

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

*Este exemplar corresponde
à redação final da tese
de fundida por Manuel Moreira
Baptista e aprovada pela comissão
julgarde em 18/ Junho / 1984
Campinas, 19/ Junho / 84*

AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO
DE ADIÇÕES NO PLANEJAMENTO A LONGO
PRAZO DE REDES DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

MANUEL MOREIRA BAPTISTA

61/84

Orientador: ARIIVALDO VERANDIO GARCIA

Tese de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia da Uni
versidade Estadual de Campinas

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL**

MAIO DE 1984

AGRADECIMENTOS

A todos os mestres que contribuíram para minha formação profissional, aos colegas com quem estudei no mestrado e em especial

a Alcir Monticelli pelo convite e incentivo de fazer pós-graduação e pela orientação

a Ariovaldo V. Garcia pela competente orientação

a Sílvia Janzon pelo trabalho de datilografia.

À Lourdinha

Este trabalho contou com o apoio financeiro da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados e avaliados quatro Critérios de Ordenação de Adições (Mínimo Esforço Exato, Mínimo Esforço Aproximado, de Sobrecarga e de Sensibilidade). Esses Critérios são utilizados no Planejamento de Redes de Transmissão de Energia Elétrica (a longo prazo) em programas computacionais que realizam a expansão da rede para um dado ano futuro. Sua função básica é construir listas ordenadas (das possíveis adições) utilizadas para determinar o conjunto de circuitos a serem adicionados a cada passo da expansão. Estes Critérios foram testados em dois sistemas brasileiros (Sistemas da Região SUL e NORTE-NORDESTE do Brasil) utilizando-se um Programa Computacional que realiza a Síntese Conceitual Estática da Rede.

CONTEÚDO

CAPÍTULO I

Introdução..... 1

CAPÍTULO II

UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE DESEMPENHO NO PLANEJAMENTO DA
EXPANSÃO DE REDES DE TRANSMISSÃO

2.1. Introdução..... 3
2.2. Síntese Conceitual Estática..... 6
2.3. Discussão Sobre Critérios de Ordenação..... 7

CAPÍTULO III

CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO DE ADIÇÕES

3.1. Propriedade do Mínimo Esforço..... 11
3.2. Critério Exato de Mínimo Esforço..... 16
3.3. Critério Aproximado de Mínimo Esforço..... 20
3.4. Índice de Sobrecarga..... 21
3.5. Critério de Sobrecarga..... 22
3.6. Critério de Ordenação Proposto (Sensibilidade)..... 26
3.6.1. Detalhes de Implementação do Critério Proposto.... 30

CAPÍTULO IV

RESULTADOS OBTIDOS COM OS CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO

4.1. Introdução..... 33
4.2. Condições dos Testes dos Critérios de Ordenação..... 33
4.3. Síntese Conceitual para o Sistema da Referência |16| 36
4.4. Descrição dos Sistemas da Região SUL e NORTE-NOR
DESTE do Brasil..... 49

4.5. Resultados Obtidos para os Sistemas das Regiões SUL e NORTE-NORDESTE do Brasil.....	52
--	----

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

5.1. Critério Exato de Mínimo Esforço.....	71
5.2. Critério Aproximado de Mínimo Esforço.....	74
5.3. Critério de Sobrecarga.....	75
5.4. Critério de Sensibilidade (Proposto).....	76
5.5. Comentários Finais.....	77

APÊNDICE A

FLUXO DE CARGA (POTÊNCIA) LINEARIZADO

A.1. Equações do Modelo Completo.....	81
A.2. Equações do Fluxo de Carga Linearizado.....	84

APÊNDICE B

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	87
-------------------------------	----

APÊNDICE C

FLUXO DE CARGA (POTÊNCIA) LINEARIZADO COM REDE FICTÍCIA.	90
--	----

REFERÊNCIAS.....	97
------------------	----

GLOSSÁRIO DE ALGUNS TERMOS

CIRCUITO - linha de transmissão ou transformador

CAMINHO - conjunto de circuitos interligando dois nós da rede ou interligando um nó da rede a um nó com carga/geração desconectado da rede

ESTÁGIO - síntese da rede para um ano de planejamento (horizonte) a partir de um ano inicial

CATEGORIA DE CIRCUITO - exemplo de categorias de circuitos :
numa rede com níveis de tensão 500 kV e 230 kV tem-se as seguintes categorias de circuitos

(i) linhas de 500 kV

(ii) linhas de 230 kV

(iii) transformadores de 500-230 kV

FASE - refere-se à Fase de Adição de circuitos e à Fase de Retirada de circuitos

ETAPA - Consiste na elaboração da lista ordenada, construção de caminhos e adição do melhor caminho

ADIÇÃO - circuito planejável ou acréscimo de um novo circuito (ou de um caminho) à rede existente

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O planejamento a longo prazo da expansão de redes de transmissão de energia elétrica tem por objetivo a determinação de equipamentos (e suas localizações) necessários para que a rede de transmissão satisfaça padrões de operação desejados, e a um custo mínimo. Normalmente os planos de longo prazo são utilizados de forma indicativa para o planejamento a médio e a curto prazo.

Como afirmado em trabalhos anteriores | 1,2,3 | é impossível (na maioria das vezes) a utilização do modelo completo (não linear) dos sistemas de energia elétrica, quando se está no início do planejamento a longo prazo, onde se trabalha com a rede elétrica em sua configuração de um ano inicial (rede existente), e com injeções líquidas (geração menos demanda) de potência ativa previstas para um ano futuro (horizonte). Por esta razão, o modelo de fluxo de carga (potência) utilizado é o linearizado (também conhecido como Fluxo de Carga DC) | 1,4 | que, mesmo nos casos onde o modelo exato diverge não fornecendo solução alguma, sempre apresenta uma solução, que contém informação sobre onde há problemas (sobrecarga em linhas/transformadores, barras com carga/geração desconectadas).

Neste trabalho, quando é utilizado o termo "Planejamento da Expansão de Transmissão" está-se referindo à fase inicial do planejamento propriamente dito, ou seja, procura-se obter os planos de expansão a longo prazo do sistema de transmissão partindo-se da rede de um ano inicial, e com as injeções futuras. Este procedimento é denominado "Síntese Conceitual de Redes de Transmissão" [5,6,7] e tem por objetivo determinar que adições (linhas/transformadores) devem ser efetuadas na rede inicial para que, com as injeções futuras, não existam sobrecargas ou barras com carga/geração desconectadas da rede e, ainda, a um baixo custo.

No Capítulo II mostra-se a necessidade da utilização de Índices de Desempenho e/ou Critérios de Ordenação na Síntese Conceitual de Redes de Transmissão de Energia Elétrica.

No Capítulo III são apresentados quatro Critérios de Ordenação de Adições: Critério Exato de Mínimo Esforço, Critério Aproximado de Mínimo Esforço, Critério de Sobrecarga e um Critério que é proposto neste trabalho chamado de Critério de Sensibilidade.

No Capítulo IV são apresentados os resultados obtidos com dois sistemas de energia elétrica brasileiros.

No Capítulo V comentam-se os resultados obtidos e é feita uma avaliação dos quatro Critérios.

CAPÍTULO II

UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE DESEMPENHO NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE REDES DE TRANSMISSÃO

2.1. Introdução

Para facilitar a apresentação do problema de planejamento da expansão que é tratado neste trabalho, é mostrada na Figura 2.1 uma rede de 3 barras e 2 linhas sendo que uma linha apresenta sobrecarga (indicada por um asterisco). Esta é uma situação típica de uma rede com configuração (rede elétrica) de um ano inicial mas com injeções previstas para um ano futuro. Em pontilhado estão as possibilidades de adição, ou seja, estão indicados os locais onde podem ser adicionadas novas linhas (ou transformadores). O problema do planejamento, neste caso, se resume em eliminar as sobrecargas existentes (e conectar à rede as barras com cargas/gerações não-nulas, caso existam) através da adição de novos componentes com um custo baixo. As adições possíveis são consideradas linhas fictícias, com reatância bem maior que a existente, e como detalhado no Apêndice C.

A solução ótima para este problema pode ser obtida através de um estudo exaustivo de todas as alternativas. Neste caso têm-se 7 alternativas:

1. adição de 1-2
2. adição de 1-3
3. adição de 2-3

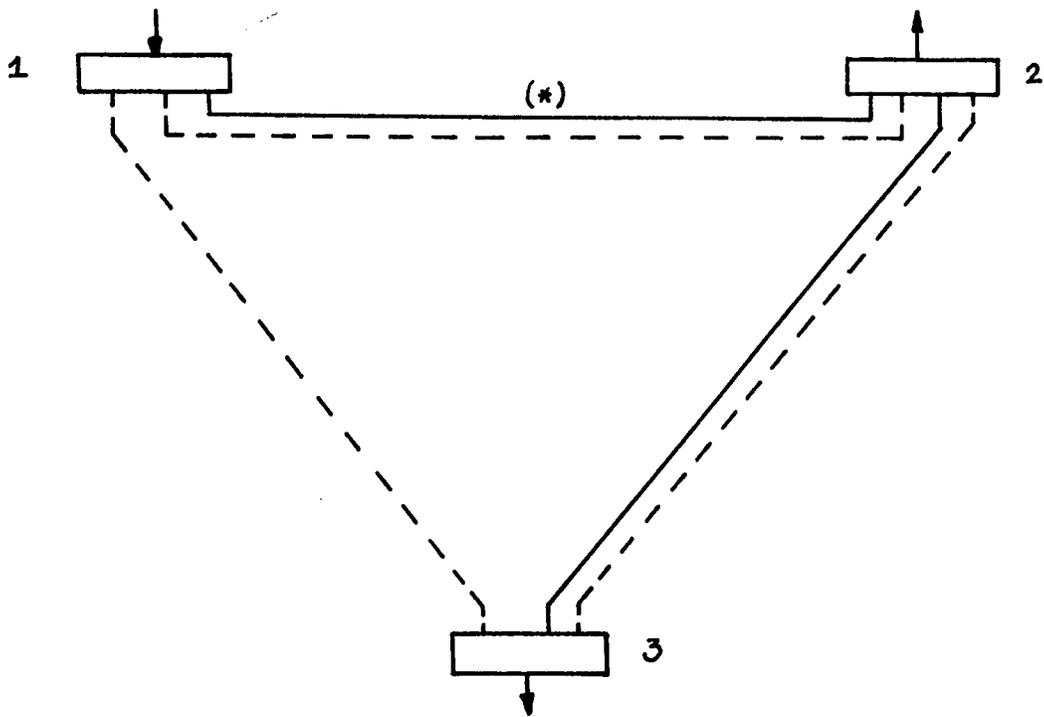


Figura 2.1 Rede de 3 barras

(*) - linha com sobrecarga

--- - circuitos possíveis de serem adicionados

4. adição de 1-2, 1-3
5. adição de 1-2, 2-3
6. adição de 1-3, 2-3
7. adição de 1-2, 1-3, 2-3

ou seja, tem-se $2^N - 1$ possibilidades de adição, com $N=3$. Evidentemente nem todas as alternativas representam soluções factíveis (eliminação de sobrecarga e conexão de barras desconectadas com carga/geração à rede) e, daquelas que são solução, pode-se escolher a de menor custo (soma dos custos de cada circuito).

A verificação se um conjunto é ou não solução possível (factível) envolve a simulação da adição do conjunto de linhas à rede o que, para sistemas reais (de grande porte) tem um custo computacional elevado. O maior problema com este tipo de enfoque é, contudo, o excessivo número de alternativas quando se trabalha com sistemas maiores. Por exemplo, para $N \approx 60$ tem-se $2^{60} - 1 \approx 1,2 \cdot 10^{18}$ possibilidades o que torna inviável qualquer tentativa de se trabalhar com métodos baseados na busca exaustiva da solução ótima. Dada a impossibilidade de serem geradas todas as alternativas possíveis para se resolver o problema de planejamento da expansão, normalmente são usados critérios para que sejam selecionados alguns desses conjuntos de adições, evitando o estudo de casos sem interesse. Dentre estes critérios estão os Índices de Desempenho através dos quais procura-se determinar que adições estão mais relacionadas com a eliminação das sobrecargas existentes, ou seja ,

constroem-se listas ordenadas dos circuitos mais atraentes possíveis de serem adicionados e, basicamente, são escolhidos os melhores colocados para serem simulados para posterior decisão sobre o plano de expansão.

2.2. Síntese Conceitual Estática |6,7|

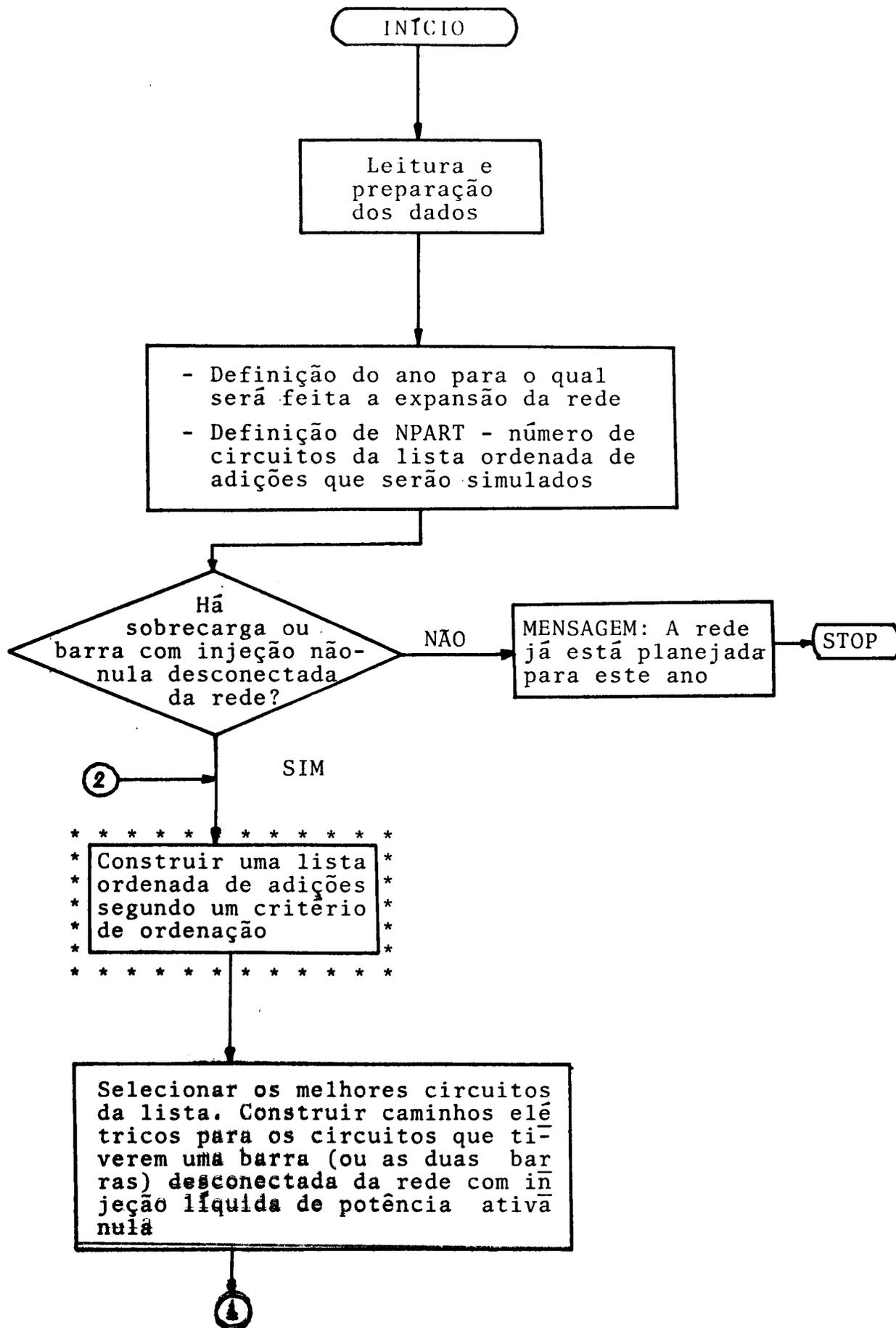
Descartando a possibilidade de se buscar a solução ótima para o problema exposto no item anterior, um procedimento que tem dado excelentes resultados é a Síntese Conceitual Estática|6, 7| que, basicamente, trata o problema em um estágio, que consiste em se avaliar o desempenho da rede e efetuar as adições (linhas e transformadores) mais atraentes segundo um critério custo/benefício | 7 |. Nesta abordagem do problema, a rede é construída (reforçada) em etapas sendo que o planejador pode interferir no processo de maneira interativa, levando em consideração outras informações além das que o programa trabalha. Em cada etapa há a necessidade de se construir a lista ordenada dos circuitos mais atraentes referida no item anterior. É clara, portanto, a dependência de um programa de planejamento, com este enfoque, em relação aos critérios de desempenho, principalmente no caso de uma síntese automática (sem interferência do planejador), em que são simuladas adições de um certo número de circuitos da lista e a decisão fica restrita a este subconjunto do conjunto de circuitos.

No diagrama de blocos apresentado na Figura 2.2 mostra-se, de maneira bem simplificada, a estrutura do programa computacional usado neste trabalho para resolver o problema do planejamento da expansão. Este programa foi utilizado para se fazer a avaliação dos índices de desempenho e de um critério de ordenação de adições (proposto neste trabalho) cujos resultados são apresentados no Capítulo IV. O bloco envolvido por asteriscos na Figura 2.2 é o alvo principal das atenções neste trabalho. Esta estrutura foi, em parte, baseada na do Sistema SINTRA | 8 | , no que se refere à filosofia de adição de circuitos.

2.3. Discussão Sobre Critérios de Ordenação

Neste trabalho são apresentados três tipos de índices de desempenho (através dos quais faz-se a ordenação das adições mais atraentes): um de Mínimo Esforço (aproximado), um de Mínimo Esforço Exato e outro de Sobrecarga. Também é proposto um Critério de Ordenação das adições mais atraentes.

Os índices de Mínimo Esforço (aproximado e exato) baseiam-se no fato de que, no modelo linearizado, os fluxos de potência em uma rede de transmissão distribuem-se segundo um critério de minimização | 9,10 | , pelo qual os fluxos sempre procuram os caminhos com as menores distâncias elétricas. Quando estes índices são utilizados , as adições podem ser ordenadas segundo o



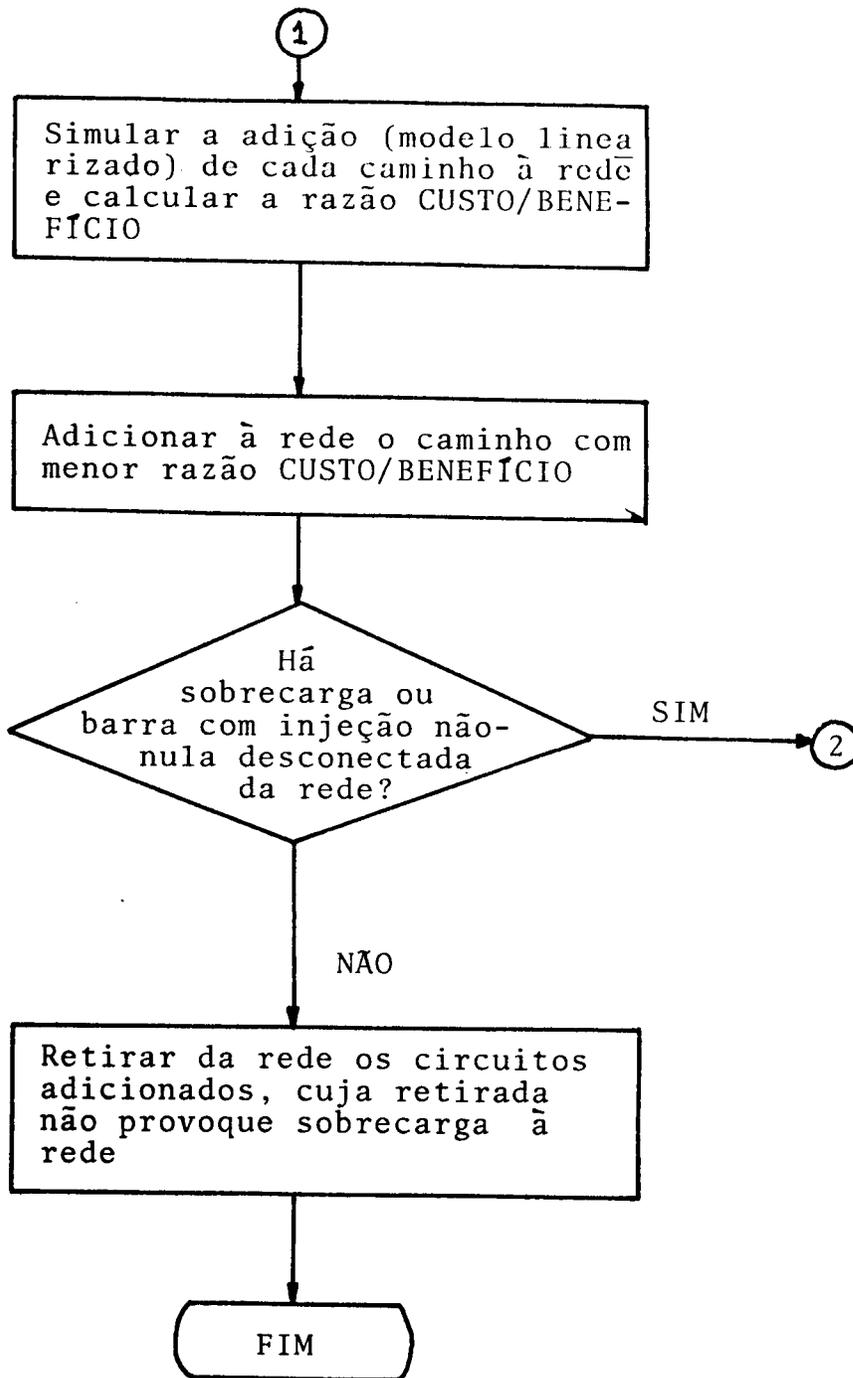


Figura 2.2 Diagrama de blocos simplificado do programa de planejamento utilizado neste trabalho.

seu efeito sobre o Índice, isto é, segundo o grau de modificação introduzida na distribuição ótima (natural) dos fluxos na rede.

