

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

SÍNTESE CONCEITUAL ESTÁTICA DE REDES
DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

ANESIO DOS SANTOS JUNIOR

11/81

Orientador: ALCIR JOSÉ MONTICELLI

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

ABRIL DE 1981

Sa59s

3953/BC

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

AGRADECIMENTOS

A todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho e em especial

a Alcir Monticelli pela orientação

a Ariovaldo Garcia pelo apoio no que diz respeito à utilização de técnicas computacionais

a Sigmar Deckmann pelas discussões sobre índices de desempenho de redes

a Ana C. Lyra pela avaliação crítica dos dados disponíveis sobre carregamentos limites de linhas e

a Nilza Galindo pelo trabalho de datilografia.

Este trabalho é uma extensão de um Projeto conjunto (UNICAMP/CEPEL/ELETROBRÁS) sobre Planejamento de Redes de Transmissão e contou com o apoio financeiro da ELETROBRÁS.

RESUMO

Este trabalho apresenta um método de Síntese Conceitual Estática de Redes de Transmissão que está implementado em um programa computacional interativo (conversacional) visando a realização dos estudos iniciais para o planejamento da expansão a longo prazo. Parte do programa computacional desenvolvido já está sendo utilizada pelo DEST - Departamento de Estudos de Sistemas de Transmissão da ELETROBRÁS em estudos com sistemas brasileiros. São apresentados resultados obtidos com os sistemas Sul e Norte/Nordeste do Brasil.

CONTEÚDO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO.....	1
-----------------	---

CAPÍTULO II

SÍNTESE CONCEITUAL DE REDES DE TRANSMISSÃO

2.1. Planejamento da Expansão a Longo Prazo de Sistemas de Transmissão.....	2
2.2. Síntese Conceitual de Redes de Transmissão.....	4
2.3. Características de um Programa Computacional para Síntese Conceitual de Redes de Transmissão.....	6

CAPÍTULO III

SÍNTESE CONCEITUAL ESTÁTICA

3.1. Modelo da Rede.....	8
3.1.1. Fluxo de Potência Linearizado (DC).....	9
3.1.2. Fluxo de Potência Linearizado com Rede Fictícia	12
3.2. Simulação de Alterações na Configuração da Rede.....	14
3.3. Critério para Seleção de Adições Atraentes.....	17
3.3.1. Propriedade de Mínimo Esforço do Fluxo de Potência Linearizado.....	17
3.3.2. Seleção de Adições Atraentes pelo Critério de Mínimo Esforço.....	19

3.4. Método para Síntese Conceitual Estática.....	22
3.4.1. Fase de Adições de Novos Componentes.....	22
3.4.2. Fase de Retiradas de Componentes Supérfluos....	25
3.4.3. Fase de Reforço para Situações de Contingências	27

CAPÍTULO IV

TESTES E RESULTADOS

4.1. Sistema Sul do Brasil.....	30
4.2. Sistema Norte/Nordeste do Brasil.....	31

CAPÍTULO V

COMENTÁRIOS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	43
---	----

APÊNDICE A

MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA LINEARIZADO

A.1. Fluxo de Potência Ativa em Linhas e Transformadores...	45
A.2. Modelo Linearizado.....	48
A.3. Modelo Linearizado com Perdas.....	49

APÊNDICE B

ALTERAÇÕES NA CONFIGURAÇÃO DA REDE

B.1. Alterações na Matriz B.....	52
B.2. Análise de Sensibilidade.....	53

APÊNDICE C

ORDENAÇÃO DE ALTERAÇÕES NA CONFIGURAÇÃO DA REDE

C.1. Propriedade de Mínima Potência Dissipada em Redes Resistivas.....	56
C.2. Analogia entre os Modelos de Fluxo de Potência Linearizado em uma Rede Resistiva.....	61
C.3. Variação de Z devido a Alteração na Rede.....	62
REFERÊNCIAS.....	65

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um método de Síntese Conceitual Estática de Redes de Transmissão visando o planejamento da expansão a longo prazo.

O Capítulo II formula de um modo geral o problema do planejamento da expansão a longo prazo de sistemas de transmissão e analisa o papel de métodos que, em fases preliminares dos estudos, realizam a Síntese Conceitual (Estatica ou Dinâmica).

O Capítulo III apresenta as técnicas de análise utilizadas bem como o método de Síntese Conceitual Estática desenvolvido.

O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos com dois sistemas brasileiros.

No Capítulo V comentam-se os resultados obtidos e indicam-se perspectivas para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO II

SÍNTESE CONCEITUAL DE REDES DE TRANSMISSÃO

Os planos de expansão a longo prazo de sistemas de energia elétrica são constituídos de dois programas básicos:

- . expansão do sistema de geração;
- . expansão do sistema de transmissão;

que são obtidos através de metodologias específicas para um dado período de planejamento.

O planejamento da expansão do sistema de geração é feito a partir das estimativas para o crescimento da demanda e das possibilidades de construção de novas usinas. O planejamento da expansão do sistema de transmissão é feito a partir dos planos de expansão do sistema de geração, das estimativas para o crescimento da demanda e das possibilidades de construção de novas linhas.

2.1. Planejamento da Expansão a Longo Prazo de Sistemas de Transmissão

O planejamento da expansão a longo prazo de sistemas de transmissão visa determinar onde, quando e que tipos de equipamentos devem ser instalados ao longo do período, de modo a satisfazer as necessidades do mercado de energia elétrica dentro de certas es

pecificações de qualidade nos serviços, com o menor custo possível. Os planos de longo prazo são utilizados de forma indicativa para os estudos de médio e curto prazos.

Nas fases iniciais dos estudos de longo prazo, quando são considerados os níveis de geração/demanda futuros na rede de transmissão do ano inicial do planejamento, o cálculo da distribuição dos fluxos pelos métodos exatos de fluxo de potência eventualmente pode tornar-se impossível, pois a violação nos limites de estabilidade estática nas linhas e/ou problemas com potência reativa podem inviabilizar a convergência do processo iterativo de resolução. Uma outra dificuldade é que freqüentemente surgem barras desconectadas da rede devido, por exemplo, à introdução de novas usinas ou ao aparecimento de novas cargas. As dificuldades apontadas acima, a precisão dos dados utilizados e a limitação de tempo para execução dos programas computacionais sugerem a utilização de técnicas rápidas e modelos simplificados nas fases iniciais dos estudos para o planejamento a longo prazo da transmissão. Neste trabalho é utilizada uma versão modificada do fluxo de potência DC (linearizado) que resolve situações de desconexidade na rede. Alguns autores sugerem também a utilização de modelos de transporte baseados na Programação Linear [1].

Em fases mais avançadas dos estudos de longo prazo, quando já se dispõem de alternativas de baixo custo para a expansão do sistema de transmissão, análises mais detalhadas devem ser efetua-

das utilizando-se técnicas mais precisas como Fluxo de Potência AC, Estabilidade e Curto-circuito. Essas análises fornecem uma avaliação mais criteriosa das alternativas apresentadas pelos estudos iniciais.

