

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

1210001127



Nº 39

ALGORITMO HEURÍSTICO INTEGRADO
APLICADO AO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS
DE TRANSMISSÃO A LONGO PRAZO

ALUNO: CARLOS ROBERTO MENDONÇA ROCHA
ORIENTADOR: RUBÉN A. ROMERO LÁZARO

Te.1127

CARLOS ROBERTO MENDONÇA ROCHA

**“ALGORITMO HEURÍSTICO INTEGRADO
APLICADO AO PLANEJAMENTO DE
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO A LONGO
PRAZO”**

CARLOS ROBERTO MENDONÇA ROCHA

**"ALGORITMO HEURÍSTICO INTEGRADO
APLICADO AO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS
DE TRANSMISSÃO A LONGO PRAZO"**

Proc. 17/2000 NRD-003/2000

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA <i>24/01/2000</i>	DATA DE TOMBO <i>31/3/2000</i>
REGISTRADO POR <i>Lelia</i>	TOMBO <i>1127</i>
AQUISIÇÃO <i>Deacap</i> <i>R\$10,00</i>	CLASSIFICAÇÃO <i>R 67-3a</i>

1210001127



Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

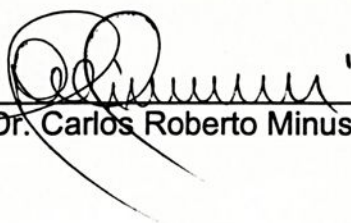
Orientador: Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

Ilha Solteira - SP
Novembro/1999

“Planejamento de Sistemas de Transmissão Usando um Algoritmo Heurístico Construtivo Integrado”

Carlos Roberto Mendonça Rocha

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).

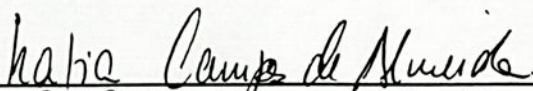


Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi - Coordenador

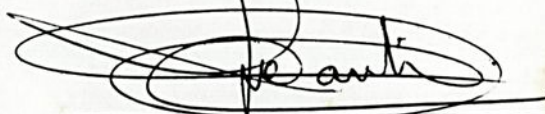
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro - orientador



Prof.ª Dr.ª Kátia Campos de Almeida



Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

Ilha Solteira – SP, outubro de 1999



AGRADECIMENTOS

- Ao professor Rubén Augusto Romero Lázaro pelo estímulo, pela orientação e pelo profissionalismo;
- Ao professor José Roberto Sanches Mantovani e à professora Katia Campos de Almeida (EEL-UFSC) pela grande ajuda na correção do texto da tese e pelas valiosas sugestões, assim como a boa vontade dispensada;
- Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS;
- Aos colegas do DEE;
- À secretaria de Pós - Graduação (ao Arlindo e à Fátima);
- Um agradecimento a Fapesp, que apoiou esta pesquisa através do processo 97/02741-3

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS, **1**

LISTA DE GRÁFICOS, **1**

LISTA DE TABELAS, **2**

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS, **3**

RESUMO/ABSTRACT, **4**

Capítulo 1

1. Introdução, **5**

Capítulo 2

2. Modelagem do Problema de Planejamento de Sistema de Transmissão, **9**

2.1 Modelo de Transportes, **12**

2.2 Modelo Híbrido, **15**

2.3 Modelo DC, **20**

2.4 Modificações na Modelagem Básica, **22**

Capítulo 3

3. Algoritmos Heurísticos usados no Planejamento de Sistemas de Transmissão, **25**

3.1. Heurísticas Construtivas usando o Modelo de Transportes, **26**

3.1.1 O Algoritmo de Garver, **27**

3.2. Heurísticas Construtivas usando o Modelo DC, **30**

3.2.1 O Algoritmo de Mínimo Esforço, **31**

3.2.2 O Algoritmo de Mínimo Corte de Carga, **36**

3.3 Heurísticas Construtivas que usam Modelo Misto, **39**

3.3.1 O Algoritmo de Villasana-Garver, **40**

3.3.2 O Algoritmo de Rede Marginal de Levi-Calovic, **43**

3.4 Outros Algoritmos usados no Problema de Planejamento, **49**



Capítulo 4

4. Algoritmo Heurístico Integrado, **52**

4.1 Introdução, **52**

4.2 Esquema básico do Algoritmo Heurístico Integrado, **53**

4.3 Geração de um conjunto de configurações com AHI usando uma estratégia tipo Branch and Bound, **58**

4.4 Modificação Adicional no AHI, **60**

Capítulo 5

5. Testes obtidos usando os Algoritmos Heurísticos e o Algoritmo Integrado, **62**

5.1 Testes com os Algoritmos Heurísticos, **62**

5.2 Testes com o Algoritmo Heurístico Integrado Básico, **82**

5.3 Testes com o Algoritmo Heurístico Integrado Modificado, **85**

5.4 Testes com a Modificação Adicional no AHI, **94**

Capítulo 6

6. Conclusões, **100**

Anexos

A. Dados dos sistemas testados, **101**

B. Equacionamento do indicador de sensibilidade de Mínimo Esforço, **113**

C. Equacionamento do indicador de sensibilidade de Mínimo Corte de Carga, **119**

D. Bibliografia, **125**

E. Artigos Publicados, **127**



LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Função de Custo na Rede Marginal.....	47
Figura 2-	Funcionamento do Algoritmo Heurístico Integrado.	53
Figura 3-	Sistema de 7 Barras Ilustrativo (1).....	55
Figura 4-	Sistema de 7 Barras Ilustrativo (2).....	55
Figura 5-	Sistema de 7 Barras Ilustrativo (3).....	56
Figura 6-	Exemplo Ilustrativo – Estratégia de B&B e o Algoritmo Heurístico Integrado (1).....	58
Figura 7-	Exemplo Ilustrativo – Estratégia de B&B e o Algoritmo Heurístico Integrado (2).....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-	Investimento para o Sistema de 6 Barras sem reprogramação da geração.....	65
Gráfico 2-	Investimento para o Sistema de 6 Barras com reprogramação da geração.....	67
Gráfico 3-	Investimento para o Sistema de 46 Barras sem reprogramação da geração.....	71
Gráfico 4-	Investimento para o Sistema de 46 Barras com reprogramação da geração.....	74
Gráfico 5-	Investimento para o Sistema de 87 Barras	82
Gráfico 6-	Investimento para o Sistema de 6 Barras.....	88
Gráfico 7-	Investimento para o Sistema de 46 Barras.....	89
Gráfico 8-	Investimento para o Sistema de 87 Barras (Algoritmo Heurístico Integrado).....	99



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Sistema de 6 Barras sem reprogramação da geração.....	64
Tabela 2 -	Sistema de 6 Barras sem reprogramação da geração Usando I.S. alternativo.....	64
Tabela 3 -	Sistema de 6 Barras sem reprogramação da geração Algoritmo de Villasana-Garver.....	65
Tabela 4 -	Sistema de 6 Barras com reprogramação da geração.....	66
Tabela 5 -	Sistema de 6 Barras com reprogramação da geração Usando I.S. alternativo.....	66
Tabela 6 -	Sistema de 6 Barras com reprogramação da geração Algoritmo de Villasana-Garver.....	67
Tabela 7 -	Sistema de 46 Barras sem reprogramação da geração.....	68
Tabela 8 -	Sistema de 46 Barras sem reprogramação da geração Usando I.S. alternativo.....	69
Tabela 9 -	Sistema de 46 Barras sem reprogramação da geração Algoritmo de Villasana-Garver.....	70
Tabela 10 -	Sistema de 46 Barras com reprogramação da geração.....	72
Tabela 11 -	Sistema de 46 Barras com reprogramação da geração Usando I.S. alternativo.....	73
Tabela 12 -	Sistema de 46 Barras com reprogramação da geração Algoritmo de Villasana-Garver.....	74
Tabela 13 -	Sistema de 87 Barras sem reprogramação da geração utilizando o Método de Garver.....	75
Tabela 14 -	Sistema de 87 Barras sem reprogramação da geração utilizando o I.S. de Mínimo Corte de Carga.....	76
Tabela 15 -	Sistema de 87 Barras sem reprogramação da geração utilizando o I.S. de Mínimo Esforço com modificação.....	77
Tabela 16 -	Sistema de 87 Barras sem reprogramação da geração utilizando o I.S. de Mínimo Esforço original.....	78
Tabela 17 -	Sistema de 87 Barras sem reprogramação da geração utilizando o I.S. alternativo de Mínimo Corte de Carga.....	79
Tabela 18 -	Sistema de 87 Barras sem reprogramação da geração utilizando o I.S. alternativo de Mínimo Esforço com modificação.....	80
Tabela 19 -	Sistema de 87 Barras sem reprogramação da geração utilizando o I.S. alternativo de Mínimo Esforço original.....	81
Tabela 20 -	Sistema de 6 Barras sem reprogramação da geração Algoritmo Heurístico Integrado.....	83
Tabela 21 -	Sistema de 6 Barras com reprogramação da geração Algoritmo Heurístico Integrado.....	83
Tabela 22 -	Sistema de 46 Barras sem reprogramação da geração Algoritmo Heurístico Integrado.....	84
Tabela 23 -	Sistema de 46 Barras com reprogramação da geração Algoritmo Heurístico Integrado.....	85
Tabela 24 -	Sistema de 46 Barras sem reprogramação da geração Algoritmo Heurístico Integrado modificado.....	86
Tabela 25 -	Sistema de 46 Barras com reprogramação da geração Algoritmo Heurístico Integrado modificado.....	87
Tabela 26 -	Sistema de 6 Barras com reprogramação da geração Algoritmo Heurístico Integrado modificado.....	88
Tabela 27 -	Sistema de 87 Barras sem reprogramação da geração Configurações obtidas com as modificações adicionais no Algoritmo Heurístico Integrado - Fase 2.....	95



LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AHI = Algoritmo Heurístico Integrado;

Cir. = Circuito;

F2 = Após a Fase 2;

Inv. = Investimento;

I.S. = Indicador de Sensibilidade;

IS_{ij}^{mc} = Indicador de Sensibilidade do Método de Mínimo Corte de Carga referente ao circuito i-j;

IS_{ij}^{mcm} = Indicador de Sensibilidade alternativo do Método de Mínimo Corte de Carga referente ao circuito i-j;

IS_{ij}^{me} = Indicador de Sensibilidade do Método de Mínimo Esforço referente ao circuito i-j;

IS_{ij}^{mem} = Indicador de Sensibilidade alternativo do Método de Mínimo Esforço referente ao circuito i-j;

MCC = Método do Mínimo Corte de Carga;

MEM = Método do Mínimo Esforço Modificado;

MEO = Método do Mínimo Esforço Original;

MG = Método de Garver;

min = minimizar;

MLC = Método de Levi-Callovic;

mod. = modificação

PL = Programação Linear;

PLIM = Programação Linear Inteira Mista;

PNLIM = Programação Não Linear Inteira Mista;

repr. = reprogramação;

Sobre. = Sobrecarregado;

VILL-G = Método de Villasana-Garver.



RESUMO

Este trabalho apresenta o Algoritmo Heurístico Integrado, usado para o planejamento da expansão de sistemas de transmissão a longo prazo. O algoritmo usa, de maneira integrada, os indicadores de sensibilidade e as principais características de cinco algoritmos heurísticos construtivos considerados eficientes pela literatura especializada.

Na primeira parte do estudo, pesquisou-se os algoritmos que comporiam o Algoritmo Heurístico Integrado, verificando-se as características e a estrutura de operação de cada um. Na etapa seguinte, o Algoritmo Heurístico Integrado foi implementado e seu desempenho pôde ser observado através dos resultados experimentais obtidos. Os sistemas elétricos utilizados na simulação são amplamente conhecidos.

ABSTRACT

This work presents the Algorithm Integrated Heuristic, used for the planning of the long term expansion of transmission systems. The algorithm uses, of integrated way, the sensibility indicators and the main characteristics of five constructive algorithms heuristic efficient considered for the specialized literature.

In the first part of the study, it was researched the algorithms that would compose the Algorithm Integrated Heuristic, being verified the characteristics and the operation structure of each one. The algorithm Integrated Heuristic was implemented in the following stage and its acting could be observed through the obtained experimental results. The electric systems used in the simulation are known thoroughly.



Capítulo 1

Introdução

O problema de planejamento de sistemas de transmissão a longo prazo é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) que, além disto, apresenta o fenômeno da explosão combinatorial e que mereceu muita atenção de pesquisadores que usaram uma diversidade de métodos aproximados e de otimização para resolvê-lo. As principais dificuldades na resolução deste problema estão relacionadas com a natureza combinatorial do processo de planejamento que normalmente leva a um número explosivo de alternativas, inclusive no caso de sistemas de médio porte. Além disso, o problema de planejamento apresenta uma estrutura multimodal com um número muito elevado de ótimos locais o que leva a maioria dos métodos aproximados a parar numa solução ótima local e às vezes de pobre qualidade. Para contornar estes problemas foram apresentadas muitas alternativas na literatura especializada.

Este projeto apresenta o problema de planejamento estático da expansão dos sistemas de energia elétrica. Neste tipo de planejamento, dada uma configuração inicial e os dados de geração e a demanda do horizonte de planejamento (além de outros dados como limites de operação, custos e restrições de investimentos), tenta-se determinar o plano de expansão com um custo mínimo, isto é, deve-se determinar *onde* e *que* tipos de equipamentos devem ser instalados. Naturalmente este é um subproblema de um caso mais geral, chamado planejamento dinâmico da expansão onde, adicionalmente, deseja-se saber *quando* instalar estes novos equipamentos.

Como todo problema de otimização matemática, o problema de planejamento de sistemas de transmissão pode ser separado em duas partes claramente definidas: modelagem matemática e a técnica de solução escolhida para resolver esse modelo matemático. Assim, em todas as pesquisas apresentadas e discutidas no capítulo 3, sempre aparece evidente a modelagem



matemática e a técnica de solução adotada nos algoritmos desenvolvidos por diferentes pesquisadores.

Na literatura especializada existem três modelos ou formulações matemáticas para realizar a modelagem do problema de planejamento de sistemas de transmissão: modelo DC, modelo de transporte e modelo híbrido. Tradicionalmente, o modelo DC é considerado como sendo o modelo ideal para representar o problema de planejamento, sendo os outros, modelos relaxados ou simplificados do modelo DC. Para resolver estes modelos foram usadas várias técnicas que podem ser agrupadas em três grupos: *métodos aproximados* ou *heurísticos*, *métodos de otimização clássica* e *métodos de otimização combinatorial*. A modelagem do problema de planejamento de sistemas de transmissão é apresentada no capítulo 2.

Os *métodos de otimização clássica*, geralmente usando técnicas de decomposição matemática, apresentam a característica de que encontram a solução ótima do problema de planejamento e são muito eficientes em sistemas de pequeno e médio porte, mas para sistemas de grande porte ainda apresentam problemas do elevado esforço computacional e problemas de convergência.

Os *métodos de otimização combinatorial* como "Simulated Annealing", Algoritmos Genéticos, Busca Tabu, etc., foram aplicados com muito sucesso para resolver muitos problemas no campo da pesquisa operacional e também em alguns problemas de engenharia elétrica. Estes métodos apresentam a característica geral de que convergem para soluções ótimas ou quase ótimas, mas com esforço computacional elevado.

Os *métodos aproximados (heurísticos)* apresentam a vantagem de fornecer soluções de boa qualidade com esforços computacionais pequenos, mas os mesmos raramente encontram a solução ótima de sistemas reais e não fornecem informação da qualidade da solução obtida, isto é, o quão perto da solução ótima se encontra a solução obtida. Para sistemas de grande porte, como os do Norte-Nordeste brasileiro, no momento, somente os métodos heurísticos são amplamente usados pelas empresas elétricas. O motivo é



exatamente o esforço computacional, pois os métodos heurísticos são simples de implementar e muito rápidos.

Na presente pesquisa são analisados os principais algoritmos heurísticos construtivos usados no Problema de Planejamento de Sistema de Transmissão. Esses algoritmos são os seguintes:

- Algoritmo Heurístico de Garver;
- Algoritmo de Mínimo Corte de Carga;
- Algoritmo de Mínimo Esforço;.
- Algoritmo de Villasana - Garver;
- Algoritmo de Rede Marginal de Levi-Calovic.

No Capítulo 3 são analisados exaustivamente as principais características dos cinco algoritmos heurísticos construtivos, que no Capítulo 5, são testados isoladamente, usando os sistemas de 6, 46 e 87 barras, cujos dados se encontram no Anexo A.

No Capítulo 4 é apresentado um algoritmo heurístico integrado, que usa as principais características dos algoritmos heurísticos construtivos, apresentados no Capítulo 3. Inicialmente, é apresentado o algoritmo heurístico integrado (AHI) básico, depois são apresentadas versões melhoradas do AHI, que permitem encontrar um conjunto de configurações ou propostas de investimento de excelente qualidade. As versões melhoradas do AHI usam outro critério de desempenho, como novos indicadores de sensibilidade, em busca de um conjunto de propostas de investimento e propostas adequadas para evitar problemas de estagnação (adição de circuitos que não produzem redução do corte de carga do sistema) que, às vezes aparecem no planejamento de sistemas de grande porte quando são utilizados indicadores de sensibilidade como critério de adição de circuitos, em algoritmos heurísticos.



No Capítulo 5 são apresentados os resultados dos testes realizados usando o AHI proposto.

No Capítulo 6 são mencionadas as conclusões mais importantes.



Capítulo 2

Modelagem do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão

A resolução de todo problema de otimização em engenharia, compreende a implementação de dois processos consecutivos: a modelagem matemática e a técnica de solução escolhida para resolver esse modelo matemático. No problema de planejamento de sistemas de transmissão, um problema específico de otimização de sistemas de energia elétrica, também existe estas duas etapas: modelagem e técnica de solução. A modelagem matemática do problema de planejamento de sistemas de transmissão a longo prazo é apresentada neste capítulo, e as várias técnicas de solução são apresentadas no capítulo seguinte.

A modelagem matemática, consiste na representação de um problema da vida real através de um modelo matemático, que relaciona um conjunto de variáveis de decisão através de um conjunto de relações matemáticas que podem assumir formas e tipos variados. A modelagem matemática, pode ser uma representação exata ou simplificada do problema da vida real. Em geral, quanto mais exata é a modelagem matemática que representa um problema da vida real, então, mais complexa é a resolução deste modelo matemático. Assim, deve existir um compromisso entre a modelagem matemática adotada e a técnica de solução escolhida; a modelagem matemática deve representar de maneira adequada o problema da vida real e, além disso, deve permitir sua resolução por técnicas de solução disponíveis e com esforços computacionais aceitáveis. Neste contexto, o conceito de modelagem adequada varia com o tempo, porque modelos muito complexos podem se tornar adequados no futuro, com o aparecimento de novas técnicas de solução e/ou a fabricação de



computadores, muito mais velozes que os disponíveis atualmente. É também evidente, que a técnica de solução escolhida, encontra uma solução para o modelo matemático e não necessariamente para o problema na vida real.

Em planejamento de sistemas de transmissão, o problema da vida real é um sistema elétrico com uma topologia corrente e se deseja encontrar o plano de expansão ótima (construção de novos circuitos) para um horizonte de planejamento definido, isto é, onde e que tipo de circuitos devem ser construídos para que o sistema opere adequadamente num horizonte de planejamento, para um crescimento especificado da demanda. Nesse contexto, a modelagem matemática ideal para indicar a operação adequada seria a representação do problema através das relações matemáticas de fluxo de carga AC. Entretanto, em planejamento de sistemas de transmissão não é usada a modelagem matemática de fluxo de carga AC por vários motivos e os mais importantes são os seguintes: 1) a topologia inicial do sistema elétrico usado no planejamento é um sistema não conexo, isto é, o sistema apresenta um conjunto de barras isoladas ou ilhadas da parte principal do sistema e, pelo menos no contexto atual, não é possível resolver sistemas deste tipo usando a modelagem matemática de fluxo de carga AC e as técnicas de solução conhecidas para resolver esse tipo de problema; e 2) o problema de planejamento de sistemas de transmissão resolve somente o fornecimento de potência ativa no sistema elétrico e o problema de fornecimento de reativos (planejamento de reativos) é resolvido numa seguinte fase de planejamento. Neste último caso, mesmo que o sistema elétrico fosse conexo, a convergência do modelo AC seria difícil ou, às vezes, impossível, pois o problema freqüentemente não teria solução. Ainda não existem técnicas de solução que resolvam simultaneamente o problema de expansão dos sistemas de transmissão (construção de linhas e/ou transformadores ou planejamento de sistemas de transmissão) e de alocação de reativos no sistema elétrico [9].

Levando em conta as observações anteriores, atualmente se considera a modelagem matemática conhecida como fluxo de carga DC como sendo a



modelagem ideal para ser usada no problema de planejamento de sistemas de transmissão e essa modelagem matemática, será chamada simplesmente de *modelo DC*. Os principais motivos para esse consenso são os seguintes: 1) testes experimentais exaustivos mostraram que os resultados obtidos usando o modelo DC apresentavam resultados muito próximos aos resultados obtidos usando o fluxo de carga AC em relação à distribuição dos fluxos de potência ativa; e 2) existem várias técnicas de solução (algoritmos) que resolvem de maneira adequada os problemas de planejamento que usam o modelo DC. Entretanto, nas três décadas de pesquisas realizadas em planejamento de sistemas de transmissão foram propostos vários modelos matemáticos para representar o problema de planejamento. Três desses modelos ainda são usados nos trabalhos de planejamento de sistemas de transmissão: o modelo de transportes, o modelo híbrido e o modelo DC. Também são ainda muito usados variantes desses modelos. Neste capítulo são apresentados e discutidos esses três modelos matemáticos e suas principais variantes.

Usando os três modelos matemáticos mencionados anteriormente, o problema resultante é um problema de otimização matemática que envolve relações algébricas lineares e/ou não lineares e com variáveis de decisão inteiras e contínuas. Assim, os problemas resultantes correspondem a um campo da pesquisa operacional conhecido como programação não linear inteira mista e, em princípio, para resolver esses problemas, podem ser usadas as técnicas de solução de problemas de programação não linear inteira mista (PNLIM).

O modelo DC usa as duas leis de Kirchhoff para realizar a modelagem matemática do problema de planejamento. Os modelos de transportes e híbrido são versões relaxadas (aproximadas) do modelo DC, considerada como sendo o modelo ideal. Os motivos e as consequências de usar modelos relaxados são discutidos na sequência.



2.1 Modelo de Transporte

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

Garver sugeriu que, por causa dos grandes problemas encontrados, ao invés de se utilizar o modelo de fluxo de carga AC usado para operação, dever-se-ia usar modelos mais relaxados que permitiriam encontrar topologias ou configurações atrativas do crescimento do sistema elétrico, mesmo que estas propostas fossem aproximadas. Assim, sugeriu a utilização de um modelo matemático que deveria satisfazer somente a primeira lei de Kirchhoff, isto é, a modelagem matemática proposta não levaria em conta a segunda lei de Kirchhoff. Este modelo matemático ficou conhecido como modelo de transportes. Obviamente, esta modelagem matemática é uma representação menos adequada do problema real do que, por exemplo, o modelo DC e, portanto, a solução encontrada pelo modelo de transportes pode ser menos adequada para o problema real.

No modelo de transportes, deseja-se encontrar uma configuração que produza o menor investimento no plano de expansão do sistema elétrico e, que tornem adequadas as condições de operação desse sistema elétrico. Adequar as condições de operação significa que, o sistema deve satisfazer a primeira lei de Kirchhoff e que os circuitos e as usinas de geração devam operar dentro de seus limites especificados. A primeira lei de Kirchhoff simplesmente especifica que a somatória dos fluxos de potências que entram numa barra do sistema devem ser igual à somatória dos fluxos de potências que saem dessa barra do sistema.



2.1.1 Modelo Matemático

Usando o modelo de transportes, a modelagem matemática do problema de planejamento de sistemas de transmissão assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \\
 \text{s.a.} \quad & \\
 & Sf + g = d \\
 & |f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \\
 & 0 \leq g \leq \bar{g} \\
 & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 & n_{ij} \text{ inteiro} \\
 & f_{ij} \text{ irrestrito}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

em que v é o investimento devido as adições de circuitos no sistema; c_{ij} é o custo de um circuito no caminho $i - j$; n_{ij} é o número de circuitos adicionados no caminho $i - j$; S é a matriz de incidência nó-ramo do sistema elétrico; f é o vetor de fluxos cujos elementos, em que os f_{ij} representam o fluxo total no caminho $i - j$; g é o vetor de geração cujos elementos g_i representam o nível de geração na barra de geração i ; d é o vetor de demanda cujos elementos d_i representam a demanda na barra de carga i ; n_{ij}^0 representa o número de circuitos na configuração base no caminho $i - j$; $\bar{f}_{ij}$ é o fluxo máximo permitido para um circuito no caminho $i - j$; $\bar{g}$ é o vetor de máxima capacidade de geração nas barras de geração e $\bar{n}_{ij}$ é o vetor do número máximo de adições permitida no caminho $i - j$. As variáveis de decisão e a estrutura matemática do modelo de transportes apresentados originalmente por Garver é diferente de (2.1), mas as duas formulações são conceitualmente equivalentes. A

modelagem matemática por Garver em [1], não usa as mesmas variáveis de decisão apresentadas em (2.1), isto é, é usada uma modelagem com "trajetórias de sobrecarga" produzindo uma modelagem matemática mais complicada de manipular.

No modelo de transportes, o conjunto de restrições $S f + g = d$ representa as equações correspondentes à primeira lei de Kirchhoff, uma equação para cada barra do sistema; as restrições $|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij}$ representam as restrições de capacidade de transmissão dos circuitos (linhas e/ou transformadores) e o valor absoluto é necessário, pois os fluxos de potência podem fluir em ambos sentidos. As outras restrições são triviais e representam apenas restrições de limite de geração e de circuitos adicionados em cada caminho candidato $i - j$. Finalmente, as variáveis f_{ij} são irrestritas em valor e as variáveis n_{ij} devem ser inteiras representando a maior fonte de complexidade no problema.

Do ponto de vista da pesquisa operacional, o modelo de transportes representado pelo sistema (2.1), é um problema de programação linear inteiro misto (PLIM). A resolução do sistema (2.1), isto é, encontrar a solução ótima desse problema, não é simples, especialmente para sistemas elétricos de grande porte. Entretanto, se fossem permitidas adições fracionárias de circuitos (linhas de transmissão e/ou transformadores), ou seja, se fosse permitido que os n_{ij} assumissem valores contínuos, então o sistema (2.1) se transformaria num simples problema de programação linear (PL), mesmo para o caso de sistemas de grande porte. Assim, fica evidente que a restrição n_{ij} inteiro produz a maior complexidade no sistema (2.1). Estas características foram aproveitadas para desenvolver vários tipos de algoritmos para a solução do problema de planejamento de sistemas de transmissão quando o modelo de transportes é utilizado.

A grande vantagem do modelo de transportes é que, praticamente, não existe diferença entre resolver problemas de sistemas conexos e altamente ilhados. Esta característica decorre diretamente do fato de que, a solução do modelo de transportes, não depende das reatâncias dos circuitos. Deve-se observar que, na formulação matemática do sistema (2.1), não aparece as



reatâncias (ou susceptâncias) dos circuitos. A desvantagem principal é que, a solução apresentada pelo modelo de transportes pode ser distante da solução correspondente ao modelo DC, considerado como sendo modelo ideal. Em outras palavras, a solução ótima do modelo de transportes às vezes pode ficar muito longe da solução ótima do modelo DC, visto que a solução do modelo de transportes não necessariamente satisfaz a segunda lei de Kirchhoff.

2.2 Modelo Híbrido

O modelo híbrido foi proposto originalmente em [6] num contexto e numa estrutura diferente do apresentado aqui. Na formulação mais pura, a modelagem matemática do modelo híbrido especifica o seguinte: a parcela do sistema elétrico correspondente aos caminhos onde já existam circuitos na configuração base, devem satisfazer as duas leis de Kirchhoff e a outra parcela, correspondente aos caminhos novos em que não existem circuitos na configuração base, devem satisfazer unicamente a primeira lei de Kirchhoff. Portanto, o modelo híbrido, é uma mistura entre o modelo de transportes e o modelo DC. Obviamente, uma vez definida a modelagem matemática desta maneira, a solução ótima encontrada também deve satisfazer as duas leis de Kirchhoff na parte do sistema onde existam circuitos na configuração base e somente a primeira lei de Kirchhoff na parte do sistema onde não existam circuitos na configuração base. Em outras palavras, no modelo híbrido, deve-se satisfazer a primeira lei de Kirchhoff em todas as barras do sistema e a segunda lei de Kirchhoff somente naqueles laços que já existam na configuração base. Assim, por exemplo, se no processo de planejamento for adicionado um circuito num caminho novo, então os laços que eventualmente podem aparecer como consequência da adição deste circuito não estão obrigados a satisfazerem a segunda lei de Kirchhoff. Aí está a principal diferença entre esta formulação do modelo híbrido e a proposta apresentada em [6], em que a modelagem híbrida é usada simplesmente como uma forma de auxílio para o indicador de sensibilidade do algoritmo heurístico proposto.



Entretanto, em [6] apareceu a primeira proposta de modelagem híbrida para ser usada no problema de planejamento de sistemas de transmissão.

A idéia de usar o modelo híbrido no problema de planejamento de sistema de transmissão surgiu para contornar alguns problemas que apresentavam os modelos de transportes e DC. O modelo de transporte apresenta uma excelente flexibilidade para trabalhar com redes não conexas, mas as soluções encontradas, podem ficar muito afastadas da solução ótima do modelo DC. Por outro lado, o modelo DC pode apresentar sérios problemas para trabalhar com redes não conexas. Assim, o modelo híbrido permite encontrar soluções mais próximas da solução ótima do modelo DC e com a vantagem de trabalhar eficientemente na parcela correspondente às partes não conexas do sistema. Entretanto, encontrar a solução ótima do modelo de planejamento de sistemas de transmissão, usando o modelo híbrido, é de uma complexidade quase equivalente que o requerido pelo modelo DC. Este fato explica em parte a falta de pesquisas publicadas usando o modelo híbrido de maneira independente. Assim, a versão do modelo híbrido que está sendo apresentada e as diferentes variantes que aparecem na literatura especializada são usadas apenas para auxiliar no processo de resolução do modelo DC em algoritmos de planejamento de sistemas de transmissão [6].

2.2.1 Modelo Matemático

A formulação matemática do modelo híbrido assume a seguinte forma:



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

s.a.

(2.5)

$$Sf + g = d$$

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

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

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

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

$$n_{ij} \text{ inteiro}$$

$$x_{ij} \text{ discreto}$$

$$f_{ij} \text{ irrestrito}$$

$$\theta_j \text{ irrestrito} \quad \forall j \in \Omega_3$$

em que γ_{ij}^0 é a susceptância equivalente dos circuitos existentes no caminho $i - j$ na configuração base; x_{ij} é a susceptância equivalente dos circuitos adicionados no caminho $i - j$ no processo de otimização; Ω_1 representa o conjunto de linhas na configuração base; Ω_3 representa o conjunto de barras que fazem parte da configuração base, isto é, as barras que não estão ilhadas, e θ_j é a magnitude do ângulo da tensão das barras existentes na configuração base, isto é, para as barras que pertencem a Ω_3 .

No sistema (2.5), o conjunto de equações $Sf + g = d$ representam as equações da primeira lei de Kirchhoff, uma equação por barra, para todas as barras do sistema, e o conjunto de equações $f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0$ representam as equações correspondentes à segunda lei de Kirchhoff com uma equação para cada caminho que apresenta, pelo menos, um circuito adicionado na configuração base.

Este último conjunto de equações representa a diferença entre os três modelos matemáticos que estão sendo apresentados. No modelo de

transportes, o conjunto de equações $f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0$ simplesmente não aparecem, já no modelo híbrido aparece somente uma parcela dessas equações, constituída pelos caminhos em que existam circuitos adicionados na configuração base e, finalmente, no modelo DC aparecem todas as equações desse tipo, uma por cada caminho existente e/ou novos caminhos candidatos a adição de circuitos.

A presença de todas as equações correspondentes à segunda lei de Kirchhoff no modelo DC transforma este modelo num problema mais restrito que os outros modelos. Assim, do ponto de vista de otimização matemática, pode-se dizer que, o modelo híbrido é um problema relaxado em relação ao modelo DC, isto é, um conjunto de restrições presentes no modelo DC foram eliminadas no modelo híbrido. De igual maneira, o modelo de transportes é um problema relaxado em relação aos modelos híbrido e DC, pois no modelo de transportes foram eliminadas todas as restrições correspondentes à segunda lei de Kirchhoff. Uma consequência natural desse processo de relaxação é que a solução ótima, para o modelo de transportes, não necessariamente é uma solução ótima para os modelos híbrido e DC e, freqüentemente, uma solução ótima do modelo de transportes pode ser infactível em relação aos outros modelos. A mesma observação é verdadeira com relação a solução ótima do modelo híbrido e a do modelo DC. É um assunto aberto às análises teórica e experimental, sobre que tão boas podem ser as soluções encontradas pelos modelos relaxados. A vantagem evidente dos modelos relaxados é que podem ser mais facilmente resolvidos. Uma observação importante é verificar que, cada uma das equações da segunda lei de Kirchhoff, $f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0$, são equações ou restrições que tornam o problema não linear e produzem um nível de complexidade maior em relação ao modelo de transportes.

