- Faria, H. , Binato, S. , Resende, M. G. C. e Falcao, D. M. - Power transmission network design by greedy randomized adaptive path relinking, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 1, p. 43–49, 2005.
- Farwell, K. - *Gomory Cutting Plane Algorithm Using Exact Arithmetic*, Tese de Doutorado, Rensselaer Polytechnic Institute, 2006.
- Gallego, R. , Monticelli, A. e Romero, R. - Comparative studies on nonconvex optimization methods for transmission network expansion planning, *20th International Conference on Power Industry Computer Applications*, 1997., p. 24–30, 1997.
- Gallego, R. , Monticelli, A. e Romero, R. - Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm, *IEE proceedings - Generation, transmission and distribution*, v. 145, n. 3, p. 329–335, 1998.
- Gallego, R. , Romero, R. , Monticelli, A. e UTP, P. - Tabu search algorithm for network synthesis, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 2, p. 490–495, 2000.
- Garver, L. - Transmission Network Estimation Using Linear Programming, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 1688–1697, 1970.
- Glover, F. - Tabu Search-Part I, *ORSA Journal on Computing*, v. 1, n. 3, p. 190–206, 1989.

- Glover, F. - Tabu search: A tutorial, *Interfaces*, v. 20, n. 4, p. 74–94, 1990.
- Glover, F. - Tabu Search-Part II, *ORSA Journal on Computing*, v. 2, n. 1, p. 4–32, 1990.
- Glover, F. e Kochenberger, G. - *Handbook of Metaheuristics*, Springer, 2003.
- Glover, F. e Laguna, M. - *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- Goldberg, D. - *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1989.
- Haffner, S. , Monticelli, A. , Garcia, A. , Mantovani, J. e Romero, R. - Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model, *IEE proceedings - Generation, transmission and distribution*, v. 147, n. 3, p. 149–156, 2000.
- Haffner, S. , Monticelli, A. , Garcia, A. e Romero, R. - Specialised branch-and-bound algorithm for transmission network expansion planning, *IEE proceedings - Generation, transmission and distribution*, v. 148, n. 5, p. 482–488, 2001.
- Haffner, S. L. - *O Planejamento da expansão dos sistemas elétricos no contexto de um ambiente competitivo*, Tese de Doutorado, UNICAMP, SP, Brazil, 2000.
- Halmos, P. - *Naive Set Theory*, Springer, 1974.
- Holland, J. - *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press Cambridge, MA, USA, 1992.
- Kennedy, J. , Eberhart, R. , Shi, Y. e service, S. O. - *Swarm intelligence*, Springer, 2001.
- Kosko, B. - Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic, *Social Science Computer Review*, 1994.
- Larsen, P. - Industrial applications of fuzzy logic control, *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 12, n. 1, p. 3–10, 1980.
- Latorre-Bayona, G. e Perez-Arriaga, I. - CHOPIN, a heuristic model for long term transmission expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 4, p. 1886–1894, 1994.
- Lee, C. - Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 2, p. 404–418, 1990.
- Lee, K. e El-Sharkawi, M. - Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems, *IEEE Power Engineering Society*, 2003.

- Lee, S. , Hicks, K. e Hnyilicza, E. - Transmission Expansion by Branch-and-Bound Integer Programming with Optimal Cost - Capacity Curves, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 1390–1400, 1974.
- Levi, V. e Calovic, M. - A new decomposition based method for optimal expansion planning of large transmission networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, n. 3, p. 937–943, 1991.
- Li, D. e Sun, X. - *Nonlinear integer programming*, Springer, 2006.
- Mamdani, E. - Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, *Proceedings of the sixth international symposium on Multiple-valued logic*, p. 196–202, 1976.
- Mamdani, E. e Assilian, S. - An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller., *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 7, n. 1, p. 1–15, 1975.
- Mendel, J. - Fuzzy Logic Systems for Engineering: A tutorial, *Proceeding of the IEEE*, v. 83, n. 3, 1995.
- Miasaki, C. T. - *Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Controladores FACTS*, Tese de Doutorado, UNICAMP SP, Brazil, 2006.
- Monticelli, A. - Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, *Edgar Blücher*, 1983.
- Monticelli, A. , Santos, A. , Pereira, M. , Cunha, S. , Parker, B. e Praca, J. - Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 3919–3925, 1982.
- Mori, H. e Sone, Y. - A parallel tabu search based approach to transmission network expansion planning, *Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto*, v. 2, 2001.
- Murtagh, B. e Saunders, M. - *MINOS 5.4 User's Guide (preliminary)*, 1987.
- Nowak, I. - *Relaxation And Decomposition Methods for Mixed Integer Nonlinear Programming*, Birkhauser, 2005.
- O'Hagan, M. - A Fuzzy Decision Maker, *Proc. Fuzzy Logic '93 (Computer)*, 1993.
- Oliveira, S. A. d. - *Metaheurísticas Aplicadas ao Planejamento da Expansão da Transmissão de Energia Elétrica em Ambiente de Processamento Distribuído*, Tese de Doutorado, UNICAMP, SP, Brazil, 2004.
- Pereira, M. e Pinto, L. - Application Of Sensitivity Analysis Of Load Supplying Capability To Interactive Transmission Expansion Planning, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 381–389, 1985.