O Índice de Sobrecarga baseia-se na soma ponderada das sobrecargas relativas (fluxo/fluxo máximo) elevada a um expoente par, para todas as linhas e transformadores da rede. Também neste caso as adições são ordenadas de acordo com o efeito de cada modificação sobre o Índice de desempenho. O fluxo máximo num circuito é um dado do qual já se dispõe e corresponde à máxima potência ativa que o circuito suporta. Ao fluxo máximo de um circuito i é associada uma abertura angular máxima (ψ_i^{max}) que é largamente utilizada no capítulo III.

O Critério de Ordenação das adições mais atraentes apresentado neste trabalho baseia-se na análise de sensibilidade entre a variação da abertura angular de um circuito k , devido à adição de um circuito i , com susceptância δ_i ; (δ_i é o inverso da reatância série do circuito i). Neste caso as adições são ordenadas segundo a modificação introduzida nos fluxos das linhas/transformadores sobrecarregados, ou seja, os circuitos mais atraentes são aqueles que, se adicionados, diminuem mais as sobrecargas das linhas/transformadores sobrecarregados.

CAPÍTULO III

CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO DE ADIÇÕES

Neste capítulo são apresentados alguns dos critérios utilizados na ordenação de adições tais como: Critério Aproximado do Mínimo Esforço, Critério Exato do Mínimo Esforço, Critério de Sobrecarga, além do Critério de Ordenação (baseado em uma Análise de Sensibilidade) mencionado no Capítulo II.

3.1. Propriedade do Mínimo Esforço |11|

Para o circuito resistivo da Figura 3.1, aplicando-se as leis de Kirchoff, obtêm-se as correntes:

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I \quad (3.1)$$

Estes são os valores de corrente para os quais a potência dissipada é a menor possível. Isto pode ser verificado resolvendo-se o problema |9| :

$$\begin{aligned} \text{Minimizar : } Z &= \frac{1}{2} (R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \\ \text{Sujeito a : } I &= I_1 + I_2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

A tendência natural das correntes, portanto, é procurar os caminhos de menor resistência elétrica. Esta propriedade é chamada de lei do Mínimo Esforço.

A solução ótima (Z^*) para este problema é obtida fazendo-se a substituição da equação (3.1) em (3.2) :

$$Z^* = \frac{1}{2} R_1 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} I \right)^2 + \frac{1}{2} R_2 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} I \right)^2 \quad (3.3)$$

Desenvolvendo esta equação chega-se a :

$$Z^* = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} I^2 \quad (3.4)$$

A equação (3.4) representa a potência ativa dissipada no modelo resistivo de corrente contínua.

Como é mostrado no Apêndice A, a rede elétrica em termos de Fluxo de Carga Linearizado (DC) possui um modelo equivalente ao circuito resistivo de corrente contínua. A capacidade \mathcal{V}_j de um circuito, a injeção nodal de potência ativa P_k e o fluxo de potência \mathcal{T}_j num ramo do modelo linearizado, são interpretados no circuito resistivo de corrente contínua, como condutância, injeção de corrente e fluxo de corrente, respectivamente.

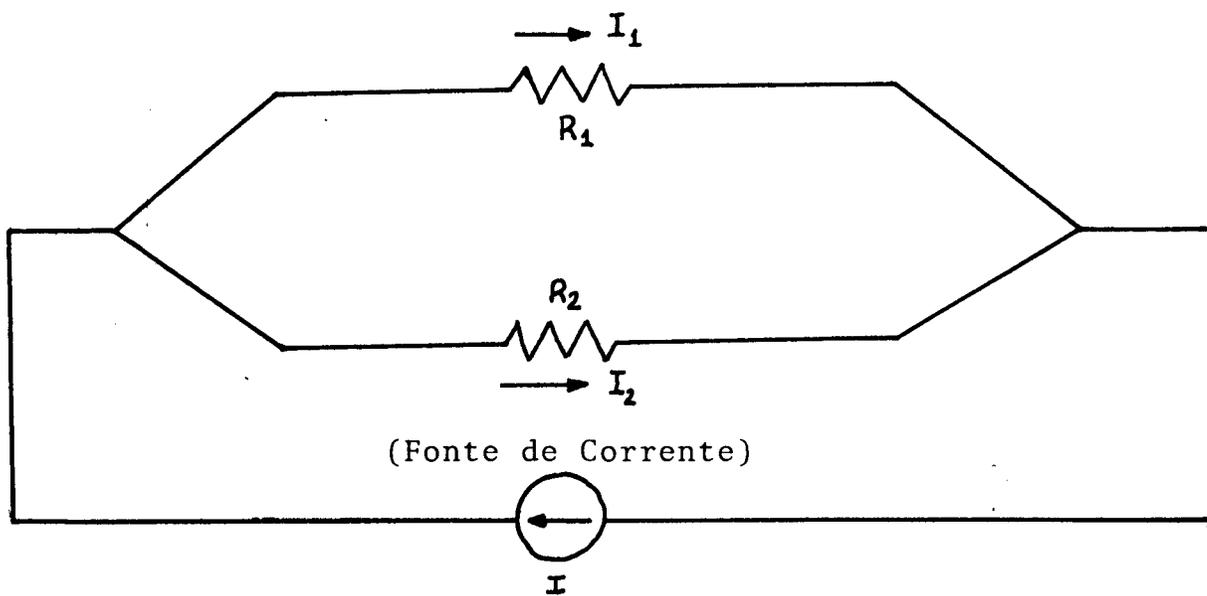


Figura 3.1 Circuito Resistivo de Corrente Contínua

Pode-se associar ao modelo linearizado (DC) uma potência dissipada (que na realidade não tem o significado físico de perdas como no circuito resistivo de corrente contínua) definida por:

$$P_d = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M \gamma_j^{-1} T_j^2 = \frac{1}{2} \underline{T}^t \gamma^{-1} \underline{T} \quad (3.5)$$

onde \underline{T} é o vetor dos fluxos de potência (orientados) e γ a matriz primitiva das capacidades de transmissão da rede. Esta expressão não representa a potência dissipada numa rede de transmissão e só faz sentido se for usada como analogia ao modelo resistivo de corrente contínua.

A lei do Mínimo Esforço verificada para o modelo resistivo de corrente contínua, é também verificada para o modelo linearizado, isto é, para uma rede de transmissão (onde todas as linhas são do mesmo tipo) os fluxos de potência ativa se distribuem de forma a procurar os caminhos mais curtos para levar a potência gerada até as cargas (esta lei pode ser generalizada para sistemas com vários níveis de tensão, bastando substituir os comprimentos das ligações pelas respectivas reatâncias em p.u.) , ou seja, os fluxos de potência distribuem-se de tal forma a minimizar a potência dissipada associada ao modelo linearizado (DC) [11]. Isto pode ser expresso pela equação:

$$\text{Minimizar : } Z = \frac{1}{2} \underline{T}^t \gamma^{-1} \underline{T}$$

$$\text{Sujeito a : } \underline{C}^t \underline{T} = \underline{P} \quad (3.6)$$

onde \underline{P} é o vetor de injeções de potência nodais e C é a matriz incidência nó-ramo.

$$C_{jk} = \begin{cases} +1, & \text{se } K \text{ for o extremo inicial do circuito } k \\ -1, & \text{se } k \text{ for o extremo final do circuito } j \\ 0, & \text{nos outros casos} \end{cases}$$

Pode-se mostrar que a solução ótima do problema formulado na equação (3.6) é a mesma obtida a partir do fluxo de carga linearizado |10|, ou seja, os valores ótimos de \underline{T} são aqueles que obedecem à equação |12| (ver Apêndice A):

$$T_j^* = \gamma_j \psi_j^* \quad (3.7)$$

onde T_j^* é o fluxo de potência ativa no circuito j com nós terminais $(k-l)$, γ_j é a susceptância e ψ_j^* ($= \theta_k^* - \theta_l^*$) é a abertura angular do circuito j .

A propriedade do Mínimo Esforço apresentada neste item pode ser usada para definir um Índice de Desempenho dado

por:

$$I_D = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M \gamma_j^{-1} T_j^2 \quad (3.8)$$

ou seja, é a própria "potência dissipada" associada ao modelo linearizado da equação (3.5). O valor ótimo deste Índice é obtido considerando-se (3.7):

$$I_D^* = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M \gamma_j^{-1} T_j^{*2} \quad (3.9)$$

Este Índice de Desempenho é usado a seguir, na construção de dois Critérios de Ordenação de adições.

3.2. Critério Exato de Mínimo Esforço

O índice expresso por (3.8) é utilizado para determinar quais são as adições mais atraentes. Isto é feito obtendo-se a variação ΔID_i (diferença entre o valor de ID depois da adição e ID antes da adição que está sendo simulada) devido ao acréscimo de um circuito com $\Delta \gamma_i^*$. Os circuitos mais atraentes de serem adicionados são aqueles que provocam maior variação ΔID_i . Para se calcular ΔID_i a partir da equação (3.8) é necessário, portanto, serem conhecidos os fluxos de potência ativa (T_j) na rede antes e depois da adição. Isto não é desejável porque envolveria a simulação da adição de cada circuito planejável. Deseja-se que ΔID_i seja calculado a partir

do caso base. A seguir mostra-se como isto pode ser obtido.

Supondo que se queira calcular ΔID_i para a adição de um circuito com capacidade $\Delta \gamma_i$, entre as barras $K-l$ (ramo i) de uma rede (Figura 3.2a), pode-se equivalenciar a rede entre as barras $K-l$ (ramo i) [11] como é mostrado na Figura 3.2b, e calcular o Índice de Desempenho expresso por (3.8) para o caso base:

$$ID_o = \frac{1}{2} (\gamma_i^{eq})^{-1} \cdot T_{eq}^2 \quad (3.10)$$

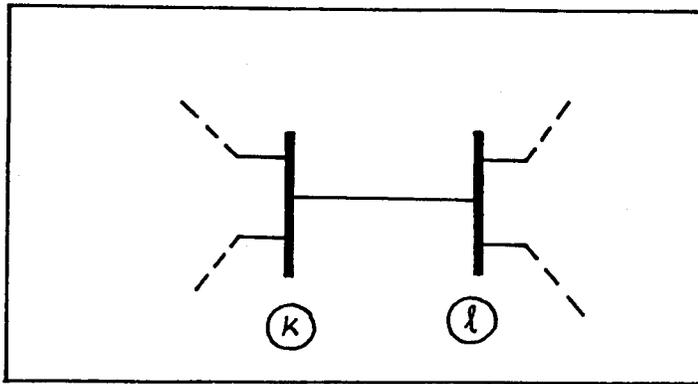
Por analogia com o modelo resistivo de corrente contínua pode-se calcular o valor (ótimo) do Índice de Desempenho expresso por (3.8) para a situação mostrada na Figura 3.2c (ver equação 3.4):

$$ID_1 = \frac{1}{2} (\gamma_i^{eq} + \Delta \gamma_i)^{-1} \cdot T_{eq}^2 \quad (3.11)$$

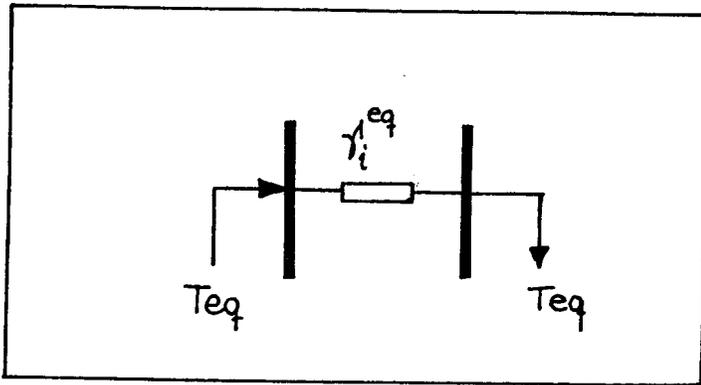
Fazendo-se a diferença entre ID_1 e ID_o obtém-se ΔID_i , ou seja:

$$\begin{aligned} \Delta ID_i &= ID_1 - ID_o \\ \Delta ID_i &= \frac{1}{2} (\gamma_i^{eq} + \Delta \gamma_i)^{-1} \cdot T_{eq}^2 - \frac{1}{2} (\gamma_i^{eq})^{-1} \cdot T_{eq}^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

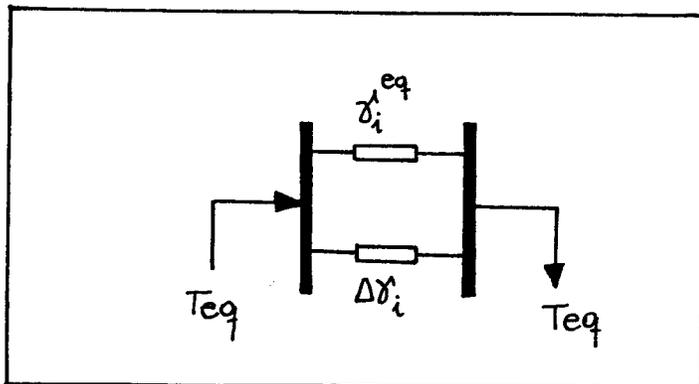
Desenvolvendo esta equação vem:



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2. (a) Rede do caso base
(b) Rede equivalente do caso base
(c) Rede equivalente do caso base, mais o circuito adicionado ($\Delta\gamma_i$)

$$\Delta ID_i = - \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \gamma'_i}{(\gamma'_i{}^{eq} + \Delta \gamma'_i) \gamma'_i{}^{eq}} \right] T_{eq}^2 \quad (3.13)$$

A equação (3.7) neste caso fornece:

$$T_{eq} = \gamma'_i{}^{eq} \psi_i \quad (3.14)$$

onde ψ_i é a abertura angular do ramo i ($k-l$) do caso base.

Substituindo (3.14) em (3.13) tem-se:

$$\Delta ID_i = - \frac{1}{2} \psi_i^2 \Delta \gamma'_i \left(\frac{\gamma'_i{}^{eq}}{\Delta \gamma'_i + \gamma'_i{}^{eq}} \right) \quad (3.15)$$

Como se observa na equação (3.15), os cálculos de ΔID_i dependem apenas do caso base. O cálculo de $\gamma'_i{}^{eq}$ é feito a partir da inversa da matriz Capacidade ($Z=B^{-1}$) da rede, ou seja:

$$\gamma'_i{}^{eq} = (\gamma_i{}^{eq})^{-1} \quad (3.16)$$

sendo,

$$\gamma_i{}^{eq} = Z_{kk} + Z_{ll} - 2 \cdot Z_{kl} \quad (3.17)$$

onde $\gamma_i{}^{eq}$ é a impedância equivalente entre os nós k e l (extremos do ramo i) e Z_{kk} , Z_{ll} e Z_{kl} são, respectivamente, os elementos (k,k) , (l,l) e (k,l) da matriz inversa da matriz capacidade de transmissão da rede.

Convém ressaltar que nem sempre se dispõe diretamente dos elementos da matriz Z e, portanto, para se calcular $\gamma_i{}^{eq}$ é

necessária a obtenção de duas colunas da matriz Z, o que requer considerável esforço computacional.

Para a equação (3.15) define-se o coeficiente α expresso por:

$$\alpha = \frac{\gamma_i^{eq}}{\Delta\gamma_i + \gamma_i^{eq}} \quad (3.18)$$

3.3. Critério Aproximado de Mínimo Esforço

Cronologicamente o Critério Aproximado do Mínimo Esforço foi desenvolvido antes do Critério Exato [10]. Isto foi feito determinando-se a sensibilidade aproximada do Índice ID* em relação a γ_i na equação (3.9). Para a adição de um circuito ($\Delta\gamma_i$) num ramo i, a variação ΔID_i^* é dada por [12]:

$$\Delta ID_i^* = \frac{\partial ID^*}{\partial \gamma_i} \Delta \gamma_i \quad (3.19)$$

onde a componente i do vetor gradiente $\partial ID^* / \partial \gamma_i$ é dada, aproximadamente [10] por:

$$\frac{\partial ID^*}{\partial \gamma_i} = - \frac{1}{2} \psi_i^2 \quad (3.20)$$

Substituindo-se (3.20) em (3.19) obtêm-se a forma mais conhecida do Critério Aproximado do Mínimo Esforço:

$$\Delta ID_i^* = - \frac{1}{2} (\psi_i^*)^2 \Delta \delta_i \quad (3.21)$$

A equação (3.21) também pode ser obtida a partir da equação (3.15). Para os casos em que γ_i^{eq} é muito maior que $\Delta \delta_i$ o coeficiente α da equação (3.18) pode ser aproximado para $\alpha = 1$ e a equação (3.15) passa a ser a própria equação (3.21). Este é o caso em que a rede equivalente entre dois nós é muito mais forte eletricamente que a adição (ver Figura 3.2c). Estudos recentes [13, 14], no entanto, mostraram que existem casos em que esta aproximação não é válida e, portanto, casos em que o cálculo do vetor gradiente de acordo com a equação (3.19) também não é válido. Apesar da aproximação não ser válida, em algumas situações [13, 14] na Síntese Conceitual, por exemplo na construção de caminhos elétricos interligando nós desconectados da rede, verificou-se que o Critério Aproximado produz melhores resultados que o Critério Exato. A razão disso é abordada no Capítulo V onde são comentados os resultados obtidos e é feita uma avaliação sobre o desempenho de cada critério de ordenação de adições.

3.4. Índice de Sobrecarga [15, 17]

O Índice de Sobrecarga adotado neste trabalho penaliza os circuitos sobrecarregados, ou seja, são calculados os carregamentos relativos (fluxo/fluxo máximo permitido) em todos os transformadores e linhas da rede, e aqueles que apresentarem sobrecarga influirão de maneira mais acentuada

no cálculo do Índice. As adições são ordenadas de acordo com o seu efeito sobre o Índice |11|.

O Índice de Sobrecarga é definido do seguinte modo |15|:

$$I_s = \sum_{j=1}^{NL} \frac{w_j}{2n} \left[\frac{T_j}{T_j^{max}} \right]^{2n} \quad (3.22)$$

onde

- T_j - fluxo de potência ativa no circuito j ;
- T_j^{max} - fluxo máximo permitido;
- w_j - coeficiente de ponderação (arbitrário);
- NL - número de circuitos do sistema;
- n - número inteiro (normalmente $n=1$).

3.5. Critério de Sobrecarga

Considerando $w_j=1$ e $n=1$ a equação (3.22) pode ser reescrita como:

$$I_s = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{NL} \left[\frac{T_j}{T_j^{max}} \right]^2 \quad (3.23)$$

Para se calcular a variação ΔI_s , a partir da equação (3.23), é necessário que sejam conhecidos os fluxos de potência antes e depois da adição simulada e, do mesmo modo como foi afirmado para o Critério Exato de Mínimo Esforço, isto não é desejável pois envolveria a simulação da adição

de cada circuito. Deseja-se aqui também, que o Critério de Sobrecarga seja calculado a partir do caso base. A seguir mostra-se como isto é obtido.