2.2. Síntese Conceitual de Redes de Transmissão

Os estudos iniciais para o planejamento a longo prazo da transmissão baseados em técnicas de análise rápidas e modelos simplificados, são denominados de Síntese Conceitual de Redes de Transmissão e têm por objetivo apresentar alternativas de baixo custo para a expansão do sistema que satisfaçam a critérios de desempenho especificados. Na síntese conceitual o desempenho da rede é avaliado verificando se os fluxos de potência ativa estão abaixo dos limites permitidos, se todas as cargas estão sendo atendidas e se todas as barras de geração estão conectadas à rede. Esses critérios de desempenho devem levar em conta situações de contingências de linhas e transformadores. Os dados necessários para a síntese conceitual são: rede do ano inicial, injeções líquidas de potência ativa (geração menos demanda) para o período que vai do ano inicial até o ano final do planejamento e o conjunto de linhas de transmissão e transformadores que podem ser instalados durante esse mesmo período.

Os planos preliminares para a expansão do sistema de transmissão (síntese conceitual) são obtidos utilizando-se métodos que, a partir da rede de um ano inicial, determinam um conjunto de adições de novas linhas e transformadores que tornem possível o

transporte dos fluxos de potência correspondentes aos níveis de geração/demanda de um ano especificado, satisfazendo a critérios de desempenho e custos. Esses métodos de expansão em um estágio são denominados de "síntese conceitual estática" e devem realizar basicamente duas tarefas:

- . avaliar o desempenho da rede;
- . selecionar e efetuar as adições mais atraentes de linhas e transformadores.

Um plano de expansão da rede ao longo do tempo, obtido através de um método denominado de "síntese conceitual dinâmica", é conseguido através de uma série de estudos em um estágio (síntese conceitual estática). Um exemplo disso é a idéia utilizada no método da G.E. [2] e que consiste dos seguintes passos:

- i - expande a rede inicial em um estágio para os níveis de geração/demanda do ano horizonte do planejamento;
- ii - expande a rede inicial considerando os níveis de geração/demanda dos anos intermediários, polarizando a adição de novos componentes em relação à solução obtida para o ano horizonte (i).

Até o presente, a busca de uma estratégia ótima para a expansão de sistemas de transmissão através de métodos inteiramente automáticos, baseados em técnicas de otimização conhecidas, tem se mostrado inviável principalmente em sistemas com grandes dimen

sões. Por outro lado, existem os métodos interativos através dos quais a síntese conceitual é feita com a intervenção do planejador, o que permite a consideração de critérios de ordem prática que dificilmente poderiam ser modelados utilizando-se as técnicas usuais de otimização. Isso não impede no entanto que, na medida em que a experiência comprove a viabilidade de certos procedimentos, estes venham a ser mecanizados. No estágio atual, o procedimento mais indicado para a síntese conceitual de redes de transmissão é do tipo semi-automático com a tendência a um maior grau de automatização, na medida em que aumente a experiência com um maior número de casos estudados.

2.3. Características de um Programa Computacional para Síntese Conceitual de Redes de Transmissão

A seguir são feitas algumas considerações a respeito de um programa computacional de síntese conceitual de redes de transmissão. São apontadas também as tarefas básicas que o programa deve efetuar.

A característica fundamental de um programa de síntese conceitual de redes é que deve permitir, durante sua execução, a interferência do planejador de modo a considerar, na evolução da síntese, critérios de planejamento não previstos nas técnicas implementadas ou dados específicos sobre o caso em estudo como por exemplo necessidades futuras do sistema.

As técnicas de análise utilizadas devem ser rápidas de modo a permitir a utilização do programa em forma interativa (conversacional) entre planejador e máquina; e devem possibilitar a realização das seguintes tarefas:

- . seleccionar de acordo com algum critério as mais atraentes adições de linhas e transformadores;
- . simular adições seleccionadas verificando o impacto no desempenho do sistema;
- . estimar a distribuição dos fluxos possibilitando um critério de desempenho do sistema;
- . seleccionar as contingências mais severas;
- . simular contingências de linhas e transformadores verificando o impacto causado no desempenho do sistema.

CAPÍTULO III

SÍNTESE CONCEITUAL ESTÁTICA

Neste capítulo é apresentado um método de síntese conceitual estática (um estágio) de redes de transmissão que tem como base um modelo de fluxo de potência linearizado (DC). O método está implementado em um programa computacional interativo (conversacional) e a experiência com alguns estudos possibilitaram a automação de determinados procedimentos. Parte do programa já está sendo utilizada pelo DEST da Eletrobrás em estudos para o planejamento a longo prazo da expansão de sistemas brasileiros. O método de síntese, em sua concepção geral, pode ser dividido em três fases:

- . Fase de adições de novos componentes;
- . Fase de retiradas de componentes supérfluos;
- . Fase de reforço para situações de contingências.

3.1. Modelo da Rede

Os métodos clássicos de cálculo de fluxo de potência AC podem não oferecer solução em situações nas quais se consideram uma rede com sua topologia atual e as injeções de potência correspondentes a um ano futuro (isto pode ocorrer mesmo considerando todas as barras como sendo do tipo PV, e portanto eliminando-se os problemas com potência reativa). A razão disso é que em determinadas

situações a rede pode não ter capacidade de transmissão correspondente às injeções de potência do ano futuro o que inviabiliza a convergência do processo iterativo de resolução. Nesse caso qualquer solução para a distribuição dos fluxos no sistema apresentará violações nos limites de estabilidade estática. Uma outra dificuldade que surge freqüentemente é a possível desconexão entre áreas da rede, quando entre elas existe a necessidade de transporte de potência. Essas duas dificuldades podem ser superadas adotando-se, para a estimação da distribuição de fluxos na rede, um modelo linearizado para o cálculo de fluxo de potência conjuntamente com um artifício que elimina as possíveis desconexões.

3.1.1. Fluxo de Potência Linearizado (DC)

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

$$B \underline{\theta} = \underline{P} \quad (3.1)$$

onde

B - matriz capacidade de transmissão,

dimensão = $(N - 1 \times N - 1)$;

$\underline{\theta}$ - 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 dados pelas relações

$$\begin{aligned} B_{kl} &= -Y_{kl} \\ B_{kk} &= \sum_{l \in \Omega_k} Y_{kl} \end{aligned} \quad (3.2)$$

onde:

Y_{kl} - capacidade de transmissão do ramo kl ;

Ω_k - conjunto das barras que se ligam à barra k .

Com a solução $\underline{Q}$, do sistema linear (3.1), estimam-se os fluxos de potência ativa nas linhas e transformadores através da relação

$$\begin{aligned} P_{kl} &= Y_{kl} (\theta_k - \theta_l) \\ kl &\in \Omega \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde:

P_{kl} - fluxo de potência ativa no elemento kl ;

Y_{kl} - capacidade de transmissão do elemento kl ;

θ_k - componente k do vetor $\underline{Q}$;

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. Isso pode ser feito utilizando-se uma primeira solução de (3.1), designada por $\underline{\tilde{\theta}}$, com a qual calculam-se aproximadamente as perdas de transmissão, em todos os elementos da rede, através da expressão

$$L_{kl} = g_{kl} (\tilde{\theta}_k - \tilde{\theta}_l)^2 \quad (3.4)$$

$kl \in \Omega$

onde:

L_{kl} - perdas no elemento kl ;

g_{kl} - condutância do elemento kl ;

$\tilde{\theta}_k$ - componente k do vetor $\underline{\tilde{\theta}}$.