- Ramirez-Rosado, I. , Dominguez-Navarro, J. e Yusta-Loyo, J. M. - A new model for optimal electricity distribution planning based on fuzzy set techniques, *Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE*, v. 2, 1999.
- Reeves, C. - *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1993.
- Rider, M. - *Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Usando os Modelos CC-CA e Técnicas de Programação Não-Linear*, Tese de Doutorado, UNICAMP SP, Brazil, 2006.
- Romero, R. , Asada, E. , Carreno, E. e Rocha, C. - Constructive heuristic algorithm in branch-and-bound structure applied to transmission network expansion planning, *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 1, n. 2, p. 318–323, 2007.
- Romero, R. , Gallego, R. e Monticelli, A. - Transmission system expansion planning by simulated annealing, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1, p. 364–369, 1996.
- Romero, R. , Gallego, R. A. e Monticelli, A. - Transmission system expansion planning by simulated annealing, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1, p. 364–369, 1996.
- Romero, R. e Mantovani, J. - Introdução a Metaheurísticas, 3º Congresso de Dinâmica e Controle da SBMAC, UNESP - Campus de Ilha Solteira, 2004.
- Romero, R. e Monticelli, A. - A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 3, p. 373 – 380, 1994.
- Romero, R. e Monticelli, A. - A zero-one implicit enumeration method for optimizing investments in transmission expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 3, 1994.
- Romero, R. , Monticelli, A. , Garcia, A. e Haffner, S. - Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning, *IET proceedings - Generation, transmission and distribution*, v. 149, n. 1, p. 27–36, 2002.
- Romero, R. , Rider, M. e Silva, I. - A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 4, p. 2289–2291, 2007.
- Romero, R. , Rocha, C. , Mantovani, J. e Sanchez, I. - Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning, *IET proceedings - Generation, transmission and distribution*, v. 152, n. 2, p. 277–282, 2005.
- Romero, R. , Rocha, C. , Mantovani, M. e Mantovani, J. - Analysis of heuristic algorithms for the transportation model in static and multistage planning in network expansion systems, *IET proceedings - Generation, transmission and distribution*, v. 150, n. 5, p. 521–526, 2003.

- Rommelfanger, H. - Decision making in fuzzy environment, *Intelligent Systems, 2002. Proceedings. 2002 First International IEEE Symposium*, v. 2, 2002.
- Sadegheih, A. e Drake, P. - System network planning expansion using mathematical programming, genetic algorithms and tabu search, *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 6, p. 1557–1566, 2008.
- Salkin, H. - *Integer programming*, Addison-Wesley, 1975.
- Silva Junior, I. - *Planejamento da Expansão o de Sistemas de Transmissão Considerando Segurança e Planos de Programação da Geração*, Tese de Doutorado, UNICAMP SP, Brazil, 2005.
- Sleem, A. , Ahmed, M. , Kumar, A. e Kamel, K. - Comparative study of parallel vs. distributed genetic algorithm implementation for ATM networking environment, *Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications, 2000. Proceedings. ISCC 2000.*, p. 152–157, 2000.
- Sánchez, I. , Romero, R. , Mantovani, J. e Rider, M. - Transmission-expansion planning using the DC model and nonlinear-programming technique, *IEE proceedings - Generation, transmission and distribution*, v. 152, n. 6, p. 763–769, 2005.
- Sousa, A. S. e Asada, E. N. - Tomada de decisão fuzzy aplicada ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão, *XVII Congresso Brasileiro de Automática*, 2008.
- Taranto, G. , Pinto, L. e Pereira, M. - Representation of FACTS devices in power system economic dispatch, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 2, p. 572–576, 1992.
- Ustundag, B. , Eksin, I. e Bir, A. - A new approach to global optimization using a closed loop control system with fuzzy logic controller, *Advances in Engineering Software*, v. 33, n. 6, p. 309–318, 2002.
- Villasana, R. , Garver, L. e Salon, S. - Transmission Network Planning Using Linear Programming, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 349–356, 1985.
- Wen, F. e Chang, C. - Transmission network optimal planning using the tabu search method, *Electric power systems research*, v. 42, n. 2, p. 153–163, 1997.
- Wolsey, L. - *Integer Programming*, v. 32, John Wiley & Sons, 2000.
- Zadeh, L. A. - Fuzzy sets, *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.
- Zimmermann, H. - *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*, Kluwer Academic Publishers, 2001.

Apêndice A

Regras *Fuzzy*

Abaixo são apresentadas todas as regras *fuzzy* utilizadas no desenvolvimento do sistema *fuzzy* usado na metodologia proposta neste trabalho. Onde:

- C: o custo da linha
- N: o valor de n_{ij}
- MP: Muito Pequeno
- PQ: Pequeno
- MD: Médio
- GR: Grande
- MG: Muito Grande