Após algumas manipulações algébricas, pode-se chegar a uma formulação equivalente que assume a seguinte forma:



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

s.a.

(2.6)

$$S_2 f_2 + B_1 \theta_1 + g = d$$

$$|\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1$$

$$|f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} n_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_2$$

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

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

$$n_{ij} \text{ inteiro}$$

$$x_{ij} \text{ discreto}$$

$$f_{ij} \text{ irrestrito}$$

$$\theta_j \text{ irrestrito} \quad \forall j \in \Omega_3$$

em que S_2 é a matriz de incidência nó - ramo da parcela dos circuitos que não tem linhas na configuração base (linhas que pertencem a Ω_2); f_2 é o vetor de fluxos das linhas que pertencem a Ω_2 ; B_1 é a matriz de susceptâncias da parcela dos circuitos que apresentam linhas adicionadas na configuração base (linhas que pertencem a Ω_1) e θ_1 é o vetor de ângulos $\theta_j \in \Omega_3$, isto é, das barras conectadas na configuração base. Assim, S_2 é de dimensão $nb \times nc$ em que nb é o número de barras e nc o número de novos caminhos, e as linhas de S_2 correspondentes às barras para as quais não chega um caminho novo tem todos os seus elementos iguais a zero; f_2 é um vetor de dimensão nc ; B_1 é de dimensão $nb \times nb$ em que as linhas e colunas de B_1 correspondentes às barras ilhadas, têm todos seus elementos iguais a zero e θ_1 é um vetor de dimensão nb em que as posições correspondentes às barras ilhadas tem valores iguais a zero.

2.3 Modelo DC

O modelo DC é uma generalização do modelo de fluxo de carga DC que está amplamente desenvolvido em [2,3]. Este modelo é considerado como sendo ideal para realizar os trabalhos de planejamento de sistemas de transmissão. No modelo DC o sistema elétrico completo deve satisfazer às duas leis de Kirchhoff, isto é, todas as barras do sistema devem satisfazer à primeira lei de Kirchhoff e todos os laços existentes devem satisfazer à segunda lei de Kirchhoff. Testes experimentais exaustivos mostraram que as topologias encontradas usando o modelo DC apresentam bom desempenho quando avaliadas com os modelos tradicionais de operação de sistemas de energia elétrica como o fluxo de carga AC.

2.3.1 Modelo Matemático

A formulação matemática do modelo DC assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \\ \text{s.a.} \quad & \\ & Sf + g = d \\ & f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i,j) \in \Omega_1 \\ & |f_{ij}| \leq (x_{ij} + \gamma_{ij}^0) \bar{\phi}_{ij} \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\ & n_{ij} \quad \text{inteiro} \\ & x_{ij} \quad \text{discreto} \\ & f_{ij} \quad \text{irrestrito} \\ & \theta_j \quad \text{irrestrito} \quad \forall j \in \Omega_3 \end{aligned} \tag{2.10}$$

em que γ_{ij}^0 representa a susceptância equivalente dos circuitos existentes no caminho $i - j$ na configuração base; γ_{ij} representa a susceptância de um circuito no caminho $i - j$; x_{ij} representa a susceptância equivalente dos circuitos adicionados no caminho $i - j$ e as seguintes relações são válidas:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\gamma_{ij}} \quad \bar{\phi}_{ij} = \frac{\bar{f}_{ij}}{\gamma_{ij}}$$

e obviamente, usando as relações anteriores, podem ser eliminados as incógnitas x_{ij} ou n_{ij} da formulação do modelo DC.

Após algumas manipulações algébricas, pode-se chegar a uma formulação equivalente que assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \\ \text{s.a.} \quad & B\theta + g = d \\ & |\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad \forall (i,j) \in \Omega_1 \\ & x_{ij} |\theta_i - \theta_j| \leq x_{ij} \bar{\phi}_{ij} \quad \forall (i,j) \in \Omega_2 \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\ & n_{ij} \text{ inteiro} \\ & x_{ij} \text{ discreto} \\ & \theta_j \text{ irrestrito} \end{aligned} \tag{2.11}$$

Em que B é a matriz de susceptâncias do sistema elétrico e θ é o vetor de ângulos de tensão de barras do sistema elétrico, Ω_1 representa as linhas



adicionadas na configuração base e Ω_2 as linhas correspondentes aos novos caminhos.

2.4 Modificações na Modelagem Básica

Na utilização de algumas técnicas de resolução às vezes é mais adequado realizar algumas modificações na modelagem básica dos três modelos usados no problema de planejamento de sistemas de transmissão. A modificação mais usada é a utilização de geradores artificiais em todas as barras de carga. O objetivo fundamental da mudança é tornar o problema modificado mais fácil de resolver usando determinados tipos de algoritmos. Do ponto de vista matemático, os geradores artificiais constituem apenas novas variáveis (incógnitas) no problema. Portanto, o problema original fica com um número de variáveis acrescido, mas pode se tornar mais fácil de ser resolvido. Logicamente, para que a solução de ambos problemas (original e modificado) sejam equivalentes na solução final, todas as variáveis correspondentes aos geradores artificiais devem ser iguais a zero. Usando as novas variáveis r_i correspondentes aos geradores artificiais, os três modelos usados em planejamento de sistemas de transmissão assumem a seguinte forma:

Modelo de Transportes:

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

s.a.

(2.12)

$$Sf + g + r = d$$

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

$$0 \leq r \leq d$$

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

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

$$n_{ij} \quad \text{inteiro}$$

$$f_{ij} \quad \text{irrestrito}$$

Modelo Híbrido:

$$\begin{aligned} \min \quad & v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{k \in \Gamma} r_k \\ \text{s.a.} \quad & \\ & Sf + g + r = d \\ & f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall (i,j) \in \Omega_1 \\ & |f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \\ & 0 \leq r \leq d \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\ & n_{ij} \quad \text{inteiro} \\ & x_{ij} \quad \text{discreto} \\ & f_{ij} \quad \text{irrestrito} \\ & \theta_j \quad \text{irrestrito} \quad \forall j \in \Omega_3 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Modelo DC:

$$\begin{aligned} \min \quad & v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{k \in \Gamma} r_k \\ \text{s.a.} \quad & \\ & Sf + g + r = d \\ & f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \\ & |f_{ij}| \leq (x_{ij} + \gamma_{ij}^0) \bar{\phi}_{ij} \\ & 0 \leq r \leq d \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\ & n_{ij} \quad \text{inteiro} \\ & x_{ij} \quad \text{discreto} \\ & f_{ij} \quad \text{irrestrito} \\ & \theta_j \quad \text{irrestrito} \quad \forall j \in \Omega_3 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Obs: Em que Γ representa o conjunto de todas as barras k em que existe demanda, r_k representa a geração artificial na barra k e α é um parâmetro de penalidade suficientemente grande para tornar pouca atrativa alternativas de investimento com valores de r_k diferentes de zero.

Matematicamente, a inclusão das variáveis artificiais permite obter um problema de maior tamanho com um incremento das variáveis, mas, freqüentemente, mais fácil de ser resolvido usando determinados tipos de algoritmos. É interessante observar que o modelo modificado sempre possui uma solução factível trivial, não necessariamente ótima, fazendo cada $r_k = d_k$ e todas as outras variáveis iguais a zero. Esta característica será aproveitada adequadamente nos processos de resolução implementados em alguns algoritmos no próximo capítulo.



Capítulo 3

Algoritmos Heurísticos Usados no Planejamento de Sistemas de Transmissão

Como já foi analisado no capítulo anterior, o problema de planejamento de sistemas de transmissão pode ser representado usando três modelos matemáticos. Usando o modelo de transporte é obtido um problema de programação linear inteiro misto (PLIM) e usando os modelos híbrido e DC é obtido um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). Ainda hoje é difícil de se resolver problemas destes tipos, especialmente quando são considerados os sistemas de grande porte. Portanto, nas pesquisas iniciais do problema de planejamento de sistemas de transmissão, foram usados os chamados algoritmos heurísticos construtivos para resolverem problemas de planejamento de sistemas reais. Este capítulo faz uma análise dos algoritmos heurísticos construtivos utilizados nos testes para a obtenção dos resultados mostrados no capítulo cinco.

Um algoritmo construtivo é um procedimento passo-a-passo em que, de maneira sistemática, se encontra uma boa proposta de expansão do sistema de energia elétrica, isto é, a partir da configuração base, em cada passo é adicionado um ou vários circuitos até que o conjunto de adições realizadas permitam uma operação adequada do sistema elétrico. Portanto, em cada passo, a configuração do sistema é modificada pela adição de um ou vários circuitos, e esta configuração obtida passa a ser denominada configuração corrente. O circuito escolhido em cada passo para ser adicionado à chamada configuração corrente é um circuito que corresponde ao caminho mais atrativo identificado pelo chamado critério de sensibilidade, indicador de sensibilidade ou índice de desempenho. Assim, a diferença fundamental entre os diferentes



algoritmos heurísticos está no indicador de sensibilidade escolhido e, obviamente, no modelo matemático escolhido (transporte, híbrido, DC).

3.1 Heurísticas Construtivas Usando o Modelo de Transportes

Garver [1] desenvolveu o primeiro algoritmo de grande difusão usado no planejamento de sistemas de transmissão. O trabalho de Garver foi pioneiro em vários aspectos e entre os mais importantes podem ser citados os seguintes:

- Sugeriu uma forma sistemática de realizar o planejamento de sistemas de transmissão, introduzindo técnicas diferentes das usadas na análise de operação de sistemas elétricos. Assim, sugeriu usar o agora conhecido como modelo de transportes como a forma mais adequada de modelagem matemática para a realização de trabalhos de planejamento, em contraposição ao uso dos modelos mais exatos como o fluxo de carga AC que não podiam ser aplicáveis nos trabalhos de planejamento. Modelos como o fluxo de carga AC não podem ser usados por causa da topologia de sistemas elétricos usados em planejamento, que são sistemas não conexos com barras e/ou regiões ilhadas, e porque ainda não foi resolvido o problema dos reativos, o que levaria a sérios problemas de convergência mesmo em sistemas não ilhados.
- Inaugurou a fase dos algoritmos heurísticos construtivos que foram muito usados nas décadas seguintes. Estes algoritmos consistiam basicamente em ir se adicionando um circuito em cada passo, usando um indicador de sensibilidade, até o momento em que eram satisfeitas todas as condições de operação.



3.1.1 O Algoritmo de Garver

Garver [1] sugeriu usar o modelo de transportes como o modelo matemático mais adequado para resolver problemas de planejamento. O modelo de transportes, amplamente discutido no capítulo 2, assumiu a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \\ \text{s.a.} \quad & Sf + g = d \\ & |f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\ & n_{ij} \text{ inteiro} \\ & f_{ij} \text{ irrestrito} \end{aligned} \tag{3.1}$$

No modelo de transportes, é levada em conta somente a primeira lei de Kirchhoff e os limites de fluxos nos circuitos, isto é, não é levada em conta a segunda lei de Kirchhoff, portanto, representando um modelo relaxado em relação aos modelos híbridos e DC. Entretanto, a solução encontrada para o modelo de transportes, não necessariamente é uma solução factível para os modelos híbrido e DC. Além disso, é necessário mencionar que a forma matemática do modelo de transportes apresentada por Garver em [1] é significativamente diferente do sistema (3.1) apresentado aqui, embora sejam conceitualmente equivalentes.

O problema (3.1) é um PLIM, mas se aceitarmos como solução valores de n_{ij} contínuos, então, (3.1) se transforma num simples problema de programação linear (PL). Em outras palavras, se relaxarmos a integralidade das variáveis inteiras n_{ij} , aceitando que assumam valores fracionários, então o problema (3.1), muito complexo, transforma-se num problema simples. O

problema resultante de (3.1) após o relaxamento da integralidade das variáveis inteiras leva a um PL conhecido como problema de programação linear correspondente. Deve-se observar que no sistema (3.1), as restrições do tipo $|f_{ij}| \dots$ com valor absoluto podem ser substituídas por duas restrições lineares. Logicamente, que uma solução com números fracionários de linhas de transmissão fracionária é inaceitável como proposta global de solução, mas pode ser uma idéia excepcional **como estratégia**, na tentativa de se encontrar uma boa solução com variáveis de investimento inteiras. Assim, a idéia excepcional de Garver consistiu em usar o PL correspondente como uma estratégia para se encontrar uma boa solução do problema original.

Desta maneira, a proposta de Garver consiste em resolver o sistema (3.1) relaxado e encontrar a solução ótima contínua para a configuração corrente n_{ij}^0 . Assim, conhecidas as incógnitas n_{ij} , encontradas usando um algoritmo de PL, pode-se encontrar os fluxos de potência em todos os circuitos antigos (n_{ij}^0) e novos (n_{ij}). Portanto, aquele caminho novo ij identificado pelo n_{ij} que levar o maior fluxo de potência, representará o caminho mais atrativo de acordo com a proposta de Garver. Esta proposta então, consiste em adicionar uma linha naquele caminho mais atrativo na configuração corrente e atualizar a configuração corrente de acordo com a adição escolhida. Um processo repetido desta estratégia, adicionando em cada passo o circuito mais atrativo, constitui o algoritmo de Garver. O processo termina quando a solução do PL correspondente à configuração corrente apresentar uma solução com todos os $n_{ij} = 0$, o que significaria que não seria necessário realizar mais adições e o conjunto de adições realizadas representaria a proposta de solução do algoritmo de Garver.

O algoritmo de Garver pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Assumir a configuração base n_{ij}^0 como configuração corrente;



2. Resolver o PL correspondente do sistema (3.1) para a configuração corrente. Se todos os $n_{ij} = 0$ então pare, pois foi encontrada uma boa configuração factível. Caso contrário ir ao passo 3;
3. Calcular os fluxos através de todos os novos circuitos adicionados pelo PL, ($n_{ij} \neq 0$), usando a relação $f_{ij}^v = n_{ij} \bar{f}_{ij}$. Identificar o caminho novo com maior valor de f_{ij}^v e atualizar a configuração corrente adicionando um circuito naquele caminho ij. Voltar ao passo 2.

No item 3, f_{ij}^v simboliza o fluxo de potência no circuito i-j, $\bar{f}_{ij}$ a máxima capacidade de transmissão do circuito i-j, n_{ij} a variável de adição de circuitos para o circuito i-j, determinada na solução do PL.

O algoritmo apresentado não tem a mesma estrutura nem as simbologias usadas em [1], mas são conceitualmente equivalentes. Em [1] são usados conceitos como trajetórias sobrecarregadas (overload path) e a determinação de fluxos lineares (linear flow estimation) que são conceitos decorrentes da formulação matemática e da estratégia de programação linear adotada.

O maior esforço computacional do algoritmo corresponde ao passo 2 que consiste em resolver um problema de PL. Entretanto, o algoritmo apresentado, pode ainda ser modificado para obter versões alternativas ligeiramente diferentes do algoritmo de Garver. Assim, podem ser realizadas as seguintes modificações:

1. Após a resolução do primeiro PL, pode-se incorporar na configuração base, simultaneamente, a parte inteira de todos os circuitos que apresentam valores de $n_{ij} \geq 1$.
2. Em cada passo, pode-se escolher para adição de um circuito, aquele caminho com maior valor de n_{ij} em lugar de escolher o caminho com maior valor de f_{ij}^v .
3. Em cada passo, pode-se manter o critério de adição daquele caminho com maior valor de f_{ij}^v , mas em lugar de adicionar um simples circuito

naquele caminho, pode-se adicionar um número de circuitos igual à parte inteira de n_{ij} .

Todas as modificações propostas podem ser incorporadas separadamente ou em conjunto e levam a algoritmos ligeiramente diferentes do algoritmo de Garver. Todos esses algoritmos alternativos são mais rápidos, pois necessitam de menos chamadas ao algoritmo de PL, e geralmente, mas nem sempre, as soluções obtidas são de menor qualidade. Do ponto de vista de otimização matemática, o algoritmo de Garver é um algoritmo heurístico construtivo que na prática encontra configurações de boa qualidade, mas do ponto de vista teórico não existe garantia de encontrar a configuração ótima global. Configurações de boa qualidade na prática significam que o algoritmo encontra com facilidade as configurações ótimas de sistemas pequenos, mas em sistemas de grande porte essas configurações podem ficar bastante afastadas da configuração ótima.

3.2 Heurísticas Construtivas Usando o Modelo DC

Após o trabalho pioneiro de Garver apareceram novas pesquisas sugerindo a utilização do modelo DC e algoritmos heurísticos construtivos para encontrar uma solução desse modelo. É evidente que o modelo DC é a representação mais adequada do problema de planejamento de sistemas de transmissão. Entretanto, a dificuldade de resolver problemas usando o modelo DC é maior quando comparado com os problemas formulados usando o modelo de transportes. Em compensação, as configurações encontradas são melhores como alternativas de planejamento. Deve-se lembrar que em planejamento de sistemas de transmissão estão sendo usados modelos matemáticos relaxados (transportes, híbrido, DC) para encontrar configurações que depois devem ser usados e testados usando o modelo de operação de sistemas de energia elétrica, isto é, o modelo de fluxo de carga AC. Portanto, é evidente que as configurações obtidas usando os modelos de planejamento de sistemas de



transmissão freqüentemente devem precisar de um ajuste, o reforço adicional nas fases seguintes de estudo (planejamento de reativos, planejamento de curto prazo, etc...)[9].

Levando em conta as observações antes mencionadas, existe um consenso entre os pesquisadores em planejamento de sistemas de transmissão de que o modelo considerado ideal na fase de planejamento é o modelo DC. Consequentemente, a maioria das pesquisas publicadas em planejamento de sistemas de transmissão utilizam o modelo DC e, nos últimos anos, os outros modelos (transporte e híbrido) foram utilizados como modelos auxiliares para ajudar a encontrar excelentes configurações do modelo DC.

3.2.1 O Algoritmo de Mínimo Esforço

O algoritmo de mínimo esforço [2] é um algoritmo heurístico construtivo que usa o modelo DC. Assim como no algoritmo de Garver, o algoritmo de mínimo esforço adiciona ao sistema um circuito em cada passo do algoritmo. Entretanto, a modelagem matemática é ligeiramente diferente do modelo DC apresentado no capítulo anterior.

Neste algoritmo se resolve o sistema (3.2) que é um sistema de equações lineares, isto é, os circuitos podem ficar sobrecarregados, e a idéia é, realizar uma adição que permita uma maior redistribuição de fluxos no sistema, e como consequência disso, uma diminuição (ou eliminação) das sobrecargas nos circuitos sobrecarregados.

Como o algoritmo de mínimo esforço é um processo de passo a passo, em cada passo é resolvido um problema de fluxo de carga DC. Assim, em cada passo existe disponível a chamada configuração corrente constituída por todos os circuitos existentes na configuração base e os circuitos adicionados nos passos anteriores na implementação do algoritmo de mínimo esforço. Assim, em cada passo do algoritmo, deve-se resolver o seguinte problema:

$$B\theta = P \quad (3.2)$$



em que B é a matriz de susceptâncias do sistema constituído pelos circuitos da configuração corrente e P é o vetor de injeções líquidas de potência ativa. Uma vez conhecidos os valores de θ , pode-se encontrar facilmente os fluxos de potência através dos circuitos do sistema usando a relação:

$$f_{ij} = (\theta_i - \theta_j) \gamma_{ij}^{eq} \quad (3.3)$$

em que γ_{ij}^{eq} é a susceptância equivalente dos circuitos existentes no caminho $i - j$. Se existem circuitos sobrecarregados então, deve-se adicionar mais circuitos atrativos ao sistema até eliminar todas as sobrecargas do sistema elétrico.

Se a configuração corrente apresenta corte de carga então o próximo circuito que deve ser adicionado ao sistema deve ser aquele que apresenta o melhor desempenho determinado por um indicador de sensibilidade que apresenta a seguinte forma:

$$IS_{ij}^{me} = \Delta Z_{ij} = -\frac{1}{2}(\theta_i - \theta_j)^2 \gamma_{ij} \quad (3.4)$$

em que os θ_j são obtidos da solução de (3.2) e γ_{ij} é a susceptância de um circuito no caminho $i - j$. Assim, o circuito mais atrativo é representado por aquele caminho que apresenta o maior valor absoluto de IS_{ij}^{me} . Uma variante da metodologia de mínimo esforço consiste em modificar a relação (3.4) para incorporar o efeito dos custos dos circuitos. Assim, também faz parte do algoritmo de mínimo esforço a utilização do seguinte indicador de sensibilidade:

$$IS_{ij}^{mem} = \Delta Z_{ij} = -\frac{1}{2}(\theta_i - \theta_j)^2 \frac{\gamma_{ij}}{c_{ij}} \quad (3.5)$$



em que c_{ij} é o custo de adição de uma linha no caminho $i - j$. Portanto, no algoritmo de mínimo esforço podem ser usados qualquer um dos indicadores de sensibilidade anteriormente especificados. Obviamente, o uso de cada um dos indicadores de sensibilidade devem produzir propostas de planejamento diferentes. A dedução matemática do indicador de sensibilidade (3.4) é apresentada no Anexo B.

A justificativa teórica para usar o indicador de sensibilidade (3.4) é que a solução ótima do seguinte problema:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \frac{1}{2} \sum \frac{f_{ij}^2}{\gamma_{ij}} \\ \text{s.a.} \quad & \\ Sf = P \end{aligned} \tag{3.6}$$

é equivalente a solução obtida com $B\theta = P$, com $f_{ij} = (\theta_i - \theta_j)\gamma_{ij}^{eq}$, isto é, pela aplicação das duas leis de Kirchhoff. Fazendo um paralelo com circuitos resistivos, pode-se afirmar que as duas leis de Kirchhoff num circuito resistivo produz uma distribuição de fluxos de potência que minimiza as perdas no circuito resistivo. No sistema de potência, pode-se dizer que as duas leis de Kirchhoff produzem uma melhor distribuição de fluxo no sistema elétrico.

Para terminar de apresentar o algoritmo de mínimo esforço ainda é necessário discutir um aspecto complicante. A configuração corrente pode ser um sistema não conexo, isto é, podem existir barras isoladas da parte conexa do sistema elétrico. Este fato produz dois problemas: 1) para um sistema não conexo, o sistema(3.2) normalmente não tem solução, e 2) é necessário ter os valores de todos os θ_j para encontrar os valores dos indicadores de sensibilidade. Este problema foi contornado colocando uma rede fictícia superposta com a rede existente para tornar o sistema elétrico conexo. O

conceito de rede fictícia foi usado posteriormente por outros pesquisadores, em alguns casos com outros nomes, para contornar o problema de rede elétrica não conexa. Pode-se usar vários tamanhos de rede fictícia. Assim, pode-se colocar uma rede fictícia constituída por circuitos fictícios através de todos os caminhos do sistema elétrico, pode-se colocar circuitos fictícios somente na parcela do sistema elétrico correspondente aos caminhos novos, ou ainda, pode-se colocar circuitos fictícios somente num número mínimo de caminhos novos suficientes para tornar o sistema elétrico conexo. Para o algoritmo de mínimo esforço, pode-se colocar um circuito fictício com um valor reduzido, por exemplo, com um valor de $n_{ij} = 0,001$, isto é, colocando uma milésima parte de um circuito.

Para os sistemas analisados é usado uma formulação ligeiramente diferente da formulação original apresentada em [3]. Assim, em vez de resolver o sistema (3.2) se resolve o seguinte PL:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & w = \sum r_i \\
 \text{s.a.} \quad & B\theta + g + r = d \\
 & 0 \leq g \leq \bar{g} \\
 & 0 \leq r \leq d \\
 & \theta_j \quad \text{irrestrito}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

A solução de (3.7) deve ser exatamente igual à solução de (3.2). Na verdade (3.7) é um PL com um único ponto factível e na solução final sempre acontece que $W = 0$, isto é, está sendo resolvido um sistema de equações algébricas, que apresenta uma única solução, usando a fase 1 de um PL. Os motivos para usar esta formulação são os seguintes: 1) todos os algoritmos apresentados estão sendo reformulados para que sejam resolvidos usando algoritmos de PL facilitando a apresentação acadêmica e o trabalho de verificação dos resultados obtidos por parte do leitor, e 2) esta formulação alternativa permite trabalhar sem nenhuma modificação uma variante do

problema de planejamento de sistemas de transmissão quando é possível realizar um redespacho da geração. Neste último caso, não é possível usar a formulação (3.2) porque não são conhecidos com antecedência os valores de g e portanto de P .

É importante observar que a única diferença entre as duas formulações discutidas anteriormente, é no esforço computacional. É evidente que a formulação (3.7) deve precisar de um maior esforço computacional. Outro aspecto importante é que na formulação (3.2), deve-se fixar um θ_j no valor zero como referência angular, enquanto que na formulação (3.7) esta precaução não é necessária, pois o algoritmo de PL deixa automaticamente um dos θ_j fora da base com valor igual a zero.

Nos passos intermediários do algoritmo de Garver sempre existem adições de circuitos que produzem investimentos diferentes de zero e termina justamente quando o algoritmo de PL não produz investimento porque os circuitos adicionados já permitem operar adequadamente o sistema elétrico. Por outro lado, nos passos intermediários do algoritmo de mínimo esforço sempre existem circuitos sobrecarregados porque os θ_j estão irrestritos e o algoritmo termina quando não existem circuitos sobrecarregados, porque os circuitos adicionados permitem que o sistema opere adequadamente.

O algoritmo de mínimo esforço pode ser resumido nos seguintes passos:

Fase 1:

1. Assumir a configuração base n_{ij}^0 (ou equivalentemente x_{ij}^0) como configuração corrente.
2. Resolver o PL correspondente ao sistema (3.7) para a configuração corrente. Se as sobrecargas foram eliminadas então passar para a fase 2, pois foi encontrada uma configuração factível. Em caso contrário,



calcular os indicadores de sensibilidade de mínimo esforço usando a relação (3.4) ou a relação (3.5) e ordenar a lista de circuitos candidatos a adição iniciando pelo circuito mais atrativo de acordo com o indicador de sensibilidade, isto é, o circuito mais atrativo é aquele que possui o maior valor absoluto de indicador de sensibilidade encontrado usando (3.4) ou (3.5).

3. Adicionar ao sistema um circuito correspondente ao caminho mais atrativo determinado no passo anterior (o primeiro elemento da lista) para obter a nova configuração corrente e voltar ao passo 2.

Fase 2:

1. É possível que existam alguns circuitos irrelevantes adicionados durante a fase 1 devido a outras adições mais importantes realizadas posteriormente. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de seus custos e eliminar aqueles que, uma vez simulada sua saída, não produzam cortes de carga no sistema.

3.2.2 O Algoritmo de Mínimo Corte de Carga

O algoritmo de mínimo corte de carga foi originalmente apresentado em [3]. Este algoritmo também usa o modelo DC modificado usando os geradores artificiais para contornar os problemas de operação do sistema elétrico.

No algoritmo de mínimo esforço os problemas de operação do sistema elétrico são contornados permitindo que os circuitos sejam sobrecarregados. Já no algoritmo de mínimo corte de carga os circuitos devem permanecer entre os limites de operação. Os problemas de operação neste algoritmo passam a ser contornados pelos geradores artificiais realizando-se, portanto, cortes de carga no sistema. O algoritmo converge quando forem adicionados circuitos suficientes e que não causem cortes de carga no sistema elétrico. Da mesma forma, existe o conceito de configuração corrente que é o conjunto de circuitos



existentes na configuração base que são acrescidos àqueles adicionados nos passos anteriores.

Em cada passo do algoritmo de mínimo corte de carga se resolve o seguinte PL:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & w = \sum r_i \\
 \text{s.a.} \quad & B\theta + g + r = d \\
 & |\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \\
 & 0 \leq g \leq \bar{g} \\
 & 0 \leq r \leq d \\
 & \theta_j \text{ irrestrito}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

O indicador de sensibilidade do método de mínimo corte de carga que permite encontrar o circuito mais atrativo para adição é determinado pela seguinte relação:

$$IS_{ij}^{mc} = \frac{\partial W}{\partial \gamma_{ij}} = -(\theta_i - \theta_j)(\pi_i - \pi_j) \tag{3.9}$$

em que IS_{ij}^{mc} é o indicador de sensibilidade da função objetivo (3.8) com respeito à susceptância do circuito no caminho $i - j$; os π_j são os multiplicadores de Lagrange das restrições $B\theta + g + r = d$ e os θ_j são os ângulos de tensão das barras do sistema obtidos ao resolver (3.8).

A dedução matemática de (3.9) é realizada no Anexo C.

No método de mínimo corte de carga aparecem os mesmos problemas que aparecem no método de mínimo esforço com relação aos sistemas não



conexos. Da mesma forma então, se utiliza a rede fictícia para contornar o problema.

Para o algoritmo de mínimo corte de carga é definida uma rede fictícia constituída por circuitos fictícios 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 a um circuito normal. A primeira característica do circuito fictício, n_{ij} pequeno, é apenas para dispor de um sistema conexo, evitar problemas numéricos e produzir uma modificação mínima no sistema. Entretanto, a segunda característica é importante em relação a segunda lei de Kirchhoff, isto é, a abertura angular de um circuito fictício deve ser suficientemente grande para que as diferenças angulares nos laços artificiais gerados pelos circuitos fictícios não modifiquem as aberturas angulares nos circuitos normais.

Uma variante do indicador de sensibilidade de mínimo corte de carga pode ser obtida incluindo o efeito dos custos dos circuitos. Assim, uma relação alternativa para usar como indicador de sensibilidade no método de mínimo corte de carga é a seguinte:

$$IS_{ij}^{mcm} = IS_{ij}^{mc} / c_{ij} \quad (3.10)$$

em que c_{ij} é o custo de adição de um circuito no caminho $i - j$.

O algoritmo de Mínimo Corte de Carga pode ser resumido nos seguintes passos:

Fase 1:

1. Assumir a configuração base n_{ij} (ou equivalentemente x_{ij}^0) como configuração corrente.



2. Resolver o PL correspondente do sistema (3.8) para a configuração corrente. Se os cortes de carga foram eliminados então passar para a fase 2, pois foi encontrada uma configuração factível. Em caso contrário, calcular os indicadores de sensibilidade de mínimo corte de carga usando a relação (3.9) ou (3.10) e ordenar a lista de circuitos candidatos a adição iniciando pelo circuito mais atrativo de acordo com o indicador de sensibilidade, isto é, o circuito mais atrativo é aquele que possui o maior valor de indicador de sensibilidade encontrado usando (3.9) ou (3.10).

3. Adicionar ao sistema um circuito correspondente ao caminho mais atrativo determinado no passo anterior (o primeiro elemento da lista) para obter a nova configuração corrente e voltar ao passo 2.

Fase 2:

1. É possível que existam alguns circuitos irrelevantes adicionados durante a fase 1 devido a outras adições mais importantes realizadas posteriormente. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de seus custos e eliminar aqueles que, uma vez simulada sua saída, não produzam cortes de carga no sistema.

3.3 Heurísticas Construtivas que Usam Modelos Mistos

Existem várias pesquisas que usam uma modelagem mista [4,6], isto é, a modelagem matemática resolvida em cada passo do algoritmo heurístico construtivo é diferente dos modelos (transportes, DC) apresentados no capítulo 2. Porém as soluções encontradas por estes modelos satisfazem as exigências do modelo DC. É coerente afirmar então que a modelagem utilizada por esses métodos corresponde ao modelo DC com algumas modificações que substituem os índices de sensibilidade dos outros algoritmos heurísticos.



3.3.1 O Algoritmo de Villasana-Garver

O algoritmo de Villasana-Garver [6] propõe uma modelagem matemática que representa duas redes elétricas superpostas. Uma correspondente aos circuitos existentes (configuração corrente) e a outra aos circuitos fictícios (rede artificial) existentes nos caminhos em que podem ser adicionados caminhos.

Na modelagem proposta em [6], os circuitos da configuração corrente devem satisfazer as duas leis de Kirchhoff e os limites de fluxos dos circuitos, enquanto que os circuitos da rede artificial precisam somente satisfazer a primeira lei Kirchhoff. Esta formulação é chamada também de modelagem híbrida porque a rede formada pelos circuitos existentes apresenta a estrutura do modelo DC e a rede artificial à do modelo de transportes, mas os dois modelos não estão separados porque ambas redes superpostas, devem resolver em conjunto, o problema de planejamento.