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

$$P'_k = P_k - \frac{1}{2} \sum_{l \in \Omega_k} g_{kl} (\tilde{\theta}_k - \tilde{\theta}_l)^2 \quad (3.5)$$

onde:

P'_k - componente k do vetor $\underline{P'}$;

P_k - componente k 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

$$B \cdot \underline{\theta} = \underline{P}' \quad (3.6)$$

seguida do cálculo dos fluxos nos elementos através das relações (3.3).

3.1.2. Fluxo de Potência Linearizado com Rede Fictícia

O modelo de fluxo de potência linearizado (DC), embora obtido sob hipóteses que não são satisfeitas em determinadas situações (fase inicial da síntese com a rede ainda desconexa) pode ser utilizado no cálculo da distribuição dos fluxos e fornecer critérios que indicam as áreas onde se localizam as insuficiências na capacidade de transmissão da rede. Quando se consideram as injeções de potência de um ano futuro conjuntamente com a configuração da rede de um ano inicial freqüentemente surgem desconexões entre áreas do sistema. Essa dificuldade é superada adotando-se, superposta à configuração do sistema, uma "rede fictícia" constituída de ligações com capacidade de transmissão igual a, por exemplo, 10^{-4} dos valores normais, colocadas em todos os ramos onde são permitidos o acréscimo de novos componentes (linhas ou transformadores). Dada a baixa capacidade de transmissão da rede fictícia ela só será utilizada quando não houver possibilidade de transporte de

potência pela rede real, ou seja, em situações de desconexidade onde houver necessidade de se transportar potência entre as ilhas que formam a rede. Quando isto ocorrer haverá uma indicação muito forte de sobrecarga na rede fictícia que será logo corrigida pelo acréscimo de novas linhas e transformadores. O valor de 10^{-4} da capacidade normal de uma ligação adotado para as linhas e transformadores da rede fictícia foi escolhido de tal forma a garantir a não singularidade da matriz B em situações de desconexidade e, em situações normais, não afetar de maneira significativa a distribuição dos fluxos.

A utilização da rede fictícia viabiliza a estimação da distribuição dos fluxos através do modelo de fluxo de potência linearizado cuja solução é utilizada no processo de síntese com as seguintes finalidades:

- . em todo processo de síntese fornece critérios de seleção das alterações mais atraentes na configuração da rede;
- . nas fases finais da síntese, quando a capacidade de transmissão da rede se torna compatível com os níveis de geração/demanda, apresenta a distribuição dos fluxos com razoável precisão fornecendo elementos para avaliação do desempenho do sistema.

3.2. Simulação de Alterações na Configuração da Rede

Nos estudos de síntese de redes de transmissão aparecem dois tipos de alterações que podem ser introduzidas na rede: alterações definitivas ou temporárias. As chamadas alterações definitivas correspondem a adição ou retirada de um componente e é considerada refatorando-se a matriz B. As chamadas alterações temporárias, que podem ser devidas à análise de contingências ou um teste de aceitação de novas adições, podem ser estudadas por um método bastante simples que mantém inalterados os fatores triangulares da matriz B como será descrito no que segue.

A alteração na distribuição dos fluxos devido a variação na capacidade de transmissão de um ramo da rede pode ser avaliada pela relação obtida da análise de sensibilidade entre o estado ($\underline{\theta}$) e os parâmetros da rede (Apêndice B). Considere-se uma configuração básica da rede com a qual estão associados um estado (θ^0) e uma matriz (B^0) relacionados por

$$B^0 \underline{\theta}^0 = \underline{P} \quad (3.7)$$

onde:

B^0 - matriz capacidade de transmissão associada com a configuração básica;

$\underline{\theta}^0$ - estado associado com a configuração básica.

A variação no estado ($\underline{\theta}^0$) devido a alteração na capacidade de transmissão de um ramo da rede pode ser calculada utilizando-se a relação

$$\underline{\Delta\theta} = - \frac{(\theta_k^0 - \theta_l^0)}{\Delta Y_{kl}^{-1} + \underline{e}_{kl}^t Z^0 \underline{e}_{kl}} Z^0 \underline{e}_{kl} \quad (3.8)$$

onde:

$\underline{\Delta\theta}$ - variação no estado devido uma alteração na configuração básica;

θ_k^0 - componente k. do vetor $\underline{\theta}^0$;

ΔY_{kl} - variação na capacidade de transmissão no ramo kl;

$Z^0 = B^0^{-1}$ - matriz impedância associada com a configuração básica;

$$\underline{e}_{kl} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ +1 \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{posição } k \\ \\ \text{posição } l \end{array} \quad - \text{vetor auxiliar.}$$

O novo estado da rede para uma variação na capacidade de transmissão do ramo $k\ell$ é calculado através da relação

$$\underline{\theta}' = \underline{\theta}^0 + \Delta \underline{\theta} \quad (3.9)$$

onde:

$\underline{\theta}'$ - estado da rede para uma variação na capacidade de transmissão do ramo $k\ell$.

Com o novo estado da rede ($\underline{\theta}'$) recalcula-se a nova distribuição dos fluxos através das relações (3.3).

A utilização da expressão (3.8), no caso de sistemas de grandes dimensões quando é impossível dispor de $\underline{z}^0$, torna-se viável calculando-se diretamente

$$\underline{x} = \underline{z}^0 \underline{e}_{k\ell} \quad (3.10)$$

como solução do sistema linear

$$B^0 \underline{x} = \underline{e}_{k\ell} \quad (3.11)$$

A solução ($\underline{x}$) de (3.11) pode ser obtida utilizando-se os mesmos fatores triangulares de B^0 utilizados na resolução (3.7). Substituindo-se (3.10) em (3.8) e considerando que

$$\underline{e}_{k\ell}^t \underline{x} = x_k - x_\ell \quad (3.12)$$

onde:

x_k - componente k do vetor $\underline{x}$;

obtêm-se uma nova expressão para $(\Delta\theta)$ ou seja

$$\Delta\theta = - \frac{(\theta_k^0 - \theta_l^0)}{\Delta Y_{kl}^{-1} + x_k - x_l} \underline{x} \quad (3.13)$$

3.3. Critério para Seleção de Adições Atraentes

A solução do fluxo de potência linearizado fornece uma indicação, dos pontos mais atraentes da rede, para a adição de novos componentes, pois a distribuição dos fluxos obedece uma propriedade de mínimo esforço segundo a qual a tendência da potência ativa é fluir pelos caminhos eletricamente mais curtos (menor reatância p.u.). Esta propriedade, discutida a seguir, será aproveitada na seleção das adições mais atraentes a serem efetuadas.

3.3.1. Propriedade de Mínimo Esforço do Fluxo de Potência Linearizado

O modelo de fluxo de potência linearizado (DC), representado por (3.1) ou (3.6) e (3.3), é equivalente a um problema de otimização (Apêndice C), que procura o mínimo de uma função quadrática dos fluxos sujeito às restrições correspondentes às injeções de potência nas barras, que pode ser representado como

$$\text{Min } Z = \frac{1}{2} \sum_{kl \in \Omega} \gamma_{kl}^{-1} P_{kl}^2 \quad (3.14)$$

$$\text{s.a } \sum_{l \in \Omega_k} P_{kl} = P_k$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, (N-1)$$

onde:

Z - função objetiva correspondente às perdas no modelo resistivo (DC) associado.