Considerando que

e

$$T_j = \gamma_j \psi_j$$
$$T_j^{\max} = \gamma_j^{\max} \psi_j^{\max} \triangleq K_j \gamma_j^{\max}, \quad (3.24)$$

e substituindo-se (3.24) em (3.23) vem:

$$I_s = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{NL} \frac{\psi_j^2}{K_j^2} \quad (3.25)$$

ou seja:

$$I_s = \sum_{j=1}^{NL} h_j(\psi_j) \quad (3.26)$$

onde

$$h_j(\psi_j) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\psi_j^2}{K_j^2} \quad (3.27)$$

A variação ΔI_{S_i} provocada pela adição de um circuito ($\Delta \gamma_i$) no ramo i pode ser obtida através da expressão:

$$\Delta I_{S_i} = \frac{\partial I_s}{\partial \gamma_i} \cdot \Delta \gamma_i \quad (3.28)$$

A sensibilidade de I_s em relação a $\Delta \gamma_i$ é derivada da

equação (3.26)

$$\frac{\partial I_s}{\partial \gamma_i} = \sum_{j=1}^{NL} \frac{\partial h_j}{\partial \psi_j} \cdot \frac{\partial \psi_j}{\partial \gamma_i} \quad (3.29)$$

A sensibilidade $\partial \psi_j / \partial \gamma_i$ está deduzida no Apêndice B e sua forma é:

$$\frac{\partial \psi_j}{\partial \gamma_i} = -\underline{e}_i^t Z \underline{e}_j \psi_i \quad (3.30)$$

onde

$$\underline{e}_j = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ +1 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1_j \\ \\ m_j \end{matrix} \quad \begin{matrix} 1_j, m_j \text{ são respectivamente os nós} \\ \text{inicial e final do circuito } j; \end{matrix}$$

\underline{e}_i^t é o vetor transposto de \underline{e}_i , cuja construção é análoga a \underline{e}_j ;

Z é a matriz inversa da matriz capacidade de transmissão ($Z=B^{-1}$).

Substituindo-se (3.30) em (3.29) tem-se:

$$\frac{\partial I_s}{\partial \gamma_i} = -\underline{e}_i^t Z \sum_{j=1}^{NL} \frac{\partial h_j}{\partial \psi_j} \underline{e}_j \psi_i \quad (3.31)$$

Define-se um vetor auxiliar $\underline{\hat{p}}$ como mostrado na equação (3.32)

$$\underline{\hat{p}} \triangleq \sum_{j=1}^{NL} \frac{\partial h_j}{\partial \psi_j} \underline{e}_j \quad (3.32)$$

As componentes do vetor $\underline{\hat{p}}$ podem ser interpretadas como injeções de uma rede adjunta [15,17] que tem a mesma configuração da rede real e as injeções dadas por (3.32). Pode-se verificar que essas injeções são obtidas por:

$$\hat{p}_{m_j} = \sum_{l_j \in \Omega_{m_j}} \frac{(\theta_{m_j} - \theta_{l_j})}{K_j^2} \quad (3.33)$$

onde Ω_{m_j} é o conjunto de nós vizinhos a m_j , e θ_{m_j} e θ_{l_j} se referem ao caso base.

Reescrevendo a equação (3.31), vem:

$$\frac{\partial IS}{\partial \delta_i} = - \underline{e}_i^t \underline{z} \underline{\hat{p}} \psi_i \quad (3.34)$$

Considerando-se que a rede adjunta tem a mesma configuração da rede real, pode-se escrever a equação do fluxo de carga linearizado (Apêndice A) para essa rede:

$$\underline{z} \underline{\hat{p}} = \underline{\hat{\theta}} \quad (3.35)$$

onde $\underline{\hat{\theta}}$ é o vetor de ângulos nodais da rede adjunta.

A abertura angular dos circuitos da rede adjunta é dada por:

$$\hat{\psi}_i = e_i^t \hat{\theta} \quad (3.36)$$

Substituindo (3.35) e (3.36) em (3.34) chega-se a:

$$\frac{\partial IS}{\partial \delta_i} = - \psi_i \hat{\psi}_i \quad (3.37)$$

Substituindo (3.37) em (3.28) obtêm-se o Critério de Ordenação de Adições baseado no Índice de Sobrecarga (nesse trabalho chamado de Critério de Sobrecarga) que é expresso pela equação que segue:

$$\Delta IS_i = - \psi_i \hat{\psi}_i \Delta \delta_i \quad (3.38)$$

A equação (3.38) é utilizada para ordenar as adições, sendo as mais atraentes aquelas cuja adição provocar maior variação ΔIS_i .

3.6. Critério de Ordenação Proposto (Sensibilidade)

O critério de ordenação de adições proposto baseia-se na sensibilidade da abertura angular de um circuito k sobrecarregado devido à adição de um circuito i ($\partial \psi_k / \partial \delta_i$). As adições mais atraentes, segundo este critério são aquelas que têm, potencialmente, maior capacidade para reduzir a so

brecarga (ou a abertura angular) dos circuitos sobrecarregados. Este critério será mostrado a seguir.

Do modelo linearizado tem-se que a abertura angular de um circuito é função apenas das susceptâncias dos circuitos da rede, isto porque o vetor de injeções é constante para um determinado ano de planejamento, ou seja, na expansão da rede, são feitas alterações apenas na capacidade de transmissão da rede. Isto pode ser também expresso pela função:

$$\psi_k = \psi_k (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{NL})$$

onde NL é o número de circuitos da rede.

A sensibilidade da abertura ψ_k em relação a um circuito i está deduzida no Apêndice B e é reescrita na equação que segue:

$$\frac{\partial \psi_k}{\partial \gamma_i} \triangleq - e_k^t z e_i \psi_i \quad (3.39)$$

A equação (3.39) é utilizada para formular o critério de ordenação de adições proposto, como é mostrado a seguir.

Supondo-se, por exemplo, que uma rede tenha M circuitos sobrecarregados e N circuitos possíveis de serem adicionados, para cada circuito com sobrecarga pode-se construir um vetor que é formado da seguinte maneira:

$$\left[\frac{\partial \psi_j}{\partial \delta} \right] = \begin{array}{|c|} \hline \partial \psi_j / \partial \delta_1 \\ \hline \partial \psi_j / \partial \delta_2 \\ \hline \vdots \\ \hline \partial \psi_j / \partial \delta_N \\ \hline \end{array} \quad (3.40)$$

; $j = 1, \dots, M$

O primeiro elemento desse vetor é um escalar que fornece a sensibilidade de abertura angular do circuito j , sobrecarregado em relação ao circuito 1. Da mesma forma, o p -ésimo elemento do vetor fornece a sensibilidade do circuito j sobrecarregado em relação ao circuito p . Os elementos do vetor podem ser positivos ou negativos. Se $(\partial \psi_j / \partial \delta_p)$ for positivo significa que a adição do circuito p ($\Delta \delta_p > 0$) produz um aumento na abertura angular do circuito j ($\Delta \psi_j > 0$). Se $(\partial \psi_j / \partial \delta_p)$ for negativo, como ainda se trata de adição ($\Delta \delta_p > 0$), então a abertura angular sofre uma diminuição. Pode-se concluir, portanto que o elemento de vetor $[\partial \psi_j / \partial \delta]$ que tiver maior valor negativo, indicará o melhor circuito a ser adicionado, ou então, iniciar a construção de um caminho elétrico visando-se a redução da sobrecarga do circuito j .

Frequentemente, na expansão de uma rede para um ano futuro (planejamento a longo prazo) ocorre que vários

circuitos apresentam sobrecarga. Neste caso não basta simplesmente conhecer a sensibilidade de abertura angular de um circuito em relação a outro; é necessário saber qual a sensibilidade de todos ou, se for o caso, de um conjunto de circuitos com sobrecarga em relação a um circuito planejável, ou seja, procura-se o circuito que, se adicionado, provoca em média uma maior diminuição de sobrecarga em um conjunto de circuitos sobrecarregados. Isto é feito através da construção de vetores, como o mostrado na equação (3.40) para os M circuitos sobrecarregados. Estes vetores, somados algebricamente, fornecem os elementos para se construir o critério desejado. Contudo, para tornar o critério um pouco mais flexível, pode-se ponderar cada vetor antes de se obter a soma, como indicado na equação (3.41)

$$\begin{array}{|c|} \hline S_1 \\ \hline S_2 \\ \hline \vdots \\ \hline S_N \\ \hline \end{array} = \omega_1 \begin{array}{|c|} \hline \partial\psi_1/\partial\alpha_1 \\ \hline \partial\psi_1/\partial\alpha_2 \\ \hline \vdots \\ \hline \partial\psi_1/\partial\alpha_N \\ \hline \end{array} + \omega_2 \begin{array}{|c|} \hline \partial\psi_2/\partial\alpha_1 \\ \hline \partial\psi_2/\partial\alpha_2 \\ \hline \vdots \\ \hline \partial\psi_2/\partial\alpha_N \\ \hline \end{array} + \dots + \omega_M \begin{array}{|c|} \hline \partial\psi_M/\partial\alpha_1 \\ \hline \partial\psi_M/\partial\alpha_2 \\ \hline \vdots \\ \hline \partial\psi_M/\partial\alpha_N \\ \hline \end{array} \quad (3.41)$$

Os elementos do vetor soma (S_1, S_2, \dots, S_N) são escalares que contêm a seguinte informação: o elemento p deste vetor que contiver o maior escalar negativo corresponde ao circuito p mais atraente a ser adicionado, tendo em vista uma

maior redução (média) de um conjunto de sobrecargas.

Os fatores de ponderação (w_1, w_2, \dots, w_M) são escalares escolhidos arbitrariamente. Algumas sugestões são:

$$w_i = \psi_i - \psi_i^{\max}$$

$$w_i = \frac{\psi_i - \psi_i^{\max}}{\psi_i^{\max}}$$

$$w_i = \gamma_i (\psi_i - \psi_i^{\max})$$

3.6.1. Detalhes de Implementação do Critério Proposto

Os elementos do vetor soma da equação (3.41) podem ser calculados de uma maneira bastante eficiente como será visto a seguir.

Considerando que o produto de $e_k^t Z e_i$ é um escalar e que a matriz Z é simétrica, pode-se reescrever a equação (3.39) da seguinte forma:

$$\frac{\partial \psi_k}{\partial \gamma_i} \cong -e_i^t Z e_k \psi_i \quad (3.42)$$

A partir da equação (3.42) a equação (3.41) pode ser

reescrita como:

$$\begin{array}{|c|} \hline S_1 \\ \hline S_2 \\ \hline \vdots \\ \hline S_N \\ \hline \end{array} = -\omega_1 \begin{array}{|c|} \hline \underline{e}_1^t \underline{z} \underline{e}_1 \psi_1 \\ \hline \underline{e}_2^t \underline{z} \underline{e}_1 \psi_2 \\ \hline \vdots \\ \hline \underline{e}_N^t \underline{z} \underline{e}_1 \psi_N \\ \hline \end{array} - \omega_2 \begin{array}{|c|} \hline \underline{e}_1^t \underline{z} \underline{e}_2 \psi_1 \\ \hline \underline{e}_2^t \underline{z} \underline{e}_2 \psi_2 \\ \hline \vdots \\ \hline \underline{e}_N^t \underline{z} \underline{e}_2 \psi_N \\ \hline \end{array} - \dots - \omega_M \begin{array}{|c|} \hline \underline{e}_1^t \underline{z} \underline{e}_M \psi_1 \\ \hline \underline{e}_2^t \underline{z} \underline{e}_M \psi_2 \\ \hline \vdots \\ \hline \underline{e}_N^t \underline{z} \underline{e}_M \psi_N \\ \hline \end{array} \quad (3.43)$$

ou ainda:

$$\begin{array}{|c|} \hline S_1 \\ \hline S_2 \\ \hline \vdots \\ \hline S_N \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline - \underline{e}_1^t \underline{z} (\omega_1 \underline{e}_1 + \omega_2 \underline{e}_2 + \dots + \omega_M \underline{e}_M) \psi_1 \\ \hline - \underline{e}_2^t \underline{z} (\omega_1 \underline{e}_1 + \omega_2 \underline{e}_2 + \dots + \omega_M \underline{e}_M) \psi_2 \\ \hline \vdots \\ \hline - \underline{e}_N^t \underline{z} (\omega_1 \underline{e}_1 + \omega_2 \underline{e}_2 + \dots + \omega_M \underline{e}_M) \psi_N \\ \hline \end{array} \quad (3.44)$$

O cálculo do vetor \underline{S} envolve os seguintes passos:

- . Cálculo de $\sum_{i=1}^M \omega_i \underline{e}_i = \underline{a}$ onde \underline{e}_i está definido na equação (3.30)
- . Cálculo de $\underline{Z} \underline{a} = \underline{b}$
- . Cálculo de $S_j = -\underline{e}_j^t \underline{b} \psi_j$ para $j=1, \dots, N$

O cálculo do vetor soma da equação (3.44) utilizado para ordenar as adições é calculado a partir do caso base (da mesma forma que os Critérios Exato e Aproximado do Mínimo Esforço e o Critério de Sobrecarga) de maneira bastante eficiente computacionalmente.

No Capítulo IV estão os resultados obtidos com o Critério de Ordenação proposto. No Capítulo V é feita uma avaliação deste critério.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS OBTIDOS COM OS CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO

4.1. Introdução

Como já foi afirmado anteriormente neste trabalho, o objetivo das listas ordenadas das adições mais atraentes construídas através dos Critérios de Ordenação é a obtenção de versões automáticas de programas computacionais de planejamento que realizem a Síntese Conceitual com um menor custo possível.

Para a avaliação das listas obtidas através dos Critérios de Ordenação apresentados no Capítulo III, foi utilizada uma versão automática de um programa computacional apresentado no Capítulo II cuja estrutura foi mostrada no diagrama simplificado da Figura 2.2. Dependendo da forma como são utilizadas as listas ordenadas chega-se a Sínteses (soluções) diferentes para a rede. Por esta razão, a seguir são mostrados detalhes do programa computacional utilizado neste trabalho, ou seja, são mostradas as condições em que foram testadas as listas ordenadas. É mostrado, também, a solução passo a passo do Sistema da Referência [16] e são apresentados os resultados obtidos para os sistemas brasileiros da região SUL e NORTE-NORDESTE do Brasil.

4.2. Condições dos testes dos Critérios de Ordenação

A Síntese Conceitual é dividida em duas etapas: uma eta-

pa em que são feitas adições de novos componentes à rede (Fase de Adições) e uma etapa em que são retirados os circuitos (segundo um determinado critério) que foram adicionados e cuja retirada não provoque sobrecarga na rede (Fase de Retiradas).

A Fase de Adições consiste basicamente dos seguintes passos:

- i) Construção de uma lista ordenada de adições segundo um Critério de Ordenação (Mínimo Esforço Exato, Mínimo Esforço Aproximado, Sobrecarga ou Sensibilidade) ;
- ii) Seleção de circuitos da lista para iniciar a Construção de Caminhos. Neste trabalho optou-se por duas maneiras diferentes de escolher esses circuitos:
 - escolha dos primeiros NPART (sendo NPART escolhido arbitrariamente) circuitos do topo de lista independentemente da categoria;
 - escolha dos melhores NPART circuitos da lista por categoria (por exemplo, linhas de 500 kV, 230 kV e transformadores 500-230 kV).
- iii) Construção dos caminhos elétricos a partir dos circuitos escolhidos em (ii). Os circuitos para início de caminho (circuitos de partida) podem se en

quadrar em uma das seguintes situações:

- terem ambos os nós terminais desconectados da rede sem carga/geração (neste caso a construção do caminho é feita a partir dos dois nós);
- terem ambos os nós terminais desconectados da rede com um nó ou ambos com carga/geração (neste caso se apenas um dos nós tiver carga/geração a construção do caminho é feita a partir do nó sem carga/geração. Se ambos os nós tiverem carga/geração a construção do caminho é feita a partir do nó com menor ângulo nodal);
- terem ambos os nós conectados à rede (neste caso o caminho é formado por um único circuito);
- terem um nó conectado à rede e o outro desconectado, porém com carga/geração (neste caso o caminho também é formado por um único circuito);
- terem um nó conectado à rede e o outro desconectado sem carga/geração (neste caso a continuação do caminho é feita a partir do nó desconectado).

A seguir mostra-se como é feita a construção do caminho neste trabalho.

Para cada circuito de partida escolhe-se o nó (ou os nós, caso o circuito possua os dois nós desconectados da rede sem carga/geração) que será usado para iniciar a construção do caminho

nho. Procura-se na lista ordenada de adições o 1º circuito que seja continuação do circuito de partida (tenha um nó igual ao nó de partida e tenha o mesmo sentido de fluxo do circuito de partida). Determina-se o novo nó de partida e repete-se este procedimento até alcançar a rede ou um nó com carga/geração.

- iv) Adição do caminho com menor razão CUSTO/BENEFÍCIO, onde o CUSTO é obtido para um caminho a partir da soma dos custos individuais de cada circuito e o BENEFÍCIO é a redução de sobrecarga na rede que ocorreria devido à adição desse caminho.

A Fase de Retiradas consiste basicamente dos seguintes passos:

- i) Elaboração de uma lista ordenada dos circuitos adicionados por ordem decrescente de custo;
- ii) Retirada da rede do circuito da lista ordenada em (i) mais caro, cuja retirada não provoque sobrecarga na rede;
- iii) Repetição de (i) e (ii) até não ser mais possível retirar algum circuito.

4.3. Síntese Conceitual para o Sistema da Referência [16]

A seguir será mostrada a Síntese Conceitual passo a passo

para o sistema da referência [16] que é mostrado na Figura 4.1. Para este exemplo o critério de ordenação utilizado foi o de Sensibilidade e para início de construção de caminhos foram escolhidos os 3 circuitos do topo da lista, ou seja, foram construídos caminhos a partir dos 3 circuitos do topo da lista e a cada passo foi adicionado o caminho com melhor razão CUSTO/BENEFÍCIO. A solução (final) é mostrada na Figura 4.2.

<u>CIRCUITOS SOBRECARRREGADOS</u>	<u>LISTA ORDENADA</u>		<u>CAMINHOS CONSTRUÍDOS</u>	
(3-5)	<u>Circuito</u>	<u>Índice</u>	<u>Caminho</u>	<u>BENEFÍCIO/CUSTO</u>
	(4-6)	383079,9	4-6	18.14251
	(2-6)	383079,9	2-6	18.14289
	(5-6)	188406,3	5-6	8.921290
	(3-6)	182406,8		
	(1-6)	169005,8		
	(3-5)	0.1459426E-02		
	(2-3)	0.6447990E-03		
	(1-3)	0.3393679E-03		
	(3-4)	0.2196155E-03		
	(1-5)	0.1640843E-03		
	(2-5)	0.1058608E-03		
	(4-5)	0.5160085E-04		
	(2-4)	0.1818989E-08		
	(1-4)	0.1212660E-08		
	(1-2)	0.0000000E+00		

CAMINHO ADICIONADO

(2-6)

<u>CIRCUITOS SOBRECARGADOS</u>	<u>LISTA ORDENADA</u>		<u>CAMINHOS</u>	<u>CONSTRUÍDOS</u>
	<u>Circuito</u>	<u>Índice</u>	<u>Caminho</u>	<u>BENEFÍCIO/CUSTO</u>
(1-2)				
(2-4)	(4-6)	0.7938071E-01	4-6	0.5729893E-03
(3-5)	(2-6)	0.4451769E-01	2-6	0.3328482E-03
(2-6)	(5-6)	0.3770332E-01	5-6	0.3560334E-03
	(1-6)	0.3075185E-01		
	(3-6)	0.2471073E-01		
	(2-5)	0.4201372E-02		
	(2-4)	0.3754560E-02		
	(3-5)	0.3613606E-02		
	(1-2)	0.2108608E-02		
	(3-4)	0.1479776E-02		
	(1-3)	0.1035485E-02		
	(2-3)	0.4237203E-03		
	(1-5)	0.2483035E-03		
	(1-4)	0.1571816E-03		
	(4-5)	0.1126698E-04		

CAMINHO ADICIONADO

(4-6)

<u>CIRCUITO SOBRECARGADO</u>	<u>LISTA ORDENADA</u>		<u>CAMINHOS CONSTRUÍDOS</u>	
	<u>Circuito</u>	<u>Índice</u>	<u>Caminho</u>	<u>BENEFÍCIO/CUSTO</u>
(3-5)				
	(5-6)	0.1309301E-01	5-6	0.2585993E-03
(2-6)				
	(2-6)	0.1298767E-01	2-6	0.3068887E-03
(4-6)				
	(4-6)	0.9423145E-02	4-6	0.3556745E-03
	(1-6)	0.8889725E-02		
	(3-6)	0.7137202E-02		
	(3-5)	0.2489363E-02		
	(2-5)	0.2342594E-02		
	(4-5)	0.2080009E-02		
	(1-4)	0.1007016E-02		
	(1-5)	0.6749887E-03		
	(1-2)	0.5874704E-03		
	(3-4)	0.3268373E-03		
	(1-3)	0.3009632E-03		
	(2-4)	0.2139687E-03		
	(2-3)	0.1074216E-03		

CAMINHO ADICIONADO

(4-6)