O modelo matemático é o seguinte:

$$\begin{aligned} \min \quad & v = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \\ \text{s.a.} \quad & \\ & Sf + B_1 \theta_1 + g = d \\ & |\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \\ & |f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} n_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_2 \\ & 0 \leq g_1 \leq \bar{g} \\ & n_{ij} \geq 0 \\ & f_{ij} \quad \text{irrestrito} \\ & \theta_j \quad \text{irrestrito} \end{aligned} \tag{3.11}$$

em que S é a matriz de incidência nó - ramo da rede artificial, (linhas que pertencem a Ω_2); $f = \{f_{ij}\}$ é o fluxo de potência através do circuito artificial no caminho $i - j$; B_1 é a matriz de susceptâncias dos circuitos existentes na



configuração corrente; θ_i é o vetor de ângulos de tensão das barras que estão ligadas ao sistema elétrico através de circuitos normais na configuração corrente e n_{ij} é o número de circuitos artificiais que devem ser adicionados para que o sistema opere adequadamente.

A formulação (3.11) está apresentada de uma forma diferente da apresentada em [6], mas é equivalente conceitualmente. A formulação matemática apresentada em [6] é mais confusa usando outras variáveis de decisão e ainda os conceitos de “trajetórias de sobrecarga”. Deve-se notar que a formulação de (3.11) é um problema de programação linear (PL), diferente então da formulação do modelo híbrido apresentado no capítulo 2. As diferenças são enumeradas a seguir:

1. Em (3.11) n_{ij} é um número contínuo cujo maior valor contribui para a identificação do circuito artificial a ser adicionado, enquanto que na modelagem do Capítulo 2, n_{ij} era o número de circuitos que deveriam ser adicionados ao sistema no caminho $i - j$.
2. Em (3.11) $B_i\theta_i$ é um conjunto de relações algébricas lineares, pois a matriz B_i tem como elementos parâmetros conhecidos, enquanto que no modelo do Capítulo 2 a relação $B_i\theta_i$ era um conjunto de relações algébricas não lineares relacionando variáveis x_{ij} (ou n_{ij}) e θ_j .

A formulação (3.11) é usada em [6] para verificar se a configuração corrente está operando nas condições adequadas de operação. Se o sistema não estiver operando adequadamente, devem aparecer fluxos de potência através da rede fictícia (circuitos fictícios). Nesse caso, em [6] é sugerido a adição de um circuito naquele caminho identificado pelo circuito artificial que transporta maior fluxo de potência, atualizando-se a configuração corrente com a adição implementada. O processo iterativo termina quando $v = 0$ na resolução de (3.11), o que indica que os circuitos já adicionados permitem a operação adequada do sistema elétrico. Portanto, em cada passo do algoritmo apresentado em [6], é resolvido o sistema (3.11) de forma que, em cada passo.



esse sistema muda apenas na estrutura da matriz B_1 , incorporando-se o efeito do último circuito adicionado ao sistema, e, toda vez em que um circuito que corresponda a um novo caminho é adicionado pela primeira vez, deve-se adicionar a correspondente restrição $|\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij}$ do respectivo caminho.

O algoritmo Villasana-Garver pode ser resumido nos seguintes passos:

Fase 1:

1. Assumir a configuração base, sem nenhuma adição, como configuração corrente e montar o sistema (3.11) para essa configuração.
2. Resolver o PL correspondente ao sistema (3.11) para a configuração corrente. Se a resolução do PL não apresentar investimento, isto é, se todos os $n_{ij} = 0$ pare, pois foi encontrada uma boa configuração factível. Caso contrario, calcular o investimento corrente que é a soma do investimento das linhas adicionadas mais o investimento contínuo fornecido pelo PL e ir ao passo 3.
3. Adicionar na configuração corrente um circuito correspondente ao caminho fictício que leva o maior fluxo de potência entre todos os caminhos fictícios, obtendo assim, a nova configuração corrente. Montar o sistema (3.11) para a configuração corrente, atualizar o investimento correspondente aos circuitos adicionados e voltar ao passo 2.

Fase 2:

1. É possível que existam alguns circuitos irrelevantes adicionados durante a fase 1 devido a outras adições mais importantes realizadas posteriormente. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de seus custos e eliminar aqueles que, uma vez simulada sua saída, não produzam cortes de carga no sistema.



3.3.2 O Algoritmo de Rede Marginal de Levi-Calovic

O algoritmo de rede marginal foi apresentado em [4]. Este algoritmo é semelhante ao algoritmo de Villasana-Garver, mas apresenta algumas contribuições adicionais interessantes. Ao invés de se usar duas redes superpostas como em [6], é feita uma montagem dos modelos matemáticos correspondentes a duas redes diferentes, resolvendo-as em cada passo do algoritmo heurístico construtivo. O primeiro modelo matemático corresponde ao modelo DC para a chamada configuração corrente (que verifica se o sistema está operando adequadamente na configuração corrente). Se o sistema não operar adequadamente, é montada a rede marginal, utilizando-se os resultados obtidos ao se resolver o primeiro modelo matemático.

O primeiro modelo matemático a ser resolvido pelo algoritmo é o seguinte problema de programação linear (PL):

$$\begin{aligned} \min \quad & w = \sum r_i \\ \text{s.a.} \quad & B_1 \theta_1 + g + r = d \\ & |\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & 0 \leq r \leq d \\ & \theta_j \quad \text{irrestrito} \end{aligned} \tag{3.12}$$

em que B_1 é a matriz de susceptâncias dos circuitos existentes na configuração corrente e θ_1 é o vetor de ângulos de barra das barras ligadas ao sistema elétrico através dos circuitos existentes na configuração corrente, isto é, não existe ângulo para as barras ilhadas na configuração corrente.

Se durante o processo iterativo a resolução de (3.12) não aparecer corte de carga, isto é, $w = 0$, então significa que as adições já realizadas permitem que o sistema opere adequadamente e foi encontrada uma solução factível para o problema de planejamento de sistemas de transmissão. Por outro lado, se a resolução de (3.12) apresentar corte de carga, então a configuração corrente ainda não permite uma operação adequada do sistema e, deve-se adicionar o circuito mais atrativo para obter uma nova configuração corrente. Esse circuito mais atrativo é encontrado resolvendo-se o problema de rede marginal.

O modelo de rede marginal é uma modelagem matemática construída a partir da chamada rede marginal. Esta, por sua vez, é montada a partir da resolução do sistema (3.12), levando-se em conta os aspectos mostrados a seguir.

As gerações na rede marginal são formadas pelas gerações residuais obtidas na resolução de (3.12). Assim, por exemplo, se na resolução de (3.12) uma barra de geração está gerando um valor de $g = 400\text{MW}$ e sua capacidade máxima de geração é de $g' = 450\text{MW}$ então, na rede marginal, naquela barra de geração, deverá aparecer um gerador com uma capacidade máxima de geração de $g'_m = 450 - 400 = 50\text{MW}$, isto é, com a capacidade de geração não usada ou residual.

As demandas ou cargas na rede marginal serão formadas pelos cortes de carga apresentados na resolução de (3.12). Assim, por exemplo, se uma barra de carga apresentar um corte de carga de $r_m = 20\text{MW}$, então, na rede marginal, a demanda nesta barra será de $d_m = 20\text{MW}$. Assim, na rede marginal, as demandas e gerações, serão constituídas pela parcela de demanda não fornecida e pela parcela de capacidade de geração não gerada pela insuficiência dos circuitos elétricos na configuração existente.

Os circuitos na rede marginal são obtidos de uma forma um pouco mais complexa definindo-se vários tipos de circuitos. Assim, serão definidos seguintes tipos de circuitos:



1. Circuitos saturados: Se na resolução do sistema (3.12) os circuitos existentes no caminho $i - j$ estão no limite ou saturados, então, neste caminho, o circuito correspondente na rede marginal deverá apresentar um custo c_{ij} , isto é, equivalente a um circuito normal do sistema elétrico. Assim, por exemplo, se na resolução de (3.12) acontecer que no caminho $i - j \rightarrow f_{ij} = \bar{f}_{ij} = 100$, então, na rede marginal, qualquer adição neste caminho deverá ser considerada com o seu correspondente custo de c_{ij} . Em outras palavras, neste caso, não existirá capacidade residual neste caminho que seja aproveitável porque os circuitos estão trabalhando no limite.

2. Circuitos não saturados: Se na resolução do problema (3.12) os circuitos existentes no caminho $i - j$ estão trabalhando abaixo de seus limites de operação, ou seja, estão não saturados, então esse circuito correspondente na rede marginal deverá apresentar um custo igual a zero pela capacidade residual existente e um custo de c_{ij} para acima dessa capacidade residual. Assim, por exemplo, se na resolução de (3.12) acontecer que no caminho $i - j$ exista um circuito com capacidade $\bar{f}_{ij} = 100$ e na resolução de (3.12) aparecer um fluxo de $f_{ij} = 70$ no sentido $i - j$, então, na rede marginal, qualquer adição neste caminho deve apresentar custo zero até atingir um fluxo de $f_{ij} = 100 - 70 = 30$ no sentido $i - j$ e, todo fluxo acima desse valor deverá ser considerado com o seu correspondente valor de c_{ij} . Além disso, no mesmo exemplo, qualquer adição neste caminho deverá apresentar custo zero para fluxo de potência no sentido $j - i$ até atingir o valor de $f_{ij} = 100 + 70 = 170$ e, acima desse valor, deverá ser considerado um custo de c_{ij} para o circuito adicionado para esse excesso de fluxo de potência. Em outras palavras, a variável de investimento n_{ij} que determina o número de circuitos adicionados deverá ter custo zero até atingir um valor especificado $\bar{n}_{ij}$ e acima desse valor deverá ter um



custo c_{ij} . Assim, a rede marginal aproveita a capacidade disponível dos circuitos existentes com custo zero, o que é muito lógico, e utiliza os circuitos que implicam investimento somente quando não é possível usar as capacidades residuais existentes.

Em [4] ainda é definido o chamado circuito quase saturado, mas pode ser eliminada essa caracterização por ser pouco relevante.

Desta forma, a rede marginal produz um modelo matemático que assume a seguinte forma:

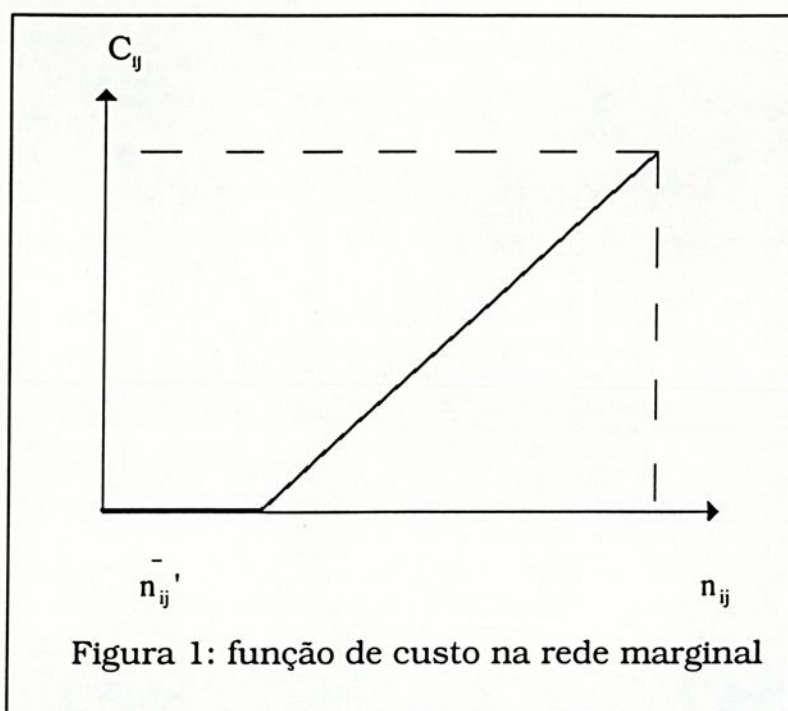
$$\begin{aligned}
 \min \quad & v_1 = \sum c_{ij} n_{ij} \\
 \text{s.a.} \quad & \\
 & Sf + g_m = d_m \\
 & |f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} n_{ij} \\
 & 0 \leq g_m \leq \bar{g}_m \\
 & n_{ij} \geq 0 \\
 & f_{ij} \text{ irrestrito}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

em que g_m e d_m são respectivamente, o vetor de geração e demanda residual ou marginal e o custo c_{ij} é linear por partes e assume a forma mostrada na figura 1.

Na figura 1, o valor $\bar{n}'_{ij}$ é a margem de circuitos disponível sem custo na rede marginal. Assim, $\bar{n}'_{ij}$ pode ser obtido através da seguinte relação:

$$\bar{n}'_{ij} = 1 - \frac{f'_{ij}}{f_{ij}} \tag{3.14}$$

em que f'_{ij} é o fluxo de potência através dos circuitos no caminho $i - j$ na resolução de (3.12) e $\bar{f}_{ij}$ é o fluxo máximo de potência através dos circuitos no caminho $i - j$. Assim, os valores de $\bar{n}'_{ij}$ são obtidos da resolução de (3.12).



O algoritmo da rede marginal pode ser resumido nos seguintes passos:

Fase 1:

1. Assumir a configuração base, sem nenhuma adição, com configuração corrente e montar o sistema (3.12) para essa configuração, isto é, usar o modelo DC para a configuração corrente.
2. Resolver o PL (modelo DC) correspondente ao sistema (3.12) para a configuração corrente. Se a resolução do PL não apresentar corte de carga então foi terminada a fase 1, pois foi encontrada uma boa

configuração factível e deve-se passar para a fase 2. Caso contrario, ir ao passo 3.

3. Montagem e resolução da rede marginal: usando os resultados do passo anterior, identificar as demandas e gerações residuais, assim como a capacidade de transmissão residual dos circuitos da rede existente. Montar o modelo da rede marginal do sistema (3.13) e resolver o PL resultante.
4. Adicionar na configuração corrente um circuito naquele caminho da rede marginal que leva o maior fluxo de potência para obter a nova configuração corrente. Atualizar o investimento correspondente aos circuitos adicionados e voltar ao passo 2.

Fase 2:

1. É possível que existam alguns circuitos irrelevantes adicionados durante a fase 1 devido a outras adições mais importantes realizadas posteriormente. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de seus custos e eliminar aqueles que, uma vez simulada sua saída, não produzam cortes de carga no sistema.



3.4 Outros Algoritmos Usados no Problema de Planejamento

3.4.1 Algoritmos de Otimização Clássica

Na década de 80 iniciou-se uma nova fase na tentativa de se resolver a formulação (2.14) de maneira ótima e a principal ferramenta matemática encontrada foram as técnicas de decomposição matemática. O objetivo principal, era o de encontrar a solução ótima do problema de planejamento de transmissão, usando o modelo DC, isto é, resolvendo a formulação (2.14) o que significava resolver um problema PNLIM.

Nesta perspectiva, a metodologia mais utilizada foi a técnica de decomposição de Benders, que explorava a decomposição natural do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão em duas partes, desta maneira:

- *Um subproblema de investimento* em que se escolhe um plano de expansão candidato e, calculam-se os custos de investimento associados ao mesmo.
- *Um subproblema de operação* onde é testado o plano de expansão candidato em termos do adequado fornecimento de carga.

A otimização global é atingida através de uma resolução iterativa das resoluções separadas dos subproblemas de operação e investimento.

Estas metodologias de decomposição foram incapazes de resolver os sistemas de grande porte, como o sistema Norte-Nordeste.

3.4.2 Algoritmos Combinatoriais

Resolver um problema de otimização combinatorial consiste em determinar a “melhor” ou a solução “ótima” entre um grande número de



soluções alternativas, assumindo-se para isto, que a qualidade de uma solução, seja quantificável e que possa ser comparada com alguma outra solução, e que além disso, o conjunto de soluções seja finito.

Nas últimas décadas uma grande variedade de problemas complexos surgiram em diversas áreas, tais como: ciência matemática, ciência computacional, engenharia, etc... . Entre todos os problemas de otimização combinatorial é provavelmente o problema do caixeiro viajante, o mais conhecido. Neste problema, o caixeiro inicia o processo em uma cidade, visita cada uma das cidades prescritas na lista e retorna à cidade de partida, de tal maneira que o comprimento da rota seja mínima. A importância deste problema está no aspecto que combina as características típicas de grandes problemas de otimização combinatorial, contendo os elementos matemáticos complicantes.

Uma consequência direta da propriedade de "NP-completo" é que a solução ótima não pode ser obtida em razoáveis tempos de computação. Grandes problemas "NP-completo" podem ser resolvidos com algoritmos apropriados; estes, por sua vez, podem ser selecionados entre duas opções: uma que obtém o ótimo global com a desvantagem de requerer tempos de computação impraticáveis, e a outra que obtém soluções sub-ótimas com menor tempo de computação.

A primeira opção, constitui a classe de algoritmos de otimização. Exemplos bem conhecidos são métodos de enumeração usando planos de corte ("*branch and bound*", entre outros) ou *técnicas de programação dinâmica*. A segunda opção, constitui a classe de algoritmos de aproximação, também freqüentemente chamados algoritmos heurísticos, tais como: *algoritmos de busca local* e *algoritmos randômicos*. A divisão entre estas duas classes de algoritmos não é muito restrita. Alguns tipos de algoritmos podem ser empregados em ambos propósitos, por exemplo, regras de limitação heurística de "*branch and bound*" podem ser facilmente transferidas a um algoritmo aproximado.

Além disso, distinguem-se em ambas as classes: *algoritmos gerais* e *algoritmos especializados*. Os primeiros, aplicáveis a uma grande variedade de



problemas e, portanto, podem ser chamados problemas independentes. Os segundos, empregam informação específica e sua aplicação é por conseguinte limitada a um conjunto restrito de problemas. Nos algoritmos especializados, em cada tipo de problema de otimização combinatorial um novo algoritmo é construído. Algoritmos, tais como: "simulated annealing" (SA), genéticos e busca tabu, são algoritmos gerais de alta qualidade, apesar de que em implementações práticas estes algoritmos se comportam como algoritmos de aproximação.

Os algoritmos acima estão sendo empregados na solução de sistemas de grande porte; nestes, reportam-se resultados muito satisfatórios na maioria das aplicações apresentadas. O SA faz uso de conceitos descritos na Mecânica Estatística. No processo físico o material é esquentado a uma temperatura elevada para logo ser resfriado de maneira lenta de tal forma que a estrutura do material ao final do processo fique perfeita. O algoritmo genético, é uma técnica de busca baseada na mecânica da seleção natural das espécies. Busca tabu, nasce de regras geradas na inteligência artificial: neste, se conta com um esquema de busca local para explorar o espaço de soluções além do ótimo local.

Quando um método exato tem capacidade de resolver um problema de otimização, então o mesmo deverá ser empregado; com isto, garante-se a obtenção da solução ótima. O grande inconveniente é o requerimento de um grande esforço computacional. No caso de não existir uma metodologia exata, como mencionado anteriormente, recorre-se aos métodos heurísticos os quais acham soluções que estão perto do ótimo global em tempos de computação relativamente baixos, dependendo da qualidade da resposta que se deseja obter.



Capítulo 4

Algoritmo Heurístico Integrado

4.1 Introdução

A idéia de sistematizar um algoritmo que utilizasse em sua essência os principais métodos heurísticos utilizados em planejamento de sistemas de energia elétrica a longo prazo está intimamente ligada à possibilidade de encontrar uma melhor resposta para o planejamento.

Como acontece em qualquer pesquisa, durante o desenvolvimento do algoritmo, alguns problemas no desempenho do algoritmo, especialmente ao testar sistemas de grande porte, apareceram.

Quando se trabalha com algoritmos heurísticos construtivos, as fases mais críticas estão no início e no final do processo de planejamento. No início do processo, geralmente são adicionadas linhas de grande capacidade de transmissão e um erro na escolha de algumas destas linhas pode eliminar a possibilidade de se encontrar a solução ótima global e diminuir a possibilidade de encontrar soluções sub-ótimas de excelente qualidade. Por outro lado, nas fases finais do processo, geralmente são adicionadas linhas de pequenas capacidades de transmissão e um erro de adição nesta fase pode levar à adição inadequada de linhas de transmissão.

Outro problema verificado foi a estagnação, ou seja, as adições propostas pelo algoritmo produziram uma redução de corte de carga desprezível. problema este, verificado ocasionalmente na fase final do processo.

Para contornar estes problemas, são apresentadas algumas propostas que foram incorporadas ao Algoritmo Heurístico Integrado (AHI) como a



capacidade de gerar um conjunto de configurações, utilizando-se uma estratégia similar a de métodos Branch and Bound (B&B), adaptar ao AHI alguns ajustes adequados na fase final do processo.

Neste capítulo é apresentado o AHI básico e as propostas adicionais que foram incorporadas ao AHI.

4.2 Esquema básico do Algoritmo Heurístico Integrado

O algoritmo Heurístico Integrado utiliza como o critério de adição de um novo circuito, a melhor decisão dentre as propostas pelos indicadores de sensibilidade dos melhores métodos heurísticos (aqueles que se mostraram competitivos na prática):

- Algoritmo Heurístico de Garver
- Algoritmo do Mínimo Corte de Carga
- Algoritmo do Mínimo Esforço
- Algoritmo de Villasana – Garver
- Algoritmo da Rede Marginal de Calovic

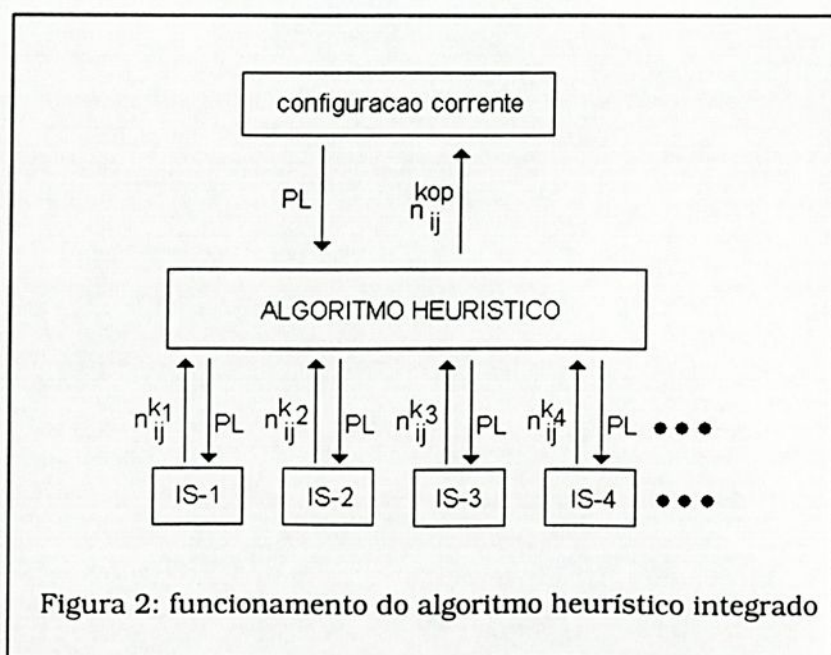


Figura 2: funcionamento do algoritmo heurístico integrado

A cada passo do algoritmo, têm-se uma lista de circuitos candidatos a adição, fornecida pelas melhores propostas dos diferentes indicadores de sensibilidade. Cada um desses candidatos são testados e é verificado aquele que apresenta o melhor desempenho em termos de corte de carga ou eliminação de sobrecarga.

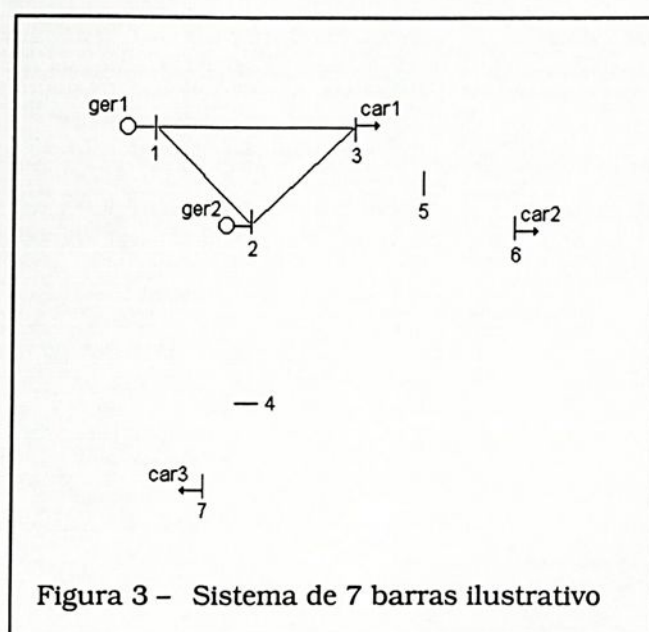
Para encontrar os indicadores de sensibilidade de cada metodologia, processa-se um problema de PL correspondente à configuração corrente e ao respectivo método a se resolver, da mesma forma, para verificar o desempenho de cada elemento da lista de linhas candidatas a adição, escolhidas pelos diferentes indicadores de sensibilidade. Assim, em cada passo, o algoritmo deve implementar uma decisão apresentada esquematicamente na figura 2 em que IS – K identifica o indicador de sensibilidade da metodologia heurística k.

Geração de caminhos e análise de desempenho do Algoritmo Heurístico Integrado

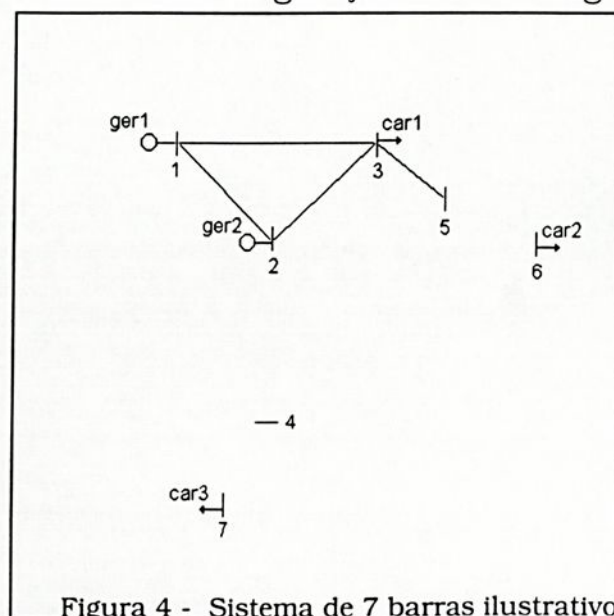
Um caminho é uma linha ou um conjunto de adições de linhas que resolvem o problema de geração ou demanda de uma barra ilhada. Para evitar a adição de uma linha “pendurada”, ou seja, a adição de uma linha que não complete um caminho, foi criado um dispositivo que age junto aos algoritmos heurísticos que fazem parte do algoritmo heurístico integrado, acrescentando outra ou outras linhas à esta até completar um caminho, minimizando os custos desta adição.

Para exemplificar, observe o sistema de 7 barras mostrado na figura 3. Ger representa as barras de geração, Car as barras de carga.



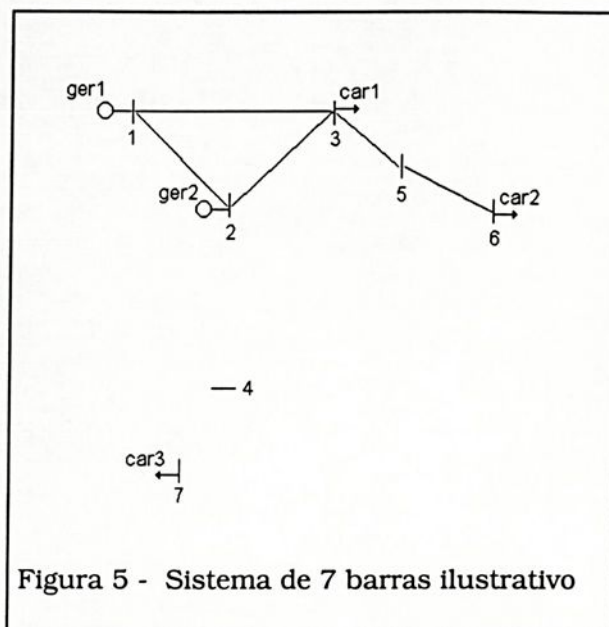


Suponha que em um passo qualquer, o método de mínimo esforço (só para exemplificar) tenha escolhido a linha 3-5 como a melhor opção. Observe que se for implementada apenas esta linha ao sistema, ela ficará pendurada, pois a barra 5 não é uma barra de geração nem de carga (figura 4).



O dispositivo então identifica a linha 5-6 como a mais adequada para que junto com a linha 3-5 forme um novo caminho, o caminho formado pelas

linhas 3-5 e 5-6. Este caminho então é adicionado à configuração corrente (figura 5).



Desta maneira se contorna o problema da adição de linhas penduradas (linhas que não reduzem cortes de carga) ao sistema.

O índice de desempenho do algoritmo integrado é definido por

$$I_s^{AI} = \frac{I_s^{mcc}}{c_{ij}} \quad (4.1)$$

onde I_s^{AI} é o índice de sensibilidade do algoritmo integrado; I_s^{mcc} é o índice de sensibilidade obtido subtraindo-se o valor do corte de carga corrente e o valor do corte de carga simulado com a adição do caminho determinado pelo método em análise, c_{ij} é o custo (linha) ou a soma dos custos (mais de uma linha) do caminho.

Desta forma, obtém-se um índice de sensibilidade I_s^{AI} para cada método do algoritmo integrado.

O caminho com maior I_s^{AI} é escolhido, ou seja, aquele que apresenta grandes valores de I_s^{mcc} e/ou pequenos valores de c_{ij} .

O algoritmo heurístico integrado pode ser resumido nos seguintes passos:

Fase 1:

1. Assumir a configuração base, sem nenhuma adição, como configuração corrente.
2. Para a configuração corrente, resolver o PL de cada método listando os indicadores de sensibilidade dos algoritmos heurísticos que compõem o algoritmo integrado. Se no método do mínimo corte de carga não se verifica corte de carga, ir para fase 2. Caso contrário, ir ao passo 3.
3. Para cada índice listado, identificar o respectivo caminho. Adicionar cada caminho separadamente à configuração corrente determinando o I_s^{mcc} de cada um e calcular os respectivos c_{ij} , com esses dados, calcular o índice de desempenho do algoritmo heurístico (I_s^{AI}) de cada caminho.
4. Adicionar definitivamente à configuração corrente o caminho em que se verifica o melhor desempenho do sistema e retornar ao passo 2.

Fase 2:

1. É possível que existam alguns circuitos irrelevantes adicionados durante a fase 1 devido a outras adições mais importantes realizadas posteriormente. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de seus custos e eliminar aqueles que, uma vez simulada sua saída, não produzam cortes de carga no sistema.



4.3 Geração de um conjunto de configurações com AHI usando uma estratégia tipo Branch and Bound (B&B)

O início do processo iterativo dos algoritmos heurísticos é crítico, pois no início, os maiores caminhos, ou seja, aqueles que interligam as 'maiores' demandas às gerações, são os que se tornam os mais atrativos no processo, e, pode acontecer do caminho escolhido nesta fase não ser o mais adequado para o planejamento. A geração de um conjunto de configurações utilizando-se a estratégia de B&B é uma alternativa para contornar este problema.

Esta estratégia pode ser organizada em níveis. Em cada nível, as opções de adição são organizadas em uma 'fila' de forma que a proposta mais atrativa se posicione no topo da fila e não só a mais atrativa é considerada, mas as outras também, dependendo do grau de aprofundamento que se queira alcançar com esta estratégia.

Vamos supor um exemplo para ilustrar esta estratégia.

Considere, a título de ilustração, que se queira empregar esta estratégia para criar n configurações com m níveis e com um grau k de aprofundamento. A figura 6 é o desenho do exemplo.

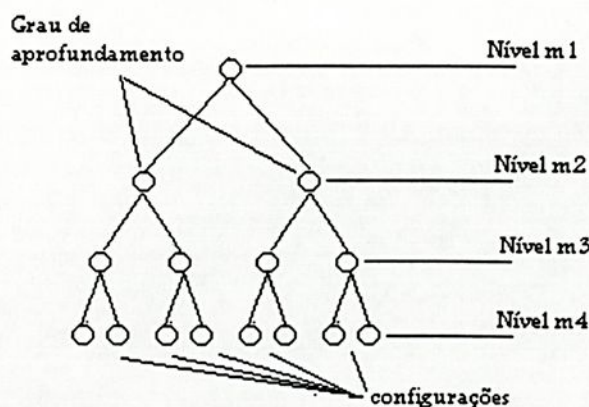


Figura 6 - Exemplo ilustrativo

Em cada nível, k opções de adição são consideradas, totalizando-se no final do processo um conjunto de n (com $n=k.m$) configurações.

Para o Algoritmo Heurístico Integrado, foi adaptado uma estratégia que compõe ao final do processo, 8 configurações. Estratégia esta, obviamente, composta por uma estrutura de 4 níveis, onde se adotou um grau 2 de aprofundamento. A Figura 7 esquematiza esta estratégia.