A solução $\underline{\theta}^*$ do sistema linear (P-0) dado em (3.1) ou (3.6) corresponde a uma distribuição de fluxos que é a solução do problema de otimização (3.14) e que pode ser calculada através das relações (3.3) ou seja

$$P_{kl}^* = \gamma_{kl} (\theta_k^* - \theta_l^*) \quad (3.15)$$

$$kl \in \Omega$$

onde:

θ_k^* - componente k da solução $\underline{\theta}^*$ de (3.1) ou (3.6);

$P_{kl}^* (kl \in \Omega)$ - solução de (3.14).

3.3.2. Seleção de Adições Atraentes pelo Critério de Mínimo Esforço

A propriedade descrita na seção 3.3.1 mostra que a distribuição dos fluxos, calculada através do modelo de fluxo de potência linearizado, se dá de forma a minimizar as perdas associadas com o modelo resistivo (DC) correspondente (mínimo esforço). Com essa propriedade pode-se estabelecer um critério de seleção dos ramos candidatos a receber um novo componente. Esse critério consiste em se determinar um conjunto de ramos que, sofrendo aumento em sua capacidade de transmissão, acarretam as maiores perturbações no valor ótimo Z^* , da função objetiva Z dada por

$$Z^* = \frac{1}{2} \sum_{kl \in \Omega} Y_{kl}^{-1} P_{kl}^2 \quad (3.16)$$

O critério pode ser aplicado de forma aproximada, linearizando-se Z^* em torno do ponto correspondente a configuração atual da rede, e simulando alterações na rede para as quais determinam-se as variações na função linear pela qual aproximou-se Z^* .

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

$$\text{grad } (Z^*) = \begin{bmatrix} \partial Z^* / \partial Y_{12} \\ \vdots \\ \partial Z^* / \partial Y_{kl} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

cujas componentes são dadas por (Apêndice C)

$$\frac{\partial Z^*}{\partial \gamma_{kl}} = - \frac{1}{2} (\theta_k^* - \theta_l^*)^2 \quad (3.18)$$

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

$$Z^*(\underline{\gamma} + \Delta \underline{\gamma}) \approx Z^*(\underline{\gamma}) + \frac{\partial Z^*}{\partial \gamma_{kl}} \Delta \gamma_{kl} \quad (3.19)$$

onde:

$\underline{\gamma}$ - vetor capacidade de transmissão da rede;

$$\Delta \underline{\gamma} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta \gamma_{kl} \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{- variação na capacidade de transmissão da rede} \\ \text{devido a adição de um novo componente no} \\ \text{ramo } kl; \end{array}$$

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

Os valores aproximados para as perturbações em Z^* correspondentes às adições de novos elementos nos ramos em que são permitidos po-

dem ser obtidos da expressão (3.19) como

$$\Delta Z_{kl}^* = \frac{\partial Z^*}{\partial \gamma_{kl}} \Delta \gamma_{kl} \quad (3.20)$$

onde:

ΔZ_{kl}^* - valor aproximado da perturbação em Z^* causada pela adição de um novo componente no ramo kl .

De acordo com o critério os ramos candidatos a receber um novo componente são aqueles que correspondem aos maiores valores de $|\Delta Z_{kl}^*|$. O conjunto de adições selecionado por esse critério corresponde àquelas que, se fossem efetuadas, provocariam os maiores impactos na distribuição dos fluxos na rede.

O valor exato de ΔZ_{kl}^* é função também da relação entre $\Delta \gamma_{kl}$ e a capacidade de transmissão equivalente da rede no ramo kl . A obtenção dos valores exatos de ΔZ_{kl}^* para seleção de alterações na rede exige um significativo esforço computacional adicional que até agora não se justificou dada a qualidade das soluções obtidas com as redes testadas. Ao que tudo indica a utilização dos valores corretos para ΔZ_{kl}^* se torna atraente quando se trata da ordenação de contingências severas. Neste caso o esforço computacional adicional pode ser compensado pelas contingências que deixarão de ser simuladas.

3.4. Método para Síntese Conceitual Estática

A síntese conceitual estática consiste em, a partir de um ano inicial, determinar um conjunto de adições de novas linhas e transformadores que tornem possível o transporte dos fluxos correspondentes às injeções de potência de um ano futuro especificado, satisfazendo, em situações normais e de contingências simples, os critérios de desempenho dados a seguir:

- . fluxos de potência abaixo dos limites permitidos;
- . todas as cargas atendidas;
- . todas as barras de geração conectadas à rede.

3.4.1. Fase de Adições de Novos Componentes

Nesta fase é realizada a síntese conceitual estática sem se considerar contingências, utilizando-se o seguinte algoritmo:

passo 1 - obtém-se a solução do fluxo de potência linearizado para a configuração atual da rede;

passo 2 - com a solução do fluxo de potência linearizado avaliam-se os carregamentos nas ligações (rede real e fictícia): se houver algum elemento da rede real sobrecarregado ou desconexão de áreas entre as quais existe a necessidade de transmissão de potência, indicada pelo grau de utilização da rede fictícia, passa-se para o passo 3; caso contrário esta fase da síntese está terminada.

passo 3 - selecionam-se os ramos candidatos a receber a adição de um novo componente de acordo com o critério do mínimo esforço (descrito em 3.3.2.);

passo 4 - define-se o ramo no qual será efetuada a adição de um novo componente. Esta decisão é tomada a partir da lista ordenada produzida no passo 3, que é submetida a um teste de aceitação descrito no final desta seção;

passo 5 - adiciona-se à rede um novo componente no ramo definido no passo 4 e volta-se ao passo 1.

O procedimento adotado para os testes que simulam a adição de novos componentes (testes de aceitação) deve levar em conta o período de tempo entre o ano para o qual se está efetuando a síntese e o ano correspondente à rede inicial. Numa perspectiva de longo prazo, onde ocorrem grandes variações nos níveis de geração/demanda, são privilegiadas as adições de circuitos com elevada capacidade de transmissão bem como a criação de novos caminhos para a circulação de potência. Por outro lado, numa perspectiva de curto prazo, geralmente as soluções podem ser obtidas com pequenos reforços na rede de transmissão. A compatibilização desses enfoques deve ser feita através de um método de síntese conceitual dinâmica e foge do objetivo deste trabalho.

Na perspectiva de longo prazo o teste de aceitação leva

em conta as economias de escala, dando preferência aos circuitos com capacidade de transmissão elevada e permitindo a criação de novos caminhos através da adição de circuitos em série. Nesta caso a lógica para o teste de aceitação é a seguinte:

Percorrem-se as n (por exemplo, $n = 3$) primeiras opções da lista seleccionada no passo 3 e escolhe-se para ser adicionada a opção que primeiro:

- . eliminar uma sobrecarga da rede real ou
- . conectar duas áreas entre as quais existe a necessidade de transmissão de potência ou
- . diminuir a sobrecarga total em (MW) de um valor mínimo especificado (por exemplo, metade da capacidade em (MW) do circuito correspondente à adição testada).