<u>CIRCUITO SOBRECARGADO</u>	<u>LISTA</u>	<u>ORDENADA</u>	<u>CAMINHOS</u>	<u>CONSTRUÍDOS</u>
	<u>Circuito</u>	<u>Índice</u>	<u>Caminho</u>	<u>BENEFÍCIO/CUSTO</u>
(3-5)				
	(5-6)	0.9570135E-02	5-6	0.2475861E-03
(2-6)				
	(2-6)	0.8792714E-02	2-6	0.3058977E-03
(4-6)				
	(1-6)	0.5992515E-02	1-6	0.1192463E-03
	(3-6)	0.4809192E-02		
	(4-6)	0.3438419E-02		
	(4-5)	0.3113377E-02		
	(3-5)	0.2281642E-02		
	(2-5)	0.2023511E-02		
	(1-4)	0.1676682E-02		
	(2-4)	0.9256633E-03		
	(3-4)	0.8908624E-03		
	(1-5)	0.7900695E-03		
	(1-2)	0.3890870E-03		
	(1-3)	0.2033954E-03		
	(2-3)	0.6785485E-04		

CAMINHO ADICIONADO

(2-6)

CIRCUITO SOBRECARGADO

LISTA ORDENADA

CAMINHOS CONSTRUÍDOS

	<u>Circuito</u>	<u>Índice</u>	<u>Caminho</u>	<u>BENEFÍCIO/CUSTO</u>
(3-5)				
	(5-6)	0.5861683E-02	5-6	0.2293833E-03
(2-6)				
	(2-6)	0.3505320E-02	2-6	0.3206761E-03
(4-6)				
	(1-6)	0.3442976E-02	1-6	0.1313230E-03
	(3-5)	0.2536329E-02		
	(2-5)	0.2416192E-02		
	(3-6)	0.2205317E-02		
	(4-6)	0.2145683E-02		
	(4-5)	0.1881103E-02		
	(1-4)	0.8828060E-03		
	(1-5)	0.6509802E-03		
	(1-2)	0.6366343E-03		
	(1-3)	0.3249508E-03		
	(3-4)	0.2401235E-03		
	(2-4)	0.1245025E-03		
	(2-3)	0.1174020E-03		

CAMINHO ADICIONADO

(2-6)

<u>CIRCUITO SOBRECARGADO</u>	<u>LISTA ORDENADA</u>		<u>CAMINHOS CONSTRUÍDOS</u>	
	<u>Circuito</u>	<u>Índice</u>	<u>Caminho</u>	<u>BENEFÍCIO/CUSTO</u>
(3-5)				
	(5-6)	0.4455689E-02	5-6	0.1434273E-03
(2-6)				
	(3-5)	0.2658369E-02	3-5	0.3152172E-03
(4-6)				
	(2-5)	0.2609084E-02	2-5	0.1325204E-03
	(1-6)	0.2503387E-02		
	(2-6)	0.1871426E-02		
	(4-6)	0.1651558E-02		
	(4-5)	0.1416697E-02		
	(3-6)	0.1341936E-02		
	(1-2)	0.7712797E-03		
	(1-4)	0.6016589E-03		
	(1-5)	0.5913482E-03		
	(1-3)	0.3905850E-03		
	(2-3)	0.1448101E-03		
	(3-4)	0.7876542E-04		
	(2-4)	0.5150719E-05		

CAMINHO ADICIONADO

(3-5)

<u>CIRCUITO SOBRECARGADO</u>	<u>LISTA ORDENADA</u>		<u>CAMINHOS CONSTRUÍDOS</u>	
	<u>Circuito</u>	<u>Índice</u>	<u>Caminho</u>	<u>BENEFÍCIO/CUSTO</u>
(2-6)				
(4-6)	(5-6)	0.3389712E-02	5-6	0.7369306E-04
	(1-6)	0.2081879E-02	1-6	0.6551411E-04
	(2-6)	0.1922812E-02	2-6	0.1498425E-03
	(3-6)	0.1669157E-02		
	(4-6)	0.1580446E-02		
	(2-5)	0.1484848E-02		
	(4-5)	0.8913925E-03		
	(3-5)	0.8507728E-03		
	(1-2)	0.4629387E-03		
	(1-4)	0.4187503E-03		
	(2-3)	0.3536689E-03		
	(1-5)	0.3078573E-03		
	(3-4)	0.1923604E-03		
	(1-3)	0.7109173E-04		
	(2-4)	0.1257711E-04		

CAMINHO ADICIONADO

(2-6)

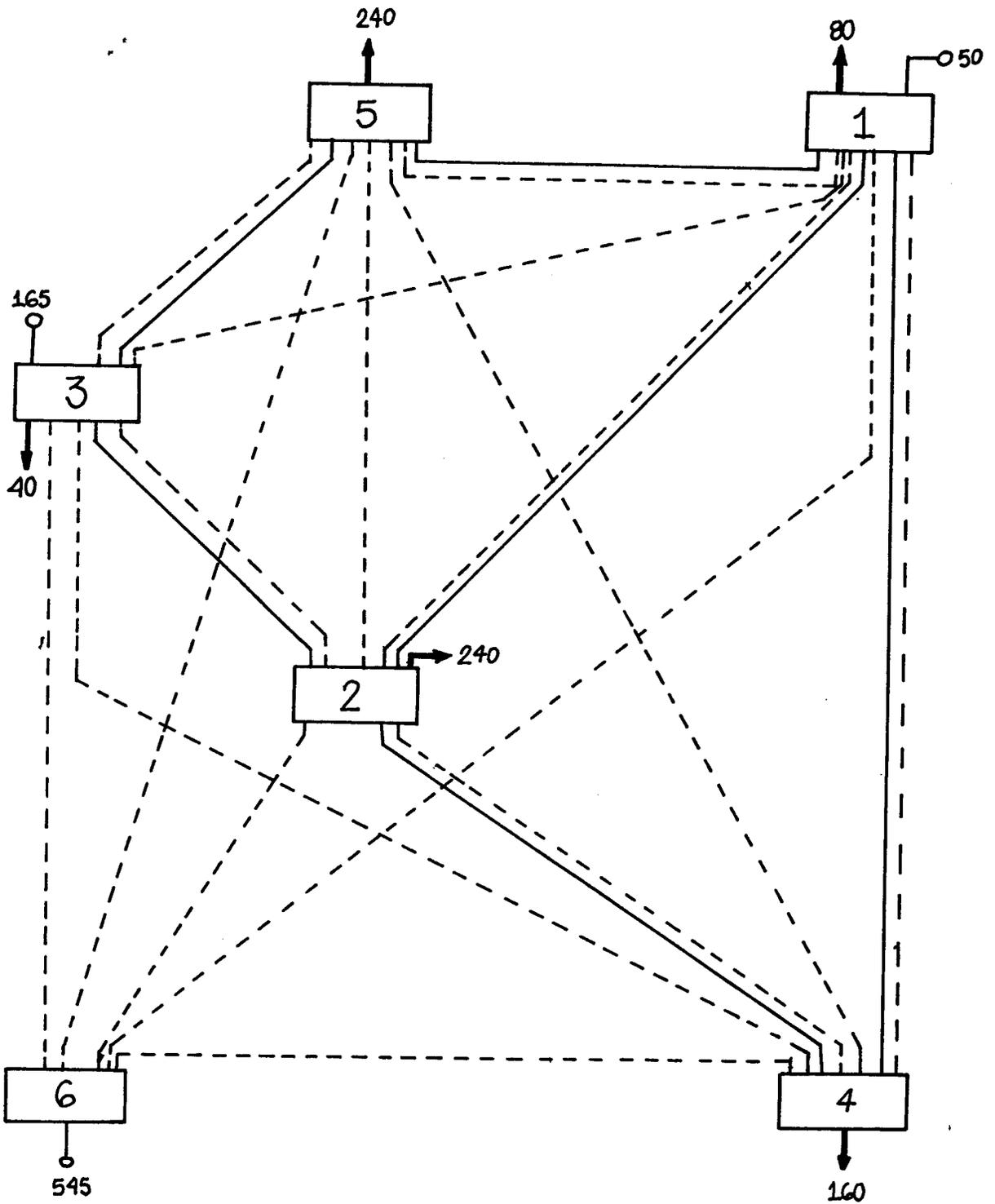


Figura 4.1. Sistema de 6 barras da referência [16], com injeção de potência ativa para um ano futuro.

— circuito da rede inicial

---- possíveis adições

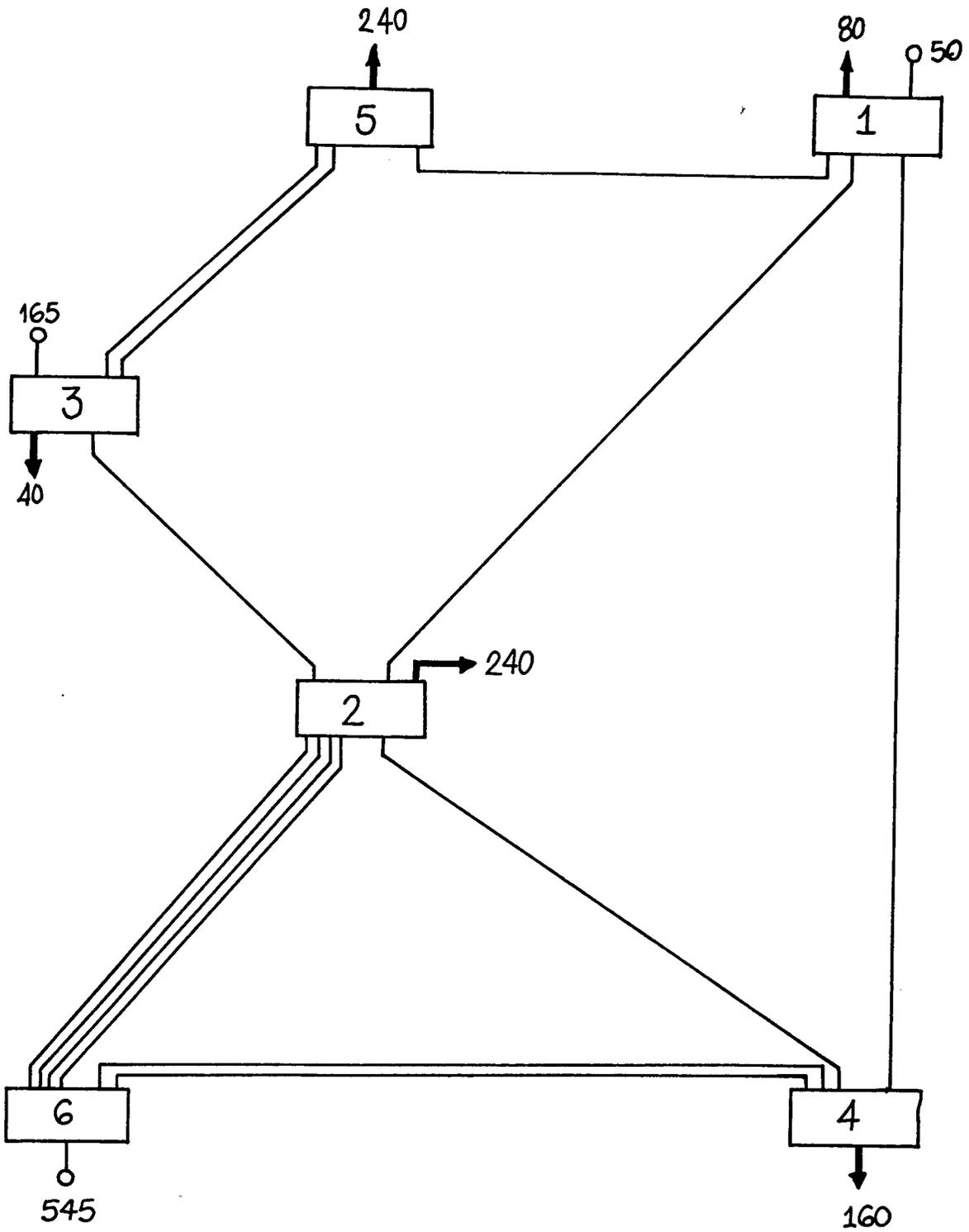


Figura 4.2. Síntese Conceitual do Sistema da referência | 16 | para um ano futuro.

No exemplo apresentado anteriormente escolheram-se arbitrariamente para início de Construção de Caminhos os 3 circuitos no topo da lista. Como esse número é arbitrário, mostra-se na Tabela 4.1 a variação do Custo da Síntese considerando-se diferentes números de circuitos de partida para Construção de Caminhos para os Critérios de Ordenação. Os resultados da Tabela 4.1 são também apresentados na Figura 4.3 de forma gráfica.

Na prática verifica-se que o melhor número de circuitos de partida é função de cada sistema, e que este deve ser determinado fazendo-se a Síntese Conceitual para diferentes circuitos de partida até se encontrar o número com o qual o Custo de Síntese seja o menor possível.

A seguir são mostrados os resultados obtidos para os Sistemas da região SUL e NORTE-NORDESTE do Brasil.

NPART	CUSTO DA SÍNTESE			
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato
1	27.200	37.200	49.200	27.200
2	23.100	38.800	20.000	27.200
3	20.000	32.300	20.000	27.200
4	20.000	34.000	20.000	20.000
5	20.000	30.300	20.000	20.000
6	20.000	23.100	20.000	20.000
7	20.000	23.100	20.000	20.000
8	20.000	23.100	20.000	20.000
9	20.000	23.100	20.000	20.000
10	20.000	23.100	20.000	20.000
11	20.000	20.000	20.000	20.000

Tabela 4.1 Custo da Síntese em função do número de caminhos de partida para cada Critério de Ordenação (sistema da referência |16|)

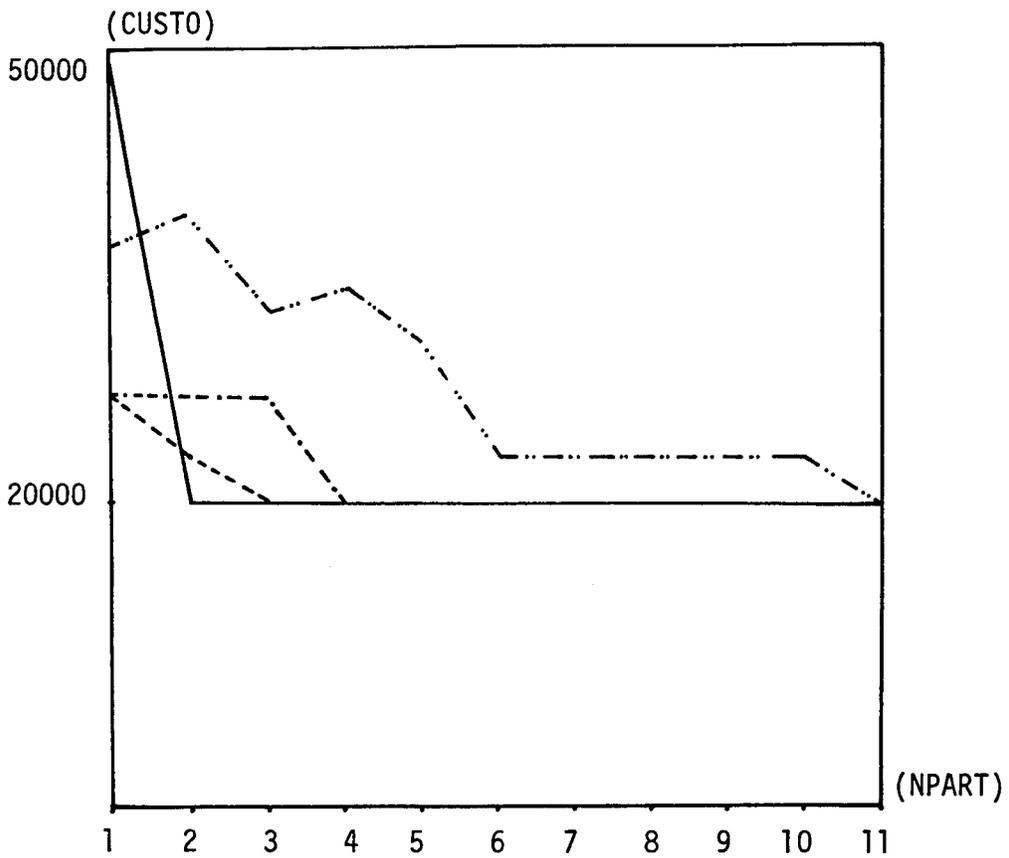


Figura 4.3 Custo da Síntese em função do número de caminhos de partida para cada Critério de Ordenação (Sistema da Referência 16.).

- Critério de Sensibilidade
- .-.-.-.- Critério Exato de Mínimo Esforço
- - - - - Critério Aproximado de Mínimo Esforço
- Critério de Sobrecarga

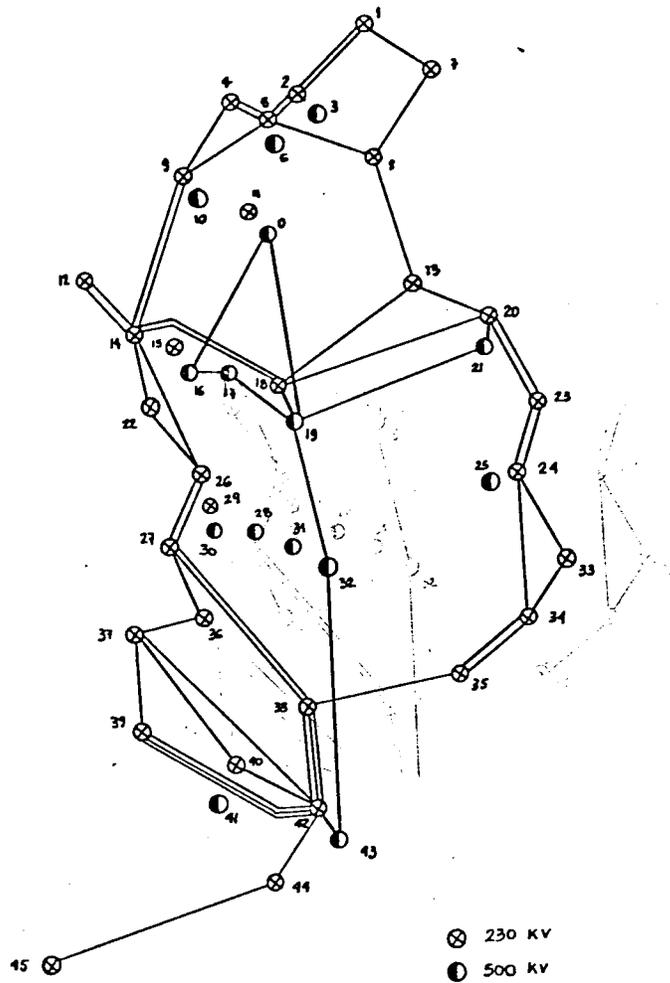
4.4. Descrição dos Sistemas da Região SUL e NORTE-NORDESTE do Brasil

O Sistema da Região SUL tem as seguintes características:

- Configuração inicial correspondente ao ano de 1980 (Fig. 4.4);
- 46 barras sendo que 35 dessas barras já estão interligadas na configuração inicial;
- Rede inicial com 62 circuitos;
- Níveis de tensão de 500 kV e 230 kV;
- 72 ramos que admitem a adição de novos componentes;
- Horizonte de 10 anos para o planejamento (1980 a 1990).

O Sistema da Região NORTE-NORDESTE tem as seguintes características:

- Configuração inicial disponível correspondente a um ano anterior a 1990 (Fig. 4.5);
- 89 barras nos níveis de tensão 1050 kV, 525 kV, 230 kV, e 138 kV sendo que 53 (nos níveis 525 kV, 230 kV e 138 kV) já estão interligadas na configuração inicial;
- Rede inicial com 119 circuitos;
- 177 ramos que admitem a adição de novos componentes.
- Horizonte de 18 anos para o planejamento (1990 a 2008).



0	IVAIPORA	16	SANTIAGO	32	BARRAÇAO
1	ASSIS	17	SEGREDO	33	PALHOÇA
2	LONDRINA	18	FOZ DO AREIA	34	J. LACEADA
3	LONDRINA	19	FOZ DO AREIA	35	SIDEROPOLIS
4	MARINGÁ	20	CURITIBA	36	STA. MARTA
5	APUCARANA	21	CURITIBA	37	PASSO REAL
6	APUCARANA	22	MTO BRANCO	38	FARROUPILHA
7	XAVANTES	23	JOINVILLE	39	ITAUBA
8	FIGUEIRA	24	BLUMENAU	40	V. AIRES
9	CAMPO MOURAO	25	BLUMENAU	41	V. AIRES
10	CAMPO MOURAO	26	XANXERE	42	PORTO ALEGRE
11	IVAIPORA	27	PASSO FUNDO	43	PORTO ALEGRE
12	CASCADEL	28	ITA	44	CAMARUÁ
13	PONTA GROSSA	29	SANTANA	45	CANDIOTA
14	SALTO OSÓRIO	30	SANTANA		
15	SANTIAGO	31	MACHADINHO		

Figura 4.4 Sistema da Região SUL do Brasil
Configuração inicial correspondente ao ano
de 1980.