01 - SE (N É MP) E (C É MP) ENTÃO *Ramificar*

02 - SE (N É MP) E (C É PQ) ENTÃO *Ramificar*

03 - SE (N É MP) E (C É MD) ENTÃO *Ramificar*

04 - SE (N É MP) E (C É GR) ENTÃO *Ramificar*

05 - SE (N É MP) E (C É MG) ENTÃO *Ramificar*

06 - SE (N É PQ) E (C É MP) ENTÃO *Ramificar*

07 - SE (N É PQ) E (C É PQ) ENTÃO *Ramificar*

08 - SE (N É PQ) E (C É MD) ENTÃO *Ramificar*

09 - SE (N É PQ) E (C É GR) ENTÃO *Ramificar*

10 - SE (N É PQ) E (C É MG) ENTÃO *Ramificar*

11 - SE (N É MD) E (C É MP) ENTÃO *Não Ramificar*

12 - SE (N É MD) E (C É PQ) ENTÃO *Não Ramificar*

13 - SE (N É MD) E (C É MD) ENTÃO *Ramificar*

14 - SE (N É MD) E (C É GR) ENTÃO *Ramificar*

15 - SE (N É MD) E (C É MG) ENTÃO *Ramificar*

16 - SE (N É GR) E (C É MP) ENTÃO *Não Ramificar*

17 - SE (N É GR) E (C É PQ) ENTÃO *Não Ramificar*

18 - SE (N É GR) E (C É MD) ENTÃO *Não Ramificar*

19 - SE (N É GR) E (C É GR) ENTÃO *Ramificar*

20 - SE (N É GR) E (C É MG) ENTÃO *Ramificar*

21 - SE (N É MG) E (C É MP) ENTÃO *Não Ramificar*

22 - SE (N É MG) E (C É PQ) ENTÃO *Não Ramificar*

23 - SE (N É MG) E (C É MD) ENTÃO *Não Ramificar*

24 - SE (N É MG) E (C É GR) ENTÃO *Ramificar*

25 - SE (N É MG) E (C É MG) ENTÃO *Ramificar*

Apêndice B

Dados dos Sistemas Elétricos Testados

B.1 Sistema de Garver 6 Barras

Os dados deste sistema foram extraídos de Garver (1970). Os dados das barras encontram-se na Tabela B.1 onde são apresentadas a geração máxima (g) e demanda (d) em *MW* de cada barra.

Tabela B.1: Garver - Dados de Barras

Barra	g	d
1	0,50	0,80
2	0,00	2,40
3	1,65	0,40
4	0,00	1,60
5	0,00	2,40
6	5,45	0,00

Os dados das linhas (existentes e candidatas) encontram-se na Tabela B.2, onde n_{ij}^0 é o número de linhas existentes na configuração inicial, x_{ij} é a reatância do ramo $i - j$, \bar{f}_{ij} é o fluxo máximo de potência entre $i - j$ em MW e c_{ij} é o custo de instalação do equipamento de transmissão e está em (10^3 US\$).

Tabela B.2: Garver - Dados de Linhas

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
1	2	1	0,40	1,00	40,00
1	3	0	0,38	1,00	38,00
1	4	1	0,60	0,80	60,00
1	5	1	0,20	1,00	20,00
1	6	0	0,68	0,70	68,00
2	3	1	0,20	1,00	20,00
2	4	1	0,40	1,00	40,00
2	5	0	0,31	1,00	31,00
2	6	0	0,30	1,00	30,00
3	4	0	0,59	0,82	59,00
3	5	1	0,20	1,00	20,00
3	6	0	0,48	1,00	48,00
4	5	0	0,63	0,75	63,00
4	6	0	0,30	1,00	30,00
5	6	0	0,61	0,78	61,00

B.2 Dados do Sistema Sul Brasileiro

Os dados das barras encontram-se na Tabela B.3 onde são apresentadas a geração máxima (g) e demanda (d) em *MW* de cada barra.

Tabela B.3: Sul - Dados de Barras

Barra	g	d
1	0,00	0,00
2	0,00	4,43
3	0,00	0,00
4	0,00	3,01
5	0,00	2,38
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,72
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	5,12
13	0,00	1,86
14	12,57	0,00
15	0,00	0,00
16	20,00	0,00
17	10,50	0,00
18	0,00	0,00
19	16,70	0,00
20	0,00	10,91
21	0,00	0,00
22	0,00	0,82
23	0,00	4,58
24	0,00	4,78
25	0,00	0,00
26	0,00	2,32
27	2,20	0,00
28	8,00	0,00
29	0,00	0,00
30	0,00	0,00
31	7,00	0,00

Tabela B.4: Sul - Dados de Barras (continuação)

Barra	g	d
32	5,00	0,00
33	0,00	2,29
34	7,48	0,00
35	0,00	2,16
36	0,00	0,90
37	3,00	0,00
38	0,00	2,16
39	6,00	0,00
40	0,00	2,62
41	0,00	0,00
42	0,00	16,08
43	0,00	0,00
44	0,00	0,79
45	0,00	0,87
46	7,00	0,00

Os dados das linhas (existentes e candidatas) encontram-se na Tabela B.5, onde n_{ij}^0 é o número de linhas existentes na configuração inicial, x_{ij} é a reatância do ramo $i - j$, \bar{f}_{ij} é o fluxo máximo de potência entre $i - j$ em MW e c_{ij} é o custo de instalação do equipamento de transmissão e está em (10^3 US\$).