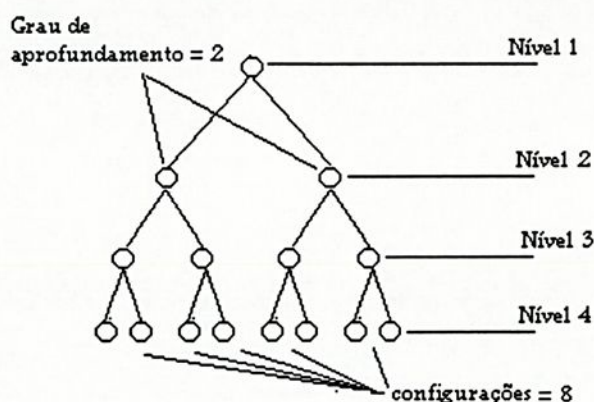


Figura 7 - Exemplo ilustrativo

Adotando-se um grau 2 de aprofundamento, significa dizer que, em cada nível, além da linha (ou caminho) mais atrativa para ser adicionada, a segunda opção proposta na iteração, também é considerada e *adicionada*, promovendo assim uma configuração diferente daquela onde a mais atrativa foi adicionada. Este processo realizado até o último nível, ou seja, até o quarto nível, acaba por formar as oito configurações pré-determinadas.

Com a utilização desta estratégia, busca-se contornar o problema crítico observado nos algoritmos heurísticos no início de cada processo iterativo, pois agora, na fase inicial do processo (percorrida pelos quatro níveis da estratégia), não é considerado somente o circuito mais atrativo, melhorando-se, com isso, consideravelmente, a possibilidade de encontrar propostas de investimento excelentes.

4.4 Modificação adicional no AHI

Foi verificado durante o curso do trabalho, que durante as fases iniciais do processo iterativo, considerando todos os algoritmos heurísticos estudados, o algoritmo de Garver foi o que obteve o melhor desempenho, ou seja, foi responsável pelas melhores escolhas de circuito durante essa etapa do processo iterativo.

Neste aspecto, testes com uma modificação adicional feita no AHI foram realizados, e bons resultados foram encontrados.

A modificação adicional foi propor que, no início do processo iterativo do AHI, ao invés de se utilizar o seu indicador de sensibilidade para determinar o circuito a ser adicionado, se utilizasse o indicador de sensibilidade do algoritmo heurístico de Garver, de forma que, a melhor e a segunda melhor proposta fosse considerada, até as três iterações iniciais, proporcionando assim, no final desta etapa do processo iterativo, um total de oito configurações. A variável utilizada para determinar até o momento de se considerar o indicador de Garver para a adição dos circuitos ou o momento de se adotar o indicador de sensibilidade do AHI, foi o investimento obtido durante a etapa. Na outra etapa, o indicador considerado passa a ser o indicador do AHI, e da mesma forma que na etapa anterior, para as três primeiras iterações as duas melhores propostas são consideradas. Com isso, no final do processo iterativo, dezesseis configurações são determinadas.

Para a realização dos testes, três faixas de investimento foram consideradas: a primeira – investimento até um bilhão de dólares, a segunda – um bilhão e duzentos mil dólares, a terceira – um bilhão e quatrocentos mil dólares. Isto significa dizer que, os testes feitos para a primeira faixa de investimento, o índice de sensibilidade do algoritmo de Garver foi o indicador adotado no processo iterativo até um investimento bem próximo de um bilhão de dólares, e após este investimento, o indicador de sensibilidade passou a ser o índice de sensibilidade do AHI, até o final do processo iterativo. Da mesma forma para as outras faixas de investimentos.



Os melhores resultados encontrados, foram obtidos quando o indicador de sensibilidade de Garver atuou até a faixa de investimento de um bilhão e quatrocentos mil dólares. Estes resultados são mostrados no capítulo 5.



Capítulo 5

Testes obtidos usando os Algoritmos Heurísticos e o Algoritmo Heurístico Integrado

5.1 Testes com os Algoritmos Heurísticos

Estes testes foram feitos com o principal objetivo de visualizar o desempenho individual de cada método. Os resultados descritos a seguir são referentes aos métodos:

- Método de Garver
- Método do Mínimo Corte de Carga
- Método do Mínimo Esforço modificado¹
- Método do Mínimo Esforço original
- Método de Villasana-Garver

Testados nos sistemas indicados abaixo:

—	Sistema de 6 barras sem reprogramação	Sistema de 6 barras com reprogramação	Sistema de 46 barras Sem reprogramação	Sistema de 46 barras com reprogramação	Sistema de 87 barras sem reprogramação
Garver	X	X	X	X	X
Mínimo Corte de Carga	X	X	X	X	X
Mínimo Esforço (modificado)	X	X	X	X	X
Mínimo Esforço (original)	X	X	X	X	X
Villasana-Garver	X	X	X	X	

¹ A diferença deste para o original, está no modelo matemático utilizado. O método do Mínimo Esforço com modificação utiliza o modelo matemático usado pelo método de Mínimo Corte de Carga.



Os testes foram feitos com os índices de sensibilidade respectivos (característico) de cada método e com uma variação destes índices de sensibilidade (índice de sensibilidade modificado), determinado da seguinte forma:

$$IS_{\text{modificado}} = \frac{IS}{\text{custo}}$$

sendo: IS é o índice de sensibilidade do respectivo método; "custo" é o custo da linha em análise, $IS_{\text{modificado}}$ é o índice de sensibilidade modificado.

Uma observação importante que se faz é que no Método de Villasana-Garver, o custo já está embutido na lógica do método. Desta forma calcular o $IS_{\text{modificado}}$ para esse método seria redundante, não tendo sentido, portanto, fazê-lo.

5.1.1 Testes com cada algoritmo utilizando os dois índices de sensibilidade

5.1.1.1 Sistema de 6 barras sem reprogramação da geração

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se os índices de sensibilidade dos métodos: Garver, Mínimo Corte de Carga e Mínimo Esforço (modificado e original) para o sistema de 6 barras sem reprogramação da geração:



Tabela 1 - Sistema de 6 barras sem reprogramação da geração

-	Método de Garver			Método do Mínimo Corte de Carga				Método do Mínimo Esforço (modificado)				Método do Mínimo Esforço (original)			
	Barras	Linha	I.S.	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Cir. Sobre.
1	4-6	14	290	4-6	14	1002.3	444.51	4-6	14	300000	444.51	2-6	9	343.8E6	4
2	2-6	9	255	2-6	9	182.3	344.82	2-6	9	9970.4	344.82	4-6	14	78.8E3	3
3	2-6	9	305	2-6	9	100	244.78	5-6	15	3319.4	271.16	5-6	15	13049	3
4	2-6	9	205	2-6	9	100	188.3	5-6	15	3319.4	207.7	2-6	9	7120	4
5	4-6	14	145	4-6	14	100	99.57	2-6	9	3000	107.67	4-6	14	3876.1	4
6	4-6	14	45	3-5	11	100	48.86	2-6	9	3000	60.68	5-6	15	2643.1	1
7	3-5	11	40	2-6	9	100	0	4-6	14	3000	0	2-6	9	1733.8	0
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Investimento (US\$.10 ³) 200			Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 200 Fase 2 = 200				Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 272 Fase 2 = 272				Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 272 Fase 2 = 272			

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se os índices de sensibilidade alternativos ($I.S._{alternativo} = I.S./custo$) dos métodos: Mínimo Corte de Carga e Mínimo Esforço (modificado e original) para o sistema de 6 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 2 - Sistema de 6 barras sem reprogramação da geração Usando I.S. alternativo

-	Método do Mínimo Corte de Carga				Método do Mínimo Esforço (modificado)				Método do Mínimo Esforço (original)			
	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Cir. Sobre.
1	4-6	14	33,41	444,510	4-6	14	10000	444,510	2-6	9	114,6E6	3
2	2-6	9	6,08	344,819	2-6	9	332,35	344,819	4-6	14	2627,6	4
3	2-6	9	3,33	244,784	2-6	9	100	244,784	2-6	9	432,01	4
4	2-6	9	3,33	188,303	2-6	9	100	188,303	4-6	14	179,28	3
5	3-5	11	4,92	144,705	3-5	11	100	144,705	3-5	11	126,6	2
6	2-6	9	3,33	82,878	2-6	9	100	82,878	2-6	9	119,8	1
7	4-6	14	3,33	0	2-5	8*	101,7	74,784	2-6	9	64,02	0
8	-	-	-	-	4-6	14	100	0	-	-	-	-
-	Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 200 Fase 2 = 200				Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 231 Fase 2 = 200				Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 200 Fase 2 = 200			

* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)

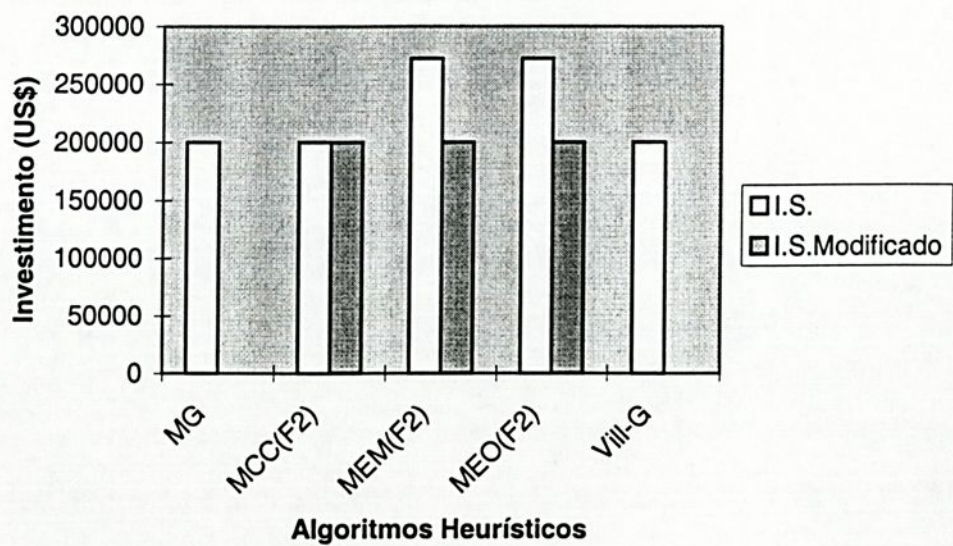
A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade do método de Villasana-Garver para o sistema de 6 barras sem reprogramação da geração:



Tabela 3 – Sistema de 6 barras sem reprogramação da geração Algoritmo de Villasana-Garver			
Número da iteração	Barras (de Conexão)	Linha (adicionada)	Índice de sensibilidade (I.S.)
1	4-6	14	331,274
2	4-6	14	231,284
3	2-6	9	213,726
4	2-6	9	248,591
5	2-6	9	148,571
6	3-5	11	83,720
7	2-6	9	49,147
Investimento após fase 1 (US\$.10 ³) = 200			
Investimento após fase 2 (US\$.10 ³) = 200			

A solução ótima deste sistema é $v=200$, ou seja, um investimento de 200 mil dólares, com as seguintes adições: $n_{2-6} = 4$, $n_{3-5} = 1$ e $n_{4-6} = 2$.

Gráfico 1 - Investimento p/ o Sistema de 6 Barras sem repr.



Os métodos de Garver, do Mínimo Corte de Carga e de Villasana-Garver encontraram a solução ótima. Os métodos de Mínimo Esforço (modificado e original) também encontraram a solução ótima deste sistema, mas quando utilizados com o índice de sensibilidade alternativo e considerando a fase 2*.

* Fase 2 – Fase do processo iterativo em que se verifica se a retirada dos circuitos listados de forma decrescente em relação a seus custos, produz variação do corte de carga

5.1.1.2 Sistema de 6 barras com reprogramação da geração

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se os índices de sensibilidade dos métodos: Garver, Mínimo Corte de Carga e Mínimo Esforço (modificado e original) para o sistema de 6 barras com reprogramação da geração:

Tabela 4 - Sistema de 6 barras com reprogramação da geração															
-	Método de Garver			Método do Mínimo Corte de Carga				Método do Mínimo Esforço (modificado)				Método do Mínimo Esforço (original)			
nº de Iter.	Barras	Linha	I.S.	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Cir. Sobre.
1	4-6	14	190	2-6	9	1000	269,581	2-6	9	300000	269,581	4-6	14*	862,4E6	3
2	4-6	14	90	4-6	14	226,45	169,861	4-6	14	15421,55	169,861	2-6	9	16750,48	4
3	2-3	6	80	2-3	6	100	112,514	2-6	9	3000	124,672	3-5	11	3402,97	4
4	2-6	9	50	3-5	11	100	51,091	4-6	14	3000	65,956	4-6	14*	2584,25	3
5	3-5	11	40	4-6	14	100	0	5-6	15	3200,06	0	2-6	9	4004,73	2
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3-5	11	1611,81	1
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2-6	9	1634,63	0
-	Investimento (US\$.10³) 130			Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 130 Fase 2 = 130				Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 181 Fase 2 = 181				Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 190 Fase 2 = 130			
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)															

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos utilizando-se os índices de sensibilidade alternativos ($I.S_{\text{alternativo}} = I.S./\text{custo}$) dos métodos: Mínimo Corte de Carga e Mínimo Esforço (modificado e original) para o sistema de 6 barras com reprogramação da geração:

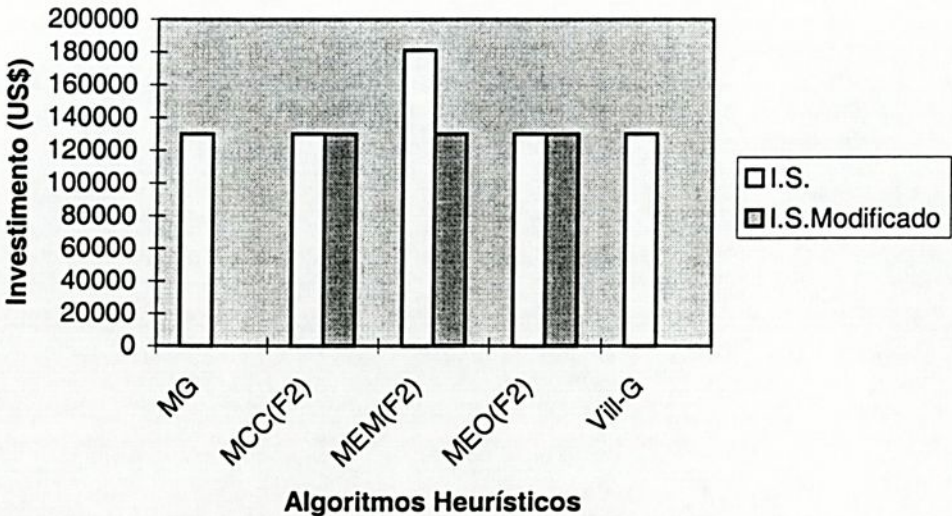
Tabela 5 - Sistema de 6 barras com reprogramação da geração												
Usando I.S. alternativo												
-	Método do Mínimo Corte de Carga				Método do Mínimo Esforço (modificado)				Método do Mínimo Esforço (original)			
Nº de Iterações	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Cir Sobre
1	2-6	9	33,33	269,581	2-6	9	10000	269,581	4-6	14*	28,7E6	3
2	4-6	14	7,55	169,861	4-6	14	514,05	169,861	2-6	9	558,35	4
3	2-3	6	5	112,514	2-3	6	100	112,514	3-5	11	170,15	4
4	3-5	11	5	51,091	3-5	11	100	51,091	4-6	14*	86,14	3
5	4-6	14	3,33	0	4-6	14	100	0	2-6	9	133,49	2
6	-	-	-	-	-	-	-	-	3-5	11	80,59	1
7	-	-	-	-	-	-	-	-	2-6	9	54,49	0
-	Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 130 Fase 2 = 130				Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 130 Fase 2 = 130				Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 190 Fase 2 = 130			
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)												

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade do método de Villasana-Garver para o sistema de 6 barras com reprogramação da geração:

Tabela 6 – Sistema de 6 barras com reprogramação da geração			
Algoritmo de Villasana-Garver			
Número da iteração	Barras (de Conexão)	Linha (adicionada)	Índice de sensibilidade (I.S.)
1	2-6	9	179,988
2	4-6	14	150,010
3	3-5	11	101,820
4	4-6	14	47,281
5	2-3	6	5,759
Investimento após fase 1 (US\$.10 ³) = 130			
Investimento após fase 2 (US\$.10 ³) = 130			

A solução ótima deste problema é $v=110$ [9], com as seguintes adições:
 $n_{4-6} = 3$ e $n_{3-5} = 1$.

Gráfico 2 - Investimento p/ o Sistema de 6 Barras com repr.



Nenhum dos algoritmos encontrou a solução ótima. A melhor configuração encontrada foi um ótimo local $v=130$.

5.1.1.3 Sistema de 46 barras sem reprogramação da geração

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se os índices de sensibilidade dos métodos: Garver, Mínimo Corte de Carga e Mínimo Esforço (modificado e original) para o sistema de 46 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 7 - Sistema de 46 barras sem reprogramação da geração															
-	Método de Garver			Método do Mínimo Corte de Carga				Método do Mínimo Esforço (modificado)				Método do Mínimo Esforço (original)			
nº de Iter.	Barras	Linha	I.S.	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Cir. Sobre.
1	42-43	47	800	40-41	76	3040.9	3423.9	28-31	62	212000	3433.6	31-32	61	656846272	14
2	46-6	53	749.8	28-41	66	6394.8	2862.1	31-32	61	184000	3434.5	28-31	62*	541063104	14
3	5-6	78	867.7	9-10	79*	2297.6	2856.3	46-3	54	240288	3499.8	46-3	54	311900.75	14
4	31-32	61	561.3	46-10	50*	9628.3	2696.1	2-3	77	450000	3095.2	2-3	77	129376310	11
5	20-21	46	561.2	24-25	74	1892.4	2691.9	24-25	74	100229	3090.6	24-25	74	168024.62	11
6	24-25	74	381.6	21-25	59*	3690.7	1991.4	21-25	59	164332	2406.4	19-25	58*	266124.09	5
7	5-6	78	567.7	46-3	54	922.4	1989.1	19-25	58*	58744	2509.3	40-41	76	69065.31	5
8	28-31	62	463.2	2-3	77	3875.9	1600.3	40-41	76	29336	2505.9	31-41	68	128948.66	6
9	21-25	59	338.8	2-3	77	735.3	1450	31-41	68	464224	2140.7	28-43	67*	21613.98	4
10	28-30	63	266.8	24-25	74	754.3	1287.4	28-43	67*	15815.	2250.6	19-21	16*	15931.53	4
11	26-29	65	266.8	19-25	58	1170.5	1241.8	16-28	55*	25619.	2257.5	9-10	79*	13954.3	4
12	29-30	75	270	42-43	47	759.5	598.13	46-6	53	13277.	2256.5	46-10	50*	57925.13	4
13	42-43	47	200	20-21	46	739.7	444.4	5-6	78	52860.7	1943.7	19-25	58*	11908.71	4
14	19-21	16	196.5	31-32	61	19654.9	157.72	19-21	16*	11249.8	2005.4	42-43	47	10527.1	4
15	24-25	74	29.1	28-31	62	1954.1	30.21	17-29	18*	10494.6	2006.5	16-28	55*	10721.28	4
16	-	-	-	42-43	47	849.7	0.26	40-45	71*	8175.8	1959.3	28-43	67*	9027.44	4
17	-	-	-	-	-	-	-	16-28	55*	6902.0	1969.0	20-21	46	8139.54	4
18	-	-	-	-	-	-	-	19-25	58*	5867.6	1987.8	46-6	53	6406.7	4
19	-	-	-	-	-	-	-	12-14	11*	4847.7	1987.8	5-6	78	25480.57	3
20	-	-	-	-	-	-	-	20-21	46	4500	1334.8	17-19	18*	6170.08	3
21	-	-	-	-	-	-	-	19-21	16*	7723.1	1369.8	40-45	71*	5336.59	3
22	-	-	-	-	-	-	-	20-21	46	4500	1289.1	19-21	16	5158.91	3
23	-	-	-	-	-	-	-	19-21	16	4755.3	1277.1	32-43	39*	4672.93	3
24	-	-	-	-	-	-	-	42-43	47	4500	535.40	24-25	74	4593.13	2
25	-	-	-	-	-	-	-	28-43	67*	14162.4	622.45	42-43	47	3550.35	1
26	-	-	-	-	-	-	-	32-43	39	6888.4	674.02	19-25	58	3327	1
27	-	-	-	-	-	-	-	42-43	47	4500	295.16	28-43	67*	2847.28	1
28	-	-	-	-	-	-	-	28-43	67*	6120.1	289.36	12-14	11	2423.89	1
29	-	-	-	-	-	-	-	24-25	74	4500	0.03	20-21	46	2328.48	0
-	Investimento (US\$.10³) 162.278			Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 221.833 Fase 2 = 181.645				Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 612.547 Fase 2 = 251.139				Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 589.244 Fase 2 = 223.990			
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)															

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se os índices de sensibilidade alternativos ($I.S_{\text{alternativo}} = I.S./\text{custo}$) dos métodos: Mínimo Corte de Carga e Mínimo Esforço (modificado e original) para o sistema de 46 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 8 - Sistema de 46 barras sem reprogramação da geração												
Usando I.S. alternativo												
-	Método do Mínimo Corte de Carga				Método do Mínimo Esforço (modificado)				Método do Mínimo Esforço (original)			
Nº de Iterações	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Cir Sobre.
1	26-29	65	0.43	3431.40	28-31	62	271.13	2433.68	31-32	61	93143.26	14
2	29-30	75	0.45	3422.95	31-32	61	260.92	3434.57	28-31	62*	69198.51	14
3	28-30	63	1.45	3279.07	5-6	78	27.4	3431.49	5-6	78	37.01	14
4	9-10	79*	0.25	3273.84	46-6	53	49	3136.04	46-6	53	74.85	11
5	46-10	50*	0.8	3109.70	24-25	74	12.26	3131.49	24-25	74	20.38	11
6	24-25	74	0.23	3104.97	21-25	59	7.78	2450.59	21-25	59*	9.89	10
7	21-25	59*	0.17	2403.90	40-41	76	3.58	2447.29	40-41	76	8.83	10
8	40-41	76	0.15	2398.39	14-15	49*	1.71	2446.7	31-41	68	4.14	9
9	31-41	68	0.13	2098.34	15-16	72*	3.18	2335.46	14-15	49	2.21	9
10	28-31	62	0.51	1877.33	17-19	18*	1.63	2345.02	15-16	72	4.12	10
11	42-43	47	0.1	1317.79	19-25	58*	1.56	2453.60	19-25	58	1.55	5
12	5-6	78	0.1	1316.19	31-41	68	1.39	2111.38	26-29	65*	1.01	5
13	46-6	53	0.2	1026.48	16-28	55*	1.51	2123.76	29-30	75*	2.47	5
14	24-25	74	0.09	863.97	26-29	65*	1.48	2124.07	28-30	63*	10.82	5
15	5-6	78	0.09	559.69	29-30	75*	3.81	2121.58	17-19	18*	0.94	5
16	19-25	58	0.03	580.69	28-30	63*	14.85	2011.97	42-43	47*	0.89	3
17	20-21	46	0.09	214.44	12-14	11*	0.95	2011.97	41-43	70*	1.04	4
18	31-32	61	0.38	0.26	40-45	71*	0.8	1957.31	20-21	46	0.83	3
19	-	-	-	-	2-3	77	0.66	1956.88	2-3	77	0.64	3
20	-	-	-	-	46-3	54	0.95	1646.89	46-3	54	0.92	2
21	-	-	-	-	26-29	65*	0.58	1624.61	24-25	74	0.59	1
22	-	-	-	-	20-21	46	0.55	1052.49	19-21	16*	0.5	1
23	-	-	-	-	19-21	16	0.77	1025.16	12-14	11*	0.47	1
24	-	-	-	-	20-21	46	0.55	998.53	40-45	71*	0.36	1
25	-	-	-	-	42-43	47	0.55	316.46	32-43	39*	0.34	1
26	-	-	-	-	41-43	70*	1.6	411.03	42-43	47	0.37	0
27	-	-	-	-	32-43	39*	0.55	493.13	-	-	-	-
28	-	-	-	-	42-43	47	0.55	279.22	-	-	-	-
29	-	-	-	-	24-25	74	0.55	0.09	-	-	-	-
-	Investimento (US\$.10³)				Investimento (US\$.10³)				Investimento (US\$.10³)			
	Fase 1 = 219.093				Fase 1 = 395.710				Fase 1 = 357.273			
	Fase 2 = 178.905				Fase 2 = 215.182				Fase 2 = 186.064			
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)												

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade do método de Villasana-Garver para o sistema de 46 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 9 – Sistema de 46 barras sem reprogramação da geração**Algoritmo de Villasana-Garver**

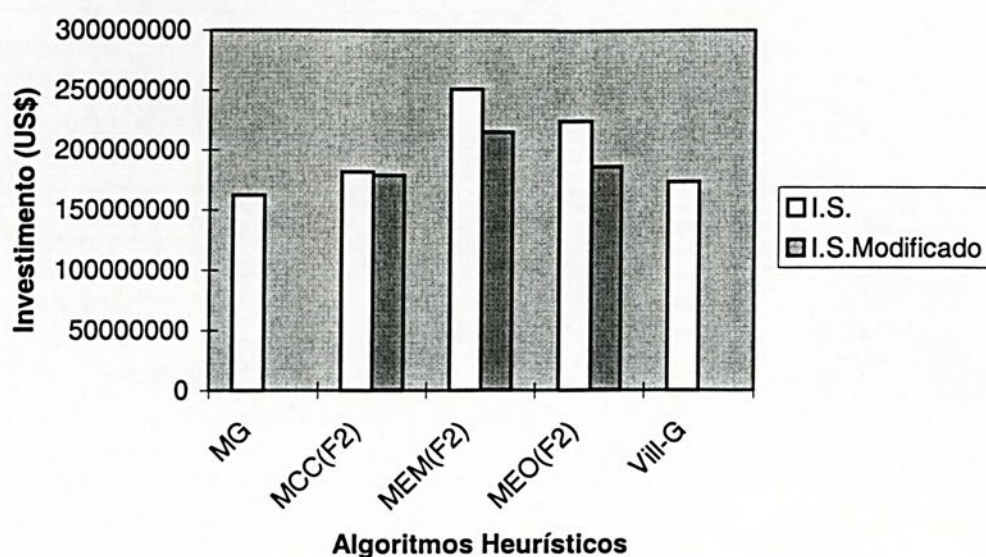
Número da iteração	Barras (de Conexão)	Linha (adicionada)	Índice de sensibilidade (I.S.)
1	4-11	51*	1383,286
2	18-19	45*	1782,75
3	42-43	47	2829,337
4	17-19	18*	3952,334
5	20-21	46*	829,007
6	28-31	62	729,955
7	31-32	61	652,696
8	19-25	58	916,125
9	24-25	74	1342,920
10	19-21	16*	2460,353
11	14-15	49*	1341,640
12	14-15	49	1818,462
13	16-28	55*	2089,983
14	19-21	16*	2708,622
15	42-43	47	527,893
16	5-6	78	440,989
17	15-16	72	531,741
18	18-20	15*	568,851
19	32-43	39	1074,881
20	46-6	53	454,830
21	5-6	78	290,847
22	24-25	74	175,452

Investimento após a fase 1 (US\$.10³) = 319.452Investimento após a fase 2 (US\$.10³) = 172.889

* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)

A melhor configuração encontrada dentre os algoritmos que utilizam a modelagem DC (levam em consideração as 2 leis de Kircchoff) constituiu um investimento de 172.889.000 dólares, configuração esta, encontrada pelo método de Villasana-Garver.

**Gráfico 3 - Investimento p/ o Sistema de 46 Barras
sem repr.**



A solução ótima deste sistema produz um investimento de 154.420.000 dólares [9], com as seguintes adições: $n_{20-21} = 1$, $n_{46-6} = 1$, $n_{31-32} = 1$, $n_{26-29} = 3$, $n_{29-30} = 2$, $n_{5-6} = 2$, $n_{42-43} = 2$, $n_{19-25} = 1$, $n_{28-30} = 1$ e $n_{24-25} = 2$.

Assim, a melhor configuração encontrada, ultrapassa em 18,469 milhões de dólares a configuração ótima.

Levando em consideração apenas a fase 1, o algoritmo de Mínimo Corte de Carga teve o melhor desempenho. O investimento sugerido pelo Método de Garver é menor que os 172.889.000 dólares, porém, há de se considerar, que o Método de Garver, deve ser interpretado apenas como um parâmetro indicador, visto que este método não resolve o modelo DC, apenas o modelo de transporte.

5.1.1.4 Sistema de 46 barras com reprogramação da geração

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se os índices de sensibilidade dos métodos: Garver, Mínimo Corte de Carga e Mínimo Esforço

(modificado e original) para o sistema de 46 barras com reprogramação da geração:

Tabela 10 - Sistema de 46 barras com reprogramação da geração															
-	Método de Garver			Método do Mínimo Corte de Carga				Método do Mínimo Esforço (modificado)				Método do Mínimo Esforço (original)			
nº de lter.	Barras	Linha	I.S.	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Cir. Sobre.
1	20-21	46	764,6	40-41	76*	2883,9	2255,87	28-31	62	2120000	2265,196	9-10	79*	467511,09	13
2	46-6	53	546,4	28-41	66*	6401,1	1824,353	31-32	61	1840000	2267,019	46-10	50	611589,5	10
3	5-6	78	646,4	46-3	54	1492,91	1821,298	46-3	54	99420,67	2262,96	24-25	74	74400,86	10
4	42-43	47	408,6	2-3	77	5984,96	1369,11	2-3	77	450000	1809,937	19-25	58	136274,75	7
5	20-21	46	164,6	24-25	74	1340,6	1365,73	24-25	74	54595,2	1806,506	46-3	54	50967,48	7
6	20-23	22	89	21-25	59*	2506,63	850,239	19-25	58*	92268,11	1264,385	2-3	77	212929	4
7	5-6	78	46,4	42-43	47	704,49	740,846	40-41	76*	15287,87	1261,852	40-41	76*	15790,19	4
8	-	-	-	31-32	61*	752,32	719,607	31-41	68*	28525,88	989,429	32-41	69*	31064,2	4
9	-	-	-	20-21	46	707,06	367,352	17-32	57*	17647,61	995,39	19-21	16	13098,55	4
10	-	-	-	25-32	60	1348,61	141,866	28-43	67*	19384,83	1108,657	16-28	55	8651,14	3
11	-	-	-	2-3	77	737,1	0	46-6	53	11243,79	1107,716	31-32	61	274321568	3
12	-	-	-	-	-	-	-	5-6	78	44763,54	904,586	32-43	39	9117,22	3
13	-	-	-	-	-	-	-	16-28	55*	30870,17	938,26	20-21	46	7878,34	3
14	-	-	-	-	-	-	-	19-21	16*	10009,6	1071,439	46-6	53	5602,1	3
15	-	-	-	-	-	-	-	40-45	71*	9451,91	1020,134	5-6	78	22280,51	1
16	-	-	-	-	-	-	-	19-25	58	7337,72	942,613	40-45	71*	5558,83	1
17	-	-	-	-	-	-	-	33-24	27*	6574,33	954,333	25-32	60*	5172,88	2
18	-	-	-	-	-	-	-	39-42	36*	5498,5	931,764	42-43	47	5109,62	0
19	-	-	-	-	-	-	-	12-14	11*	4847,78	931,754	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	20-21	46	4500	276,721	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	19-21	16	9000,96	287,163	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	20-21	46	4500	271,471	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	19-21	16	4820,4	269,412	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	42-43	47	4500	0	-	-	-	-
-	Investimento (US\$.10³) 63.163			Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 177.952 Fase 2 = 102.318				Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 459.369 Fase 2 = 142.011				Investimento (US\$.10³) Fase 1 = 335.273 Fase 2 = 231.857			
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)															

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se os índices de sensibilidade alternativos ($I.S._{alternativo} = I.S./custo$) dos métodos: Mínimo Corte de

Carga e Mínimo Esforço (modificado e original) para o sistema de 46 barras com reprogramação da geração:

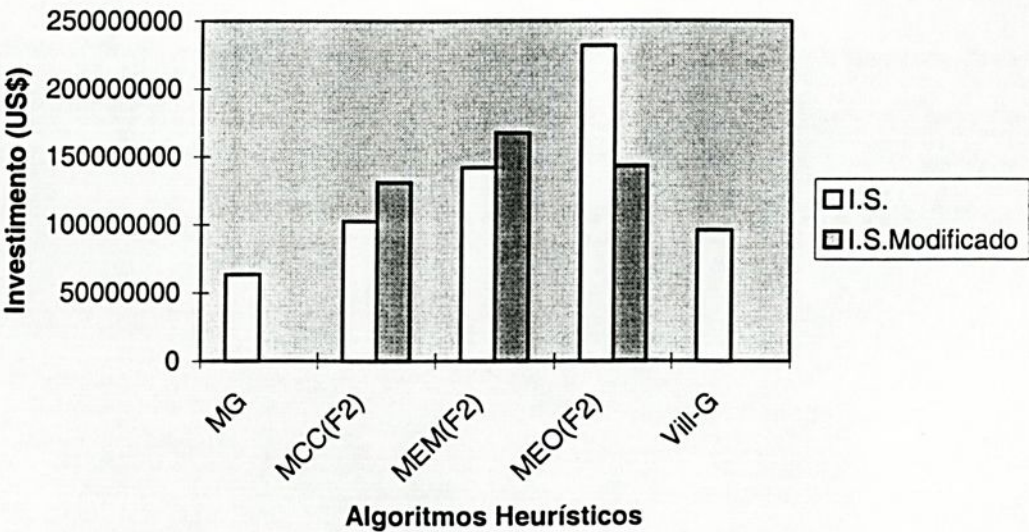
Tabela 11 - Sistema de 46 barras com reprogramação da geração Usando I.S. alternativo												
-	Método do Mínimo Corte de Carga				Método do Mínimo Esforço (modificado)				Método do Mínimo Esforço (original)			
Nº de Iterações	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Corte (MW)	Barras	Linha	I.S.	Cir Sobre.
1	40-41	76*	0,35	2255,8 7	28-31	62*	271,1 3	2265,1 9	9-10	79*	57.17	13
2	26-29	65	0,23	2257,0 7	31-32	61*	260,9 2	2267,0 1	46-10	50*	56.17	10
3	29-30	75	0,51	2249,0 8	5-6	78	10,42	2262,1 1	24-25	74	9.1	10
4	28-30	63	1,35	2110,9 9	46-6	53	31,04	1842,2 6	5-6	78	5.52	10
5	24-25	74	0,16	2107,7 2	24-25	74	6,6	1838,9 1	46-6	53	11.23	8
6	5-6	78	0,13	2103,9 2	21-25	59	3,88	1323,7 5	21-25	59	3.86	4
7	46-6	53	0,32	1637,2 5	40-41	76*	1,87	1321,2 0	40-41	76*	2.09	6
8	31-41	68*	0,13	1223,7 6	19-25	58*	1,11	1280,4 1	31-32	61*	1.42	4
9	21-25	59	0,1	729,86	12-14	11*	0,95	1280,3 8	31-41	68*	1.8	4
10	20-21	46	0,08	429,31	31-41	68	0,87	1006,5 8	19-25	58*	0.96	4
11	5-6	78	0,09	206,24	40-45	71*	0,82	950,67	26-29	65	0.91	3
12	42-43	47	0,09	38,14	16-28	55*	0,8	951,86	28-31	62*	65513.5 9	3
13	19-21	16	0,04	0	14-15	49*	0,85	952,41	29-30	75*	1.43	3
14	-	-	-	-	15-16	72*	1,68	1000,3 2	28-30	63*	6.25	3
15	-	-	-	-	17-19	18*	1,47	1004,6 8	14-15	49*	1.22	3
16	-	-	-	-	33-24	27*	0,8	1018,6 8	15-16	72*	1.53	3
17	-	-	-	-	2-3	77	0,7	1018,2 4	20-21	46	0.76	2
18	-	-	-	-	46-3	54	1,01	742,88	41-43	70*	0.58	2
19	-	-	-	-	16-17	17*	0,78	750,97	42-43	47	0.63	2
20	-	-	-	-	20-21	46	0,55	185,10	25-32	60	0.53	2
21	-	-	-	-	19-21	16	0,73	167,77	12-14	11*	0.47	2
22	-	-	-	-	17-19	18*	0,7	169,18	2-3	77	0.47	2
23	-	-	-	-	42-43	47	0,55	0	46-3	54	0.67	1
24	-	-	-	-	-	-	-	-	33-24	27*	0.42	0
-	Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 171.861 Fase 2 = 131.051				Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 321.146 Fase 2 = 167.599				Investimento (US\$.10 ³) Fase 1 = 314.083 Fase 2 = 143.338			
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)												

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade do método de Villasana-Garver para o sistema de 46 barras com reprogramação da geração:

Tabela 12 – Sistema de 46 barras com reprogramação da geração			
Algoritmo de Villasana-Garver			
Número da iteração	Barras (de Conexão)	Linha (adicionada)	Índice de sensibilidade (I.S.)
1	20-21	46	829,020
2	42-43	47	542,557
3	46-6	53	462,212
4	5-6	78	814,959
5	5-6	78	378,232
6	20-21	46	160,208
7	20-23	22	87,484
8	19-21	16	32,184
Investimento após a fase 1 (US\$.10 ³) = 95.795			
Investimento após a fase 2 (US\$.10 ³) = 95.795			

A configuração ótima deste sistema produz um investimento de 70.289.000 dólares [9], promovendo as seguintes adições: $n_{13-20} = 1$, $n_{46-6} = 1$, $n_{42-43} = 1$, $n_{20-23} = 1$, $n_{20-21} = 2$ e $n_{5-6} = 2$.