Se entre as n primeiras opções da lista não se encontrar uma que satisfaça pelo menos uma das condições acima, escolhe-se para ser adicionada a primeira opção da lista.

Na perspectiva de curto prazo, quando não ocorrem grandes variações nos níveis de geração/demanda, em geral é possível obter-se uma boa solução com alguns reforços na rede existente, dispensando-se a criação de novos caminhos para circulação de potência. Obviamente neste tipo de procedimento não são levadas em conta as economias de escala. Neste caso a lógica para o teste de aceitação é a seguinte:

Na lista elaborada no passo 3 percorrem-se as n primeiras opções para cada um dos níveis de tensão de linhas e tipos de transformadores previstos, na ordem decrescente dos níveis de tensão; e escolhe-se para ser adicionada a opção que primeiro:

- . eliminar uma sobrecarga da rede real ou
- . conectar duas áreas entre as quais existe a necessidade de transmissão de potência ou
- . diminuir a sobrecarga total em (MW) de um valor mínimo especificado.

Se entre as opções testadas não se encontrar uma que satisfaça pelos menos uma das condições acima, é adicionado um componente no ramo correspondente à maior sobrecarga e que aceite novas adições.

Os testes de aceitação de novas adições para períodos longos ou curtos visam apenas a síntese conceitual estática, ou seja, conseguem boas soluções para o problema em um estágio.

3.4.2. Fase de Retiradas de Componentes Supérfluos

Na fase de adições de novos componentes pode ocorrer que circuitos adicionados em estágios iniciais da síntese tornem-se superfluos (sua retirada não prejudica o desempenho da rede) nos estágios finais. Isso pode ser corrigido retirando-se os elementos

supêrfluos depois da fase de adições. Essa fase pode ser realizada através do seguinte procedimento:

passo 1 - os componentes com baixo grau de utilização (carregamentos abaixo de 50%) são ordenados de acordo com um dos critérios:

- . ordem crescente dos carregamentos ou
- . ordem crescente dos valores de $|AZ_{kl}^*|$ correspondentes ao critério do mínimo esforço (aqui são seleccionadas as retiradas que provocam os menores impactos na distribuição dos fluxos);

passo 2 - se não houver elemento com baixo grau de utilização, encerra-se a fase de retiradas, se houver faz-se $m = 1$ e vai-se ao passo-3;

passo 3 - simula-se a retirada do elemento de ordem m da lista ordenada produzida no passo-1, através da análise de sensibilidade apresentada em 3.2. Se essa retirada causar alguma sobrecarga ou desconexão de áreas entre as quais existe a necessidade de transmissão de potência vai-se ao passo-7, caso contrário vai-se ao passo-4;

passo 4 - efetua-se a retirada do elemento de ordem m ;

passo 5 - obtém-se a solução do fluxo de potência linearizado para

a nova configuração;

passo 6 - verifica se o elemento retirado é o último da lista e

- . se não for vai-se ao passo 1,
- . se for encerra-se a fase de retiradas;

passo 7 - verifica se o elemento m é o último da lista e

- . se não for incrementa-se m ($m \leftarrow m + 1$) e volta-se ao passo 3,
- . se for encerra-se a fase de retiradas.

3.4.3. Fase de Reforço para Situações de Contingências

Nesta fase são adicionadas novas linhas e transformadores à configuração obtida nas duas fases precedentes até que os critérios de desempenho sejam satisfeitos, mesmo na ocorrência de uma contingência simples. Isso é feito através do seguinte procedimento:

passo 1 - em todos os ramos da rede é simulada a contingência da ligação de maior capacidade de transmissão;

passo 2 - se ocorrer desconexão de áreas entre as quais existe a necessidade de transmissão de potência, identifica-se a contingência causadora da desconexão mais crítica através dos fluxos na rede fictícia e vai-se ao passo-5. Caso

contrário passa-se ao passo-3;

passo 3 - se aparecer algum transformador sobrecarregado seleciona-se para ser adicionado um novo ao lado daquele com maior sobrecarga e vai-se ao passo-7. Caso contrário passa-se ao passo-4;

passo 4 - se aparecer alguma linha sobrecarregada, identifica-se a contingência correspondente a maior sobrecarga total (MW) na rede e vai-se ao passo 5. Caso contrário encerra-se a fase de reforço.

passo 5 - obtêm-se os fatores triangulares da matriz B e a solução do fluxo de potência linearizado para a configuração da rede correspondente à contingência identificada nos passos 2 ou 4 e a partir disso selecionam-se os ramos candidatos a receber um novo componente de acordo com o critério do mínimo esforço (descrito em 3.3.2);

passo 6 - na lista elaborada no passo 5 aplica-se o teste de aceitação de novas adições com lógica para perspectiva de curto prazo, deixando de considerar a possibilidade de acréscimos em níveis de tensão acima daquele correspondente à contingência estudada, selecionando-se a adição a ser efetuada.

passo 7 - adiciona-se à rede o elemento selecionado nos passos 3 ou 6;

passo 8 - obtém-se a solução do fluxo de potência linearizado para a configuração atual da rede e volta-se ao passo 1.

CAPÍTULO IV

TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em testes realizados com os sistemas Sul e Norte/Nordeste do Brasil, utilizando-se o método de síntese de redes apresentado no capítulo precedente.

4.1. Sistema Sul do Brasil

O sistema Sul tem as seguintes características:

- . configuração inicial correspondente ao ano de 1980 (Fig. 4.1);
- . 46 barras das quais 35 já estão interligadas na configuração inicial;
- . rede inicial com 62 circuitos nos níveis de tensão de 500KV e 230KV;
- . 72 ramos em 500KV e 230KV que admitem a adição de novos componentes;
- . horizonte de 10 anos para o planejamento (1980 a 1990);

- . crescimento médio da demanda em relação ao ano inicial do planejamento de aproximadamente 170%.

No teste realizado parte-se da configuração inicial (Fig. 4.1) e obtém-se a solução para o ano de 1990 (Fig. 4.2) que obedece aos requisitos de desempenho inclusive nas situações de contingências simples. O teste de aceitação de novas adições utilizado foi para longos períodos (considerando economias de escala). As adições e retiradas efetuadas durante a síntese são apresentadas na Tabela (4.1).

4.2. Sistema Norte/Nordeste do Brasil

O sistema Norte/Nordeste tem as seguintes características:

- . configuração inicial disponível correspondente a um ano anterior à 1990 (Fig. 4.3);
- . 89 barras das quais 53 já estão interligadas na configuração inicial;
- . rede inicial com 119 circuitos nos níveis de tensão de 525KV, 230KV e 138KV;
- . 177 ramos em 1050KV, 525KV, 230KV e 138KV que admitem a adição de novos componentes;

- . horizonte de 18 anos para o planejamento (1990 a 2008);
- . crescimento médio da demanda em relação ao ano inicial do planejamento de aproximadamente 240%.