Tabela B.5: Sul - Dados de Linhas

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
1	7	1	0,06	2,70	4349,00
1	2	2	0,11	2,70	7076,00
4	9	1	0,09	2,70	6217,00
5	9	1	0,12	2,70	7732,00
5	8	1	0,11	2,70	7480,00
7	8	1	0,10	2,70	6823,00
4	5	2	0,06	2,70	4046,00
2	5	2	0,03	2,70	2581,00
8	13	1	0,13	2,40	8793,00
9	14	2	0,18	2,20	11267,00
12	14	2	0,07	2,70	5106,00
14	18	2	0,15	2,40	9803,00
13	18	1	0,18	2,20	11570,00
13	20	1	0,11	2,70	7126,00
18	20	1	0,20	2,00	12732,00
19	21	1	0,03	15,00	32632,00
16	17	1	0,01	20,00	10505,00
17	19	1	0,01	20,00	8715,00
14	26	1	0,16	2,20	10409,00
14	22	1	0,08	2,70	5712,00
22	26	1	0,08	2,70	5409,00
20	23	2	0,09	2,70	6268,00
23	24	2	0,08	2,70	5308,00
26	27	2	0,08	2,70	5662,00
24	34	1	0,16	2,20	10611,00
24	33	1	0,14	2,40	9399,00
33	34	1	0,13	2,70	8288,00
27	36	1	0,09	2,70	6167,00
27	38	2	0,21	2,00	13237,00
36	37	1	0,11	2,70	7025,00
34	35	2	0,05	2,70	3591,00
35	38	1	0,20	2,00	12631,00

Tabela B.6: Sul - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
37	39	1	0,03	2,70	2329,00
37	40	1	0,13	2,70	8389,00
37	42	1	0,21	2,00	13388,00
39	42	3	0,20	2,00	12934,00
40	42	1	0,09	2,70	6268,00
38	42	3	0,09	2,70	6116,00
32	43	1	0,03	14,00	35957,00
42	44	1	0,12	2,70	7934,00
44	45	1	0,19	2,00	11924,00
19	32	1	0,02	18,00	23423,00
46	19	1	0,02	18,00	26365,00
46	16	1	0,02	18,00	24319,00
18	19	1	0,01	6,00	8178,00
20	21	1	0,01	6,00	8178,00
42	43	1	0,01	6,00	8178,00
2	4	0	0,09	2,70	5965,00
14	15	0	0,04	2,70	2884,00
46	10	0	0,01	20,00	10889,00
4	11	0	0,22	2,40	14247,00
5	11	0	0,09	2,70	6167,00
46	6	0	0,01	20,00	16005,00
46	3	0	0,02	18,00	24319,00
16	28	0	0,02	18,00	26365,00
16	32	0	0,03	14,00	36213,00
17	32	0	0,02	17,00	27516,00
19	25	0	0,03	14,00	37748,00
21	25	0	0,02	20,00	21121,00
25	32	0	0,03	14,00	37109,00
31	32	0	0,00	20,00	7052,00
28	31	0	0,01	20,00	7819,00
28	30	0	0,01	20,00	8331,00
27	29	0	0,10	2,70	6672,00
26	29	0	0,05	2,70	3894,00
28	41	0	0,03	13,00	39283,00
28	43	0	0,04	12,00	46701,00
31	41	0	0,03	15,00	32632,00
32	41	0	0,03	14,00	35957,00
41	43	0	0,01	20,00	17284,00
40	45	0	0,22	1,80	13994,00
15	16	0	0,01	6,00	8178,00
46	11	0	0,01	6,00	8178,00
24	25	0	0,01	6,00	8178,00

Tabela B.7: Sul - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
29	30	0	0,01	6,00	8178,00
40	41	0	0,01	6,00	8178,00
2	3	0	0,01	6,00	8178,00
5	6	0	0,01	6,00	8178,00
9	10	0	0,01	6,00	8178,00

B.3 Dados do Sistema Colombiano

Os dados das barras encontram-se na Tabela B.8 onde são apresentadas a geração máxima (g) e demanda (d) em *MW* de cada barra.

Tabela B.8: Sistema Colombiano - Dados de Barras

Barra	g	d
1	2.40	0.00
2	1.65	4.87
3	0.00	5.87
4	0.00	0.00
5	0.40	3.51
6	0.34	0.00
7	1.36	4.48
8	2.30	5.06
9	0.00	5.20
10	0.00	0.89
11	1.08	2.20
12	0.47	0.00
13	0.00	2.60
14	0.00	0.00
15	0.00	5.63
16	0.00	3.52
17	0.35	2.03
18	5.40	0.54
19	13.40	0.29
20	0.45	3.02
21	0.00	2.77
22	2.00	0.79
23	0.00	3.02
24	1.50	0.00
25	0.86	0.00
26	0.70	0.00
27	0.00	3.97
28	0.14	4.86
29	6.18	5.06
30	0.00	2.00

Tabela B.9: Sistema Colombiano - Dados de Barras (continuação)