Gráfico 4 - Investimento p/ o Sistema de 46 Barras com repr.



Nos testes realizados, a melhor configuração foi encontrada pelo algoritmo de Villasana-Garver, com um investimento de 95.795.000 dólares, isto é, com investimento em torno de 25 milhões de dólares maior que a configuração ótima.

5.1.1.5 Sistema de 87 barras sem reprogramação da geração

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o Método de Garver, para o sistema de 87 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 13 - Sistema de 87 barras sem reprogramação da geração utilizando o MÉTODO DE GARVER											
Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha
1	18-50	69	15	16-44	63	29	13-15	52	43	25-55	86
2	18-50	69	16	68-69	149	30	16-61	65	44	41-64	111
3	18-50	69	17	2-87	4	31	61-85	138	45	61-64	137
4	18-74	71	18	3-83	7	32	48-49	118	46	22-58	81
5	72-73	157	19	3-87	8	33	5-58	20	47	67-68	146
6	73-74	159	20	18-50	69	34	43-58	115	48	5-56	19
7	13-15	52	21	13-15	52	35	25-55	86	49	21-57	78
8	18-74	71	22	18-74	71	36	43-55	114	50	56-57	133
9	72-83	158	23	40-45	109	37	5-68	22	51	49-50	121
10	68-83	150	24	15-16	59	38	48-49	118	52	15-16	59
11	16-44	63	25	16-44	63	39	18-50	69	53	41-64	111
12	18-50	69	26	13-14	51	40	36-46	106	-	-	-
13	15-16	59	27	42-44	112	41	2-87	4	-	-	-
14	6-67	27	28	3-87	8	42	61-85	138	-	-	-
Investimento (US\$.10 ³) 1.340.879											

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade do Mínimo Corte de Carga para o sistema de 87 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 14 - Sistema de 87 barras sem reprogramação da geração
Utilizando o I.S. de *MÍNIMO CORTE DE CARGA*

Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha
1	16-45	64	21	16-44	63	41	18-50	69	61	56-57	133
2	14-25	57	22	13-14	51	42	54-79	132	62	21-57	78
3	26-54	89	23	13-15	52	43	82-84	179	63	10-11	41
4	54-79	132	24	16-44	63	44	68-69	149	64	67-71	148
5	79-82	174*	25	16-77	66	45	18-50	69	65	2-87	4
6	75-82	165	26	77-84	171	46	18-74	71	66	21-57	78
7	6-75	30*	27	12-84	50	47	78-79	172	67	61-85	138
8	22-58	81	28	12-84	50	48	16-44	63	68	41-64	111
9	58-78	134	29	16-77	66	49	11-12	42	69	3-87	8
10	78-80	173	30	18-50	69	50	3-87	8	70	24-43	84
11	5-80	24	31	14-59	58	51	3-83	7	71	43-58	115
12	67-71	148	32	18-50	69	52	54-63	130	72	48-49	118
13	71-75	155	33	18-74	71	53	30-63	96	73	18-50	69
14	40-45	109	34	74-84	162	54	41-64	111	74	36-46	106
15	54-55	128	35	12-84	50	55	63-64	143	75	49-50	121
16	25-55	86*	36	18-74	71	56	80-83	177	76	2-87	4
17	25-55	86	37	52-59	123	57	68-83	150	77	49-50	121
18	54-55	128	38	18-50	69	58	61-85	138	-	-	-
19	53-54	124	39	68-83	150	59	16-61	65	-	-	-
20	25-55	86	40	71-83	156	60	5-56	19	-	-	-

Investimento (US\$.10³)

Fase 1 = 2.270.255

Fase 2 = 2.141.844

* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade do Mínimo Esforço com modificação para o sistema de 87 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 15 - Sistema de 87 barras sem reprogramação da geração
Utilizando o I.S. de *MÍNIMO ESFORÇO* com modificação

Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha
1	69-87	152	53	2-60	3*	105	76-77	167*	157	17-18	67*
2	13-14	51*	54	11-15	43*	106	75-81	164	158	13-17	53*
3	67-69	147	55	5-56	19	107	18-74	71	159	43-58	115*
4	4-68	13*	56	5-60	21*	108	16-44	63	160	67-71	148
5	12-84	50	57	68-69	149*	109	16-77	66	161	18-50	69
6	77-84	171*	58	53-86	127*	110	16-44	63	162	16-44	63
7	16-77	66*	59	39-86	108	111	77-84	171	163	11-53	45
8	67-71	148*	60	4-81	15	112	18-50	69*	164	53-86	127
9	54-55	128*	61	81-83	178*	113	18-50	69*	165	4-81	15
10	25-55	86	62	80-81	175*	114	67-71	148	166	5-60	21*
11	54-79	132	63	16-44	114*	115	71-72	154*	167	78-80	173*
12	79-82	174	64	73-74	159*	116	73-74	159*	168	2-60	3*
13	75-82	165	65	16-45	64*	117	72-73	157*	169	54-79	132
14	6-75	30	66	13-15	52*	118	18-74	71	170	78-79	172*
15	71-75	155*	67	13-17	53*	119	73-74	159*	171	80-83	177*
16	82-84	179*	68	72-83	158*	120	71-72	154*	172	13-15	52*
17	68-83	150*	69	12-84	50	121	18-50	69*	173	54-55	128
18	71-83	156*	70	61-64	137	122	72-73	157*	174	54-63	130
19	18-74	71*	71	16-61	65	123	18-50	69*	175	1-2	1*
20	73-74	159*	72	8-1	34*	124	18-74	71	176	18-74	71
21	8-73	39*	73	61-85	138	125	73-74	159*	177	18-50	69
22	5-56	19*	74	53-54	124*	126	8-73	39	178	73-74	159*
23	20-56	76	75	11-53	45*	127	18-50	69*	179	49-50	121
24	24-43	84	76	5-80	24	128	74-84	162*	180	71-72	154
25	43-58	115*	77	13-15	52*	129	12-84	50	181	15-16	59*
26	58-78	134*	78	15-16	59*	130	18-74	71	182	49-50	121
27	78-80	173	79	2-4	2*	131	18-50	69	183	74-84	162*
28	80-83	177*	80	16-77	66	132	13-59	55*	184	18-50	69
29	22-58	81	81	18-74	71	133	25-55	86*	185	49-50	121
30	1-2	1*	82	1-2	1*	134	54-55	128	186	12-84	50
31	26-54	89*	83	12-84	50	135	80-83	177*	187	18-74	71
32	3-87	8*	84	77-84	171*	136	74-84	162*	188	16-44	63
33	3-83	7*	85	1-2	1*	137	12-84	50	189	2-4	2
34	78-79	172*	86	65-87	145*	138	25-55	86	190	25-55	86
35	14-59	58*	87	54-55	128*	139	40-45	109*	191	18-50	69
36	77-84	171*	88	75-76	163*	140	13-45	54*	192	68-83	150
37	1-2	1*	89	76-77	167*	141	52-59	123	193	68-69	149
38	74-84	162*	90	12-13	46	142	15-16	59*	194	13-15	52*
39	72-73	157*	91	78-80	173*	143	13-15	52*	195	49-50	121
40	71-72	154*	92	2-60	3*	144	17-18	67*	196	72-73	157
41	75-83	166	93	16-77	66	145	13-17	53*	197	73-74	159
42	56-57	133*	94	73-74	159*	146	16-44	63	198	15-16	59*
43	21-57	78*	95	54-79	132	147	56-57	133	199	14-59	58
44	2-87	4*	96	16-44	63*	148	21-57	78	200	13-45	54*
45	2-87	4	97	13-45	54*	149	18-50	69	201	39-86	108
46	5-60	21*	98	11-15	43*	150	1-2	1*	202	11-17	44*
47	2-60	3*	99	68-83	150	151	40-45	109	203	17-18	67*
48	14-25	57*	100	78-79	172*	152	13-45	54*	204	58-78	134
49	54-63	130*	101	72-73	157*	153	5-56	19	205	41-64	111
50	30-63	96	102	3-71	5*	154	15-16	59*	206	61-85	138
51	41-64	111	103	3-87	8*	155	16-61	65	-	-	-
52	63-64	143	104	75-76	163*	156	2-4	2*	-	-	-

Investimento (US\$.10³): Fase 1 = 9.647.368 e Fase 2 = 2.400.241

* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas superfluas)

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade do Mínimo Esforço original (sem modificação) no sistema de 87 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 16 - Sistema de 87 barras sem reprogramação da geração Utilizando o I.S. de <i>MÍNIMO ESFORÇO</i> original											
Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha
1	67-71	148	42	76-77	167	83	11-17	44	124	15-16	59*
2	69-87	152	43	76-82	168*	84	40-45	109	125	11-15	43
3	4-68	13	44	78-80	173*	85	18-50	69	126	16-44	63
4	71-83	156	45	78-79	172	86	80-81	175*	127	18-50	69
5	13-14	51*	46	12-13	84	87	78-80	173	128	1-2	1*
6	68-83	150	47	43-58	115	88	16-44	63*	129	54-55	128
7	72-73	157*	48	58-78	134	89	15-16	59*	130	65-87	145*
8	71-72	154*	49	13-17	53*	90	5-56	19*	131	4-81	15
9	8-73	39*	50	2-87	4	91	71-75	155*	132	8-1	34*
10	73-74	159*	51	68-69	149	92	68-83	150	133	73-74	159
11	18-74	71*	52	80-83	177*	93	75-76	163*	134	13-15	52
12	3-87	8*	53	53-86	127	94	74-84	162*	135	15-16	59
13	3-83	7*	54	39-86	108	95	12-84	50	136	25-55	86
14	16-77	66*	55	18-74	71*	96	67-71	148	137	8-73	39
15	77-84	171	56	74-84	162*	97	78-79	172	138	41-64	111
16	12-84	50*	57	4-81	15*	98	76-77	167*	139	54-79	132
17	80-83	177*	58	81-83	178	99	16-77	66	140	80-83	177
18	5-80	24*	59	1-2	1*	100	61-64	137	141	2-4	2
19	26-54	89	60	22-58	81	101	2-60	3*	142	18-74	71
20	54-79	132	61	43-55	114*	102	5-60	21*	143	18-50	69
21	79-82	174*	62	14-25	57*	103	18-74	71	144	12-84	50
22	80-82	176	63	16-45	64*	104	18-50	69	145	79-82	174*
23	54-55	128*	64	12-84	50*	105	13-15	52	146	54-63	130
24	25-55	86*	65	14-77	66	106	1-2	1*	147	74-84	162*
25	5-56	19*	66	77-84	171	107	16-44	63	148	75-76	163*
26	20-56	76	67	18-50	69*	108	74-84	162*	149	16-44	63
27	54-63	130*	68	75-81	164*	109	12-84	50	150	56-57	133
28	30-63	96	69	73-74	159*	110	13-45	54	151	21-57	78
29	2-4	2*	70	2-4	2*	111	18-50	69	152	16-77	66
30	41-64	111	71	18-74	71*	112	77-84	171	153	75-81	164*
31	63-64	143	72	18-50	69*	113	52-59	123	154	40-45	109
32	73-74	159*	73	13-45	54	114	73-74	159	155	13-45	54
33	13-15	52*	74	54-79	132*	115	2-60	3*	156	1-2	1*
34	56-57	133*	75	5-60	21*	116	18-74	71	157	18-50	69
35	21-57	78*	76	2-60	3*	117	49-50	121	158	5-56	19
36	14-59	58	77	1-2	1*	118	13-59	55*	159	5-60	21*
37	75-83	166*	78	13-15	52*	119	71-72	154	160	11-53	45*
38	75-82	165*	79	49-50	121	120	72-73	157	161	13-17	53*
39	73-75	160*	80	17-18	67*	121	67-69	147	162	17-18	67*
40	61-85	138	81	25-55	86	122	16-61	65	163	49-50	121
41	16-61	65	82	54-55	128	123	61-85	138	164	77-84	171

Investimento (US\$.10³): Fase 1 = 7.695.370 e Fase 2 = 3.019.617
 * - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade alternativo ($I.S._{alternativo} = I.S./custo$) do método de Mínimo Corte de Carga para o sistema de 87 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 17 - Sistema de 87 barras sem reprogramação da geração Utilizando o I.S. alternativo do Método de Mínimo Corte de Carga											
Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha
1	15-45	60*	25	18-50	69	49	43-58	115	73	63-64	143
2	14-25	57*	26	25-55	86	50	25-55	86	74	2-87	4
3	26-54	89	27	54-55	128*	51	43-55	114	75	78-79	172
4	54-79	132	28	24-43	84	52	16-44	63	76	54-79	132
5	18-50	69	29	25-55	86	53	68-69	149	77	61-64	137
6	27-53	92*	30	43-58	115	54	3-83	7	78	54-63	130
7	40-45	109*	31	43-55	114	55	12-13	46*	79	61-85	138
8	13-14	51	32	71-75	155	56	13-15	52	80	30-31	95
9	40-45	109	33	18-50	69	57	11-12	42	81	30-63	96
10	16-44	63	34	18-74	71*	58	16-44	63	82	36-46	106*
11	67-71	148	35	13-15	52	59	15-16	59	83	3-87	8
12	6-75	30	36	13-17	53	60	9-10	40	84	41-64	111
13	16-77	66*	37	17-18	67	61	68-83	150	85	78-80	173
14	3-87	8	38	18-50	69	62	61-85	138	86	63-64	143
15	53-54	124*	39	15-16	59*	63	16-61	65	87	48-49	118
16	22-58	81	40	68-83	150	64	41-64	111	88	67-69	147
17	58-78	134	41	80-83	177	65	39-86	108*	89	12-17	48
18	78-80	173	42	10-11	41	66	61-85	138	90	18-50	69
19	5-80	24*	43	20-21	74	67	6-7	25*	91	49-50	121
20	14-59	58	44	58-78	134	68	7-8	31*	92	80-83	177
21	18-50	69	45	5-56	19	69	54-63	130	93	17-18	67
22	13-17	53	46	20-56	76*	70	30-63	96	94	2-87	4
23	17-18	67	47	21-57	78	71	67-71	148	95	49-50	121
24	52-59	123	48	56-57	133	72	6-75	30	-	-	-
Investimento (US\$.10 ³): Fase 1 = 2.197.284 e Fase 2 = 1.898.871											
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)											

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade alternativo ($I.S._{alternativo} = I.S./custo$) do método de Mínimo Esforço com modificação para o sistema de 87 barras sem reprogramação da geração:



Tabela 18 – Sistema de 87 barras sem reprogramação da geração
Utilizando o I.S. alternativo do Método do Mínimo Esforço com modificação

Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha
1	13-14	51*	33	16-61	65*	65	16-44	63*	97	13-15	52
2	69-87	152	34	39-86	108	66	18-50	69	98	43-58	115
3	4-68	13*	35	3-87	8	67	13-17	53*	99	16-44	63
4	67-71	148	36	73-74	159*	68	17-18	67*	100	49-50	121
5	67-69	147*	37	8-73	39*	69	18-50	69*	101	18-74	71
6	24-43	84	38	3-83	7	70	13-17	53	102	5-60	21
7	26-54	89	39	75-82	165	71	18-50	69*	103	43-55	114
8	12-84	50*	40	79-82	174	72	17-18	67*	104	10-11	41*
9	22-58	81*	41	30-63	96	73	18-50	69	105	54-79	132
10	58-78	134*	42	54-63	130*	74	25-55	86	106	58-78	134
11	78-80	173	43	41-64	111	75	40-45	109*	107	67-71	148
12	5-80	24	44	63-64	143	76	14-25	57*	108	2-60	3*
13	53-54	124*	45	12-13	46*	77	4-81	15*	109	18-50	69
14	16-77	66*	46	2-87	4*	78	81-83	178*	110	40-45	109
15	18-74	71	47	53-86	127	79	52-59	123	111	11-17	44*
16	14-59	58	48	1-2	1*	80	49-50	121*	112	18-50	69
17	68-69	149	49	65-87	145*	81	49-50	121	113	1-2	1*
18	71-75	155	50	18-50	69*	82	49-50	121	114	16-44	63
19	6-75	30	51	13-15	52*	83	12-17	48*	115	17-18	67
20	43-58	115*	52	61-64	137*	84	25-55	86	116	75-83	166*
21	25-55	86*	53	61-86	139	85	17-18	67*	117	15-16	59
22	54-55	128	54	72-73	157	86	21-57	78	118	13-15	52
23	54-79	132	55	71-72	154	87	3-87	8	119	5-56	19
24	77-84	171*	56	13-17	53*	88	2-87	4	120	73-74	159
25	43-55	114*	57	11-12	42*	89	20-66	77*	121	18-74	71
26	68-83	150	58	3-71	5	90	60-66	135*	122	18-50	69
27	21-57	78*	59	16-44	63*	91	4-60	12	123	41-64	111
28	56-57	133	60	18-50	69*	92	16-77	66*	124	54-63	130
29	20-56	76	61	17-18	67*	93	18-50	69	125	61-85	138
30	5-56	19*	62	13-15	52*	94	12-84	50*	-	-	-
31	80-83	177*	63	15-16	59*	95	16-44	63	-	-	-
32	61-85	138	64	2-87	4	96	15-16	59	-	-	-

Investimento (US\$.10³): Fase 1 = 3.582.980 e Fase 2 = 2.007.262

* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o índice de sensibilidade alternativo ($I.S._{alternativo} = I.S./custo$) do Método de Mínimo Esforço original para o sistema de 87 barras sem reprogramação da geração:

**Tabela 19 – Sistema de 87 barras sem reprogramação da geração
Utilizando o I.S. alternativo do Método do Mínimo Esforço original**

Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha	Iter.	Barras	Linha
1	4-68	13*	24	54-55	128	47	48-49	118	70	16-44	63
2	67-71	148	25	14-59	58*	48	13-15	52*	71	5-60	21*
3	68-69	149	26	21-57	78	49	16-61	65*	72	4-60	12*
4	13-14	51*	27	56-57	133	50	18-74	71	73	1-2	1*
5	67-69	147	28	20-56	76	51	12-84	50	74	52-59	123
6	26-54	89	29	5-56	19	52	77-84	171	75	24-25	53
7	54-79	132	30	73-74	159	53	18-50	69	76	17-18	67
8	71-75	155*	31	8-73	39*	54	25-55	86	77	18-50	69
9	6-75	30*	32	72-73	157	55	39-86	108	78	54-79	132
10	3-87	8	33	71-72	154	56	53-86	127	79	78-79	172
11	18-74	71	34	13-15	52*	57	13-17	53	80	49-50	121
12	79-82	174*	35	24-43	84	58	18-50	69	81	41-64	111
13	75-82	165*	36	68-83	150	59	16-44	63	82	2-60	3*
14	16-77	66	37	2-87	4	60	49-50	121	83	16-77	66
15	3-83	7	38	43-58	115	61	17-18	67	84	12-84	50
16	71-83	156*	39	58-78	134	62	61-86	139	85	11-12	42*
17	41-64	111	40	78-80	173	63	40-45	109	86	65-87	145*
18	54-63	130	41	5-80	24	64	2-87	4	87	18-50	69
19	30-63	96	42	22-58	81*	65	14-25	57*	88	16-44	63
20	63-64	143	43	80-83	177	66	67-71	148	89	54-63	130
21	61-85	138	44	43-55	114	67	18-50	69	-	-	-
22	61-64	137	45	15-16	59*	68	3-87	8	-	-	-
23	25-55	86	46	18-50	69	69	61-85	138	-	-	-

Investimento (US\$.10³): Fase 1 = 2.701.353 e Fase 2 = 1.912.421

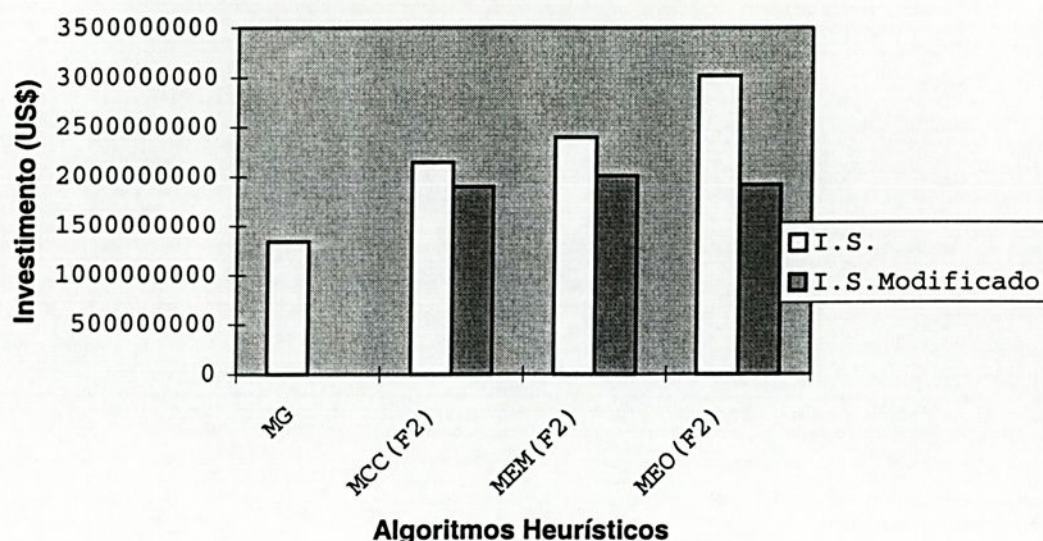
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas superfluas)

Não é conhecida a configuração ótima deste sistema, mas a melhor configuração obtida previa um investimento de 1.401.170.000 dólares e foi encontrado por “simulated annealing” [10].

Nos testes realizados, a melhor configuração foi encontrada pelo algoritmo de Mínimo Corte de Carga, com um investimento de 1.898.871.000 dólares, isto é, um investimento ainda maior que a melhor configuração encontrada.

O Gráfico a seguir faz um comparativo entre os resultados obtidos para o sistema de 87 barras sem reprogramação

Gráfico 5 - Investimento p/ o Sistema de 87 Barras



5.2 Testes com o Algoritmo Heurístico Integrado Básico

Estes testes foram feitos com o objetivo de se observar a lógica do algoritmo e para a verificação da necessidade de implementação de algumas modificações .

Nesta versão, utilizada nesta seção de testes, integrou-se ao Algoritmo Heurístico Integrado (AHI), o método da Rede Marginal de Levi-Calovic, Garver, Mínimo Esforço, Mínimo Corte de Carga e Villasana-Garver.

Os testes foram realizados no Sistema de 6 barras de Garver e no Sistema Sul brasileiro (Sistema de 46 barras).

5.2.1 Sistema de 6 barras sem reprogramação da geração

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos utilizando-se o AHI para o sistema de 6 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 20 – Sistema de 6 barras sem reprogramação da geração Corte de carga inicial = 541,452 MW Algoritmo Heurístico Integrado (AHI)								
Propostas						Caminho escolhido		
Nº da iteração	MCC	MEO	MG	VILL-G	MLC	Caminho	I.S.	Corte de carga (MW) com a adição
1	14	14	14	14	4	14	3,23	541,452
2	9	9	9	14	4	14	3,34	444,527
3	9	9	9	9	4	9	2,88	344,380
4	9	15	14	9	4	9	3,33	258,051
5	9	15	14	9	4	9	1,95	158,048
6	11	15	14	11	4	11	2,53	99,598
7	9	15	14	9	1	9	1,63	48,905
8	-	-	-	-	-	-	-	0
Investimento após a fase 1 (US\$.10 ³) = 200								
Investimento após a fase 2 (US\$.10 ³) = 200								

5.2.2 Sistema de 6 barras com reprogramação da geração

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos utilizando-se o AHI para o sistema de 6 barras com reprogramação da geração:

Tabela 21 – Sistema de 6 barras com reprogramação da geração Corte de carga inicial = 367,036 MW Algoritmo Heurístico Integrado (AHI)								
Propostas						Caminho escolhido		
Nº da iteração	MCC	MEO	MG	VILL-G	MLC	Caminho	I.S.	Corte de carga (MW) com a adição
1	14	14	14	9	11	11	5	367,036
2	14	14	14	9	4	9	3,25	267,036
3	14	14	14	14	3	14	3,32	169,536
4	6	14	14	14	7	14	2,14	69,854
5	6	9	-	6	1	6	0,28	5,72
6	-	-	-	-	-	-	-	0
Investimento após a fase 1 (US\$.10 ³) = 130								
Investimento após a fase 2 (US\$.10 ³) = 130								

5.2.3 Sistema de 46 barras sem reprogramação da geração

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o AHI para o sistema de 46 barras sem reprogramação da geração:

Tabela 22 – Sistema de 46 barras sem reprogramação da geração							
Corte de carga inicial = 3432,034 MW							
Algoritmo Heurístico Integrado (AHI)							
Propostas					Caminho escolhido		
Nº da iter.	MCC	MEO	MG	VILL-G	Caminho	I.S.	Corte de carga (MW) com a adição
1	76/66	61	47	51/73	47	0,0769	2803,236
2	76/66	61	53/78	18	53/78	0,0132	2484,553
3	76/66	61	61	72/49	76/66	0,0115	1939,870
4	74/58	61	46	74/58	46	0,0847	1247,214
5	74/58	61	74/58	18	74/58	0,0067	940,448
6	61	61	61	16	61	0,005	905,351
7	74	62	46	48	74	0,0523	477,636
8	78	62	62	18	78	0,0394	155,626
9	62	62	62	18	62	0,0139	47,311
10	47	39	-	18	47	0,0058	0,023
Investimento após a fase 1 (US\$.10³) = 173.331							
Investimento após a fase 2 (US\$.10³) = 173.331							

5.2.4 Sistema de 46 barras com reprogramação da geração

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos utilizando-se o AHI para o sistema de 46 barras com reprogramação da geração:

Tabela 23 – Sistema de 46 barras com reprogramação da geração

Corte de carga inicial = 2264,716 MW

Algoritmo Heurístico Integrado (AHI)

Propostas						Caminho escolhido	
Nº da iteração	MCC	MEO	MG	VILL-G	MLC	Caminho	Corte de carga (MW) com a adição
1	76/68	79/50	46	46	18	46	1571,732
2	76/68	79/50	53/78	47	44	47	969,913
3	74/60	79/50	78/53	53/78	44	53/78	617,066
4	74/60	74/60	46	78	18	78	320,862
5	74/59	74/59	59/74	46	14	46	146,859
6	74/60	74/60	22	22	22	22	23,771
7	16	74/60	-	16	12	16	0

Investimento após a fase 1 (US\$.10³) = 95.795Investimento após a fase 2 (US\$.10³) = 95.795

Os algoritmos heurísticos passam por duas fases. A primeira é a fase de adição, ou seja, é a fase onde o algoritmo escolhe a linha a ser adicionada. A segunda fase é a fase de refinamento do algoritmo, onde somente as linhas realmente necessárias são mantidas.

Partindo desse ponto de vista, nota-se a qualidade das adições realizadas pelo AHI nestes testes, onde a *segunda fase não foi acionada* para o sistema de 46 barras (com e sem reprogramação). Utilizando-se o AHI no sistema de 46 barras sem reprogramação, das dez iterações, sete foram adições ótimas (1^a, 2^a, 4^a, 5^a, 7^a, 8^a, 10^a) e no sistema de 46 barras com reprogramação, das sete iterações, seis foram ótimas, e apenas a última não foi.

Comprova-se na prática a qualidade e a eficiência deste algoritmo quando comparado aos demais isoladamente.

5.3 Testes com o Algoritmo Heurístico Integrado Modificado

Os testes apresentados a seguir foram realizados com uma alteração no AHI inicial, para contornar as fases críticas dos algoritmos heurísticos



construtivos. O algoritmo encontrou 8 configurações para cada sistema testado. O sistema testado foi o Sul brasileiro.

Para o sistema Sul brasileiro (46 barras) com reprogramação da geração, a configuração ótima (70,289 milhões de dólares) foi encontrada, e uma configuração muito próxima da ótima foi encontrada para o sistema sem reprogramação (164,514 milhões de dólares).