Este teste foi realizado em dois estágios:

- i- no primeiro estágio parte-se da configuração inicial disponível (Fig. 4.3) e obtém-se a solução que atenda aos requisitos de desempenho para 1990, ou seja, para o ano inicial do período de planejamento (Fig. 4.4) . Neste estágio o teste de aceitação de novas adições utilizado foi para curtos períodos. As adições e retiradas efetuadas durante este estágio são apresentadas na Tabela (4.2);
- ii- no segundo estágio parte-se da configuração obtida em (i) para 1990 e obtém-se a solução para o ano de 2008 (Fig. 4.5). O teste de aceitação de novas adições utilizado foi para longos períodos (considerando economias de escala). As adições e retiradas efetuadas durante este estágio são apresentadas na Tabela (4.3).

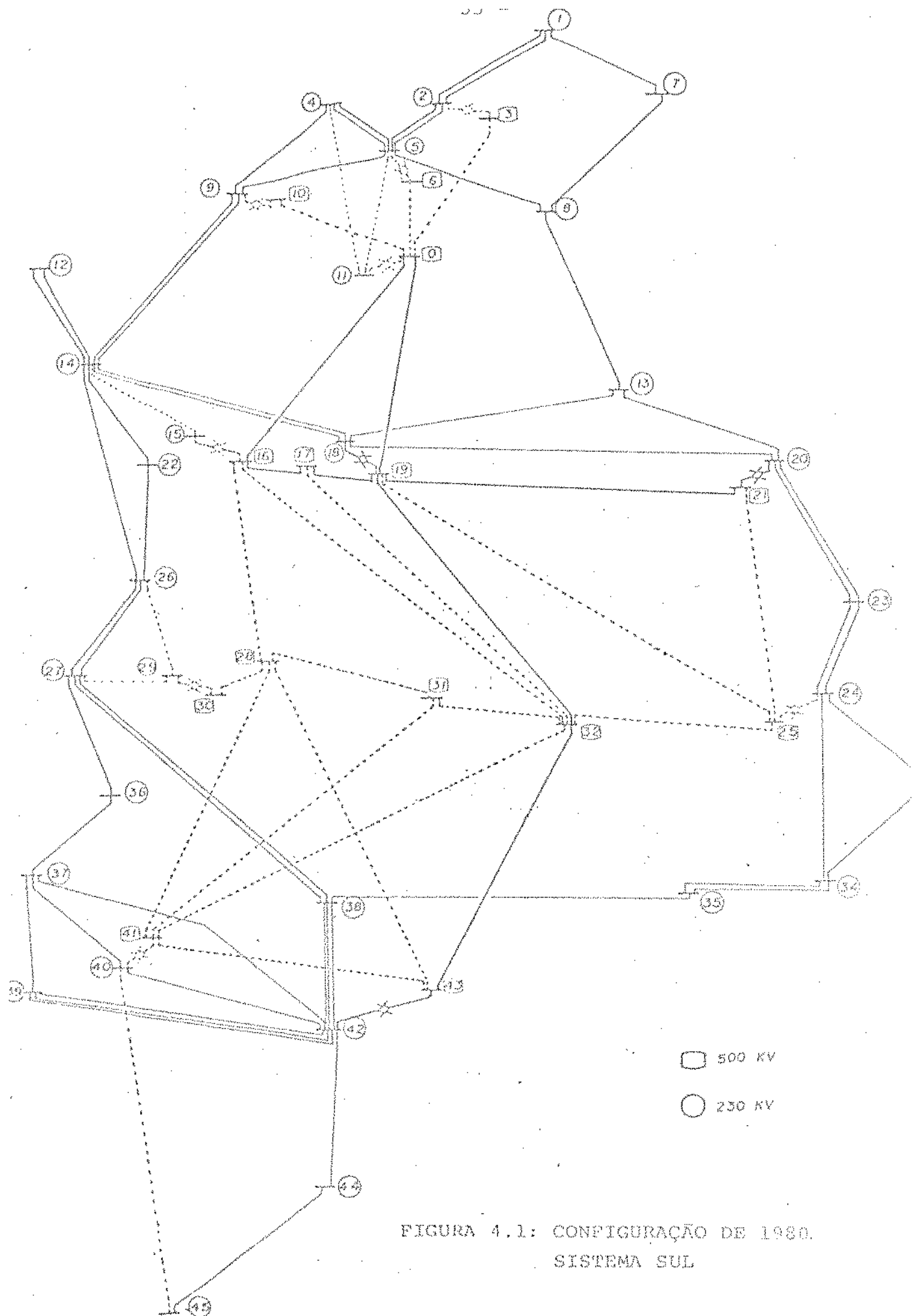


FIGURA 4.1: CONFIGURAÇÃO DE 1980.
SISTEMA SUL

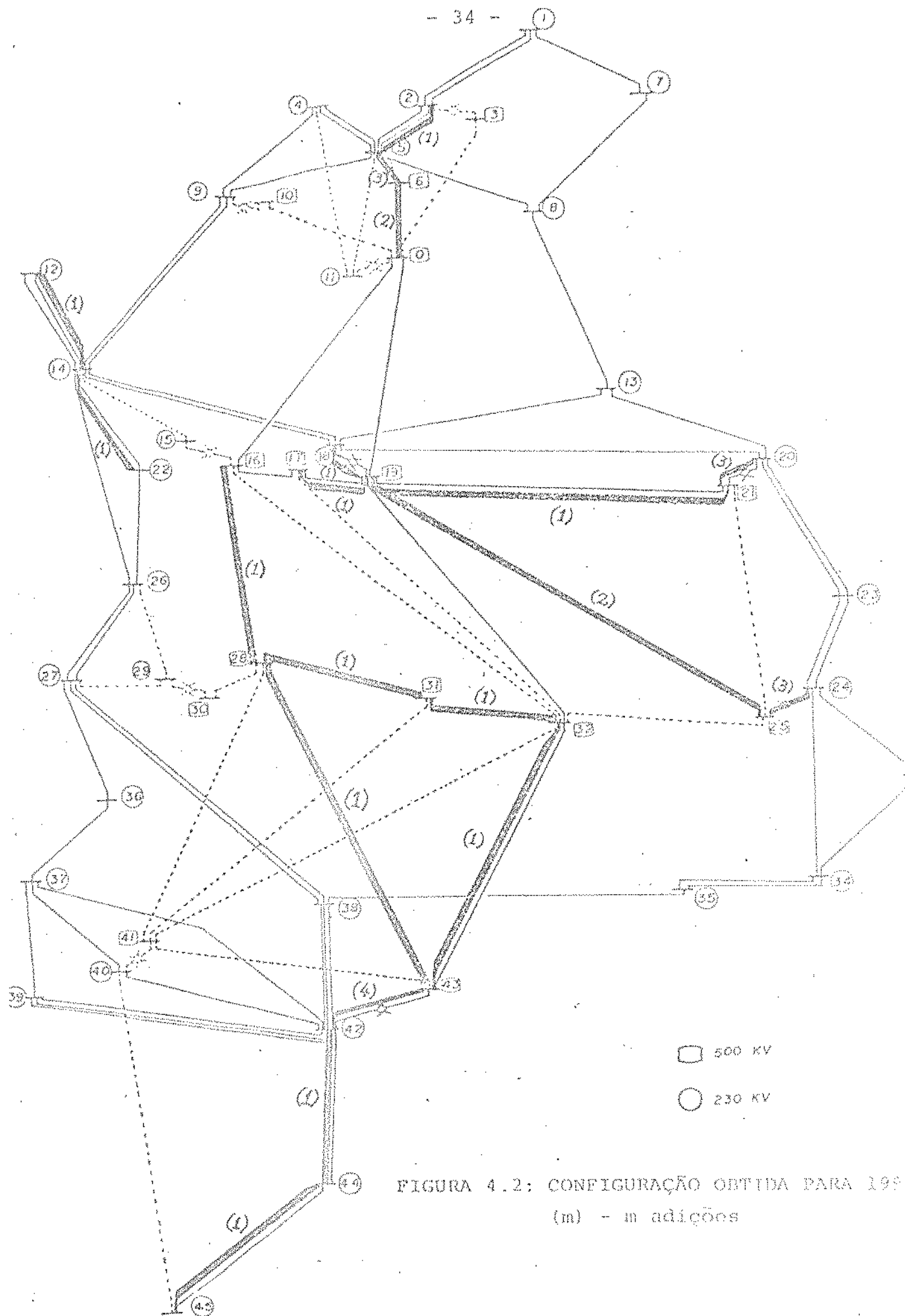


FIGURA 4.2: CONFIGURAÇÃO OBTIDA PARA 199
(m) - m adições

FASE	Nº INICIAL	Nº FINAL
ADIÇÕES	31	32
	28	31
	0	6
	5	6
	24	25
	19	25
	28	43
	42	43
	20	21
	5	6
	24	25
	42	43
RETIRADAS	28	31
ADIÇÕES (REFORÇO)	28	31
	42	44
	44	45
	20	21
	5	6
	18	19
	42	43
	24	25
	0	6
	19	21
	20	21
	17	19
	19	25
	32	43
	42	43
	12	14
	2	5
	16	28
	14	22

TABELA 4.1: ADIÇÕES E RETIRADAS
SISTEMA SUL (1990)