Barra	g	d
31	1.89	3.92
32	0.00	1.88
33	0.00	2.47
34	0.00	1.16
35	2.00	2.57
36	0.44	1.67
37	1.38	1.76
38	0.15	1.30
39	0.15	2.68
40	3.05	0.00
41	1.00	0.82
42	0.00	1.52
43	0.00	0.53
44	0.23	3.85
45	12.08	0.00
46	1.50	1.82
47	0.00	0.62
48	8.85	8.96
49	0.00	1.93
50	2.40	6.33
51	0.00	1.90
52	0.00	0.56
53	3.20	0.00
54	0.00	1.14
55	0.40	3.34
56	0.00	0.00
57	1.30	3.37
58	1.90	0.00
59	1.60	0.00
60	12.16	0.00
61	1.55	0.00
62	0.00	0.00
63	10.90	0.53
64	2.80	1.32
65	0.00	1.98
66	3.00	0.00
67	4.74	3.98
68	0.00	0.00

Tabela B.10: Sistema Colombiano - Dados de Barras (continuação)

Barra	g	d
69	0.00	1.07
70	1.80	0.00
71	4.24	4.71
72	0.00	0.00
73	0.00	0.00
74	0.00	0.00
75	0.00	0.00
76	0.40	0.00
77	0.00	0.83
78	0.00	0.54
79	3.00	1.47
80	0.00	0.88
81	0.00	0.00
82	0.00	0.00
83	0.00	0.00
84	5.00	0.00
85	0.00	0.00
86	8.50	0.00
87	0.00	0.00
88	3.00	0.00
89	0.00	0.00
90	0.00	0.00
91	0.00	0.00
92	0.00	0.00
93	0.00	0.00

Os dados das linhas (existentes e candidatas) encontram-se na Tabela B.11, onde n_{ij}^0 é o número de linhas existentes na configuração inicial, x_{ij} é a reatância do ramo $i - j$, \bar{f}_{ij} é o fluxo máximo de potência entre $i - j$ em MW e c_{ij} é o custo de instalação do equipamento de transmissão e está em (10^6 US\$).

Tabela B.11: Sistema Colombiano - Dados de Linhas

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	f_{ij}	c_{ij}
52	88	0	0.10	3.00	34.19
43	88	0	0.18	2.50	39.56
57	81	0	0.02	5.50	58.89
73	82	0	0.04	5.50	97.96
27	89	0	0.03	4.50	13.27
74	89	0	0.00	5.50	14.57
73	89	0	0.02	5.50	66.65
79	83	0	0.05	3.50	15.40
8	67	0	0.22	2.50	29.20
39	86	0	0.05	3.50	9.88
25	28	1	0.06	3.20	9.77
25	29	1	0.06	3.20	9.88
13	14	2	0.00	3.50	3.90
13	20	1	0.02	3.50	5.74
13	23	1	0.03	3.50	7.01
14	31	2	0.13	2.50	18.62
14	18	2	0.15	2.50	20.23
14	60	2	0.11	3.00	15.98
2	4	2	0.03	3.50	6.66
2	9	1	0.01	3.50	5.28
2	83	1	0.02	5.70	5.97
9	83	1	0.02	4.00	5.97
15	18	1	0.04	4.50	7.93
15	17	1	0.05	3.20	9.42
15	20	1	0.05	3.20	9.65
15	76	1	0.04	3.20	9.88
15	24	1	0.01	3.50	5.28
37	61	1	0.01	3.50	4.94
19	61	2	0.11	2.50	16.09
61	68	1	0.08	2.50	12.41
37	68	1	0.05	3.20	9.65
40	68	1	0.13	3.20	18.16
12	75	1	0.06	3.20	11.49
24	75	1	0.02	3.50	5.51
35	36	1	0.21	2.50	27.36
27	35	1	0.15	2.50	22.07
35	44	2	0.14	2.50	20.35
38	68	1	0.04	3.50	7.93

Tabela B.12: Sistema Colombiano - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
38	39	1	0.03	3.50	6.32
27	80	1	0.02	3.50	7.01
44	80	1	0.10	2.50	17.59
56	81	1	0.01	5.50	32.86
45	54	1	0.09	3.20	13.56
45	50	2	0.01	3.50	4.36
10	78	1	0.01	3.50	4.94
7	78	1	0.00	3.50	4.13
30	64	1	0.15	2.50	20.58
30	65	1	0.09	2.50	13.68
30	72	2	0.02	3.50	5.51
55	57	1	0.02	6.00	46.81
57	84	1	0.01	6.00	26.66
55	84	1	0.01	6.00	26.66
56	57	2	0.02	6.00	62.62
9	77	1	0.02	3.50	5.86
77	79	1	0.01	3.50	5.17
1	59	2	0.02	3.50	6.20
59	67	2	0.12	2.50	16.67
8	59	2	0.11	2.50	15.40
1	3	1	0.10	2.50	15.86
3	71	1	0.01	4.50	5.17
3	6	1	0.05	3.50	9.42
55	62	1	0.03	5.50	70.99
47	52	1	0.06	3.50	10.57
51	52	1	0.09	2.50	12.87
29	31	2	0.10	2.50	32.98
41	42	1	0.01	3.50	4.71
40	42	1	0.02	3.50	5.17
46	53	2	0.10	2.50	14.60
46	51	1	0.11	2.50	16.32
69	70	2	0.02	3.50	6.20
66	69	2	0.12	2.50	17.13
9	69	2	0.11	3.50	15.75
60	69	2	0.09	3.50	13.68
31	32	1	0.03	3.50	6.55
32	34	1	0.05	3.50	9.77
16	18	1	0.06	3.50	10.92
16	23	1	0.02	3.50	6.89