A seguir seguem os resultados obtidos com o algoritmo:

5.3.1 Sistema de 46 barras sem reprogramação da geração

Tabela 24 – Sistema de 46 barras sem reprogramação da geração							
Corte de carga inicial = 3432,034 MW							
Algoritmo Heurístico Integrado (AHI) modificado							
Configurações							
1	2	3	4	5	6	7	8
47	47	47	47	76/66	76/66	76/66	76/66
53/78	53/78	76/66	76/66	78/53	78/53	79*/50*	79/50
76/66	72*/49*	16*	79*/50*	46	74/59*	74/59*	60/74
46	76/66	46*	74/59*	47	47	54/77	46
74/60	46	46	54/77	74/60	74	47	47
74	74/60	74/60	74	74	18*	74	54/77
61	78	79/50	58	61	58	58	61
62	61	54/77	77	62	46	77	74
78	74	61	46	78	61	46	62
-	62	74	61	-	78	61	77
-	58	62	62	-	62	62	-
-	-	77	47	-	47	47	-
Custo 1 = 5 = US\$ 164.514.000				Custo 6 = US\$ 173.331.000			
Custo 2 = US\$ 202.262.000				Custo 8 = 3 = US\$ 191.895.000			
Custo 4 = 7 = US\$ 181.645.000							
* - Linhas eliminadas após a aplicação da Fase 2 (retirada de linhas supérfluas)							

5.3.2 Sistema de 46 barras com reprogramação da geração

Tabela 25 – Sistema de 46 barras com reprogramação da geração
Corte de carga inicial = 2264,716 MW
Algoritmo Heurístico Integrado (AHI) modificado

Ite	Propostas								
1	46	47	53/78	78	46	22	16	-	-
2	46	47	74/60	53/78	78	-	-	-	-
3	46	53/78	44	47	78	74/59	14	16	-
4	46	53/78	76/68*	78	47	46	22	16	-
5	76/68*	46	61*	53/78	78	47	46	22	16
6	76/68*	46	17*	53/78	78	47	46	22	14
7	76/68	74/59	46	78/53	16	78	47	-	-
8	76/68	74/59	53/78	46	16	78	47	-	-
Custo 1 = 4 = 5 (U\$.10 ³) = 95.795 Custo 2 (U\$.10 ³) = 94.004 Custo 3 (U\$.10 ³) = 142.093 Custo 6 (U\$.10 ³) = 70.289 Custo 7 = 8 = (U\$.10 ³) = 151.458				* = linhas ou caminhos retirados após segunda fase.					

Num segundo teste realizado com o sistema de 46 barras sem reprogramação, gerando dezesseis configurações, uma destas apresentou um investimento inferior a US\$ 164.514.000.

A configuração obtida estimou as seguintes adições de circuitos: $n_{20-21} = 1$, $n_{46-6} = 1$, $n_{28-31} = 1$, $n_{42-43} = 2$, $n_{24-25} = 2$, $n_{5-6} = 2$, $n_{25-32} = 1$, $n_{31-32} = 1$, $n_{32-43} = 1$; com um investimento de US\$ 161.188.000, consequentemente, melhor que a melhor configuração obtida no teste com a geração de oito configurações.

5.3.3 Sistema de 6 barras com reprogramação da geração

Na tentativa de encontrar uma melhor configuração para o sistema de 6 barras com reprogramação da geração, foi feito este teste. A geração de 4 configurações diferentes foi o suficiente para a determinação do ótimo global, obtido com a configuração de número três.

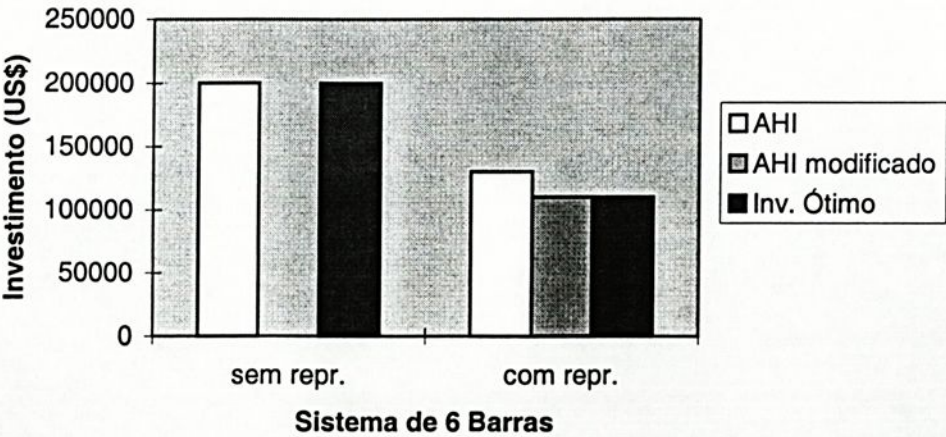


A tabela a seguir mostra a descrição das configurações obtidas.

Tabela 26 – Sistema de 6 barras com reprogramação da geração						
Corte de carga inicial = 367,036 MW						
Algoritmo Heurístico Integrado (AHI) modificado						
Iter	Propostas					
1	11	9	14	14	6	
2	11	9	3*	14	14	6
3	11	14	14	14		
4	11	14	7	9	14	
Custo 1 = 2 = (U\$.10³) = 130				* = linhas ou caminhos retirados após segunda fase.		
Custo 3 (U\$.10³) = 110						
Custo 4 (U\$.10³) = 150						

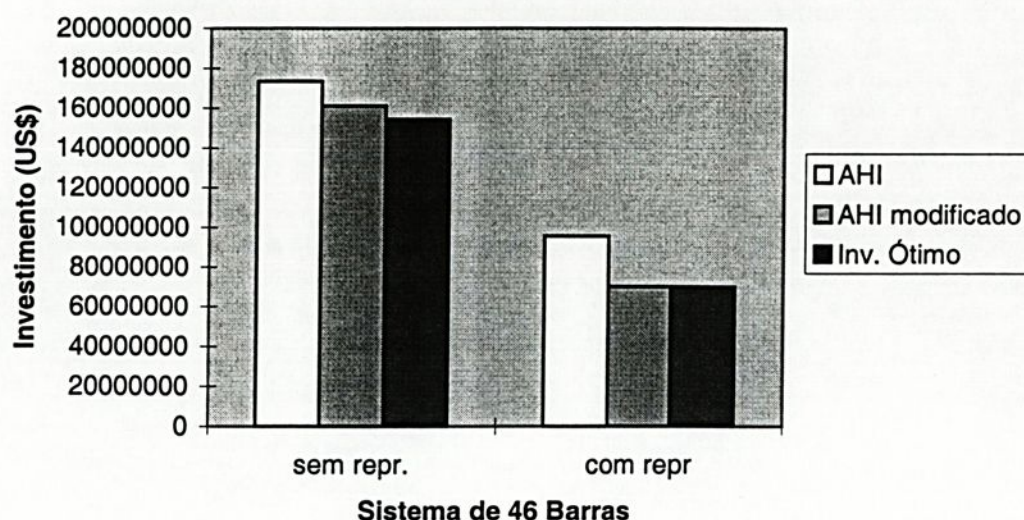
O gráfico a seguir faz um comparativo com os resultados obtidos com os testes e o investimento ótimo, utilizando as versões do AHI, no sistema de 6 barras

Gráfico 6 - Investimento p/ Sistema de 6 Barras



O gráfico a seguir faz um comparativo com os resultados obtidos com os testes e o investimento ótimo, utilizando as versões do AHI, no sistema de 46 barras

Gráfico 7 - Investimento p/ o Sistema de 46 Barras



5.3.4 Sistema de 87 barras com reprogramação da geração

Para o sistema de Grande Porte (Norte - Nordeste) com reprogramação, implementou-se a estratégia de geração de dezesseis configurações no teste. A seguir, é mostrado os resultados obtidos com o teste.

Configuração 1:	69 58* 60 69 52 81 20 89* 92 109 132* 148 71 159 39 69 157 8 6 175 123 69 51 71 154 69 81* 13 149 24 147 86 128 174 176 86 111 143 130 132 150 178 96 138 66 167 169 65 50 63 78 133 19 4 148 84 115 118 114 126* 170 78 66 63 50 118* 63 69 15 106 21 136 111 71* 138 53 67 4 121 121 Investimentos (US\$): Fase 1: 2.367.278; e Fase 2: 2.275.903
Configuração 2:	69 58 60 69 81 20* 89 92* 109 132 148 8 6 175 52 71 159 39 69 123 84 115 52 13* 8 149 147 24* 114 86 157 154 111 137 86 69 51 71 69 124* 128* 66 170 63 59 63 65 148 4 138 78 133 19 78 173 134 129* 118 69 71 138 118 150 59 134 63 178 81* 106 52 96 130 96 111 115* 95 4 121 172 Investimentos (US\$): Fase 1: 2.159.888; e Fase 2: 1.928.512
Configuração 3:	69 58 69 52 81 20 109 89 92 132 71 159 39 69 123 148 157 8 6 175 84 115 13* 149* 147 24* 154 86 114 71 86 69 111 137 65 69 59 51 52 63 138 78 133 19 78 20 148 63 59 52 71 63 4 150 24 178* 118 138 69 118 106 61 81* 115 114 8 86 106 108* 139* 111 105 88 94 24 121 4 156 150* Investimentos (US\$): Fase 1: 1.815.661; e Fase 2: 1.629.884
Configuração 4:	69 58 69 89 60* 52 13 81* 20 92* 109 148 132 71 159 39 69 157 8 6 175 123 84 115 52 149 147 154 24 86 114 111 137 86 69 51 71 69 124 128 66 170 63 59 63 148 65 4 138 78 133 19 78 150 178 164 30* 118 71 69 174 165 63 15 138 118 106 8 96 130 24 96 95 4 118* 111 66* 50*106 61 52 162* 160* 50* 71* 119* 121 Investimentos (US\$): Fase 1: 2.560.583; e Fase 2: 2.142.590

* = linha retirada durante a fase 2



Configuração 5:	69 13 58 60 69 52 81* 20 148 89 132 92* 8 6 175 71 159 39 69 109 123 84 115 149* 52 147 24 114 86 157 63 69 51 86 154 59 71 63 69 111 143 130 78 133 19 78 174 176 8 96 4 148 118 138 65 59 118 150 178 66* 170* 63 69 106 128 132 71 111 138 52 4 121 Investimento (US\$): Fase 1: 2.024.241; e Fase 2: 1.785.240
Configuração 6:	69 69 52 13* 52 58 81* 20 109 89* 92 148 132* 71 159 39* 69 157 8 6 175 123 84 115 149* 147 24 154 86 114 71 86 69 111 137 65 69 59 51 52 63 138 78 133 19 78 20 148 63 59 52 71 63 4 150 24 178* 118 138 69 118 106 61 81* 115 114 8 86 106 108* 139* 111 105 88 94 24* 121 4 156 150* Investimento (US\$): Fase 1: 1.842.431; e Fase 2: 1.656.654
Configuração 7:	69 13* 148 58 69 52 81 20* 89 149* 109 92* 132 71 159 39 69 157 8 6 175 123 147 154 24* 172 134 111 143 130 96 71 173 129 69 86 128 84 86 138 66 167 168* 65 126* 63 150 132 178 69 51* 78 133 19 4 63 8 78 50 115 118 169 170 66 50 69 63 148 118 106 61 111 71 138 52 4 118 84* 106 121 Investimento (US\$): Fase 1: 2.392.844; e Fase 2: 2.166.481
Configuração 8:	69 13* 148 149 58 69 52 81 20 147 109 92* 89 132 71 159 39 69 123 84 115 157 161* 154 8 6 175 24 86 114 71 86 69 111 137 65 69 51* 124 59 134 173 52 63 138 81* 74 8 148 63 66 171 63 4 118 138 66 118 69 106 4 147 133 19 78 148 61 111 65 118* 88* 50 71 50 115 150 178 5* 96 130 172 96 95 121 Investimento (US\$): Fase 1: 2.292.571; e Fase 2: 2.044.314

* = linha retirada durante a fase 2



Configuração 9:	60 57 69 81* 20* 89 92* 132 148 13* 8 6 175 71 159 39 69 109 69 51 109 58 8 149* 147 24* 172 134 66 167 168 63 126 63 69 155 30 4 66 63 165 111 143 130 96 148 86 128 173 84 86 138 65 78 133 19 78 150 178 164* 132 50* 115 69 71 39 118 118 69 106 4 111 121 138 53 67 123 53 150* 114 Investimentos (US\$): Fase 1: 2.303.085; e Fase 2: 2.036.180
Configuração 10:	60 57* 69 13* 81 20 89 92* 109 69 148 132 71 159 39 69 51* 149* 109* 157 160* 8 6 164 71 147 150 178 5* 174 165 66 167 169 63 69 50 111 143 130 96 86 128 138 4 65 154 78 133 19 8 84 115 118 52 21 12 63 69 59 58 132 108* 127* 139* 86 118 114* 78 69 63 4 121 106 138 53* 67* 52 71 3* 135* 77* 66 50 148 123 111 121* Investimentos (US\$): Fase 1: 2.589.923; e Fase 2: 2.031.506
Configuração 11:	60 57 89 69 81* 20* 92* 132 148 13* 8 6 175 71 159 39 69 109 69 51 109 58 8 149* 147 24* 172 134 66 167 168 63 126 63 69 155 30 4 66 63 165 111 143 130 96 148 86 128 173 84 86 138 65 78 133 19 78 150 178 164* 132 50* 115 69 71 39 118 118 69 106 4 111 121 138 53 67 123 53 150* 114 Investimentos (US\$): Fase 1: 2.308.253; e Fase 2: 2.041.348
Configuração 12:	60* 57 89 132 69 92* 109 69 71 159 39* 69 51 109 58 157 161* 148 158 152* 13* 156 150 8 6 175 81 20 178 5* 54 174 176 66 167 163* 63 126 69 84 63 71 89* 123 69 4 8 86 128 59 86 132 63 111 143 130 96 118 118 74 69 51* 106 4 112* 138 65 133 19 78 118* 52 30* 115 95* 71* 66* 106* 148 149 52 155* 50* 114 53 67 111 150 138 121 Investimentos (US\$): Fase 1: 2.784.840; e Fase 2: 2.080.210

* = linha retirada durante a fase 2



Configuração 13:	60 13 57* 89 69 148 81 20* 149* 132 92* 8 6 15 71 159 39 69 109 69 51* 109* 58 147 157 162* 154 178* 175 24* 172 134 111 143 130 96 123 173 129 86 128 84 86 138 66 167 168* 65 126 63 69 71 132 63 69 4 148 59 118 52 69 118 74 71 63 150* 115 52 138 111 8 84* 106 81* 19 133 78 4 121 Investimento (US\$): Fase 1: 2.295.287; e Fase 2: 1.885.222
Configuração 14:	60* 13 57 148 69 81 20 149* 147 89 92* 109 69 132* 71 159 39 69 51 109 58 157 160* 154 8 6 175 24 30 86 114 115 84 111 137 65 123 59 52 138 86 52 63 71 69 63 69 59* 71 148 63 20 78 133 19 4 150* 178* 164 118 24 78 69 52* 111 15 106 118 108* 139* 115 114 8 96 130 86 106 138 105 4 121 66 167 126 Investimento (US\$): Fase 1: 2.264.527; e Fase 2: 1.931.565
Configuração 15:	60 13* 148 69 58 69 52 149 81 20* 89 132 92* 8 6 175 71 159 39 69 109 84 147 123 115 52 24* 114 86 157 154 111 137 86 69 51 71 69 124* 128* 66 170 63 59 63 148 65 4 8 138 78 133 19 78 173 134 129* 118 69 71 138 118 150 59 134 63 178 81* 106 52 96 130 96 111 115* 95 4 121 172 Investimento (US\$): Fase 1: 2.168.814; e Fase 2: 1.937.438
Configuração 16:	60* 13* 148 81 20 69 58 69 89 92 52 69 71 159 39 132* 157 160* 8 6* 164 109 123 71 69 69 8* 152* 147* 154 86 114 115 30 84 111 137 86 65 59 52 63 138 78 133 19 63 59 52 4 71 63 148 118 111 69 118 106 21 12 78 20 108* 139* 115 114 96 130 86 106 138 4* 118* 66* 171* 61 50* 174* 165* 128* 150 178 5 51* 14 143 53* 67* 127* 3 21 66* 50* 132* 119* 121 Investimento (US\$): Fase 1: 2.714.759; e Fase 2: 1.759.591

* = linha retirada durante a fase 2



A configuração ótima global deste sistema não é conhecida, mas a melhor conhecida até o momento prevê um investimento de US\$ 1.401.170.000 [10].

A terceira configuração obtida pelo AHI modificado foi a melhor encontrada, com o valor de investimento de US\$1.629.884.000. Deste modo, a melhor configuração obtida pelo AHI modificado, ainda é superior (14%) que a melhor configuração conhecida para este sistema até o momento.

5.4 Testes com a Modificação Adicional no AHI

No teste apresentado nesta seção, foram determinadas dezesseis configurações para o sistema de Grande Porte (Norte – Nordeste), obtidas através da estratégia apresentada no item 4.4, para uma faixa de investimento de um bilhão e quatrocentos milhões de dólares. Os resultados encontrados pelo teste são mostrados a seguir:



TABELA 27 – Configurações Obtidas Com as Modificações adicionais no AHI
Fase 2

Configuração 1		Configuração 2		Configuração 3		Configuração 4	
nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições
4	2	4	2	4	2	4	2
7	1	7	1	7	1	7	1
8	2	8	2	8	2	8	2
19	1	12	1	19	1	19	1
20	2	19	1	20	1	20	1
24	2	20	2	22	1	22	1
27	1	21	1	27	1	27	1
39	1	22	1	50	2	50	2
52	3	27	1	51	1	51	1
58	1	51	1	53	1	53	1
59	2	52	3	58	1	58	1
61	1	58	1	63	3	63	3
63	3	59	2	66	2	66	2
65	1	61	1	67	1	67	1
69	6	63	3	69	6	69	6
71	3	65	1	71	2	71	2
78	2	66	1	78	2	78	2
81	1	69	6	84	1	84	1
84	1	71	3	86	2	86	2
86	3	78	2	89	1	89	1
89	1	81	1	96	1	96	1
92	1	84	1	108	1	108	1
94	1	86	3	109	1	109	1
95	1	88	1	111	2	111	2
96	1	94	1	114	1	114	1
106	2	106	2	115	1	115	1
109	1	109	1	118	1	118	1
111	2	111	2	121	2	121	2
114	2	112	1	123	1	123	1
115	2	114	2	127	1	127	1
118	2	115	2	128	1	128	1
121	1	118	2	130	1	130	1
123	1	121	1	132	2	132	2
130	1	123	1	133	1	133	1
133	1	126	1	138	2	138	2
137	1	133	1	139	1	139	1
138	2	137	1	143	1	143	1
146	1	138	2	146	1	146	1
149	1	146	1	148	1	148	1
150	2	149	1	149	1	149	1
157	1	150	1	150	1	150	1
158	1	157	1	155	1	155	1
159	1	158	1	162	1	162	1
177	1	159	1	163	1	163	1
		167	1	166	1	166	1
				167	1	167	1
				172	1	172	1
				173	1	173	1
				177	1	177	1
Total de Investimento (US\$) x 10 ³ : 1.671.147		Total de investimento (US\$) x 10 ³ : 1.742.401		Total de investimento (US\$) x 10 ³ : 2.136.640		Total de investimento (US\$) x 10 ³ : 2.136.640	



TABELA 27 - (continuação)

Configuração 5		Configuração 6		Configuração 7		Configuração 8	
nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições
2	1	2	1	4	2	4	2
4	1	4	1	7	1	7	1
5	1	5	1	8	2	8	2
8	2	8	2	12	1	19	1
9	1	9	1	13	1	20	2
20	2	20	2	19	1	24	2
22	1	22	1	20	2	27	1
51	1	51	1	21	1	39	1
52	3	52	3	30	1	52	3
58	1	58	1	50	1	58	1
59	3	59	3	52	3	59	2
63	3	61	1	58	1	61	1
65	2	63	3	59	3	63	3
69	6	65	1	61	1	65	1
71	3	69	6	63	3	69	6
75	1	71	3	65	1	71	3
76	1	74	2	66	1	78	2
78	1	75	1	69	6	84	1
81	1	81	1	71	4	86	3
84	1	84	1	78	2	95	1
86	3	86	3	81	1	96	2
88	1	88	1	84	1	106	2
92	1	92	1	86	2	109	1
94	1	94	1	88	1	111	2
106	1	106	2	89	1	114	2
109	1	109	1	96	1	115	2
111	2	111	2	106	1	118	2
114	2	114	2	109	1	121	1
115	2	115	2	111	2	123	1
118	2	118	2	114	1	124	1
121	1	121	1	115	2	130	1
123	1	123	1	118	1	133	1
133	1	137	1	121	2	137	1
137	1	138	2	123	1	138	2
138	2	148	2	124	1	146	1
148	2	152	1	130	1	149	1
152	1	154	1	133	1	150	2
154	1	157	1	137	1	159	1
157	1	159	1	138	2	160	1
159	1	170	1	148	2	166	1
				149	1	177	1
				150	1		
				154	1		
				157	1		
				159	2		
				160	1		
				166	1		
				167	1		
				169	1		
Total de investimento (US\$) x 10 ³ : 1.523.212		Total de investimento (US\$) x 10 ³ : 1.672.924		Total de investimento (US\$) x 10 ³ : 2.206.055		Total de investimento (US\$) x 10 ³ : 1.692.905	



TABELA 27 - (continuação)

Configuração 9		Configuração 10		Configuração 11		Configuração 12	
nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições
3	1	3	1	4	2	4	2
4	1	4	1	7	1	7	1
7	1	7	1	8	2	8	2
8	1	8	1	27	1	27	1
9	1	9	1	39	1	39	1
13	1	13	1	51	1	52	3
19	1	19	1	52	3	58	1
20	2	20	2	58	1	59	2
21	1	21	1	59	2	61	1
52	3	52	3	61	1	63	3
58	1	58	1	63	3	65	1
59	3	59	2	65	1	69	6
61	1	61	1	66	1	71	3
63	3	63	3	69	6	75	1
65	1	65	1	71	3	76	1
66	1	66	1	74	2	78	1
69	6	69	6	75	1	81	1
71	3	71	3	81	1	84	1
78	2	78	2	84	1	86	3
84	1	84	1	86	3	88	2
86	3	86	3	88	1	94	2
88	1	88	1	94	1	95	1
89	1	94	1	106	2	106	2
94	1	106	2	109	1	109	1
106	1	109	1	111	2	111	2
109	1	111	2	112	1	115	1
111	2	112	1	115	1	118	2
112	1	114	2	118	2	121	1
114	2	115	2	121	1	123	1
115	2	118	2	123	1	128	2
118	2	121	1	128	2	132	2
121	1	123	1	132	2	133	1
123	1	126	1	134	1	134	1
124	1	133	1	137	1	137	1
126	1	137	1	138	2	138	2
133	1	138	2	148	1	148	1
137	1	148	2	149	1	149	1
138	2	149	1	150	2	150	2
148	2	150	1	156	1	156	1
149	1	156	1	157	1	157	1
150	1	157	1	158	1	158	1
156	1	158	1	159	1	159	1
157	1	159	1	170	1	172	1
158	1	167	1	172	1	173	1
159	1			173	1	177	1
167	1			177	1		
Total de investimento (US\$) x 10³ : 1.803.835		Total de investimento (US\$) x 10³ : 1.742.264		Total de investimento (US\$) x 10³ : 1.977.353		Total de investimento (US\$) x 10³ : 1.803.050	



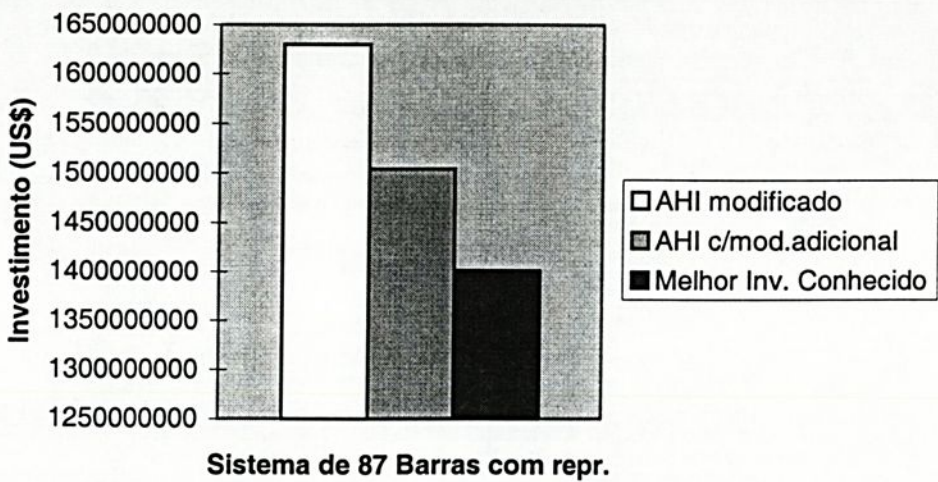
TABELA 27 - (continuação)

Configuração 13		Configuração 14		Configuração 15		Configuração 16	
nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições	nº circuito	nº de adições
4	2	4	2	3	2	3	2
5	1	5	1	19	1	19	1
7	1	7	1	20	1	20	2
8	3	8	3	21	2	21	2
22	1	13	1	24	1	51	1
39	1	15	1	52	3	52	3
45	1	24	1	58	1	58	1
51	1	30	1	59	2	59	3
52	3	51	1	61	1	61	1
59	2	52	3	63	3	63	3
61	1	58	1	65	1	65	1
63	3	59	2	69	6	69	6
65	1	61	1	71	3	71	3
69	6	63	3	78	2	78	2
71	4	65	1	84	1	84	1
74	2	66	2	86	3	86	3
75	1	69	6	95	1	88	1
81	2	71	3	96	2	92	1
84	1	74	2	106	2	94	1
86	2	75	1	109	1	106	2
89	1	81	2	111	2	109	1
95	1	84	1	114	2	111	2
96	2	86	2	115	2	114	2
106	1	96	2	118	2	115	2
109	1	106	1	121	1	118	2
111	2	109	1	123	1	121	1
112	1	111	2	124	1	123	1
114	1	112	1	130	1	133	1
115	1	114	1	133	1	137	1
118	1	115	1	134	1	138	2
121	2	118	2	137	1	148	2
123	1	121	1	138	2	149	1
124	2	123	1	148	2	150	2
128	1	124	1	149	1	154	1
129	1	128	1	150	2	156	1
130	1	130	1	154	1	157	1
134	2	134	2	156	1	159	1
137	1	137	1	157	1		
138	2	138	2	159	1		
148	2	148	2	173	1		
150	1	152	1				
152	1	154	1				
154	2	157	2				
157	2	159	1				
159	2	163	1				
173	1	167	1				
		173	1				
		177	1				
		178	1				
Total de investimento (US\$) x 10³ : 2.218.820		Total de investimento (US\$) x 10³ : 2.187.760		Total de investimento (US\$) x 10³ : 1.602.509		Total de investimento (US\$) x 10³ : 1.504.023	



No conjunto dos resultados obtidos com o teste, a melhor configuração foi a configuração 16, com um investimento de US\$ 1.504.023.000, um acréscimo de aproximadamente 7% no investimento, quando comparado a melhor configuração conhecida para o sistema. Esta foi a melhor proposta determinada para o sistema de Grande Porte.

Gráfico 8 - Investimento p/ o Sistema de 87 Barras com repr. (AHI)



Capítulo 6

Conclusões

Nos testes feitos com o sistema de Grande Porte, o indicador de sensibilidade do algoritmo de Levi-Calovic [4] não fez parte do AHI, pois foi verificado através de testes preliminares que, a contribuição deste algoritmo na resolução do sistema era muito pequena, de forma que a implementação ou não deste algoritmo no AHI não fazia diferença quando se observava os resultados obtidos.

Como era esperado, o AHI apresentou um desempenho superior a cada um dos outros algoritmos usados como base. O algoritmo encontrou configurações ótimas em três dos cinco sistemas testados. Outra qualidade muito importante observada no algoritmo, foi o fato dele não entrar na fase 2, exceto na implementação das 16 configurações para o sistema de 46 barras sem reprogramação e no sistema de Grande Porte, mostrando uma sequência de adições consistente.

Outra conclusão importante é que mesmo os melhores algoritmos heurísticos não são muito confiáveis. Para alguns sistemas, podem apresentar um excelente desempenho, mas para outros, um de menor qualidade.

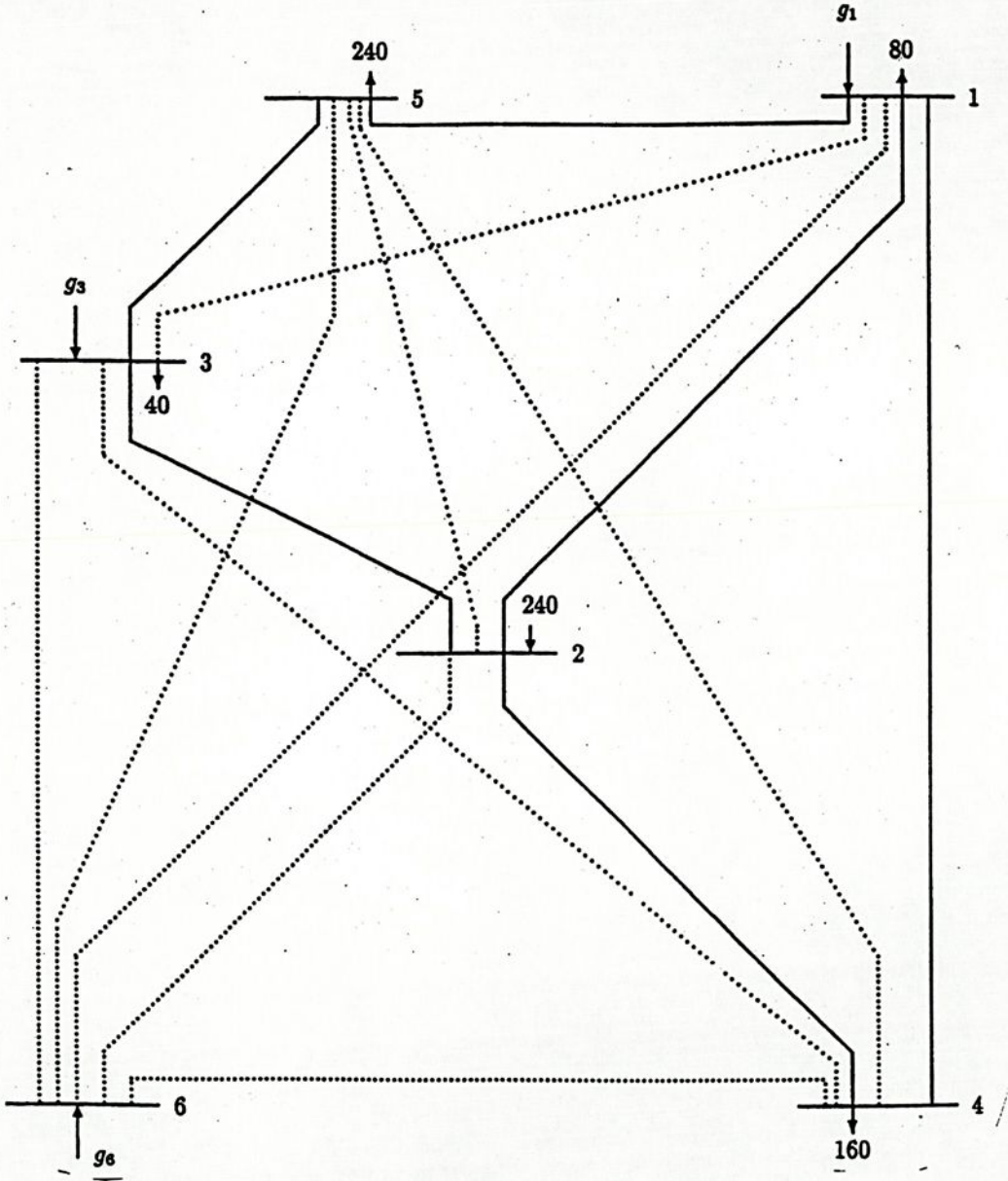


ANEXO A

DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS



ANEXO A : DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS
A.1 SISTEMA DE 6 BARRAS DE GARVER



Sistema de 6 Barras

A.1.1 Dados das barras

A.1.1.1 Dados das barras considerando a reprogramação da geração

Nº da barra	Geração (MW)	Carga (MW)
1	150	80
2	0	240
3	360	40
4	0	160
5	0	240
6	600	0