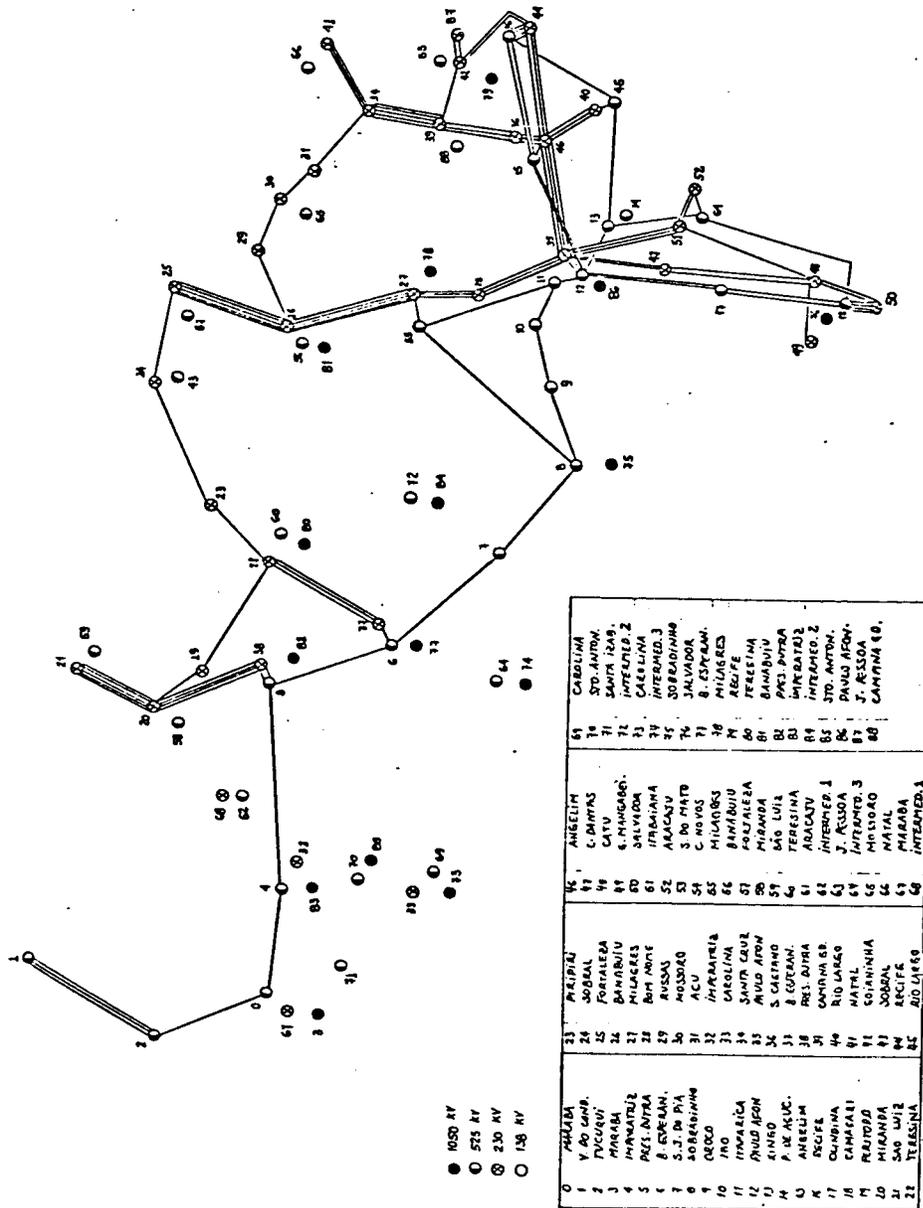


Figura 4.5 Sistema da Região NORTE-NORDESTE do Brasil
Configuração da rede correspondente a um
ano anterior a 1990.

4.5. Resultados obtidos para os Sistemas das Regiões Sul e NORTE-NORDESTE do Brasil

A Síntese Conceitual para a Região SUL do Brasil foi realizada para os anos de 1980 a 1990 sendo o ano inicial 1980 (isto porque os dados disponíveis são de 1980). Para a Região NORTE-NORDESTE a Síntese foi realizada para os anos pares compreendidos entre 1990 e 2008 (inclusive) tendo como ano inicial um ano anterior a 1990. Foram utilizados os vários Critérios de Ordenação de Adições apresentados no Capítulo III e a construção de caminhos foi feita de dois modos:

- A partir dos 3 melhores circuitos por categoria (NPART=3). Para o Sistema da Região SUL o número de circuitos de partida, portanto, é 9 (3 categorias de circuitos) e para o Sistema da Região NORTE-NORDESTE é 15 (5 categorias de circuitos);
- A partir dos 9 circuitos do topo da lista das Adições mais atraentes obtida por cada Critério de Adições para o Sistema da Região SUL (NPART=9) e a partir dos 15 circuitos do topo da lista para a Região NORTE-NORDESTE (NPART=15).

Os resultados obtidos para o Sistema da Região SUL são apresentados nas tabelas que seguem:

- Tabela 4.2

Mostra o Custo da Síntese para cada ano utilizando-se

os Critérios de Ordenação abordados neste trabalho e construção de caminhos a partir dos 3 melhores circuitos por categoria;

- Tabela 4.3

Mostra o esforço computacional em **CPU** requerido para realizar a Síntese utilizando-se os mesmos Critérios de Ordenação e construção de caminhos da Tabela 4.2;

- Tabela 4.4

Idem à Tabela 4.2, porém com a construção de caminhos a partir dos 9 circuitos do topo da lista de adições mais atraentes;

- Tabela 4.5

Idem à Tabela 4.3, porém com a construção de caminhos também a partir dos 9 circuitos do topo da lista.

Os resultados das Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 são também apresentados nas Figuras 4.6 , 4.7 , 4.8 e 4.9 respectivamente, em forma de gráficos. Nessas Tabelas e Gráficos aparece também a solução fornecida pelo programa computacional do SISTEMA SINTRA |8|, que será útil para os comentários do capítulo V.

Os resultados obtidos para o Sistema da Região NORTE-

NORDESTE são apresentados nas Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 cuja construção é idêntica às Tabelas apresentadas para a Região SUL ressaltando apenas que, pelo fato do Sistema da Região NORTE-NORDESTE possuir um nível de tensão a mais que o sistema da Região SUL, o número de circuitos de partida para a construção de caminhos é igual a 15.

Estes resultados são também apresentados nas Figuras 4.10 , 4.11 , 4.12 e 4.13 em forma de gráficos. Nesses gráficos também aparece a curva correspondente à Solução do SISTEMA SINTRA, que como já foi mencionado anteriormente será útil para os comentários do próximo capítulo.

É importante ressaltar que os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se dois programas computacionais : um desenvolvido neste trabalho para avaliar os Critérios de ordenação e um outro (SISTEMA SINTRA) cujos resultados foram utilizados como referência. Não se pretendeu desenvolver um programa computacional com a sofisticação do SINTRA, pelo contrário, procurou-se utilizar um programa bastante simplificado que permitisse ponderar mais as listas ordenadas quanto à decisão dos circuitos a serem adicionados.

Estes resultados foram obtidos em um estágio, ou seja, partiu-se do ano inicial (o mesmo para todas as simulações para cada rede) e realizou-se a expansão da rede para cada ano mostrado nas tabelas a seguir.

Ano horizonte	CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO				Sistema SINTRA
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato	
1983	26419	26419	13401	8248	8248
1984	74960	74328	58727	28415	28415
1985	74960	74960	43114	39312	35254
1986	99716	197042	162378	130472	62648
1987	107968	82813	80018	118984	70896
1988	107968	107968	134369	290848	139061
1989	161573	161248	189437	212463	139424
1990	177942	190431	256962	255176	204631

Tabela 4.2 Custo da Síntese (os valores da tabela devem ser multiplicados por US\$ 1000) para a rede da região Sul do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir de 3 circuitos por categoria.

Ano horizonte	CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO				Sistema SINTRA
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato	
1983	2.70	2.58	3.21	21.38	2,93
1984	3.20	3.13	4.19	26.23	4,34
1985	3.32	3.19	2.96	38.10	4,67
1986	8.19	9.20	13.87	47.05	6,92
1987	8.59	11.29	7.04	48.49	8,18
1988	7.74	8.75	8.37	54.12	9,94
1989	12.97	9.57	11.66	52,72	8,94
1990	13.42	9.27	14.43	60,30	9,06

Tabela 4.3 Esforço Computacional (em segundos) para a rede da região Sul do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir de 3 circuitos por categoria.

Ano horizonte	CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO				Sistema SINTRA
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato	
1983	26419	26419	13401	8248	8248
1984	74960	58057	30231	25929	28415
1985	74960	58057	34667	54875	35254
1986	99716	215205	99716	132118	62648
1987	136045	82813	74865	76049	70896
1988	136045	107968	137652	194276	139061
1989	161248	161248	193689	215807	139424
1990	210615	196929	182079	248546	204631

Tabela 4.4 Custo da Síntese (os valores da tabela devem ser multiplicados por US\$ 1000) para a rede da região Sul do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir dos 9 circuitos do topo da lista.

Ano horizonte	CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO				Sistema SINTRA
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato	
1983	4,67	3,03	2,99	8,78	2,93
1984	5,78	4,21	4,93	24,04	4,34
1985	4,26	4,17	4,81	14,46	4,67
1986	11,59	10,19	5,91	28,20	6,92
1987	13,30	14,45	10,11	61,75	8,18
1988	12,99	15,91	14,77	57,17	9,94
1989	12,55	14,88	13,62	87,76	8,94
1990	10,70	14,28	17,77	60,65	9,06

Tabela 4.5 Esforço Computacional (em segundos) para a rede da região Sul do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir dos 9 circuitos do topo da lista.

(US\$ 260 x 10⁶)

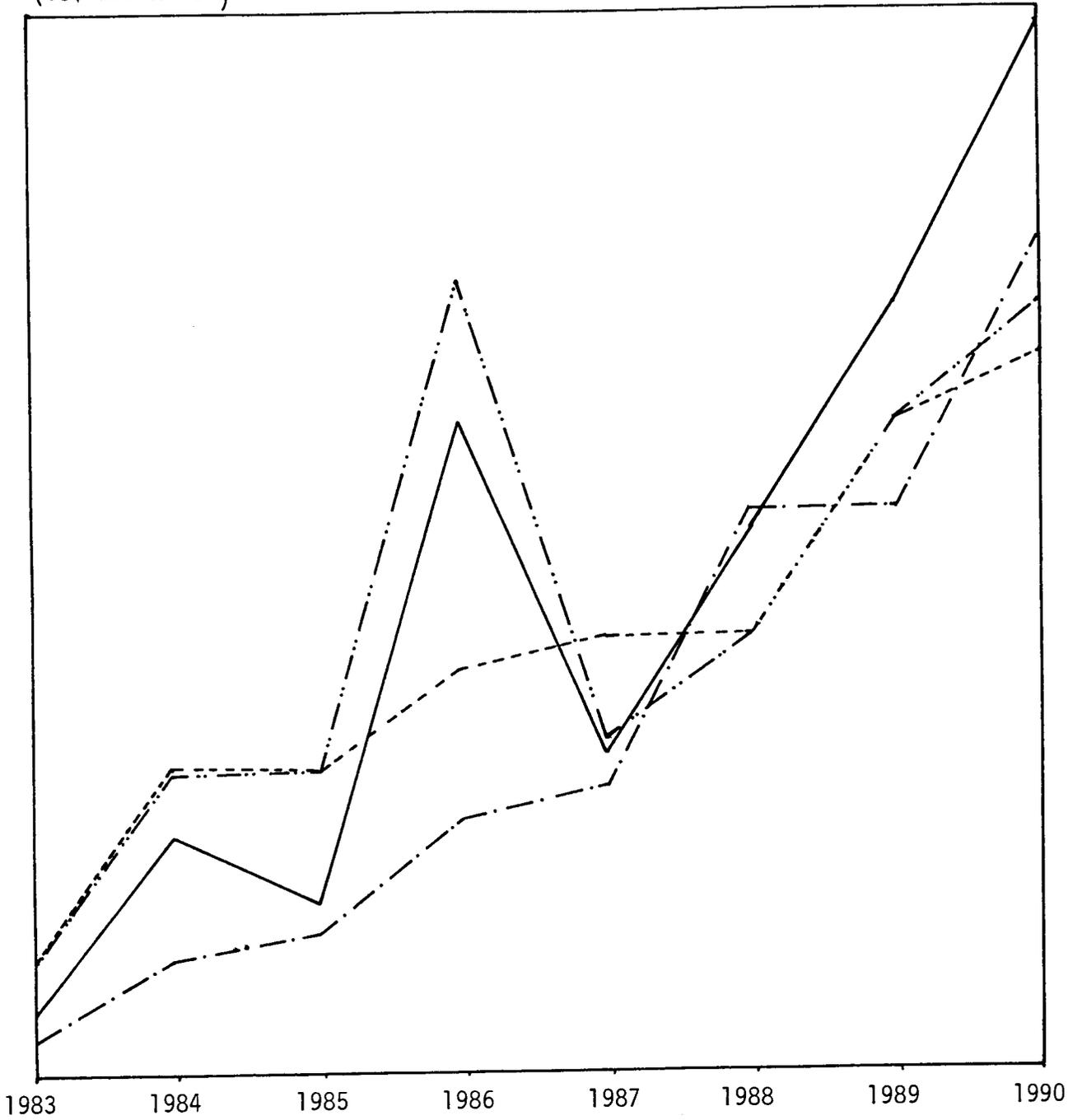


Figura 4.6 Custo da Síntese para a rede da região SUL do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir de 3 circuitos por categoria.

- Sistema SINTRA
- Sobrecarga
- Mínimo Esforço Aproximado
- Sensibilidade

(15 segundos)



Figura 4.7 Esforço Computacional para a rede da região SUL do Brasil, sendo a construção feita a partir de 3 circuitos por categoria.

- Sistema SINTRA
- Sobrecarga
- Mínimo Esforço Aproximado
- Sensibilidade

(US\$ 220 x 10⁶)

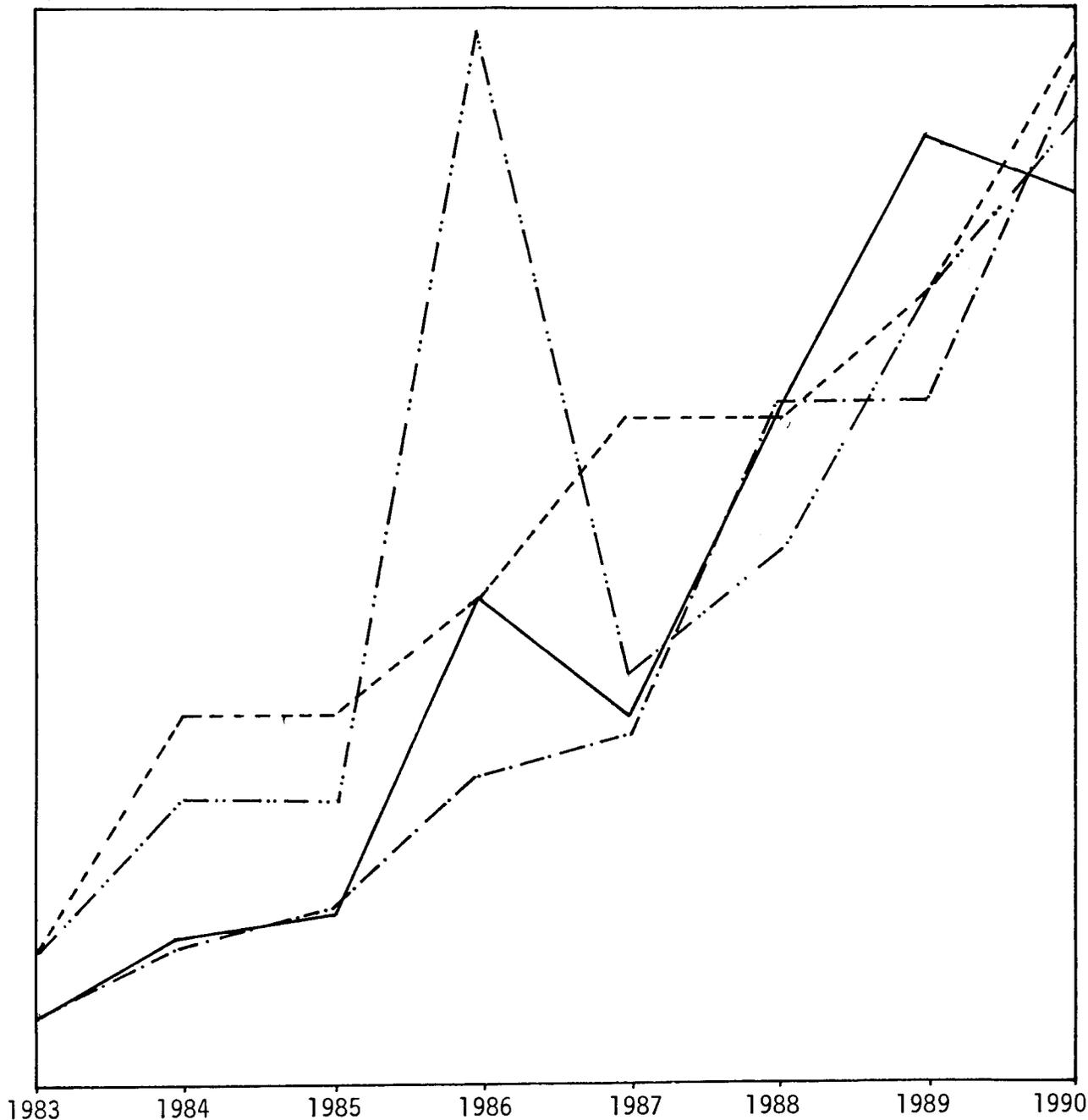


Figura 4.8 Custo da Síntese para a rede da região SUL do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir dos 9 circuitos do topo da lista.

- Sistema SINTRA
- Sobrecarga
- Mínimo Esforço Aproximado
- Sensibilidade

(18 segundos)

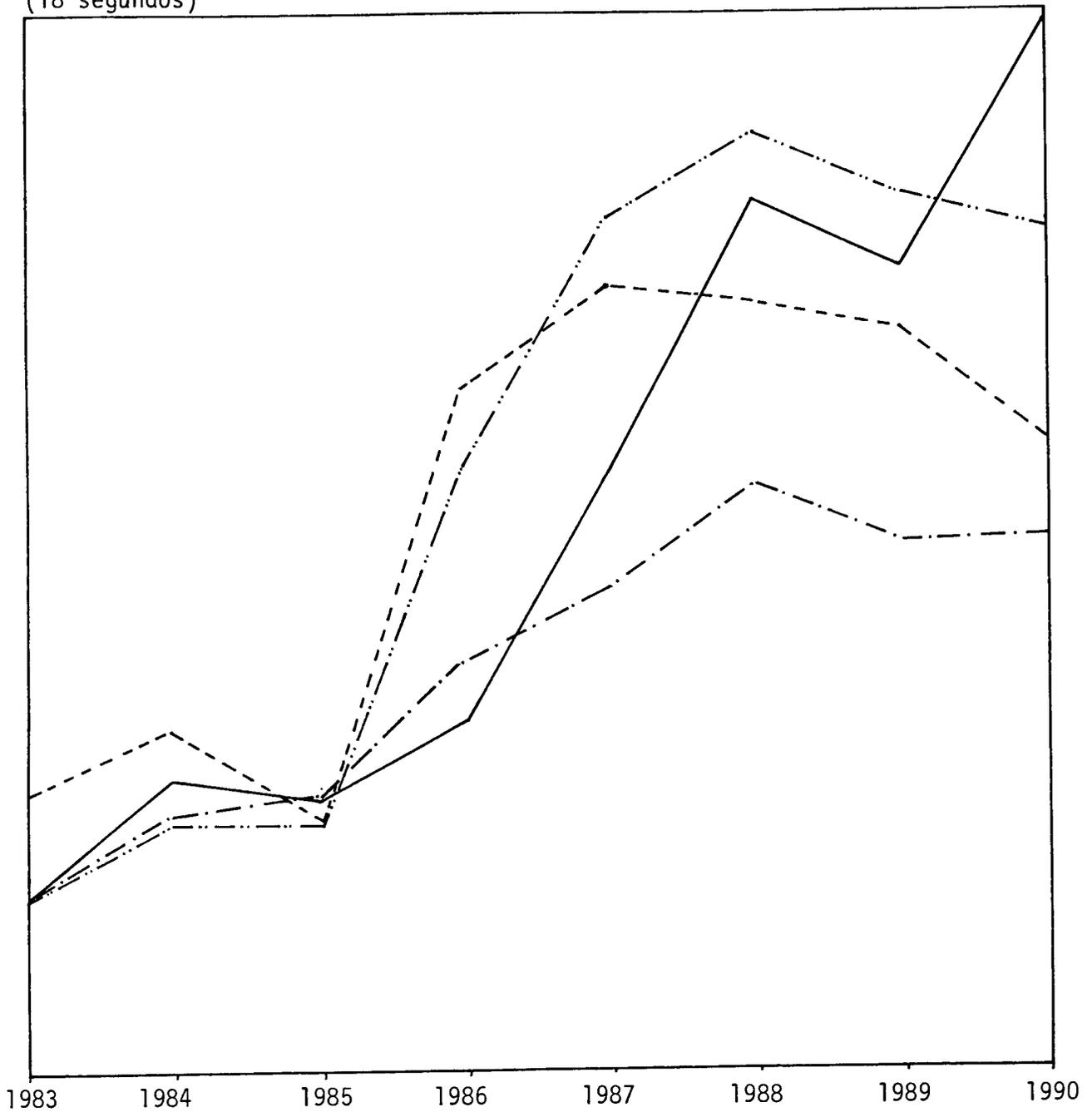


Figura 4.9 Esforço Computacional para a rede da região SUL do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir dos 9 circuitos do topo da lista.