Tabela B.13: Sistema Colombiano - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
16	21	1	0.03	3.50	6.89
31	34	1	0.08	2.50	12.41
31	33	2	0.02	3.50	6.43
31	60	2	0.19	2.50	25.98
31	72	2	0.02	3.50	6.32
47	54	2	0.10	2.50	14.25
47	49	2	0.09	2.50	13.56
18	58	2	0.02	3.50	5.74
18	20	1	0.05	3.50	9.54
18	66	2	0.07	3.50	11.38
18	21	1	0.03	3.50	7.47
18	22	1	0.02	3.50	6.43
19	22	1	0.07	3.50	11.72
4	5	3	0.00	3.50	4.25
5	6	2	0.01	3.50	4.48
17	23	1	0.09	2.50	12.99
17	76	1	0.00	3.50	3.90
12	17	1	0.01	3.50	4.71
1	71	2	0.08	2.50	14.37
1	8	1	0.08	2.50	13.22
1	11	1	0.08	2.50	12.53
4	36	2	0.09	2.50	13.56
19	58	1	0.08	3.20	11.72
27	64	1	0.03	3.50	6.78
27	28	1	0.02	3.50	6.20
27	44	1	0.09	2.50	16.32
26	27	1	0.07	3.50	10.92
27	29	1	0.02	3.50	5.05
19	66	1	0.05	3.50	9.31
73	74	1	0.02	6.00	58.28
64	65	1	0.07	3.50	11.84
29	64	1	0.01	3.50	4.36
4	34	2	0.10	2.70	14.94
34	70	2	0.04	3.50	8.27
33	34	1	0.11	3.20	16.32
8	71	1	0.01	4.00	4.48
54	63	3	0.05	3.20	9.08
48	63	1	0.02	3.50	6.32
67	68	2	0.17	2.50	22.07

Tabela B.14: Sistema Colombiano - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
39	68	1	0.01	3.50	5.28
8	9	1	0.02	3.50	5.97
79	87	1	0.01	3.50	4.48
8	87	1	0.01	3.50	5.17
39	43	1	0.12	2.50	16.55
41	43	1	0.11	2.50	16.32
23	24	1	0.03	3.50	6.32
21	22	1	0.05	3.50	9.88
26	28	1	0.05	3.50	9.31
28	29	1	0.03	3.50	6.78
6	10	1	0.03	3.50	7.58
33	72	1	0.02	3.50	6.20
39	40	2	0.10	2.50	16.21
12	76	1	0.01	3.50	4.71
48	54	3	0.04	3.50	8.04
50	54	2	0.09	2.50	12.87
62	73	1	0.03	7.50	73.16
49	53	2	0.10	2.50	14.25
40	41	1	0.02	3.50	5.74
45	81	1	0.03	4.50	13.27
64	74	1	0.03	5.00	13.27
54	56	3	0.03	4.50	13.27
60	62	3	0.03	4.50	13.27
72	73	2	0.03	5.00	13.27
19	82	1	0.03	4.50	13.27
55	82	1	0.03	5.50	77.50
62	82	1	0.01	6.00	31.00
83	85	2	0.03	4.50	13.27
82	85	1	0.03	7.00	89.90
19	86	1	0.15	3.00	20.92
68	86	1	0.04	3.50	8.27
7	90	2	0.01	3.50	4.25
3	90	1	0.01	3.50	4.59
90	91	1	0.03	5.50	13.27
85	91	1	0.01	6.00	40.30
11	92	1	0.03	4.50	13.27
1	93	1	0.03	4.50	13.27
92	93	1	0.01	6.00	30.07
91	92	1	0.01	6.00	27.59

B.4 Dados do Sistema Norte-Nordeste Brasileiro

Os dados das barras encontram-se na Tabela B.15 onde são apresentadas a geração máxima (g) e demanda (d) em *MW* de cada barra.

Tabela B.15: Norte-Nordeste - Dados de Barras

Barra	g	d
1	0,00	18,57
2	40,48	0,00
3	0,00	0,00
4	5,17	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,31
8	4,03	0,00
9	4,65	0,00
10	5,38	0,00
11	22,00	0,00
12	22,57	0,00
13	45,10	0,00
14	5,42	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,86
20	0,00	1,25
21	0,00	7,22
22	0,00	2,91
23	0,00	0,58
24	0,00	1,59
25	0,00	15,02
26	0,00	0,47
27	0,00	3,78
28	0,00	1,89
29	0,00	0,47
30	0,00	1,89
31	0,00	1,10

Tabela B.16: Norte-Nordeste - Dados de Barras (continuação)

Barra	g	d
32	0,00	0,00
33	0,00	0,00
34	0,00	0,28
35	16,35	0,00
36	0,00	2,25
37	1,69	0,00
38	0,00	0,00
39	0,00	1,86
40	0,00	12,01
41	0,00	5,20
42	0,00	3,41
43	0,01	0,00
44	0,00	40,22
45	0,00	0,00
46	0,00	2,05
47	0,00	0,00
48	0,00	3,47
49	0,00	7,77
50	0,00	51,89
51	0,00	2,90
52	0,00	7,07
53	0,00	0,00
54	0,00	0,00
55	0,00	0,00
56	0,00	0,00
57	0,00	0,00
58	0,00	0,00
59	0,00	0,00
60	0,00	0,00
61	0,00	0,00
62	0,00	0,00
63	0,00	0,00
64	0,00	0,00
65	0,00	0,00
66	0,00	0,00
67	12,42	0,00
68	8,88	0,00
69	9,02	0,00
70	0,00	0,00
71	0,00	0,00
72	0,00	0,00