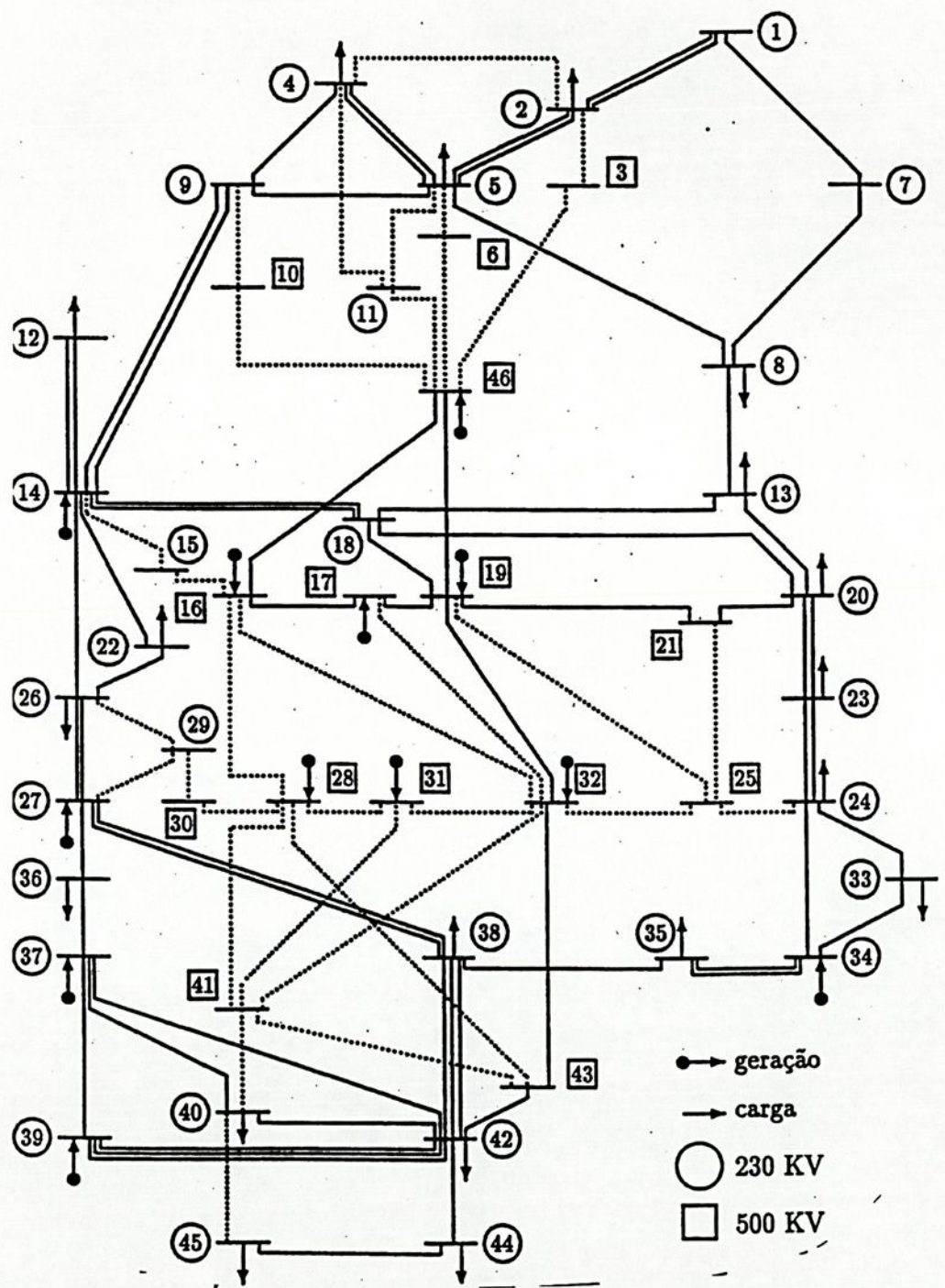
A.1.1.2 Dados das barras sem considerar a reprogramação da geração

Nº da barra	Geração (MW)	Carga (MW)
1	50	80
2	0	240
3	165	40
4	0	160
5	0	240
6	545	0

A.1.2 Dados das linhas

DADOS DAS LINHAS DO SISTEMA DE 6 BARRAS					
Nº da linha	Barra inicial	Barra final	Capacidade de Transmissão (MW)	Reatância (Ω)	Custo US\$.10 ³
1	1	2	100	0,4	40
2	1	3	100	0,38	38
3	1	4	80	0,6	60
4	1	5	100	0,2	20
5	1	6	70	0,68	68
6	2	3	100	0,2	20
7	2	4	100	0,4	40
8	2	5	100	0,31	31
9	2	6	100	0,30	30
10	3	4	82	0,59	59
11	3	5	100	0,20	20
12	3	6	100	0,48	48
13	4	5	75	0,63	63
14	4	6	100	0,3	30
15	5	6	78	0,61	61

A.2 SISTEMA SUL BRASILEIRO DE 46 BARRAS



Sistema de 46 Barras

A.2.1 Dados das barras

A.2.1.1 Dados das barras com a reprogramação da geração

Nº da barra	Geração (MW)	Carga (MW)
1	0	0
2	0	443,1
3	0	0
4	0	300,7
5	0	238
6	0	0
7	0	0
8	0	72,8
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	511,9
13	0	185,8
14	1257	0
15	0	0
16	2000	0
17	1050	0
18	0	0
19	1670	0
20	0	1091,2
21	0	0
22	0	81,9
23	0	458,1
24	0	478,2
25	0	0
26	0	231,9
27	220	0
28	800	0
29	0	0
30	0	0
31	700	0
32	500	0
33	0	229,1
34	748	0
35	0	216
36	0	90,1
37	300	0
38	0	216
39	600	0
40	0	262,1
41	0	0
42	0	1607,9
43	0	0
44	0	79,1
45	0	86,7
46	700	0

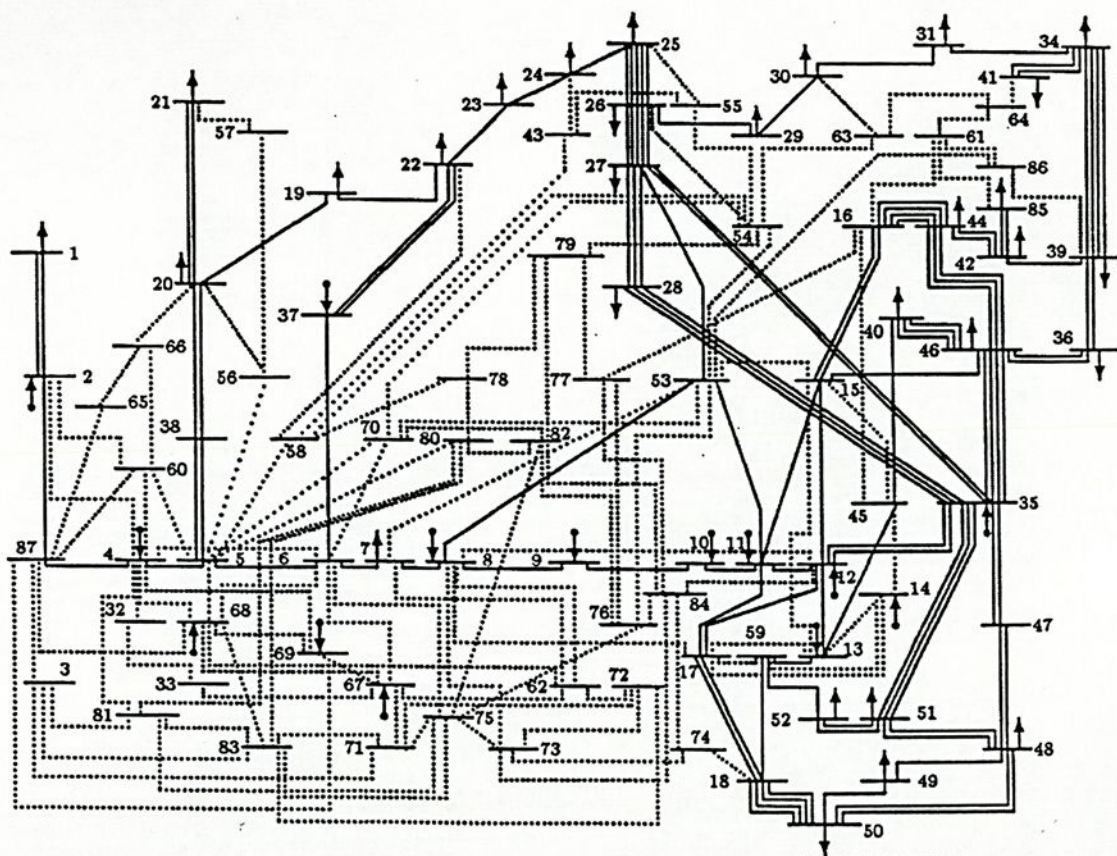
A.2.1.2 Dados das barras sem a reprogramação da geração

Nº da barra	Geração (MW)	Carga (MW)
1	0	0
2	0	443,1
3	0	0
4	0	300,7
5	0	238,0
6	0	0
7	0	0
8	0	72,2
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	511,9
13	0	185,8
14	944,0	0
15	0	0
16	1366,0	0
17	1000,0	0
18	0	0
19	773,0	0
20	0	1091,2
21	0	0
22	0	81,9
23	0	458,1
24	0	478,2
25	0	0
26	0	231,9
27	54,0	0
28	730,0	0
29	0	0
30	0	0
31	310,0	0
32	450,0	0
33	0	229,1
34	221,0	0
35	0	216,0
36	0	90,1
37	212,0	0
38	0	216,0
39	221,0	0
40	0	262,1
41	0	0
42	0	1607,9
43	0	0
44	0	79,1
45	0	86,7
46	599,0	0

A.2.2 Dados das linhas

DADOS DAS LINHAS DO SISTEMA DE 46 BARRAS					
Nº da linha	Barra inicial	Barra final	Capacidade de Transmissão (MW)	Reatância (Ω)	Custo (US\$.10³)
1	1	7	270	0.0616	4349
2	1	2	270	0.1065	7076
3	4	9	270	0.0924	6217
4	5	9	270	0.1173	7732
5	5	8	270	0.1132	7480
6	7	8	270	0.1023	6823
7	4	5	270	0.0566	4046
8	2	5	270	0.0324	2581
9	8	13	240	0.1348	8793
10	9	14	220	0.1756	11267
11	12	14	270	0.0740	5106
12	14	18	240	0.1514	9803
13	13	18	220	0.1805	11570
14	13	20	270	0.1073	7126
15	18	20	200	0.1997	12732
16	19	21	1500	0.0278	32632
17	16	17	2000	0.0078	10505
18	17	19	2000	0.0061	8715
19	14	26	220	0.1614	10409
20	14	22	270	0.0840	5712
21	22	26	270	0.0790	5409
22	20	23	270	0.0932	6268
23	23	24	270	0.0774	5308
24	26	27	270	0.0832	5662
25	24	34	220	0.1647	10611
26	24	33	240	0.1448	9399
27	33	24	270	0.1265	8288
28	27	36	270	0.0915	6167
29	27	38	200	0.2080	13237
30	36	37	270	0.1057	7025
31	34	35	270	0.0491	3591
32	35	38	200	0.1980	12631
33	37	39	270	0.0283	2329
34	37	40	270	0.1281	8389
35	37	42	200	0.2105	13388
36	39	42	200	0.2030	12934
37	40	42	270	0.0932	6268
38	38	42	270	0.0907	6116
39	32	43	1400	0.0309	35957
40	42	44	270	0.1206	7934
41	44	45	200	0.1864	11924
42	19	32	1800	0.0195	23423
43	46	19	1800	0.0222	26365
44	46	16	1800	0.0203	24309
45	18	19	600	0.0125	8178
46	20	21	600	0.0125	8178
47	42	43	600	0.0125	8178
48	2	4	270	0.0882	5965
49	14	15	270	0.0374	2884
50	46	10	2000	0.0081	10889
51	4	11	240	0.2246	14247
52	5	11	270	0.0915	6167
53	46	6	2000	0.0128	16005
54	46	3	1800	0.0203	24319
55	16	28	1800	0.0222	26365
56	16	32	1400	0.0311	36213
57	17	32	1700	0.0232	27516
58	19	25	1400	0.0325	37748
59	21	25	2000	0.0174	21121
60	25	32	1400	0.0319	37109
61	31	32	2000	0.0046	7052
62	28	31	2000	0.0053	7819
63	28	30	2000	0.0058	8331
64	27	29	270	0.0998	6672
65	26	29	270	0.0541	3894
66	28	41	1300	0.0339	39283
67	28	43	1200	0.0406	46701
68	31	41	1500	0.0278	32632
69	32	41	1400	0.0309	35957
70	41	43	2000	0.0139	17284
71	40	45	180	0.2205	13994
72	15	16	600	0.0125	8178
73	46	11	600	0.0125	8178
74	24	25	600	0.0125	8178
75	29	30	600	0.0125	8178
76	40	41	600	0.0125	8178
77	2	3	600	0.0125	8178
78	5	6	600	0.0125	8178
79	9	10	600	0.0125	8178

A.3 SISTEMA NORDESTE BRASILEIRO DE 87 BARRAS



Sistema de 87 Barras

A.3.1 Dados das barras (com reprogramação da geração)

Nº da Barra	Geração (MW)	Carga (MW)
1	0	1857
2	4048	0
3	0	0
4	517	0
5	0	0
6	0	0
7	0	31
8	403	0
9	465	0
10	538	0
11	2200	0
12	2257	0
13	4510	0
14	542	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	86
20	0	125
21	0	722
22	0	291
23	0	58
24	0	159
25	0	1502
26	0	47
27	0	378
28	0	189
29	0	47
30	0	189
31	0	110
32	0	0
33	0	0
34	0	28
35	1635	0
36	0	225
37	169	0
38	0	0
39	0	186
40	0	1201
41	0	520
42	0	341
43	0	0
44	0	4022
45	0	0

Nº da Barra	Geração (MW)	Carga (MW)
46	0	205
47	0	0
48	0	347
49	0	777
50	0	5189
51	0	290
52	0	707
53	0	0
54	0	0
55	0	0
56	0	0
57	0	0
58	0	0
59	0	0
60	0	0
61	0	0
62	0	0
63	0	0
64	0	0
65	0	0
66	0	0
67	1242	0
68	888	0
69	902	0
70	0	0
71	0	0
72	0	0
73	0	0
74	0	0
75	0	0
76	0	0
77	0	0
78	0	0
79	0	0
80	0	0
81	0	0
82	0	0
83	0	0
84	0	0
85	0	487
86	0	0
87	0	0

A.3.2 Dados das linhas

DADOS DAS LINHAS DO SISTEMA DE 87 BARRAS					
Nº da linha	Barra inicial	Barra final	Capacidade de Transmissão (MW)	Reatância (Ω)	Custo (US\$.10 ³)
1	1	2	1000	0,0374	44056
2	2	4	1000	0,0406	48880
3	2	60	1000	0,0435	52230
4	2	87	1000	0,0259	31182
5	3	71	3200	0,0078	92253
6	3	81	3200	0,0049	60153
7	3	83	3200	0,0043	53253
8	3	87	1200	0,0058	21232
9	4	5	1000	0,0435	52230
10	4	6	1000	0,0487	58260
11	4	32	300	0,0233	7510
12	4	60	1000	0,0215	26770
13	4	68	1000	0,007	10020
14	4	69	1000	0,0162	20740
15	4	81	1200	0,0058	21232
16	4	87	1000	0,0218	26502
17	5	6	1000	0,0241	29852
18	5	38	600	0,0117	8926
19	5	56	1000	0,0235	29182
20	5	58	1000	0,022	27440
21	5	60	1000	0,0261	32130
22	5	68	1000	0,0406	48880
23	5	70	1000	0,0464	55580
24	5	80	1200	0,0058	21232
25	6	7	1000	0,0288	35212
26	6	37	300	0,0233	7510
27	6	67	1000	0,0464	55580
28	6	68	1000	0,0476	56920
29	6	70	1000	0,0371	44860
30	6	75	1200	0,0058	21232
31	7	8	1000	0,0234	29048
32	7	53	1000	0,0452	54240
33	7	62	1000	0,0255	31460
34	8	9	1000	0,0186	23420
35	8	12	1000	0,0394	47540
36	8	17	1000	0,0447	53570
37	8	53	1200	0,0365	44190
38	8	62	1000	0,0429	51560
39	8	73	1200	0,0058	21232
40	9	10	1000	0,0046	7340
41	10	11	1000	0,0133	17390
42	11	12	1200	0,0041	6670
43	11	15	1200	0,0297	36284
44	11	17	1200	0,0286	35078
45	11	53	1000	0,0254	31326
46	12	13	1200	0,0046	7340
47	12	15	1200	0,0256	31594
48	12	17	1200	0,0246	30388
49	12	35	600	0,0117	8926
50	12	84	1200	0,0058	21232
51	13	14	1200	0,0075	10690
52	13	15	1200	0,0215	26770
53	13	17	1200	0,0232	28780
54	13	45	1200	0,0290	35480
55	13	59	1200	0,0232	28780
56	14	17	1200	0,0232	28780
57	14	45	1200	0,0232	28780
58	14	59	1200	0,0157	20070
59	15	16	1200	0,0197	24760
60	15	45	1200	0,0103	13906
61	15	46	600	0,0117	8926
62	15	53	1000	0,0423	50890
63	16	44	600	0,0117	8926
64	16	45	1200	0,022	27440
65	16	61	1000	0,0128	16720
66	16	77	1200	0,0058	21232
67	17	18	1200	0,017	21678
68	17	59	1200	0,017	21678
69	18	50	600	0,0117	8926
70	18	59	1200	0,0331	40170
71	18	74	1200	0,0058	21232
72	19	20	170	0,0934	5885
73	19	22	170	0,1877	11165
74	20	21	300	0,0715	6960
75	20	21	170	0,1032	6435
76	20	38	300	0,1382	12840
77	20	56	600	0,0117	8926
78	20	66	170	0,2064	12210
79	21	57	600	0,0117	8926



DADOS DAS LINHAS DO SISTEMA DE 87 BARRAS (continuação)					
Nº da linha	Barra inicial	Barra final	Capacidade de Transmissão (MW)	Reatância (Ω)	Custo (US\$.10')
80	22	23	170	0.1514	9130
81	22	37	170	0.2015	11935
82	22	58	300	0.0233	7510
83	23	24	170	0.1651	9900
84	24	25	170	0.2153	12705
85	24	43	300	0.0233	7510
86	25	26	300	0.1073	29636
87	25	26	170	0.1691	10120
88	25	55	600	0.0117	8926
89	26	27	300	0.1404	25500
90	26	27	170	0.2212	12760
91	26	29	170	0.1081	6710
92	26	54	600	0.0117	8926
93	27	28	170	0.0826	5335
94	27	35	300	0.1367	25000
95	27	53	600	0.0117	8926
96	28	35	170	0.1671	9900
97	29	30	170	0.0688	4510
98	30	31	170	0.0639	4235
99	30	63	300	0.0233	7510
100	31	34	170	0.1406	8525
101	32	33	170	0.1966	11660
102	33	67	300	0.0233	7510
103	34	39	170	0.116	7150
104	34	39	80	0.2968	6335
105	34	41	170	0.0993	6215
106	35	46	170	0.2172	12705
107	35	47	170	0.1327	8085
108	35	51	170	0.1602	9625
109	36	39	170	0.1189	7315
110	36	46	170	0.0639	4235
111	39	42	170	0.0973	6105
112	39	86	300	0.0233	7510
113	40	45	600	0.0117	8926
114	40	46	170	0.0875	5500
115	41	64	300	0.0233	7510
116	42	44	170	0.0698	4565
117	42	85	170	0.0501	3465
118	43	55	1000	0.0254	31326
119	43	58	1000	0.0313	38160
120	44	46	170	0.1671	10010
121	47	48	170	0.1966	11660
122	48	49	170	0.0757	4895
123	48	50	170	0.0256	2090
124	48	51	170	0.2163	12760
125	49	50	170	0.0835	5335
126	51	52	170	0.056	3795
127	52	59	600	0.0117	8926
128	53	54	1000	0.027	32120
129	53	70	1000	0.0371	44860
130	53	76	1200	0.0058	21232
131	53	86	1000	0.0389	46870
132	54	55	1000	0.0206	25028
133	54	58	1000	0.051	60940
134	54	63	1000	0.0203	25430
135	54	70	1000	0.036	43520
136	54	79	1200	0.0058	21232
137	56	57	1000	0.0122	16050
138	58	78	1200	0.0058	21232
139	60	66	300	0.0233	7510
140	60	87	1000	0.0377	45530
141	61	64	1000	0.0186	23420
142	61	85	300	0.0233	7510
143	61	86	1000	0.0139	18060
144	62	67	1000	0.0464	55580
145	62	68	1000	0.0557	66300
146	62	72	1200	0.0058	21232
147	63	64	1000	0.029	35480
148	65	66	170	0.3146	18260
149	65	87	300	0.0233	7510
150	67	68	1000	0.029	35480
151	67	69	1000	0.0209	26100
152	67	71	1200	0.0058	21232
153	68	69	1000	0.0139	18060
154	68	83	1200	0.0058	21232
155	68	87	1000	0.0186	23240
156	69	87	1000	0.0139	18060
157	70	82	1200	0.0058	21232
158	71	72	3200	0.0108	125253
159	71	75	3200	0.0108	125253
160	71	83	3200	0.0067	80253
161	72	73	3200	0.01	116253
162	72	83	3200	0.013	149253

DADOS DAS LINHAS DO SISTEMA DE 87 BARRAS (continuação)

Nº da linha	Barra inicial	Barra final	Capacidade de Transmissão (MW)	Reatância (Ω)	Custo (US\$.10⁶)
163	73	74	3200	0,013	149253
164	73	75	3200	0,013	149253
165	73	84	3200	0,0092	107253
166	74	84	3200	0,0108	125253
167	75	76	3200	0,0162	185253
168	75	81	3200	0,0113	131253
169	75	82	3200	0,0086	101253
170	75	83	3200	0,0111	128253
171	76	77	3200	0,013	149253
172	76	82	3200	0,0086	101253
173	76	84	3200	0,0059	70953
174	77	79	3200	0,0151	173253
175	77	84	3200	0,0115	132753
176	78	79	3200	0,0119	137253
177	78	80	3200	0,0051	62253
178	79	82	3200	0,0084	98253
179	80	81	3200	0,0101	117753
180	80	82	3200	0,0108	125253
181	80	83	3200	0,0094	110253
182	81	83	3200	0,0016	23253
183	82	84	3200	0,0135	155253

ANEXO B

EQUACIONAMENTO DO INDICADOR DE SENSIBILIDADE DO MÍNIMO ESFORÇO



Anexo B [2]

B.1 Equacionamento do Fluxo de Potência Linearizado

A distribuição dos fluxos de potência ativa em uma rede de transmissão pode ser estimada aproximadamente através de um modelo linearizado (DC), representado pelo sistema linear

$$B\theta = \underline{P} \quad (b1)$$

sendo:

B - matriz da capacidade de transmissão

dimensão = $(N-1 \times N-1)$;

Δ - vetor dos ângulos das tensões nodais

dimensão = $(N-1 \times 1)$;

$\underline{P}$ - vetor das injeções líquidas de potência ativa

dimensão = $(N-1 \times 1)$;

N - número de barras da rede.

Os elementos da matriz B são obtidos pelas relações:

$$\begin{aligned} B_{ij} &= -\gamma_{ij} \\ B_{ii} &= \sum_{j \in \Omega_i} \gamma_{ij} \end{aligned} \quad (b2)$$

sendo:

γ_{ij} - capacidade de transmissão do ramo ij ;

Ω_i - conjunto das barras que se ligam à barra i .

Com a solução θ , do sistema linear (b1), estimam-se os fluxos de potência ativa nas linhas e transformadores através da relação

$$f_{ij} = \gamma_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (b3)$$

$$ij \in \Omega$$

sendo:

f_{ij} - fluxo de potência ativa no elemento ij ;

γ_{ij} - capacidade de transmissão do elemento ij ;

θ_i - componente i do vetor $\underline{\theta}$;

Ω - conjunto formado por todos os elementos (linhas e transformadores) da rede.

O modelo de fluxo de potência linearizado admite ainda que se leve em consideração, de uma maneira aproximada, as perdas ocorridas na transmissão. Isto pode ser feito utilizando-se uma primeira solução de (b1), designada por $\bar{\theta}$, com a qual calculam-se aproximadamente as perdas de transmissão, em todos os elementos da rede, através da expressão

$$L_{ij} = g_{ij}(\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_j)^2 \quad (b4)$$

$$ij \in \Omega$$

sendo:

L_{ij} - perdas no elemento ij ;

g_{ij} - condutância do elemento ij ;

$\bar{\theta}_i$ - componente i do vetor $\bar{\theta}$.

As perdas em todos os elementos da rede são representadas como cargas adicionais em suas barras terminais (metade em cada barra), obtendo-se assim um novo vetor para as injeções líquidas de potência ativa designado por $\underline{P'}$ cujas componentes são dadas por

$$P'_i = P_i - \frac{1}{2} \sum_{j \in \Omega_i} g_{ij}(\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_j)^2 \quad (b5)$$



sendo:

P'_i - componente i do vetor $\underline{P}'$;

P_i - componente i do vetor $\underline{P}$.

A solução, que leva em consideração de maneira aproximada o efeito das perdas, é finalmente obtida pela resolução do sistema linear

$$B\theta = P' \quad (b6)$$

seguida do cálculo dos fluxos nos elementos através das relações (b3).

B.2 Propriedade do Mínimo Esforço do Fluxo de Potência Linearizado

O modelo do fluxo de potência linearizado (DC) é equivalente a um problema de otimização, que procura o mínimo de uma função quadrática dos fluxos sujeito às restrições correspondentes às injeções de potência nas barras, podendo ser representado pela eq (3.6). A solução θ obtida através de (b1) ou (b6), corresponde a uma distribuição de fluxos que é a solução do problema de otimização (3.6) e que pode ser calculada através da relação (b3).

Considerando a equação (b4), a distribuição dos fluxos calculada através do modelo de fluxo de potência linearizado visa minimizar as perdas associadas (mínimo esforço). Com esta propriedade, é estabelecido um critério de seleção dos ramos candidatos a receber um novo componente. Esse critério consiste em determinar um conjunto de ramos que, sofrendo aumento em sua capacidade de transmissão, acabam em acarretar as maiores perturbações no valor ótimo de Z^* , da função objetivo dada por:

$$Z^* = \frac{1}{2} \sum_{ij \in \Omega} \frac{f_{ij}^2}{\gamma_{ij}} \quad (b7)$$

Para determinar os ramos, que recebendo a adição de um novo componente, provocariam as maiores perturbações em Z^* , inicialmente é obtido o vetor gradiente de Z^*

$$\text{grad}(Z^*) = \begin{bmatrix} \frac{dZ^*}{d\gamma_{12}} \\ \vdots \\ \frac{dZ^*}{d\gamma_{ij}} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{b8})$$

cujas componentes são dadas por:

$$\frac{dZ^*}{d\gamma_{ij}} = -\frac{1}{2}(\theta_i - \theta_j)^2 \quad (\text{b9})$$

Admitindo-se uma variação na capacidade de transmissão da rede devido a adição de um novo componente no ramo ij , obtêm-se a seguinte aproximação para Z^* :

$$Z^*(\gamma + \Delta\gamma) \cong Z^*(\gamma) + \frac{dZ^*}{d\gamma_{ij}} \Delta\gamma_{ij} \quad (\text{b10})$$

sendo:

γ - vetor capacidade de transmissão da rede;

$$\Delta\gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta\gamma_{ij} \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{- variação na capacidade de transmissão da rede devido}$$

a adição de um novo componente no ramo ij ;

$\Delta\gamma_{ij}$ - capacidade de transmissão do componente que pode ser adicionado no ramo ij

Os valores aproximados para as perturbações em Z^* correspondentes às adições de novos elementos nos ramos em que são permitidos podem ser obtidos da expressão (b10) como:

$$\Delta Z^*_{ij} = \frac{dZ^*}{d\gamma_{ij}} \Delta \gamma_{ij} \approx -\frac{1}{2} (\theta_i - \theta_j)^2 \Delta \gamma_{ij} \quad (b11)$$

sendo:

ΔZ^*_{ij} - valor aproximado da perturbação em Z^* causada pela adição de um novo componente no ramo ij

De acordo com esse critério, os ramos candidatos a receberem um novo componente serão aqueles que corresponderem aos maiores valores de $|\Delta Z^*_{ij}|$. O conjunto de adições selecionado por este critério corresponderá àquelas que se fossem, efetuadas, provocariam os maiores impactos na distribuição dos fluxos na rede.



ANEXO C

EQUACIONAMENTO DO INDICADOR DE SENSIBILIDADE DO MÍNIMO CORTE DE CARGA



Anexo C [3]

C.1 Modelo de Fluxo de Potência Linearizado (Algoritmo do Mínimo Corte de Carga)

Seja o problema de mínimo corte de carga reproduzido abaixo na forma padrão:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \sum_{k=1}^N r_k \\ \text{s.a.} \quad & \begin{array}{l} \text{variáveis duais} \\ \downarrow \\ B\theta + g + r = d \rightarrow \pi_d \\ 0 \geq -g \geq -\bar{g} \rightarrow \pi_g \\ 0 \geq -r \geq -d \rightarrow \pi_r \\ -|S'\theta| \geq -\bar{\Phi} \rightarrow \pi_\Phi \end{array} \end{aligned} \quad (c1)$$

Sejam π_d , π_g , π_r e π_Φ os multiplicadores Simplex associados às restrições de (c1). O Dual do problema (c1) pode ser representado como

$$\begin{aligned} \max \quad & \xi = \pi_d d - \pi_g \bar{g} - \pi_r d - \pi_\Phi \bar{\Phi} \\ \text{s.a.} \quad & \begin{array}{l} \text{variáveis duais} \\ \downarrow \\ \pi_d - \pi_r \leq e \rightarrow r \\ \pi_d - \pi_g \leq 0 \rightarrow g \\ \pi_d B - \pi_\Phi S' = 0 \rightarrow \theta \end{array} \end{aligned} \quad (c2)$$

Sendo os multiplicadores Simplex associados às restrições de (c2), respectivamente r , g e θ .

C.2 A Análise de Sensibilidade para o Reforço nas Linhas

Uma das maneiras de se identificar as linhas "críticas" de um sistema de transmissão é através da sensibilidade em relação à susceptância γ .

A sensibilidade em relação à susceptância pode ser facilmente calculada. Será demonstrado em seguida que

$$\pi_{\gamma}(ij) = \Delta z^* / \Delta \gamma_{ij} = (\pi_d(i) - \pi_d(j))(\theta_j^* - \theta_i^*) \quad (c3)$$

sendo: $\theta_i^* e \theta_j^*$ os ângulos de tensão nodal na solução ótima do MCC.

O cálculo do índice de sensibilidade π_{γ} em (c3) é interessante porque não se refere a variações no vetor de restrições (lado direito das equações do problema (c1)) mas sim a variações na matriz B, que faz parte da matriz de coeficientes do PL (c1). Seja então um PL na forma canônica

$$\min z = c x \quad (c4)$$

s.a.

$$A x = b$$

cuja solução ótima, escrita em termos das variáveis básicas x_b (as não básicas são iguais a zero), é representada por

$$\begin{aligned} z^* &= c_B x_B^* \\ A_B x_B^* &= b \end{aligned} \quad (c5)$$

sendo:

z^* - o valor ótimo da função objetivo;

A_B - a base ótima;

c_B - o vetor de custos básicos;

x_B^* - a solução básica ótima

Uma perturbação ΔA_B em coeficientes da matriz A_B leva a variações Δx_B^* nas variáveis básicas tais que a equação

$$(A_B + \Delta A_B)(x_B^* + \Delta x_B^*) = b \quad (c6)$$

continue sendo atendida. Expandindo-se os termos da equação (c6), obtém-se

$$A_B x_B^* + A_B \Delta x_B^* + \Delta A_B x_B^* + \Delta A_B \Delta x_B^* = b \quad (c7)$$

Lembrando que $A_B x_B^* = b$ (eq c5), e desprezando os termos de segunda ordem $\Delta A_B \Delta x_B^*$, chega-se a

$$A_B \Delta x_B^* + \Delta A_B x_B^* = 0 \quad (c8)$$

Colocando a expressão (c8) em termos de x_B , obtém-se

$$\Delta x_B^* = -A_B^{-1} \Delta A_B x_B^* \quad (c9)$$

Por sua vez, a variação Δz^* na função objetivo é dada por

$$\Delta z^* = c_B \Delta x_B^* \quad (c10)$$

Substituindo (c9) em (c10), obtém-se

$$\Delta z^* = -c_B A_B^{-1} \Delta A_B x_B^* \quad (c11)$$

o termo $c_B A_B^{-1}$ representa o vetor de multiplicadores Simplex π^* associado às restrições $A_B x_B^* = b$. A expressão

$$\Delta z^* = -\pi^* \Delta A_B x_B^* \quad (c12)$$

fornece portanto a sensibilidade da função objetivo em relação a variações na matriz de coeficientes. Em termos o problema (c1), a variação $\Delta\gamma_{ij}$ afeta a matriz B na equação do problema (c1), reproduzida a seguir,

$$B\theta^* + g^* + r^* = d \quad (c13)$$

em quatro elementos, isto é,

$$\Delta B = \begin{matrix} & \begin{matrix} i & j \end{matrix} \\ & \begin{matrix} \downarrow & \downarrow \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \Delta\gamma_{ij} & \cdots & -\Delta\gamma_{ij} & \cdots \\ & \vdots & \ddots & \vdots & \\ \cdots & -\Delta\gamma_{ij} & \cdots & \Delta\gamma_{ij} & \cdots \\ & \vdots & & \vdots & \ddots \end{bmatrix} & \begin{matrix} \leftarrow i \\ \\ \\ \leftarrow j \end{matrix} \end{matrix} \quad (c14)$$

A expressão (c14) corresponde à definição da matriz B na equação (b2).

Lembrando que o vetor de multiplicadores associado à equação (c13) é π_d , a variação Δz^* é dada, portanto, por

$$\Delta z^* = -\pi_d^* \Delta B \theta^* \quad (c15)$$

Substituindo a expressão (c14) em (c15) tem-se

$$\Delta z^* = (\pi_d(i) - \pi_d(j))\Delta\gamma_{ij}\theta_i^* - (\pi_d(i) - \pi_d(j))\Delta\gamma_{ij}\theta_j^* \quad (c16)$$

Colocando os termos em evidência, chega-se a

$$\Delta z^* / \Delta\gamma_{ij} = (\pi_d(i) - \pi_d(j))(\theta_j^* - \theta_i^*) \quad (c17)$$

que é o índice de sensibilidade desejado.