- · — · — · — Sistema SINTRA
- Sobrecarga
- - - - - Mínimo Esforço Aproximado
- Sensibilidade

Ano horizonte	CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO				Sistema SINTRA
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato	
1990	310627	215167	78980	376817	78650
1992	764701	225857	122700	429264	120675
1994	676923	387399	345498	4861113	501217
1996	815345	1024422	782213	1179803	1092162
1998	1273214	1599554	1266689	1362481	1217048
2000	1420589	1407713	1456463	1386098	1256666
2002	1844877	2875042	1566224	(*)	1620746
2004	2222109	2676277	2029364	(*)	2453935
2006	2616422	3008001	2687392	(*)	3192555
2008	3279775	(*)	2899136	(*)	3633312

Tabela 4.6 Custo da Síntese (os valores da tabela devem ser multiplicados por US\$ 1000) para a rede NORTE-NORDESTE do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir de 3 circuitos por categoria.

(*) O programa não forneceu solução.

Ano horizonte	CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO				Sistema SINTRA
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato	
1990	1,45	3,30	0,88	44,02	0,43
1992	2,78	1,91	1,26	13,46	0,53
1994	2,60	7,73	2,01	49,26	1,16
1996	5,91	19,28	4,11	38,38	2,26
1998	5,25	8,38	7,11	42,30	1,71
2000	12,73	6,03	6,58	50,10	2,53
2002	13,21	14,93	8,41	(*)	2,15
2004	10,48	17,56	10,21	(*)	2,61
2006	12,88	12,66	7,90	(*)	3,50
2008	20,38	(*)	10,46	(*)	3,60

Tabela 4.7 Esforço Computacional (em minutos) para a rede da região NORTE-NORDESTE do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir de 3 circuitos por categoria.

(*) O programa não forneceu solução.

Ano horizonte	CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO				Sistema SINTRA
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato	
1990	185957	362104	90899	127271	78650
1992	229587	459088	112945	479229	120675
1994	481080	377915	301538	645332	501217
1996	663462	1034881	594816	974818	1092162
1998	1404226	1233592	948649	1427723	1217048
2000	1820149	1706695	1281020	1851333	1256666
2002	1907637	2491323	1717591	2466212	1620746
2004	2621728	2602793	2047374	(*)	2453935
2006	2897401	3185709	2495757	(*)	3192555
2008	3374901	3600645	3035233	(*)	3632312

Tabela 4.8 Custo da Síntese (os valores da tabela devem ser multiplicados por US\$ 1000) para a rede NORTE-NORDESTE do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir dos 15 circuitos do topo da lista.

(*) O programa não forneceu solução.

Ano horizonte	CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO				Sistema SINTRA
	Mínimo Esforço Aproximado	Sobrecarga	Sensibilidade	Mínimo Esforço Exato	
1990	2,36	1,73	0,57	15,18	0,43
1992	2,63	1,81	0,66	13,96	0,53
1994	3,50	2,11	1,36	28,76	1,16
1996	4,81	3,30	1,98	28,41	2,26
1998	5,96	4,43	3,02	49,05	1,71
2000	8,53	7,20	3,56	50,06	2,53
2002	8,46	6,38	4,31	66,25	2,15
2004	12,58	7,03	6,85	(*)	2,61
2006	14,46	7,23	6,85	(*)	3,50
2008	18,51	13,06	9,06	(*)	3,60

Tabela 4.9 Esforço Computacional (em minutos) para a rede da região NORTE-NORDESTE do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir dos 15 circuitos do topo da lista.

(*) O programa não forneceu solução.

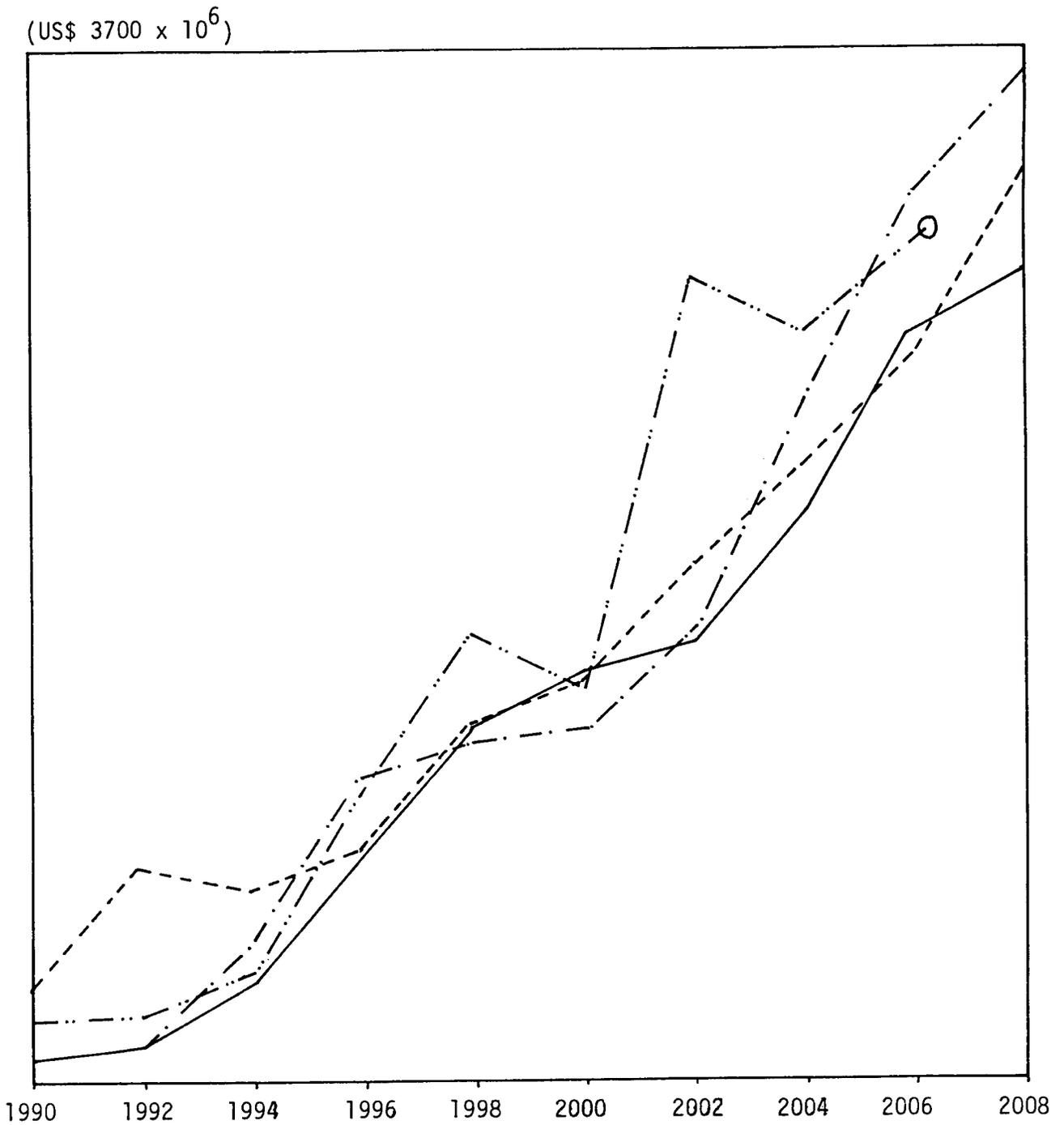


Figura 4.10 Custo da Síntese para a rede da região NORTE-NORDESTE do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir de 3 circuitos por categoria.

- Sistema SINTRA
- Sobrecarga
- Mínimo Esforço Aproximado
- Sensibilidade

(21 minutos)

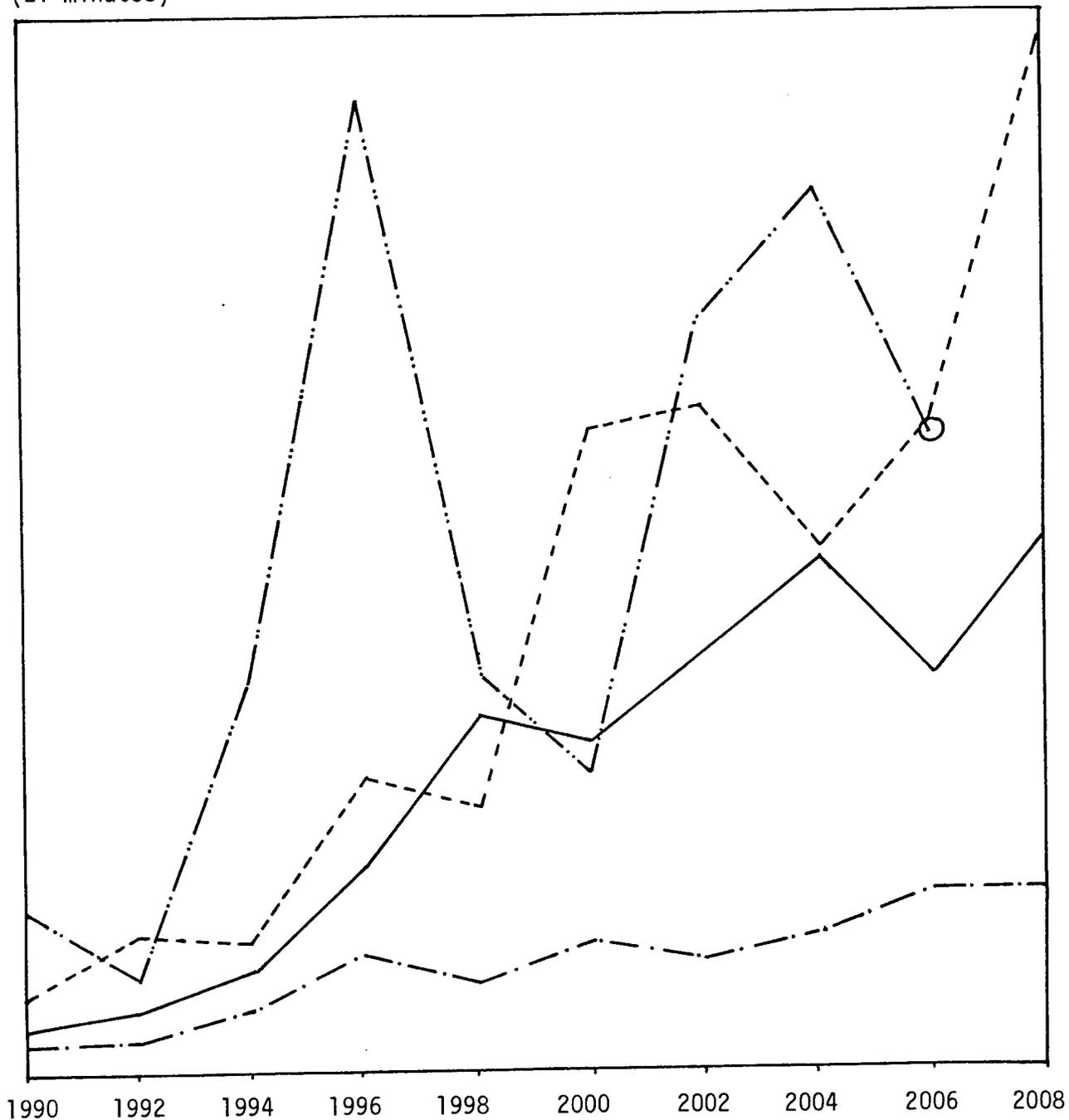


Figura 4.11 Esforço Computacional para a rede da região NORTE-NORDESTE do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir de 3 circuitos por categoria.

- Sistema SINTRA
- Sobrecarga
- Mínimo Esforço Aproximado
- Sensibilidade

(US\$ 3700 x 10⁶)

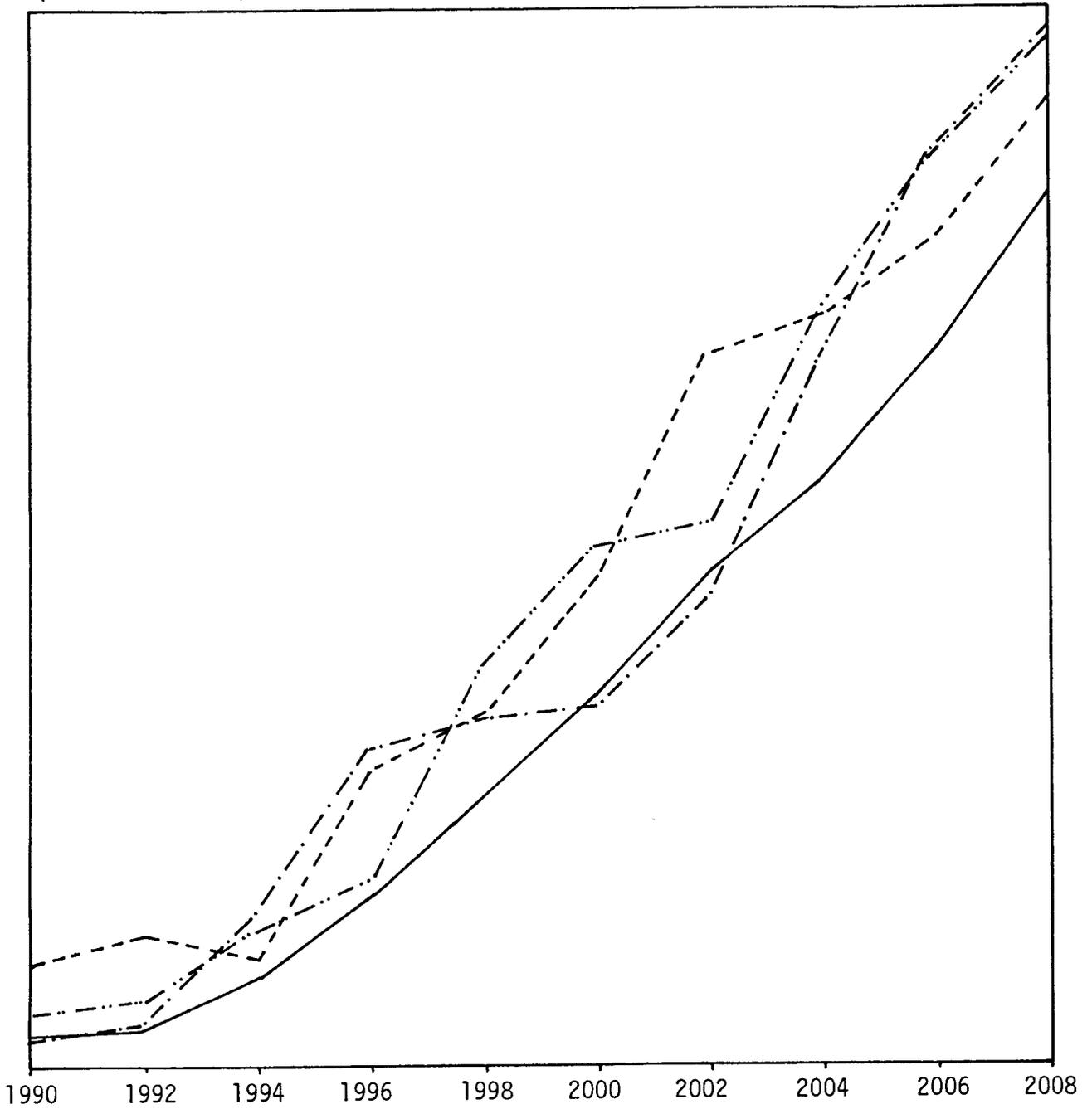


Figura 4.12 Custo da Síntese para a rede da região NORTE-NORDESTE do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir dos 15 circuitos do topo da lista.

- Sistema SINTRA
- Sobrecarga
- Mínimo Esfuerzo Aproximado
- Sensibilidad

(20 minutos)

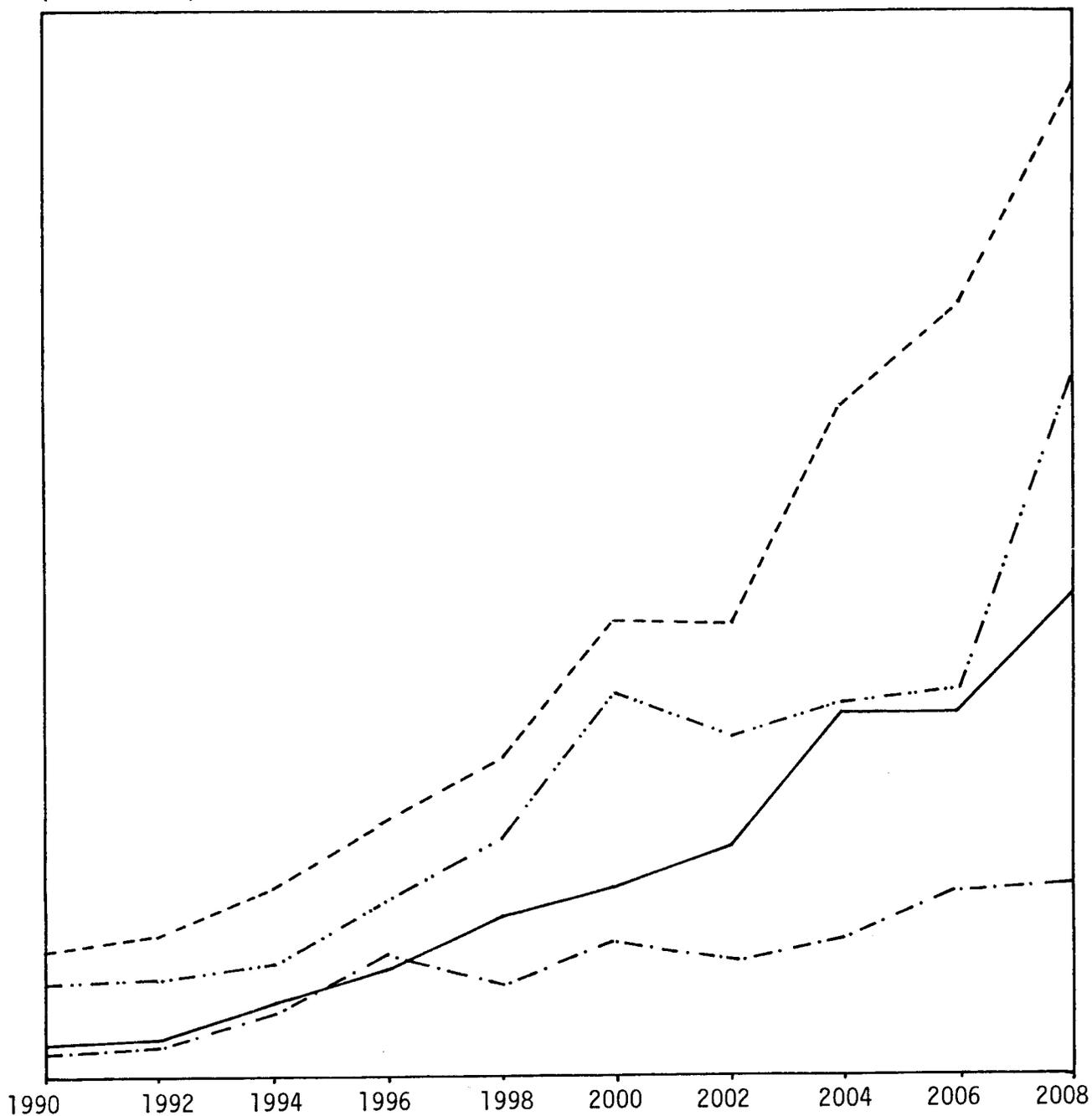


Figura 4.13 Esforço Computacional para a rede da região NORTE-NORDESTE do Brasil, sendo a construção de caminhos feita a partir dos 15 circuitos do topo da lista.