Tabela B.17: Norte-Nordeste - Dados de Barras (continuação)

Barra	g	d
73	0,00	0,00
74	0,00	0,00
75	0,00	0,00
76	0,00	0,00
77	0,00	0,00
78	0,00	0,00
79	0,00	0,00
80	0,00	0,00
81	0,00	0,00
82	0,00	0,00
83	0,00	0,00
84	0,00	0,00
85	0,00	4,87
86	0,00	0,00
87	0,00	0,00

Os dados das linhas (existentes e candidatas) encontram-se na Tabela B.18, onde n_{ij}^0 é o número de linhas existentes na configuração inicial, x_{ij} é a reatância do ramo $i - j$, \bar{f}_{ij} é o fluxo máximo de potência entre $i - j$ em MW e c_{ij} é o custo de instalação do equipamento de transmissão e está em (10^3 US\$).

Tabela B.18: Norte-Nordeste - Dados de Linhas

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
1	2	2	0,04	10,00	44056,00
2	4	0	0,04	10,00	48880,00
2	60	0	0,04	10,00	52230,00
2	87	1	0,03	10,00	31192,00
3	71	0	0,01	32,00	92253,00
3	81	0	0,00	32,00	60153,00
3	83	0	0,00	32,00	53253,00
3	87	0	0,01	12,00	21232,00
4	5	1	0,04	10,00	52230,00
4	6	0	0,05	10,00	58260,00
4	32	0	0,02	3,00	7510,00
4	60	0	0,02	10,00	26770,00
4	68	0	0,01	10,00	10020,00
4	69	0	0,02	10,00	20740,00
4	81	0	0,01	12,00	21232,00
4	87	1	0,02	10,00	26502,00
5	6	1	0,02	10,00	29852,00
5	38	2	0,01	6,00	8926,00
5	56	0	0,02	10,00	29182,00
5	58	0	0,02	10,00	27440,00
5	60	0	0,03	10,00	32130,00
5	68	0	0,04	10,00	48880,00
5	70	0	0,05	10,00	55580,00
5	80	0	0,01	12,00	21232,00
6	7	1	0,03	10,00	35212,00
6	37	1	0,02	3,00	7510,00
6	67	0	0,05	10,00	55580,00
6	68	0	0,05	10,00	56920,00
6	70	0	0,04	10,00	44860,00
6	75	0	0,01	12,00	21232,00
7	8	1	0,02	10,00	29048,00
7	53	0	0,05	10,00	54240,00

Tabela B.19: Norte-Nordeste - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
7	62	0	0,03	10,00	31460,00
8	9	1	0,02	10,00	23420,00
8	12	0	0,04	10,00	47540,00
8	17	0	0,04	10,00	53570,00
8	53	1	0,04	12,00	44190,00
8	62	0	0,04	10,00	51560,00
8	73	0	0,01	12,00	21232,00
9	10	1	0,00	10,00	7340,00
10	11	1	0,01	10,00	17390,00
11	12	1	0,00	12,00	6670,00
11	15	1	0,03	12,00	36284,00
11	17	1	0,03	12,00	35078,00
11	53	1	0,03	10,00	31326,00
12	13	1	0,00	12,00	7340,00
12	15	1	0,03	12,00	31594,00
12	17	1	0,02	12,00	30388,00
12	35	2	0,01	6,00	8926,00
12	84	0	0,01	12,00	21232,00
13	14	0	0,01	12,00	10690,00
13	15	0	0,02	12,00	26770,00
13	17	0	0,02	12,00	28780,00
13	45	1	0,03	12,00	35480,00
13	59	1	0,02	12,00	28780,00
14	17	0	0,02	12,00	28780,00
14	45	0	0,02	12,00	28780,00
14	59	0	0,02	12,00	20070,00
15	16	2	0,02	12,00	24760,00
15	45	0	0,01	12,00	13906,00
15	46	1	0,01	6,00	8926,00
15	53	0	0,04	10,00	50890,00
16	44	4	0,01	6,00	8926,00
16	45	0	0,02	12,00	27440,00
16	61	0	0,01	10,00	16720,00
16	77	0	0,01	12,00	21232,00
17	18	2	0,02	12,00	21678,00
17	59	0	0,02	12,00	21678,00
18	50	4	0,01	6,00	8926,00
18	59	1	0,03	12,00	40170,00
18	74	0	0,01	12,00	21232,00
19	20	1	0,09	1,70	5885,00
19	22	1	0,19	1,70	11165,00