A relação (c17) pode ser visualizada como o efeito da transferência de um incremento de fluxo Δf_{ij} a partir de uma barra i “segura” para uma barra j “insegura”. A diferença $\Delta z = (\pi_d(i) - \pi_d(j))\Delta f_{ij}$ mede o benefício desta transferência, pois isto equivale a diminuir a demanda na barra i e aumentá-la na barra j . O valor de Δf_{ij} pode por sua vez ser expresso como $(\theta_j - \theta_i)\Delta \gamma_{ij}$.



ANEXO D

BIBLIOGRAFIA



ANEXO D - BIBLIOGRAFIA

D. BIBLIOGRAFIA

- [1] *L. L. Garver* : "Transmission Network Estimation Using Linear Programming", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, pp. 1688-1697, September-October, 1970.
- [2] *A. Monticelli, A. Santos Jr., M. V. F. Pereira, S. H. Cunha, B. J. Parker, J. C. G. Praça* : "Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion". IEEE Trans. Power App. Systems, Vol. PAS-101, No.10, October, 1982.
- [3] *M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto* : "Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, pp 381-389, February, 1985.
- [4] *V. CA. Levi, M. S. Calovic* : "A New Decomposition Based Method for Optimal Expansion Planning of Large Transmission Networks", IEEE Transactions on Power System, Vol. 6, No. 3, pp 937-943, October, 1991.
- [5] *C. Dechamps, A. Jamouille* : "Interactive Computer Program for Planning the Expansion of Meshed Transmission Networks", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 2, No. 2, February 1985.
- [6] *R.. Villasana, L.L. Garver, S.J. Salon* : "Transmission Network Planning Using Linear Programming", IEEE Trans. Power App. Systems, Vol. PAS-104, No 2, February, 1985.
- [7] *K.. G. Murty* : "Linear Programming", Jhon Wiley and Sons, 1983.
- [8] *A. Monticelli* : "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Editora Edgar Bucher Ltda, 1983.
- [9] *R. A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero* : "Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No.1, February 1996.
- [10] *R. Romero, A. Pádua Machado* : "Avaliação Experimental do Algoritmo de Simulated Annealing usado no Planejamento de Sistemas de Transmissão".



ANEXO E

ARTIGOS PUBLICADOS

- *R. Romero, C. Rocha* : "Planificación De Sistemas de Transmisión Usando Un Algoritmo Heurístico Constructivo", XIII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, novembro de 1999.



PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO UN ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUCTIVO

R. Romero - C. Rocha

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS - UNESP

Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho

Av. Brasil 56 - Centro - CP 15385-000 Ilha Solteira - SP - Brasil

Resumen: Es presentado un algoritmo heurístico constructivo usado en la planificación de la expansión de sistemas de transmisión a largo plazo. El algoritmo usa en forma integrada los indicadores de sensibilidad y las principales características de cuatro algoritmos heurísticos constructivos que son considerados eficientes por la literatura especializada. Son mostrados resultados experimentales encontrados con el algoritmo usando sistemas eléctricos ampliamente conocidos.

1. Introducción

Este trabajo analiza la planificación estática de sistemas de transmisión. En este tipo de problema, conocida una configuración inicial y los datos de generación y de carga de un horizonte de planificación (además de otros datos como los límites de operación, costos y restricciones de inversión), se desea conocer el plan de expansión óptima del sistema con una inversión mínima, o sea determinar donde y que tipos de circuitos deben ser instalados en el sistema. Este es un subproblema de un problema más general, llamado de planificación dinámica, donde adicionalmente se desea saber cuando instalar estos nuevos circuitos y, también, del problema de planificación de un sistema de libre acceso o de mercado abierto. Además, estos trabajos preliminares que analiza simplemente la viabilidad del sistema en términos de balance de potencia activa, después debe ser analizado para resolver el problema de balance de potencia reactiva colocando fuentes reactivas en el sistema (planificación de reactivos en sistemas de transmisión). Finalmente, esas propuestas deben ser analizadas usando técnicas de análisis exactas usadas para análisis de operación de sistemas eléctricos.

En la planificación de sistemas de transmisión son usados 3 modelos matemáticos: modelo de transportes, modelo DC y modelo híbrido. El modelo DC es el considerado como ideal y los otros son versiones relajadas de este modelo. El modelo DC tiene la estructura de un problema de programación no lineal entero mixto (PNLEM) de difícil solución especialmente para sistemas de grande porte. Los especialistas usan 3 grandes familias de algoritmos para resolver este problema: algoritmos heurísticos básicamente de tipo constructivo, algoritmos de optimización exacta y algoritmos combinatoriales. Los algoritmos heurísticos, todavía bastante usados por las empresas eléctricas, son robustos y encuentran soluciones de buena calidad con esfuerzos computacionales pequeños mas raramente encuentran las soluciones óptimas de un sistema de grande porte. Métodos heurísticos de calidad reconocida

fueron presentados en [1, 2, 3, 4, 5]. Los métodos de optimización exacta usan técnicas de descomposición matemática y generalmente encuentran soluciones óptimas de sistemas de pequeño y de medio porte mas tienen problemas de convergencia y de esfuerzo computacional con sistemas grandes. Algoritmos de este tipo fueron presentados en [6, 7]. Algoritmos de optimización combinatorial como recocido simulado, genético o búsqueda tabú encuentran soluciones óptimas o sub-óptimas mismo de sistemas de grande porte mas con esfuerzos computacionales bastante elevados. Algoritmos de este tipo fue presentado en [8].

En este trabajo se retoma la línea de investigación de los algoritmos heurísticos constructivos, se analiza 4 algoritmos de este tipo, de calidad reconocida, y se propone un algoritmo heurístico constructivo integrado que usa los indicadores de desempeño y las principales características de esos algoritmos produciendo un algoritmo que tiene capacidad de encontrar soluciones de mejor calidad.

2. Formulación del Problema

El modelo DC tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \min v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{k \in R} r_k \\ \text{s.a.} & \\ & B(n + n^o)\theta + g + r = d \\ & (n_{ij}^o + n_{ij})|\theta_i - \theta_j| \leq (n_{ij}^o + n_{ij})\bar{\phi}_{ij} \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & 0 \leq r \leq d \\ & 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\ & n_{ij} \text{ entero y } \theta_j \text{ irrestricto} \end{aligned} \quad (1)$$

donde c_{ij} es el costo de un circuito en el tramo $i - j$, n_{ij} es un elemento de n y es el número de circuitos que debe adicionarse en el tramo $i - j$ donde existen adicionados n_{ij}^o (un elemento de n^o) circuitos en la topología base, B es la matriz de susceptancias, g es el vector de generadores con capacidades máximas $\bar{g}$, r es el vector de generadores artificiales con capacidades máximas d que es el vector de cargas, θ es el vector de ángulos de tensión de barras, $\bar{n}_{ij}$ es el número máximo de circuitos que puede adicionarse en el tramo $i - j$, Ω es el conjunto de circuitos candidatos, R es el conjunto de barras de carga y α es un parámetro de penalidad que debe ser escogido. Los generadores artificiales son colocados



para facilitar el proceso de solución y, en principio, pueden ser eliminados del modelo. En el modelo DC se deben cumplir las 2 leyes de Kirchhoff y las restricciones adicionales de operación del sistema. El sistema (1) es un PNLEM muy difícil de resolver usando técnicas exactas de optimización. Sin embargo, si se escoge una propuesta de solución dando valores a los n_{ij} entonces el sistema (1) se transforma en un simple problema de programación lineal (PL). Esa es la idea básica de un algoritmo heurístico.

3. Algoritmos Heurísticos Constructivos

Un algoritmo heurístico constructivo es un proceso paso a paso donde en cada paso es adicionado un circuito en el sistema eléctrico. El circuito que es adicionado es identificado por un indicador de sensibilidad propio de cada algoritmo heurístico. Por lo tanto, la diferencia fundamental entre los algoritmos heurísticos está en el tipo de indicador de sensibilidad usado. Los indicadores de sensibilidad generalmente son relaciones matemáticas aproximadas que miden la mejora de operación de un sistema eléctrico cuando es adicionado un circuito. Así, el proceso de optimización es iniciado con la topología base que se transforma en la topología actual y en cada paso se adiciona un circuito y se actualiza la topología actual con la adición de ese nuevo circuito. El proceso termina cuando el sistema opera adecuadamente y no se necesitan más adiciones.

En esta parte se presenta, en forma resumida, los 4 algoritmos heurísticos constructivos usados como base para formular el nuevo algoritmo heurístico integrado.

3.1 Algoritmo de Garver

El algoritmo de Garver [1] fue uno de los primeros algoritmos exitosos usados en la planificación de sistemas eléctricos. Este algoritmo trabaja con el modelo de transportes que tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \min v &= \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \\ \text{s.a.} & \\ S f + g &= d \\ |f_{ij}| &\leq (n_{ij}^o + n_{ij}) \bar{f}_{ij} \\ 0 &\leq g \leq \bar{g} \\ 0 &\leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\ n_{ij} &\text{ entero y } f_{ij} \text{ irrestricto} \end{aligned} \quad (2)$$

donde S es la matriz de incidencia nodo-ramo del sistema. En el modelo de transportes solo se cumple la primera ley de Kirchhoff y otras restricciones de operación, o sea, no se cumple necesariamente la segunda ley de Kirchhoff. Por lo tanto, es un modelo relajado en relación al modelo DC. El sistema (2) es un problema lineal entero mixto (PLEM) todavía difícil de resolver para sistemas de grande porte. Sin embargo, si aceptamos que n_{ij} sea real entonces el problema se transforma en un simple PL.

El identificador de sensibilidad del algoritmo de Garver consiste en resolver en cada paso el sistema (2), relajando

la integralidad de n_{ij} , usando un PL. Así, el circuito más atractivo y que debe ser adicionado al sistema, modificando el vector de los n_{ij}^o , es el tramo identificado con la solución n_{ij} que lleva el mayor flujo de potencia. En otras palabras, se identifica todos los tramos en los cuales fueron adicionados circuitos ($n_{ij} \neq 0$) y aquel circuito nuevo que lleva el mayor flujo de potencia identifica el camino más atractivo.

El algoritmo de Garver tiene la siguiente forma:

Fase I:

1. Asumir la topología base n_{ij}^o como topología actual.
2. Resolver el PL relajado de (2) para la topología actual. Si todos los $n_{ij} = 0$ pasar para la fase II. En caso contrario ir al paso 3.
3. Calcular los flujos de potencia en todos los circuitos adicionados por el PL ($n_{ij} \neq 0$) usando $f_{ij}^v = n_{ij} \bar{f}_{ij}$. Identificar el camino con el mayor f_{ij}^v y actualizar la topología actual adicionando un circuito en ese tramo $i - j$. Volver al paso 2.

Fase II:

1. Intentar retirar circuitos irrelevantes adicionados en la fase I. Ordenar los circuitos adicionados en orden decreciente de sus costos y eliminar aquellos que, una vez simulada su salida, el sistema resultante opera adecuadamente.

3.2 Algoritmo de Mínimo Esfuerzo

El algoritmo de mínimo esfuerzo propuesto en [2] usa el modelo DC. En realidad este algoritmo resuelve en cada paso, para la topología actual, el sistema lineal:

$$B \theta = P \quad (3)$$

donde P es la potencia neta en cada barra. Así, se deja que el sistema se sobrecargue libremente y se calcula el flujo de potencia en cada circuito usando la relación $f_{ij} = (\theta_i - \theta_j) \gamma_{ij}^{eq}$, donde γ_{ij}^{eq} es la susceptancia equivalente de los circuitos en $i - j$, para identificar los circuitos sobrecargados. Este algoritmo usa el indicador de sensibilidad siguiente:

$$SI_{ij}^{me} = -\frac{1}{2}(\theta_i - \theta_j)^2 \gamma_{ij} \quad (4)$$

donde γ_{ij} es la susceptancia de un circuito en $i - j$. Este indicador de sensibilidad permite identificar al circuito que una vez adicionado al sistema produce una máxima variación de flujos en el sistema eléctrico produciendo consecuentemente una disminución de sobrecarga del sistema. Una formulación alternativa de (3) consiste en resolver el siguiente PL:

$$\begin{aligned} \min w &= \sum r_k \\ \text{s.a.} & \\ B \theta + g + r &= d \\ 0 &\leq g \leq \bar{g} \\ 0 &\leq r \leq d \\ \theta_j &\text{ irrestricto} \end{aligned} \quad (5)$$



que es una relajación de (1) una vez escogida la topología y permitiendo que los circuitos se sobrecarguen. Es frecuente usar también una variante del indicador de sensibilidad (4) que lleva en cuenta los costos de los circuitos de la siguiente manera:

$$SI_{ij}^{mem} = \frac{SI_{ij}^{me}}{c_{ij}} \quad (6)$$

El circuito más atractivo es aquel que tiene el mayor valor absoluto de SI_{ij}^{me} (o SI_{ij}^{mem}). El algoritmo de mínimo esfuerzo se puede resumir en los siguientes pasos:

Fase I:

1. Asumir la topología base n_{ij}^0 como topología actual.
2. Resolver el PL (5) para la topología actual. Si no existe circuitos sobrecargados pasar para la fase II. En caso contrario ir al paso 3.
3. Calcular los indicadores de sensibilidad (4) (o (6)), identificar el camino $i-j$ que tiene el indicador de sensibilidad de mayor valor absoluto, y modificar la topología actual adicionando un circuito en ese camino. Volver al paso 2.

Fase II:

1. Igual al algoritmo de Garver.

3.3 Algoritmo de Mínimo Corte de Carga

Este algoritmo propuesto en [3] usa también el modelo DC. El algoritmo resuelve en cada paso, para la topología actual de la iteración k , el siguiente PL:

$$\begin{aligned} \min w &= \sum r_k \\ \text{s.a.} \quad & B\theta + g + r = d \\ & |\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & 0 \leq r \leq d \\ & \theta_j \text{ irrestricto} \end{aligned} \quad (7)$$

donde Ω_1 identifica los circuitos existentes en la topología actual y w representa el corte de carga en el sistema para la topología actual. Este algoritmo usa el indicador de sensibilidad siguiente:

$$SI_{ij}^{mc} = -(\theta_i - \theta_j)(\pi_i - \pi_j) \quad (8)$$

donde π_j es el multiplicador de Lagrange de la restricción j del sistema $B\theta + g + r = d$. Este indicador de sensibilidad permite identificar al circuito que una vez adicionado al sistema produciría una máxima disminución de corte de carga del sistema. Lógicamente, todas las relaciones matemáticas de los indicadores de sensibilidad son encontradas usando aproximaciones. Es frecuente usar también una variante del indicador de sensibilidad (8) que lleva en cuenta los costos de los circuitos de la siguiente manera:

$$SI_{ij}^{mcm} = \frac{SI_{ij}^{mc}}{c_{ij}} \quad (9)$$

El circuito más atractivo es aquel que tiene el mayor valor de SI_{ij}^{mc} (o SI_{ij}^{mcm}). El algoritmo de mínimo corte de carga se puede resumir en los siguientes pasos:

Fase I:

1. Asumir la topología base n_{ij}^0 como topología actual.
2. Resolver el PL (7) para la topología actual. Si no existe corte de carga en el sistema pasar para la fase II. En caso contrario ir al paso 3.
3. Calcular los indicadores de sensibilidad (8) (o (9)) y identificar el camino $i-j$ que tiene el mayor indicador de sensibilidad y modificar la topología actual adicionando un circuito en ese camino. Volver al paso 2.

Fase II:

1. Igual al algoritmo de mínimo esfuerzo.

3.4 Algoritmo de Villasana-Garver

El algoritmo de Villasana-Garver encuentra una solución para el modelo DC mas en cada paso resuelve un problema que corresponde a un modelo híbrido. El modelo matemático propuesto es interesante porque considera que la parte del sistema que corresponde a la topología actual debe obedecer a las dos leyes de Kirchoff y las otras restricciones de límites de operación. Sin embargo, se considera superpuesta a la topología actual, un sistema eléctrico constituido por circuitos artificiales que deben resolver los problemas de sobrecarga de la topología actual. Estos circuitos artificiales obedecen únicamente a la primera ley de Kirchhoff y pueden ser adicionados circuitos fraccionarios. Así, el algoritmo de Villasana resuelve, en cada paso, el siguiente PL:

$$\begin{aligned} \min v &= \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \\ \text{s.a.} \quad & S f + B_I \theta_I + g = d \\ & |\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \\ & |f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} n_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega \\ & 0 \leq g \leq \bar{g} \\ & n_{ij} \geq 0 \\ & f_{ij} \text{ y } \theta_j \text{ irrestrictos} \end{aligned} \quad (10)$$

donde S es la matriz de incidencia nodo-ramo de la red artificial (de todo el sistema eléctrico), B_I es la matriz de susceptancias de los circuitos que corresponden a la topología actual, o sea, de los circuitos que pertenecen a Ω_1 y θ_I es el vector de ángulos de las barras que están conexos en la topología actual.

La idea de circuitos artificiales fue propuesta en [2] para contornar el problema de barras desconexas en la topología actual. En la propuesta de Villasana, todos los circuitos, verdaderos y artificiales, deben obedecer a la primera ley de

Kirchhoff mas la segunda ley de Kirchhoff debe ser obedecida solamente en los lazos formados por los circuitos verdaderos. En este contexto, se desea minimizar, la inversión debido a la adición de circuitos artificiales.

La solución de (10) identifica los circuitos artificiales más atractivos. Así, el indicador de sensibilidad del algoritmo de Villasana consiste en identificar el circuito artificial que lleva el mayor flujo de potencia y puede ser encontrado fácilmente después de resolver (10) que es un PL.

El algoritmo de Villasana-Garver se puede resumir en los siguientes pasos:

Fase I:

1. Asumir la topología base n_{ij}^o como topología actual.
2. Resolver el PL (10) para la topología actual. Si $v = 0$ (sin inversión) entonces no existe necesidad de circuitos artificiales identificando operación adecuada con los circuitos ya adicionados y se debe pasar a la fase II. En caso contrario ir al paso 3.
3. Identificar el circuito artificial que lleva el mayor flujo de potencia y adicionar un circuito, correspondiente a ese camino, a la topología actual para obtener la nueva topología. Volver al paso 2.

Fase II:

1. Igual al algoritmo de mínimo esfuerzo.

4. Algoritmo Heurístico Integrado

Usando los indicadores de sensibilidad de los 4 algoritmos heurísticos analizados y la estrategia fundamental del algoritmo de mínimo corte de carga se propone un algoritmo heurístico integrado. Este algoritmo, en cada paso, determina la mejor propuesta (el circuito más atractivo) de cada uno de los 4 algoritmos y verifica la disminución de corte de carga simulando la entrada de cada uno de esos circuitos. El circuito que definitivamente es incorporado en la topología actual es aquel que presenta una mayor relación corte de carga/costo. El algoritmo integrado básico es mostrado en la figura 1.

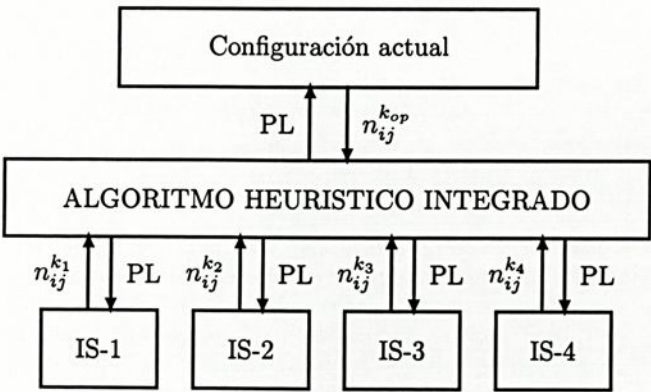


Figura 1: Algoritmo heurístico propuesto.

En cada paso del algoritmo se debe procesar hasta 8 problemas de PL aumentando, obviamente, un poco el esfuerzo computacional. Adicionalmente se implementa una estrategia para contornar problemas con sistemas no conexos en el cual se debe considerar todos los circuitos que permiten la conexión de la parte no conexas para la parte conexas del sistema. Así, para nuevos caminos uniendo barras no conexas puede ser necesario adicionar varios circuitos simultáneamente, por ejemplo, transformador - línea - transformador. Esta estrategia de adicionar varios circuitos simultáneamente también es propuesto en los métodos de mínimo esfuerzo y mínimo corte de carga.

El indicador de sensibilidad del algoritmo integrado es el siguiente:

$$IS_k^{AI} = \frac{w_c - w_k}{\delta_k}; \quad k = 1, 2, 3, 4 \tag{11}$$

donde w_c es el corte de carga de la topología actual, w_k es el corte de carga producido simulando la adición de los circuitos propuestos por el indicador de sensibilidad del algoritmo k y δ_k es el costo de los circuitos cuya adición se está simulando. Es aceptada la propuesta de aquel algoritmo que produce el mayor valor de IS_k^{AI} . En otras palabras, se escoge la propuesta que produce buena reducción de corte de carga y/o adición de circuitos de bajo costo.

El algoritmo heurístico integrado se puede resumir en los siguientes pasos:

Fase I:

1. Asumir la topología base n_{ij}^o como topología actual.
2. Para la topología actual resolver los PL's correspondientes a los 4 algoritmos analizados e identificar los circuitos más atractivos propuestos por los indicadores de sensibilidad de esos algoritmos.
3. Para cada propuesta encontrada en el paso anterior resolver un PL simulando la entrada de los circuitos propuestos y calcular el corte de carga usando (7). Si una o más de las 4 propuestas no produce corte de carga, entonces adicionar la mejor de esas propuestas a la topología actual y se debe pasar a la fase II porque fue encontrada una topología adecuada. En caso contrario, calcular los IS_k^{AI} usando (11) y pasar al paso 4.
4. Actualizar la topología actual adicionando los circuitos propuestos por aquel IS_k^{AI} de mayor valor y volver al paso 2.

Fase II:

1. Igual al algoritmo de mínimo esfuerzo.

Es posible incorporar muchas propuestas adicionales en el algoritmo integrado para mejorar su desempeño tales como usar indicadores de sensibilidad de otros algoritmos heurísticos, desarrollar otros indicadores de sensibilidad y encontrar un conjunto de topologías antes que una simple topología. En este trabajo se analiza simplemente la última propuesta.



Se sabe por experiencias experimentales que los mayores problemas de los algoritmos heurísticos suceden al inicio y al final del proceso y con pocos problemas en las fases intermedias. Al inicio, grandes circuitos disputan los mismos puntos de carga y generación y la adición de alguno de ellos inviabiliza los otros. Este problema se puede contornar generando varias topologías donde en cada paso se escogen las 2 mejores propuestas hasta generar 2^k propuestas, semejante a las estrategias de tipo Branch and Bound. Después de generar $2k$ topologías candidatas se termina el proceso usando para cada solución candidata el algoritmo básico escogiendo únicamente la mejor opción en cada caso. La figura 2 muestra la estrategia de generar un conjunto de topologías para $k = 3$.

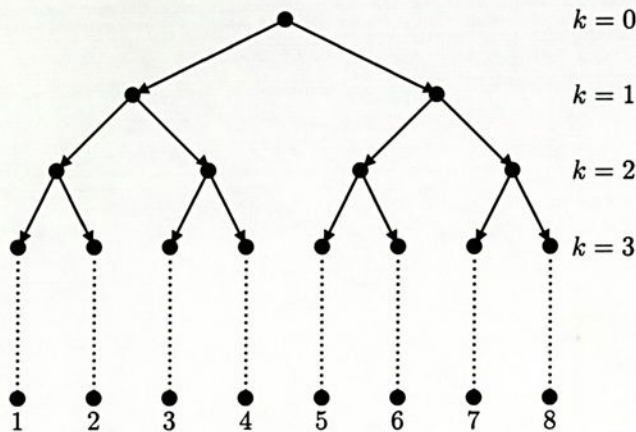


Figura 2: Estrategia para generar 8 topologías.

5. Resultados Experimentales

Para mostrar el desempeño de los 4 algoritmos analizados y del algoritmo propuesto son usados dos sistemas eléctricos bastante usados por los especialistas y cuyas soluciones óptimas son conocidas.

5.1 Sistema de 6 Barras de Garver

Los datos de este sistema de 6 barras, 15 circuitos candidatos y 760 MW de carga están en [1].

Una posibilidad de planificación, la más típica, es cuando no es permitido el redespacho de la generación. En este caso los algoritmos analizados encuentran las topologías mostradas en la Tabla 1 donde M1, M2, M3, M4 y M5 representan los algoritmos de Garver, mínimo esfuerzo, mínimo corte de carga, Villasana-Garver y el algoritmo heurístico integrado básico, respectivamente. Todos os algoritmos encuentran topologías óptimas con $v = 200$ y durante la fase I. Las adiciones realizadas son las siguientes: $n_{26} = 4$, $n_{35} = 1$ y $n_{46} = 2$ excepto el algoritmo de Garver que encuentra una topología ligeramente diferente. Sin embargo, la secuencia de adiciones son diferentes. Para el modelo de transportes este sistema tiene varias soluciones óptimas alternativas y el algoritmo de Garver también puede encontrar la topología encontrada por los otros algoritmos. Es evidente que el algoritmo de Garver encuentra topologías que solamente están obligados a cumplir con la primera ley de Kirchhoff.

Tabla 1: Sistema de 6 barras sin redespacho.

Iter.	Circuitos Adicionados				
	M1	M2	M3	M4	M5
1	4-6	2-6	4-6	4-6	4-6
2	2-6	4-6	2-6	4-6	4-6
3	2-6	2-6	2-6	2-6	2-6
4	2-6	4-6	2-6	2-6	2-6
5	4-6	3-5	3-5	2-6	2-6
6	4-6	2-6	2-6	3-5	3-5
7	3-5	2-6	4-6	2-6	2-6

Otra posibilidad de planificación es cuando es permitido el redespacho de la generación. La solución óptima en este caso es igual a $v = 110$ con las adiciones $n_{46} = 3$ y $n_{35} = 1$. En este caso los 4 algoritmos analizados encuentran topologías con inversiones mostradas en la Tabla 2. Ninguno de ellos encuentra la topología óptima. Los algoritmos encuentran topologías un poco diferentes mas con $v = 130$.

Tabla 2: Sistema de 6 barras con redespacho.

Inversión v		
Método	Fase I	Fase II
Garver	130	130
Villasana-Garver	130	130
Mínimo Esfuerzo	190	130
Mínimo Corte de Carga	130	130
AHI Básico	130	130
AHI Modificado	110	110

El algoritmo integrado básico tampoco encuentra la topología óptima realizando la siguiente secuencia de adiciones: 3-5, 2-9, 4-6, 4-6 y 2-3 con $v = 130$. Sin embargo, cuando se implementa la posibilidad de encontrar 4 ($k = 2$) topologías diferentes el algoritmo propuesto encuentra fácilmente la topología óptima.

5.2 Sistema Sur Brasileño de 46 Barras

Los datos de este sistema de 46 barras, 79 circuitos candidatos y 6880 MW de carga están en [6].

Cuando no es permitido el redespacho de la generación la solución óptima de este problema es de $v = 154420000$ \$ US con las siguientes adiciones: $n_{20-21} = 1$, $n_{46-06} = 1$, $n_{31-32} = 1$, $n_{26-29} = 3$, $n_{29-30} = 2$, $n_{42-43} = 2$, $n_{19-25} = 1$, $n_{28-30} = 1$ y $n_{24-25} = 2$.

En este caso los 4 algoritmos analizados encuentran topologías con inversiones mostradas en la Tabla 3. Ninguno de ellos encuentra la topología óptima. El algoritmo integrado básico encuentra una topología con $v = 173331000$ \$ US. Sin embargo, cuando se implementa la posibilidad de encontrar 8 ($k = 3$) topologías diferentes el algoritmo integrado encuentra una topología con $v = 164514000$ \$ US con las siguientes adiciones: $n_{20-21} = 1$, $n_{46-06} = 1$, $n_{40-41} = 1$, $n_{28-41} = 1$, $n_{42-43} = 1$, $n_{24-25} = 2$, $n_{05-06} = 2$, $n_{25-32} = 1$, $n_{31-32} = 1$ y $n_{28-31} = 1$.

Cuando es permitido el redespacho de la generación la solución óptima de este problema es de $v = 70289000$ \$ US con

Tabla 3: Sistema de 46 barras sin redespacho.

Inversión v en 10^3 \$ US		
Método	Fase I	Fase II
Garver	162278	154100
Villasana-Garver	319452	172889
Mínimo Esfuerzo	357273	186064
Mínimo Corte de Carga	219093	178905
AHI Básico	173331	173331
AHI Modificado	164514	164514

las siguientes adiciones: $n_{13-20} = 1$, $n_{46-06} = 1$, $n_{42-43} = 1$, $n_{20-23} = 1$, $n_{20-21} = 2$, y $n_{05-06} = 2$,

En este caso los 4 algoritmos analizados encuentran topologías con las inversiones mostradas en la Tabla 4. Ninguno de ellos encuentra la topología óptima. El algoritmo integrado y el de Villasana-Garver encuentra una topología con $v = 95795000$ \$ US y las siguientes adiciones: $n_{20-21} = 2$, $n_{42-43} = 1$, $n_{46-06} = 1$, $n_{05-06} = 2$, $n_{20-23} = 1$, y $n_{19-21} = 1$. En realidad, el algoritmo falla solamente en la última decisión al adicionar el circuito $n_{19-21} = 1$. También es necesario mencionar que todas las adiciones del algoritmo de Garver son óptimas mas lógicamente no puede identificar el circuito que falta porque las adiciones realizadas ya cumplen con el modelo de transportes. Finalmente, cuando se implementa la posibilidad de encontrar 8 ($k = 3$) topologías diferentes el algoritmo integrado encuentra la topología óptima del sistema además de otras topologías interesantes.

Tabla 4: Sistema de 46 barras con redespacho.

Inversión v en 10^3 \$ US		
Método	Fase I	Fase II
Garver	63163	63163
Villasana-Garver	95795	95795
Mínimo Esfuerzo	314083	143338
Mínimo Corte de Carga	177952	102318
AHI Básico	95795	95795
AHI Modificado	70289	70289

6. Conclusiones

El algoritmo heurístico integrado presenta un funcionamiento superior a cada uno de los otros algoritmos usados como base como se podía esperar. El algoritmo encuentra las topologías óptimas en 3 de 4 pruebas realizadas. Otra propiedad importante del algoritmo es que prácticamente no usa la fase II mostrando una secuencia de adiciones consistente.

Otra conclusión importante es que mismo los mejores algoritmos heurísticos no son muy confiables. Para algunos sistemas puede presentar excelente desempeño mas en otro puede presentar un desempeño de menor calidad. Actualmente se está mejorando el algoritmo propuesto para contornar otros problemas típicos de algoritmos heurísticos constructivos como problemas con buen desempeño en las fases finales del proceso y eventuales problemas de convergencia,

cuando ninguna de las propuestas de adición reduce el corte de carga del sistema.

Referencias

[1] L.L. Garver: "Transmission Network Estimation Using Linear Programming", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, pp. 1688-1697, September-October, 1970.

[2] A. Monticelli, A. Santos Jr., M.V.F. Pereira, S.H. Cunha, B.J. Parker, J.C.G. Praça: "Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion", IEEE Trans. Power App. Systems, Vol. PAS-101, No. 10, October, 1982.

[3] M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto: "Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, pp 381-389, February, 1985.

[4] R. Villasana, L.L. Garver, S.J. Salon: "Transmission Network Planning Using Linear Programming", IEEE Trans. Power App. Systems, Vol. PAS-104, No. 2, February 1985.

[5] V.A. Levi, M.S. Calovic: "A New Decomposition Based Method for Optimal Expansion Planning of Large Transmission Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp 937-943, October, 1991.

[6] Pereira M.V.F., Pinto L.M.V.G., Oliveira G.C., Cunha S.H.F.: "Composite Generation Transmission Expansion Planning"; EPRI Research Project 2473-9, EL-5179, 1987.

[7] R. Romero, A. Monticelli: "A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 373-380, February 1994.

[8] R.A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero: "Comparative Studies of Non-Convex Optimization Methods for Transmission Network Expansion Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998.

Agradecimientos

Esta investigación tiene el apoyo financiero de FAPESP a través del proyecto 97/02741-3 y de CNPq.

Biografía de Autores

RUBEN ROMERO

Bachiller e Ingeniero Electricista, UNI, Lima-Perú en 1978 y 1984, Magister y Doctor en Ingeniería Eléctrica, UNICAMP, Campinas-Brasil en 1990 y 1993. Profesor del DEE-FEIS-UNESP, Ilha Solteira - Brasil.

CARLOS ROCHA

Ingeniero Electricista, FEIS-UNESP, en 1996 y actualmente cursando Magister en la misma Institución.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15385-000 - ILHA SOLTEIRA - SP**