- . - . - . - . - Sistema SINTRA
- Sobrecarga
- - - - - Mínimo Esforço Aproximado
- Sensibilidade

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Neste capítulo é feita uma avaliação qualitativa do desempenho dos Critérios de Ordenação apresentados, a partir dos resultados que são mostrados no capítulo IV nas tabelas 4.2 a 4.9 e nas Figuras 4.6 a 4.13. Para avaliar os resultados obtidos foram utilizados os resultados fornecidos pelo Programa Computacional do Sistema SINTRA que são utilizados como padrão, tendo em vista que na Síntese Conceitual Estática não se dispõe da solução ótima.

5.1. Critério Exato de Mínimo Esforço

Os resultados obtidos para o sistema de Energia Elétrica da região SUL do Brasil mostram que o Critério Exato de Mínimo Esforço fornece resultados (Síntese da Rede) que requerem esforços computacionais muito maiores que os outros Critérios de Ordenação. Para o sistema da região NORTE-NORDESTE os esforços computacionais também são bem maiores e, para anos-horizonte mais distantes são requeridos tempos CPU da ordem de horas, o que do ponto de vista prático, torna este Critério sem utilidade. Convém lembrar que, como já foi mencionado, na Síntese Conceitual Estática procuram-se soluções indicativas que tenham um baixo custo e possam ser obtidas rapidamente (esforço computacional pequeno), portanto, não é aconselhá

vel a utilização do Critério Exato de Mínimo Esforço devido ao fato de este requerer elevados esforços computacionais. Note-se, entretanto, que os custos finais das sínteses obtidas com este critério podem ser considerados satisfatórios e, para se entender o que ocorre nestes casos, deve-se considerar o tempo de CPU gasto na obtenção das sínteses, que é muito grande. Isto evidencia que na Fase de Adições muitos circuitos supérfluos foram adicionados e corretamente retirados na Fase de Retiradas. Note-se que em alguns casos a solução não foi possível (o tempo de CPU foi limitado em 2 horas e 30 minutos!). A seguir procura-se explicar o porquê das deficiências deste critério.

Nos casos de horizonte muito distante, existem nós (com ou sem carga/geração) desconectados da rede, ou seja, ligados à rede apenas por ligações fictícias (ver Apêndice C). Estas possibilidades de adição só são possíveis de serem consideradas através da criação de caminhos elétricos, cuja política de construção está detalhada no capítulo IV. Uma ilustração destes casos é mostrada na Figura 5.1. Pelo Critério Exato de Mínimo Esforço, os circuitos são ordenados pela equação (3.15):

$$\Delta ID_i = -\frac{1}{2} \psi_i^2 \Delta \delta_i \left(\frac{\delta_i^{eq}}{\Delta \delta_i + \delta_i^{eq}} \right)$$

onde δ_i^{eq} foi definido no Capítulo III e é a susceptância equivalente entre os terminais do circuito i (exclusive o circuito i). Ocorre que nos casos referidos acima, δ_i^{eq} é próximo de zero, só não o sendo devido à presença de ligações fictícias. Portanto, a menos que ψ_i , que é a abertura angular da liga-

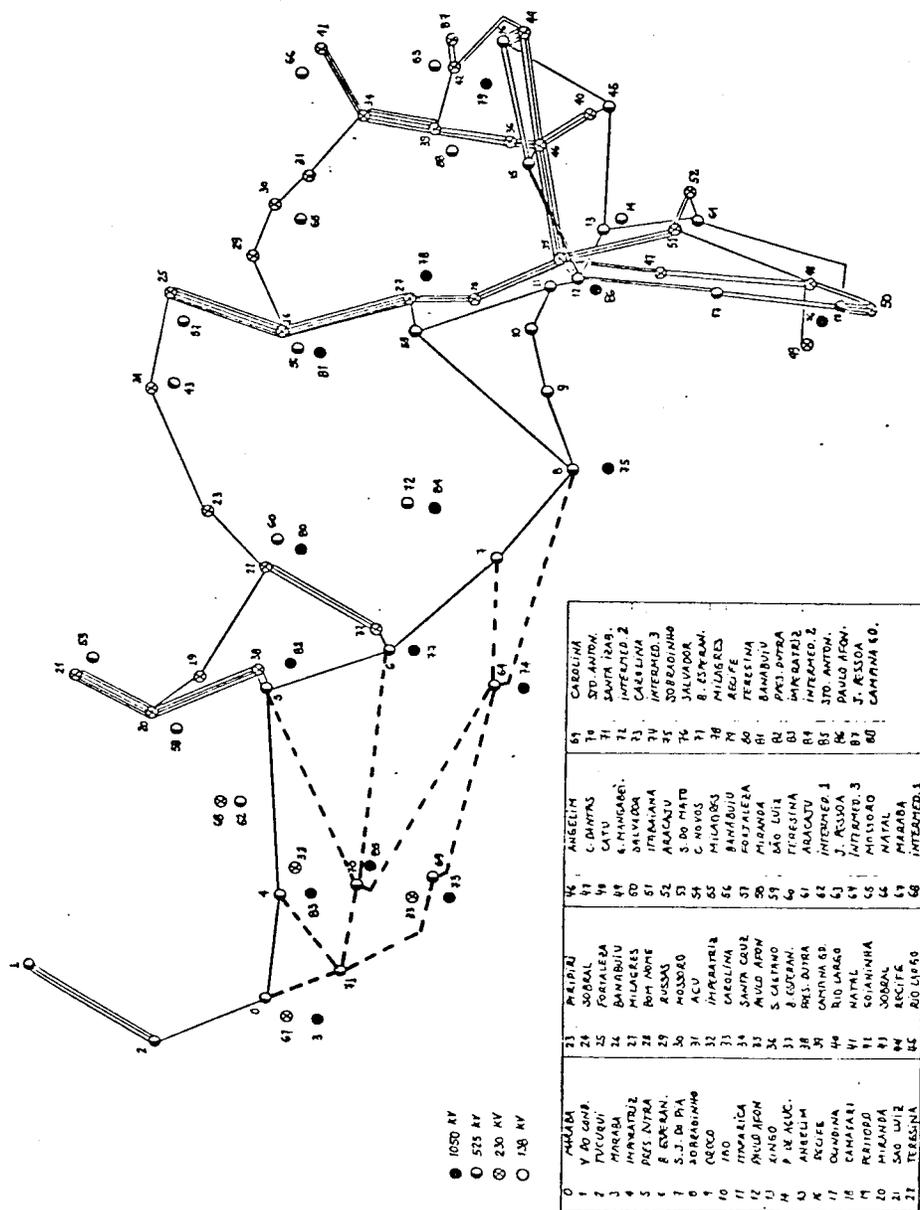


Figura 5.1. Ilustração de caminhos elétricos que podem ser criados utilizando os circuitos em pontilhado para interligar nós desconectados à rede.

ção fictícia i no caso base, seja grande, como ocorre quando há carga/geração desconectada, este circuito estará muito mal classificado na lista ordenada, não sendo escolhido para iniciar um caminho. Isto indica que este Critério privilegia a duplicação ou então a construção de caminhos de um circuito apenas; ou seja, permite apenas o reforço da rede existente.

5.2. Critério Aproximado de Mínimo Esforço

Este critério apresentou resultados satisfatórios tanto para os custos quanto para os esforços computacionais. Em relação ao Critério Exato de Mínimo Esforço o desempenho do Critério Aproximado é excelente, principalmente para a rede NORTE-NORDESTE, com horizonte distante. A explicação para o bom desempenho deste critério nos casos onde o Critério Exato falhou é vista a seguir |13|.

O Índice de Desempenho de Mínimo Esforço utilizado no Critério Aproximado de Mínimo Esforço dado pela equação (3.21)

$$\Delta ID_i = - \frac{1}{2} \psi_i^2 \Delta \gamma_i$$

é uma análise incremental e, portanto, linear em relação às variações nas susceptâncias. Assim, para a adição de um caminho com k circuitos tem-se:

$$\Delta ID (\Delta \gamma_1, \Delta \gamma_2, \dots, \Delta \gamma_k) = - \frac{1}{2} (\psi_1^2 \Delta \gamma_1 + \psi_2^2 \Delta \gamma_2 + \dots + \psi_k^2 \Delta \gamma_k) \quad (5.1)$$

ou seja, para o Critério Aproximado de Mínimo Esforço vale o

princípio de superposição

$$f(\Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_k) = f(\Delta\delta_1) + f(\Delta\delta_2) + \dots + f(\Delta\delta_k) \quad (5.2)$$

o que para o Critério Exato de Mínimo Esforço nem sempre vale, porque há casos em que $f(\Delta\delta_i) = 0$ para $i = 1, 2, \dots, k$ e $f(\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 + \dots + \Delta\delta_k) \neq 0$.

O Critério Aproximado de Mínimo Esforço permite, portanto, o estudo dos caminhos com nós ainda não interligados à rede o que não acontece com o Critério Exato de Mínimo Esforço. Como para anos-horizonte distantes (como é o caso da rede NORTE-NORDESTE) há a necessidade de interligar nós ainda desconectados à rede, o Critério Aproximado de Mínimo Esforço permite o estudo de caminhos envolvendo esses nós, fornecendo conseqüentemente bons resultados, enquanto o Critério Exato de Mínimo Esforço em alguns casos nem chega a fornecer solução.

5.3. Critério de Sobrecarga

Exceto em um caso para a Rede SUL, onde o custo da síntese resultou anormal, e em dois casos para a Rede NORTE-NORDESTE, um que não foi possível obter solução e outro com tempo de CPU anormal, os resultados obtidos com o Critério de Sobrecarga podem ser considerados satisfatórios.

Para este Critério embora o volume de cálculos necessá

rios para a obtenção de ΔIS_i na equação (3.38) seja grande, se comparado com o Critério Aproximado de Mínimo Esforço, os esforços computacionais requeridos para as sínteses de ambos os critérios são comparáveis.

Isto evidencia que a lista ordenada produzida pelo Critério de Sobrecarga é melhor que aquela produzida pelo Critério Aproximado de Mínimo Esforço. Desta forma são adicionados menos circuitos supérfluos na Fase de Adições e consequentemente é requerido um tempo menor para realizar a Fase de Retiradas, o que compensa o tempo adicional (em relação ao Critério Aproximado de Mínimo Esforço) gasto para calcular ΔIS_i .

5.4. Critério de Sensibilidade

Os resultados obtidos com o Critério de Sensibilidade para a Rede SUL foram em média, semelhantes aos dos Critérios de Sobrecarga e Aproximado de Mínimo Esforço, com exceção de um caso onde tanto o custo quanto o esforço computacional da síntese foram anormais.

Para a Rede NORTE-NORDESTE, os resultados foram surpreendentes pois chegaram a competir com o sistema SINTRA, no que se refere aos custos das sínteses. Já o esforço computacional foi o menor dentre os critérios testados, embora fosse maior que o do Sistema SINTRA.

Este Critério, assim como o de Sobrecarga, apesar de ser calculado a partir do caso base requer alguns cálculos adicionais que já foram apresentados no item (3.6.1) e basicamente são:

. Cálculo de $\sum_{i=1}^M w_i e_i = \underline{a}$

. Cálculo de $Z \underline{a} = \underline{b}$

Sem dúvida estes cálculos requerem um esforço computacional adicional em relação ao Critério Aproximado de Mínimo Esforço, que, assim como já foi mencionado para o Critério de Sobrecarga, é compensado pelo fato da Fase de Adições e da Fase de Retiradas requererem um tempo menor.

5.5. Comentários Finais

Como é de se esperar, a solução final, obtida por um programa com as características do utilizado para serem testados os critérios de ordenação, é função do conjunto de circuitos utilizados como início dos caminhos, como mencionado na seção 4.3. A razão é evidente na medida que não se busca a expansão ótima, como afirmado anteriormente. Procurando avaliar de uma outra maneira os critérios de ordenação, foram obtidas as sínteses conceituais da Rede SUL, com ano horizonte 1990, para os Critérios Aproximado de Mínimo Esforço, de Sobrecarga e de Sensibilidade, variando de 1 a 15 o número de circuitos do conjunto de partida pa

NPART	SENSIBILIDADE	SOBRECARGA	MÍNIMO ESFORÇO APROXIMADO
1	209131	182079	185337
2	209131	182079	213701
3	375155	190431	177942
4	343241	196929	177942
5	222569	196929	178576
6	230222	196929	196929
7	211458	196929	196929
8	182420	196929	210615
9	204857	196929	210615
10	182420	199758	184811
11	182420	222512	187887
12	230894	199758	187887
13	230894	188605	193531
14	193260	188605	193531
15	185337	188605	193531

Tabela 5.1 Custo (US\$) da síntese da rede da Região SUL do Brasil para o ano de 1990 utilizando conjuntos diferentes de circuitos (obtidos a partir do topo da lista) para início da construção de caminhos.

ra os caminhos. Na Tabela 5.1 verifica-se que, de fato, a solução final é sensível ao conjunto de circuitos iniciais utilizados na construção de caminhos. Isto significa que, a partir das listas ordenadas, a escolha do conjunto dos melhores circuitos não é única. No Sistema SINTRA $|8|$, por exemplo, esse conjunto de circuitos é obtido escolhendo-se os circuititos melhor classificados por categoria (normalmente 3 por categoria). Neste trabalho, além dessa maneira optou-se também por escolher simplesmente os circuitos melhor classificados na lista ordenada. Esta segunda maneira é melhor para avaliar os Critérios de Ordenação porque os circuitos do topo da lista são avaliados. Pela primeira maneira, como os circuitos são escolhidos por categoria, não necessariamente, todos os circuitos do topo da lista farão parte do conjunto selecionado para início da construção de caminhos.

Todos os Critérios de Ordenação considerados satisfatórios (Aproximado de Mínimo Esforço, Sobrecarga, Sensibilidade) podem ser usados num mesmo programa computacional. Isso dá maior flexibilidade ao programa pois podem ser obtidas várias soluções para cada ano de planejamento a um baixo custo computacional, permitindo assim elaborar diferentes estratégias de expansão da rede. Neste sentido é interessante notar que através do Critério de Sensibilidade podem ser obtidas várias soluções (para uma única maneira de escolher o conjunto de circuitos iniciais para Construção de Caminhos) escolhendo-se adequadamente os fatores de ponderação w_i da equação (3.43). Ao se fazer a ponderação, por exemplo, pode ser

atribuído um peso para um circuito sobrecarregado segundo a sua categoria, segundo a sua sobrecarga, segundo a sua sobrecarga relativa, etc. Estas ponderações darão prioridades diferentes às possíveis adições, levando a soluções diferentes.

Uma dificuldade encontrada neste trabalho foi quanto ao método utilizado para avaliar as listas ordenadas. Como já foi mencionado, para avaliar as listas ordenadas utilizou-se um programa computacional. A qualidade das listas é avaliada através do resultado final da Síntese (custo da síntese e esforço computacional) sendo tomados como referência os resultados fornecidos pelo SINTRA. Estes resultados, entretanto, dependem das particularidades de cada programa. Basta verificar que os resultados do SINTRA, que utiliza o Critério Aproximado de Mínimo Esforço, são melhores que os resultados obtidos utilizando-se o mesmo Critério no programa desenvolvido neste trabalho. É possível afirmar portanto que, para o particular método utilizado para avaliar os Critérios, aquele que apresentou melhor desempenho foi o de Sensibilidade e que o Mínimo Esforço Aproximado é comparável ao de Sobrecarga.

Uma avaliação mais profunda destes Critérios envolveria o desenvolvimento de programas computacionais com toda a sofisticação possível polarizada para cada Critério, entretanto, isso demandaria um tempo muito maior do que aquele que normalmente se dispõe para realizar um trabalho deste nível.

APÊNDICE A

FLUXO DE CARGA (POTÊNCIA) LINEARIZADO

As equações do Fluxo de Carga Linearizado são obtidas a partir de simplificações feitas nas equações do modelo completo.

A.1. Equações do Modelo Completo

As linhas e transformadores de uma rede de energia elétrica são representadas por um modelo π -equivalente como o mostrado na figura A.1, onde:

r_{k1} - resistência série

x_{k1} - reatância série

b_{k1}^{sh} - susceptância em derivação (shunt)

A corrente I_{k1} é calculada da seguinte maneira:

$$I_{k1} = (E_k - E_1) Y_{k1} + j b_{k1}^{sh} E_k \quad (A.1)$$

sendo:

E_k, E_1 - tensões das barras terminais k e 1;

Y_{k1} - admitância série.

As tensões E_k e E_1 são representadas como

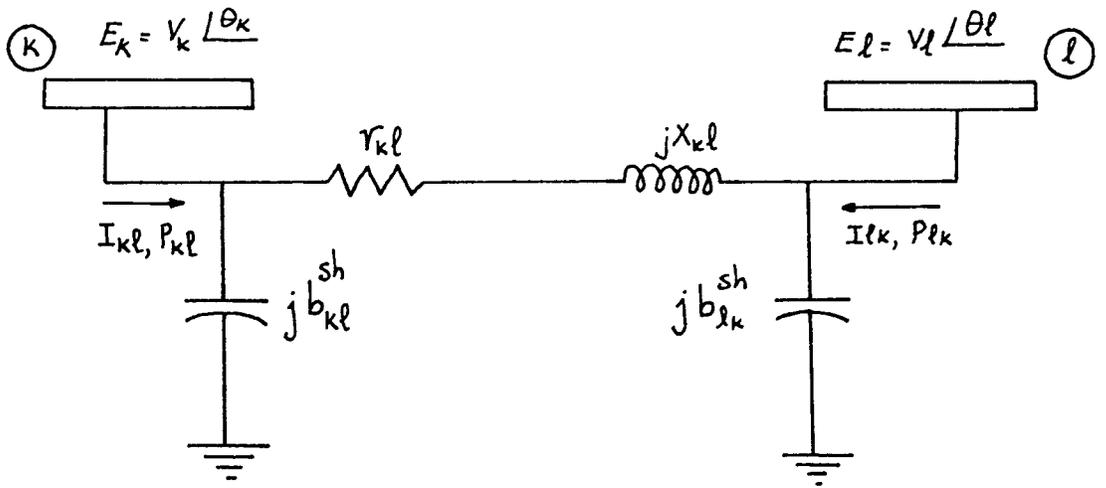


Figura A.1 Modelo π - Equivalente

$$E_k = v_k / \theta_k$$

$$E_1 = v_1 / \theta_1 \quad (A.2)$$

onde:

v_k, v_1 - magnitude das tensões das barras k e 1 ;

θ_k, θ_1 - ângulos das tensões das barras k e 1 .

A admitância série é dada por

$$Y_{k1} = \hat{y}_{k1}^{-1} = g_{k1} + j b_{k1}$$

sendo:

$$g_{k1} = \frac{r_{k1}}{r_{k1}^2 + x_{k1}^2}$$

$$b_{k1} = - \frac{x_{k1}}{r_{k1}^2 + x_{k1}^2}$$

$$z_{k1} = r_{k1} + j x_{k1}$$

A potência ativa P_{k1} é dada por

$$P_{k1} = \text{Real} \left[E_k I_{k1}^* \right] \quad (A.3)$$

Identificando-se a parte real de $E_k I_{k1}^*$ na equação (A.3),
obtém-se:

$$P_{k1} = V_k^2 g_{k1} - V_k V_1 g_{k1} \cos \theta_{k1} - V_k V_1 b_{k1} \sin \theta_{k1}$$

(A.4)

onde:

$$\theta_{k1} = \theta_k - \theta_1 - \text{abertura angular entre as barras } k \text{ e } 1.$$

A.2. Equações do Fluxo de Carga Linearizado

As equações do Modelo Linearizado de Fluxo de Carga (Potência) são obtidas aplicando-se as seguintes hipóteses simplificadoras às equações do Fluxo de Carga AC:

- i - as magnitudes das tensões são consideradas constantes e iguais a 1,0 p.u.;
- ii - a reatância x_{k1} e a resistência r_{k1} da ligação k-1 são tais que $x_{k1} \gg r_{k1}$;
- iii - as aberturas angulares nas ligações são tais que é possível fazerem-se as seguintes aproximações:

$$\sin \theta_{k1} \cong \theta_{k1}$$

$$\cos \theta_{k1} \cong 1,0$$

Aplicando-se as hipóteses i a iii sobre a equação (A.4) obtém-se:

$$P_{k1} = \frac{1}{x_{k1}} (\theta_k - \theta_1) \quad (A.5)$$

O termo $(1/x_{k1})$ é normalmente denominado de capacidade de transmissão de uma linha ou de um transformador (em p.u.) e é representado por:

$$\gamma_{k1} = \frac{1}{x_{k1}} \quad (A.6)$$

Considerando-se uma rede com N barras, as injeções líquidas de potência ativa para as (N-1) barras independentes são escritas como

$$P_k = \sum_{1 \in \Omega_k} \gamma_{k1} (\theta_k - \theta_1) \quad (A.7)$$

$$k = 1, 2, \dots, (N-1)$$

onde Ω_k é o conjunto de barras que se ligam à barra k .