Tabela B.20: Norte-Nordeste - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
20	21	1	0,07	3,00	6960,00
20	21	1	0,10	1,70	6435,00
20	38	2	0,14	3,00	12840,00
20	56	0	0,01	6,00	8926,00
20	66	0	0,21	1,70	12210,00
21	57	0	0,01	6,00	8926,00
22	23	1	0,15	1,70	9130,00
22	37	2	0,20	1,70	11935,00
22	58	0	0,02	3,00	7510,00
23	24	1	0,17	1,70	9900,00
24	25	1	0,22	1,70	12705,00
24	43	0	0,02	3,00	7510,00
25	26	2	0,11	3,00	29636,00
25	26	3	0,17	1,70	10120,00
25	55	0	0,01	6,00	8926,00
26	27	2	0,14	3,00	25500,00
26	27	3	0,22	1,70	12760,00
26	29	1	0,11	1,70	6710,00
26	54	0	0,01	6,00	8926,00
27	28	3	0,08	1,70	5335,00
27	35	2	0,14	3,00	25000,00
27	53	1	0,01	6,00	8926,00
28	35	3	0,17	1,70	9900,00
29	30	1	0,07	1,70	4510,00
30	31	1	0,06	1,70	4235,00
30	63	0	0,02	3,00	7510,00
31	34	1	0,14	1,70	8525,00
32	33	0	0,20	1,70	11660,00
33	67	0	0,02	3,00	7510,00
34	39	2	0,12	1,70	7150,00
34	39	2	0,30	0,80	6335,00
34	41	2	0,10	1,70	6215,00
35	46	4	0,22	1,70	12705,00
35	47	2	0,13	1,70	8085,00
35	51	3	0,16	1,70	9625,00
36	39	2	0,12	1,70	7315,00
36	46	2	0,06	1,70	4235,00
39	42	1	0,10	1,70	6105,00
39	86	0	0,02	3,00	7510,00
40	45	1	0,01	6,00	8926,00
40	46	3	0,09	1,70	5500,00
41	64	0	0,02	3,00	7510,00
42	44	2	0,07	1,70	4565,00

Tabela B.21: Norte-Nordeste - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	f_{ij}	c_{ij}
42	85	2	0,05	1,70	3465,00
43	55	0	0,03	10,00	31326,00
43	58	0	0,03	10,00	38160,00
44	46	3	0,17	1,70	10010,00
47	48	2	0,20	1,70	11660,00
48	49	1	0,08	1,70	4895,00
48	50	2	0,03	1,70	2090,00
48	51	2	0,22	1,70	12760,00
49	50	1	0,08	1,70	5335,00
51	52	2	0,06	1,70	3795,00
52	59	1	0,01	6,00	8926,00
53	54	0	0,03	10,00	32120,00
53	70	0	0,04	10,00	44860,00
53	76	0	0,01	12,00	21232,00
53	86	0	0,04	10,00	46870,00
54	55	0	0,02	10,00	25028,00
54	58	0	0,05	10,00	60940,00
54	63	0	0,02	10,00	25430,00
54	70	0	0,04	10,00	43520,00
54	79	0	0,01	12,00	21232,00
56	57	0	0,01	10,00	16050,00
58	78	0	0,01	12,00	21232,00
60	66	0	0,02	3,00	7510,00
60	87	0	0,04	10,00	45530,00
61	64	0	0,02	10,00	23420,00
61	85	0	0,02	3,00	7510,00
61	86	0	0,01	10,00	18060,00
62	67	0	0,05	10,00	55580,00
62	68	0	0,06	10,00	66300,00
62	72	0	0,01	12,00	21232,00
63	64	0	0,03	10,00	35480,00
65	66	0	0,31	1,70	18260,00
65	87	0	0,02	3,00	7510,00
67	68	0	0,03	10,00	35480,00
67	69	0	0,02	10,00	26100,00
67	71	0	0,01	12,00	21232,00
68	69	0	0,01	10,00	18060,00
68	83	0	0,01	12,00	21232,00
68	87	0	0,02	10,00	23240,00
69	87	0	0,01	10,00	18060,00
70	82	0	0,01	12,00	21232,00
71	72	0	0,01	32,00	125253,00
71	75	0	0,01	32,00	125253,00
71	83	0	0,01	32,00	80253,00

Tabela B.22: Norte-Nordeste - Dados de Linhas (continuação)

De	Para	n_{ij}^0	x_{ij}	\bar{f}_{ij}	c_{ij}
72	73	0	0,01	32,00	116253,00
72	83	0	0,01	32,00	149253,00
73	74	0	0,01	32,00	149253,00
73	75	0	0,01	32,00	149253,00
73	84	0	0,01	32,00	107253,00
74	84	0	0,01	32,00	125253,00
75	76	0	0,02	32,00	185253,00
75	81	0	0,01	32,00	131253,00
75	82	0	0,01	32,00	101253,00
75	83	0	0,01	32,00	128253,00
76	77	0	0,01	32,00	149253,00
76	82	0	0,01	32,00	101253,00
76	84	0	0,01	32,00	70953,00
77	79	0	0,02	32,00	173253,00
77	84	0	0,01	32,00	132753,00
78	79	0	0,01	32,00	137253,00
78	80	0	0,01	32,00	62253,00
79	82	0	0,01	32,00	98253,00
80	81	0	0,01	32,00	117753,00
80	82	0	0,01	32,00	125253,00
80	83	0	0,01	32,00	110253,00
81	83	0	0,00	32,00	23253,00
82	84	0	0,01	32,00	155253,00

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)