O sistema de equações (A.7) pode ser reescrito como

$$\underline{P} = \underline{B} \underline{\theta} \quad (A.8)$$

onde:

\underline{P} - é o vetor de injeções líquidas de potência ativa;

$\underline{\theta}$ - é o vetor de ângulos nodais das (N-1) barras independentes;

\mathbf{B} - matriz capacidade, construída da seguinte maneira:

. elementos da diagonal

$$B_{kk} = \sum_{1 \in \Omega_k} \gamma_{k1}$$

Ω_k é o conjunto dos circuitos que se ligam à barra k

. elementos fora da diagonal

$$B_{k1} = -\gamma_{k1}$$

$$1 \neq k$$

Costuma-se interpretar |18| a relação $\underline{\mathbf{p}} = \mathbf{B} \underline{\theta}$ como sendo o modelo de uma rede de resistores alimentada por fontes de corrente contínua, onde $\underline{\mathbf{p}}$ é o vetor de injeções de corrente, $\underline{\theta}$ é o vetor de tensões nodais e \mathbf{B} é a matriz admitância (condutância) nodal. Desta forma, todas as propriedades válidas para circuitos em corrente contínua valem para o modelo linearizado.

APÊNDICE B

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade aqui desenvolvida tem por objetivo determinar como varia a abertura angular de um circuito devido à adição (ou retirada) de outro circuito à rede.

Seja um sistema descrito no caso base por:

$$\underline{B}^{\circ} \underline{\theta}^{\circ} = \underline{P} \quad (\text{B.1})$$

A adição (ou retirada) de um circuito à rede provoca variações na matriz capacidade de transmissão (B°) e nos ângulos das tensões nodais, sendo as injeções mantidas constantes.

A nova situação pode ser representada pela equação:

$$\underline{B} \underline{\theta} = \underline{P} \quad (\text{B.2})$$

sendo:

$$\underline{B} = \underline{B}^{\circ} + \Delta \underline{B} \quad (\text{B.3})$$

$$\underline{\theta} = \underline{\theta}^{\circ} + \Delta \underline{\theta} \quad (\text{B.4})$$

Substituindo-se (B.3) e (B.4) em (B.2) e considerando-se (B.1) obtém-se:

$$\underline{B}^{\circ} \Delta \underline{\theta} + \Delta \underline{B} \underline{\theta}^{\circ} + \Delta \underline{B} \Delta \underline{\theta} = 0 \quad (\text{B.5})$$

Desprezando-se o termo de segunda ordem, vem:

$$B^{\circ} \underline{\Delta\theta} \cong -\Delta B \underline{\theta}^{\circ} \quad (\text{B.6})$$

onde,

$$\Delta B = -\underline{e}_i \Delta\delta_i^t \underline{e}_i^t \quad (\text{B.7})$$

$$\underline{e}_i = \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \vdots \\ \hline +1 \\ \hline \vdots \\ \hline -1 \\ \hline \vdots \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} m \\ \\ n \\ \end{array}$$

m, n são respectivamente os nós inicial e final do circuito.

$\Delta\delta_i^t$ - susceptância do circuito i adicionado à rede.

Substituindo (B.7) em (B.6) e rearranjando termos chega-se a:

$$\underline{\Delta\theta} = - (B^{\circ})^{-1} \underline{e}_i \Delta\delta_i^t \underline{e}_i^t \underline{\theta}^{\circ} \quad (\text{B.8})$$

Definindo $\underline{z} = (B^{\circ})^{-1}$ pode-se reescrever a equação (B.8) como:

$$\underline{\Delta\theta} = - \underline{z} \underline{e}_i \Delta\delta_i^t \underline{e}_i^t \underline{\theta}^{\circ} \quad (\text{B.9})$$

A variação da abertura angular de um circuito K pode ser escrita como:

$$\Delta\psi_k = \underline{e}_k^t \underline{\Delta\theta} \quad (\text{B.10})$$

Substituindo-se (B.10) em (B.9) obtém-se :

$$\Delta \psi_k \cong - \underline{e}_k^t Z \underline{e}_i \underline{e}_i^t \underline{\theta}^o \Delta \delta_i \quad (\text{B.11})$$

Considerando-se que $\underline{e}_i^t \underline{\theta}^o = \psi_i$ a equação (B.11) torna-se:

$$\Delta \psi_k \cong - \underline{e}_k^t Z \underline{e}_i \psi_i \Delta \delta_i \quad (\text{B.12})$$

e portanto,

$$\frac{\partial \psi_k}{\partial \delta_i} = - \underline{e}_k^t Z \underline{e}_i \psi_i \quad (\text{B.13})$$

APÊNDICE C

Fluxo de Carga (Potência) Linearizado com Rede Fictícia

Neste Apêndice apresenta-se, de maneira resumida o procedimento adotado para tornar possível o cálculo do Fluxo de Carga Linearizado quando há barras desconectadas da rede. Este procedimento foi apresentado nas referências [6, 10, 12] .

No planejamento a longo prazo, quando se considera a configuração da rede de um ano inicial e as injeções de potência de um ano futuro, verifica-se que existem barras desconectadas da rede. Nesta situação não é possível obter a solução do Fluxo de Carga (Potência) Linearizado ($\underline{\theta} = \underline{B}^{-1} \underline{p}$) porque a matriz \underline{B} é singular.

Para superar este problema, como proposto nas referências [7, 10], é superposta à rede original uma rede "fictícia" que é composta de circuitos com reatâncias muito maiores que as normais, colocadas em todos os ramos onde é permitida a adição de novos componentes (linhas ou transformadores). O valor das reatâncias dos "circuitos fictícios" adotado é de 10^4 vezes o valor das reatâncias dos circuitos possíveis de serem adicionados correspondentes. O fator 10^4 é escolhido de tal forma a garantir a não singularidade da matriz \underline{B} nos casos em que há barras desconectadas da rede e, não afetar de modo significativo a distribuição dos fluxos de potência ativa em situações normais. Além disto como a capacidade de transmissão dos circuitos fictícios é 10^{-4} vezes a da capacidade normal, a rede fictícia só se

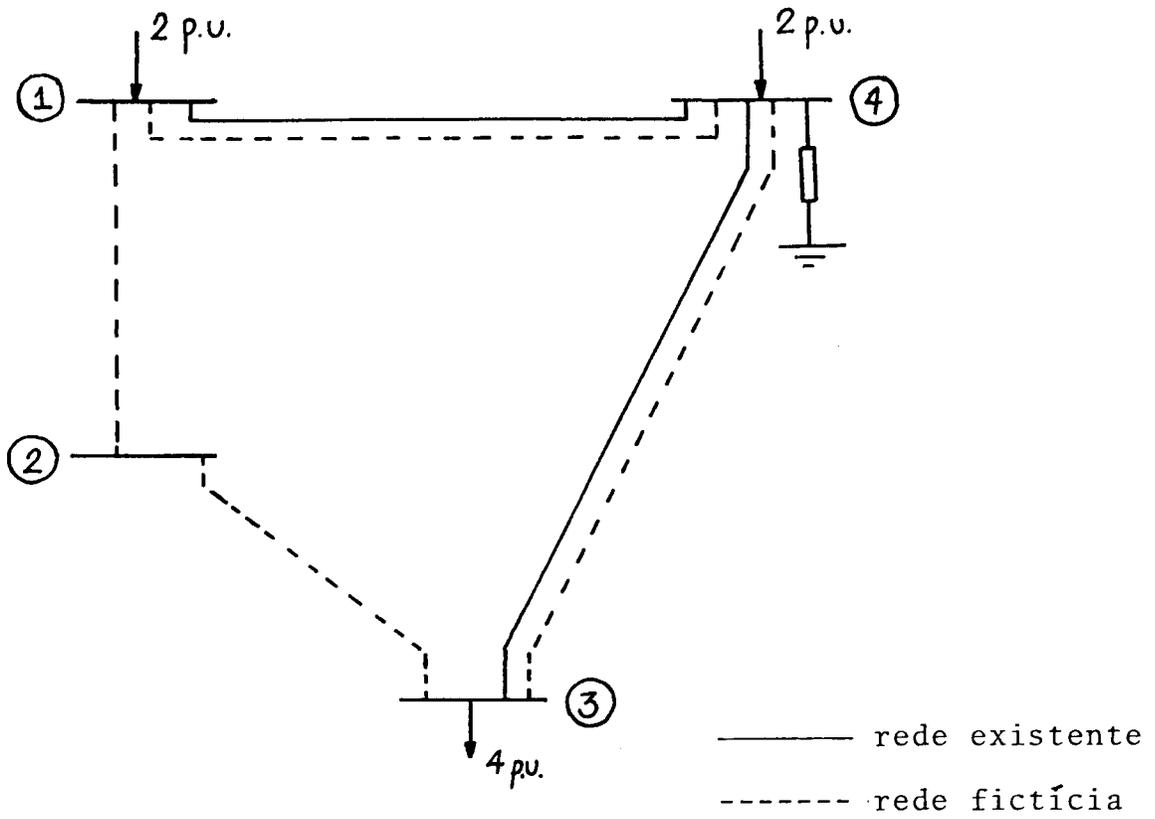
rã utilizada quando não for possível o transporte de potência pela rede existente. Esta informação pode ser utilizada, por exemplo, na elaboração da lista ordenada das adições mais atraentes.

Para ilustrar o que foi afirmado é utilizado o sistema da referência [14].

Para esta rede, se forem considerados apenas os circuitos existentes, é imediato verificar que a matriz B é singular e, portanto, não é possível obter a solução do Fluxo de Carga Linearizado. Se for considerada a rede fictícia (e tomando a barra 4 como de referência) tem-se a matriz B dada por:

	1	2	3	
B =	1,0005	- 0,0004	0	1
	- 0,0004	0,0008	- 0,0004	2
	0	- 0,0004	1,0005	3

Esta matriz, por sua vez, é não-singular o que permite obter a solução do Fluxo de Carga (Potência) Linearizado ($\underline{\theta} = B^{-1} \underline{P}$). A matriz B^{-1} e os ângulos nodais ($\underline{\theta}$) são dados a seguir:



Reatâncias dos circuitos (p.u.)				
	X_{12}	X_{23}	X_{34}	X_{14}
Rede existente	-	-	1,0	1,0
Adições possíveis	0,25	0,25	1,0	1,0
Rede fictícia	$0,25 \times 10^4$	$0,25 \times 10^4$	$1,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^4$

Figura C.1. Rede da referência | 14 |

$$B^{-1} =$$

1,0	0,5	0,0002
0,5	1251,2	0,5
0,0002	0,5	1,0

$$\theta_1 = 1,9992 \text{ rad}$$

$$\theta_2 = - 1,0 \text{ rad}$$

$$\theta_3 = - 3,9996 \text{ rad}$$

$$\theta_4 = 0,0 \text{ rad}$$

Os fluxos de potência nos circuitos podem ser calculados a partir da equação (A.5) e são dados a seguir:

Fluxos de potência na rede existente

$$P_{14} = 1,9992 \text{ pu}$$

$$P_{43} = 3,9996 \text{ pu}$$

Fluxos de potência na rede fictícia

$$P_{14} = 2,0 \times 10^{-4} \text{ pu}$$

$$P_{43} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ pu}$$

$$P_{12} = 1,2 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

$$P_{23} = 1,2 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

Como se observa pelos valores de fluxos de potência nos circuitos, neste caso foi possível o transporte de potência pela rede existente não sendo utilizada a rede fictícia. É interessante notar também, que a rede fictícia não afetou significativamente os fluxos da rede existente (os fluxos P_{14} e P_{43} esperados eram respectivamente 2,0 pu e 4,0 pu e os valores calculados foram 1,9992 pu e 3,9996 pu).

Para verificar o efeito da rede fictícia quando há barras com carga/geração desconectadas é adicionada uma injeção de potência na barra 2 devido a um aumento de carga na barra 3, como mostra a Figura C.2.

Os ângulos nodais para esta rede são:

$$\theta_1 = 2,9988 \text{ rad}$$

$$\theta_2 = 2500,4 \text{ rad}$$

$$\theta_3 = - 4,9996 \text{ rad}$$

$$\theta_4 = 0,0 \text{ rad}$$

Os fluxos de potência na rede existente são:

$$P_{14} = 2,9988 \text{ pu}$$

$$P_{43} = 4,9996 \text{ pu}$$

e na rede fictícia são:

$$P_{14} = 2,9988 \times 10^{-4} \text{ pu}$$

$$P_{43} = 4,9996 \times 10^{-4} \text{ pu}$$

$$P_{21} = 0,9990 \text{ pu}$$

$$P_{23} = 1,0022 \text{ pu}$$

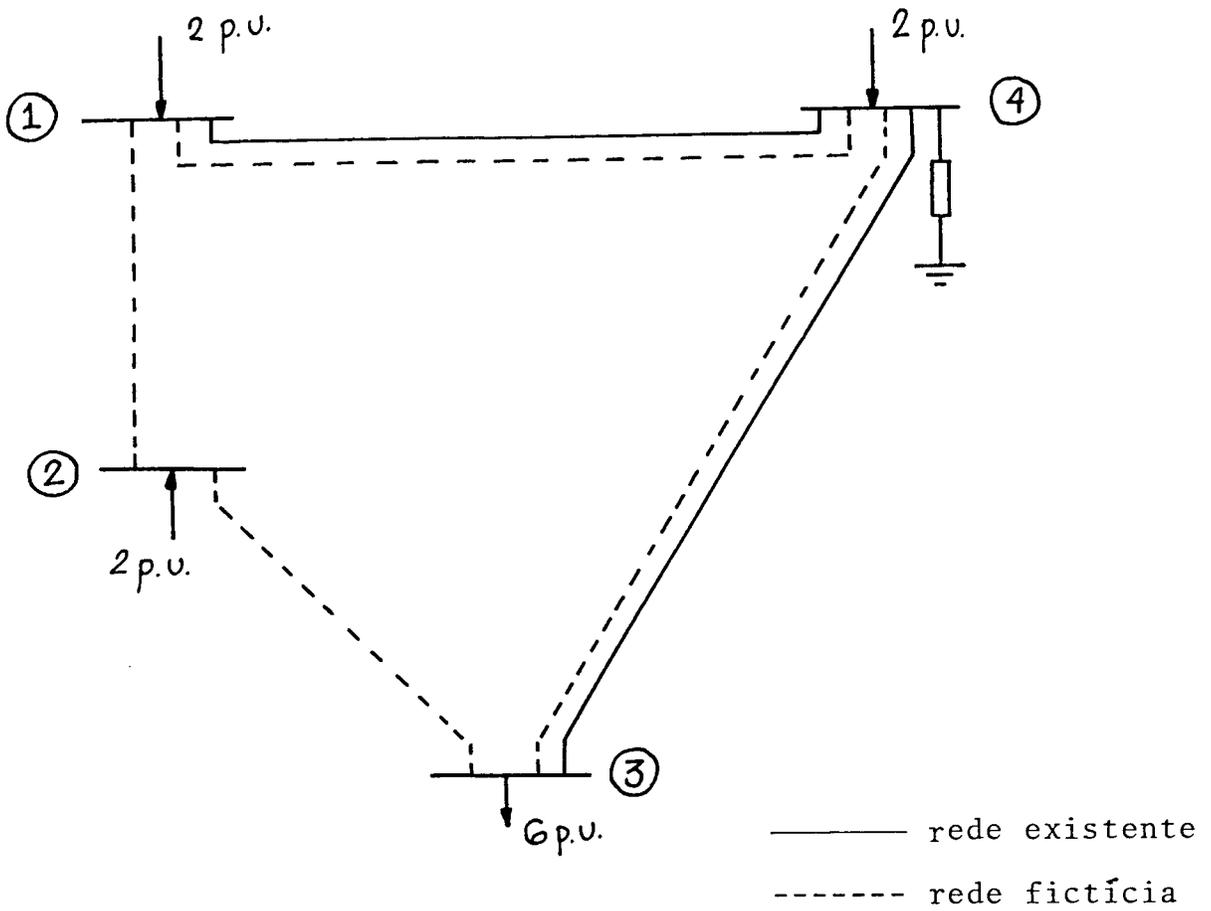


Figura C.2. Rede da referência |14| com as injeções das barras 2 e 3 alteradas.

Neste caso, pode ser observado que o transporte de potência da barra 2 foi feito pela rede fictícia (através dos circuitos 1-2 e 2-3) e isto confirma o que já era esperado, ou seja, o fato da rede existente não poder transportar a carga/geração da rede na configuração da Figura C.2.

A informação de que a rede fictícia está sendo utilizada para transportar a injeção de potência da barra 2, é utilizada na construção da lista ordenada e neste caso os circuitos (1-2) e (2-3) estarão bem classificados porque constituem a única opção de interligar a injeção de potência de barra 2 à rede existente.

REFERÊNCIAS

- |1| M.M. Baptista, A. Monticelli, "Síntese de Redes de Transmissão de Energia Elétrica", Relatório nº 1 da Bolsa de Mestrado da FAPESP, Campinas, 1982.
- |2| A. Santos Jr., A. Monticelli, A.V. Garcia e A.C. Lyra, "Um programa automático para síntese em um estágio de redes de transmissão baseado no critério do mínimo esforço", Relatório nº 4 do Convênio CEPEL/UNICAMP sobre Planejamento de Redes de Transmissão, Campinas, 1980.
- |3| A. Santos Jr., A. Monticelli, "Síntese Conceitual Estática de Redes de Transmissão considerando contingências", Campinas, 1981.
- |4| A. Monticelli, "Métodos de Análise e Síntese Aplicados ao Planejamento ao Longo Prazo de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica", Relatório nº 1 do Convênio CEPEL/UNICAMP sobre Planejamento de Redes de Transmissão, Campinas, 1979.
- |5| Nota Técnica do Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento da ELETROBRÁS, "Proposição de Metodologia e Modelos Para Estudos de Planejamento de Sistemas de Transmissão a Longo Prazo", setembro/79.
- |6| A. Santos Jr., "Síntese Conceitual Estática de Redes de

- Transmissão de Energia Elétrica", Tese de Mestrado, UNI
CAMP, 1981.
- |7| A. Monticelli & outros, "Interactive Transmission Net
work Planning Using a Least-Effort Criterion", IEEE
Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, p. 3919-3925, ou
tubro, 1982.
- |8| M.V.F. Pereira, S.H.F. Cunha, G.C. Oliveira, J.G. Praça,
B.J. Parker, A. Monticelli e A. Santos Jr. - "SINTRA-
Programa Digital Interativo para Planejamento de Redes
de Transmissão" - VI Seminário Nacional de Produção e
Transmissão de Energia Elétrica - Balneário de Camboriu
1981.
- |9| C.A. Desoer & E.S. Kuh, Basic Circuit Theory, Mc Graw-
Hill Book Company, Tokyo, 1969.
- |10| A. Monticelli, "Expansão de Sistemas Elétricos de Potên
cia: Um Algoritmo Para o Planejamento do Sistema de
Transmissão", Tese de Doutorado, Campinas, 1975.
- |11| A. Monticelli, "Análise Estática de Contingências em
Sistemas de Energia Elétrica", Tese de Livre-Docência,
Campinas, 1980.
- |12| A. Santos Jr., A. Monticelli, "Síntese Interativa de Re
des de Transmissão - Subrotinas Básicas e Programa Pro

visório", Relatório nº 3 do Convênio CEPEL/UNICAMP sobre Planejamento de Redes de Transmissão, Campinas, 1980.

- |13| A.V. Garcia, A. Monticelli, M.M. Baptista, "Aperfeiçoamento dos Algoritmos de Compensação para Adições/Retiradas Múltiplas", Relatório nº 7 do Convênio CEPEL/UNICAMP sobre Planejamento de Redes de Transmissão, Campinas, 1982.

- |14| M.M. Baptista, A.V. Garcia, "Síntese de Redes de Transmissão de Energia Elétrica", Relatório nº 2 da Bolsa de Mestrado da FAPESP, Campinas, 1983.

- |15| G.C. Ejebe & B.F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", IEEE Trans. Power App. Syst., VOL. PAS-98, p. 97-109, Jan/Fev, 1979.

- |16| L.L. Garver, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming", IEEE Trans. Power App. Syst., VOL. PAS-89, p. 1688-1697, Set/Out, 1970.

- |17| G. Irisarri, A.M. Sasson e D. Levner, "Automatic Contingency Selection for On-Line Security Analysis: Real-Time Tests", IEEE Trans. Power App. Syst., VOL. PAS-98, p. 1552-1559, Set/Out, 1979.

- |18| A. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1983.