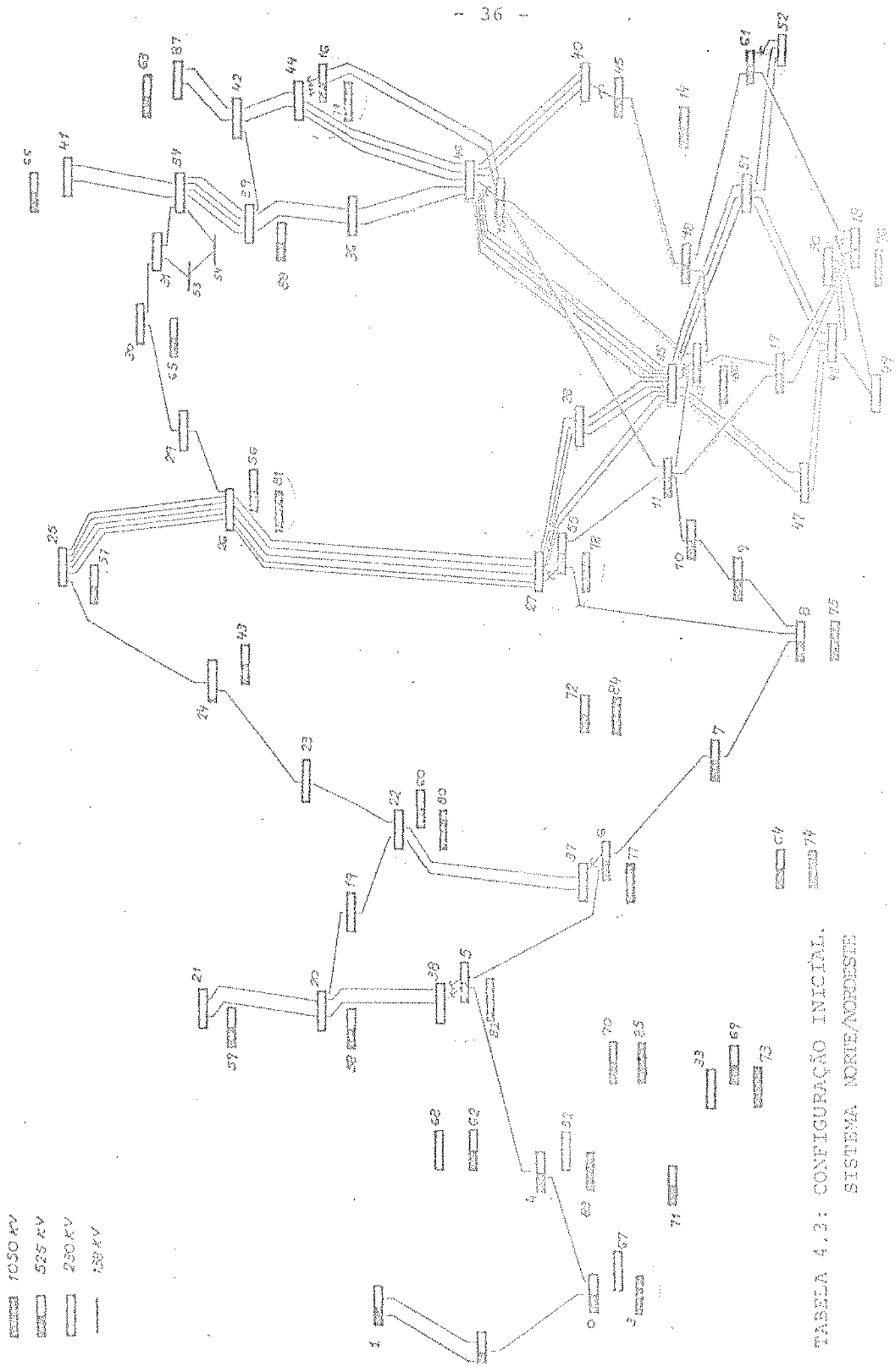


TABELA 4.3: CONFIGURAÇÃO INICIAL.
SISTEMA NOROESTE/NORDESTE

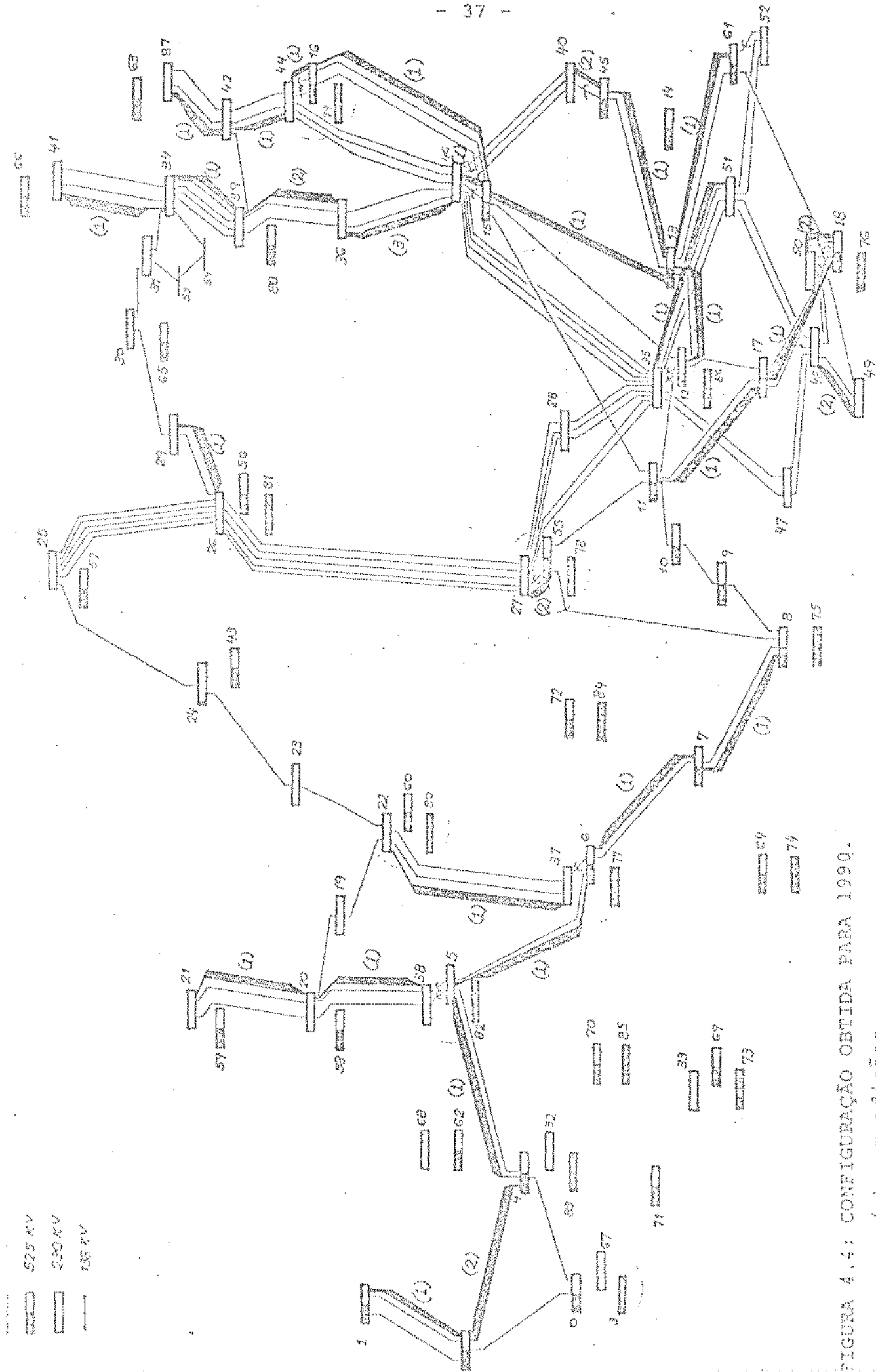


FIGURA 4.4: CONFIGURAÇÃO OBTIDA PARA 1990.

(m) - m adições

525 KV
 230 KV
 138 KV

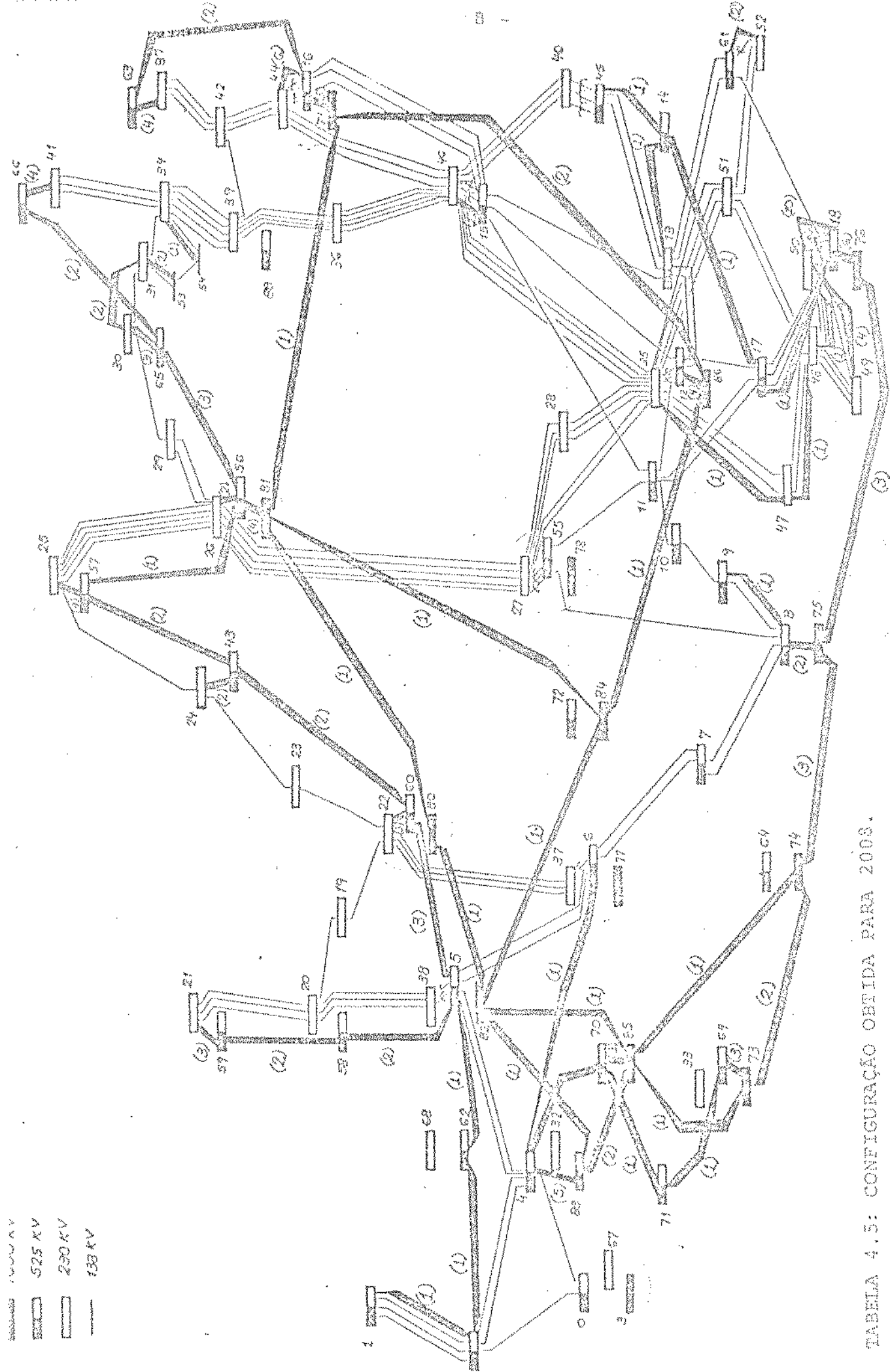


TABELA 4.5: CONFIGURAÇÃO OBTIDA PARA 2003.

(m) - m adições

FASE	Nº INICIAL	Nº FINAL
ADIÇÕES	2	4
	36	39
	36	46
	26	29
	13	15
	48	49
	42	44
	36	46
	27	55
	18	50
ADIÇÕES (REFORÇO)	4	5
	15	46
	27	55
	40	45
	18	50
	17	18
	11	17
	5	6
	15	16
	16	44
	20	21
	6	7
	20	38
	1	2
	13	45
	40	45
	34	41
	13	61
	12	13
	42	87
	22	37
	48	49
	7	8

FASE	Nº INICIAL	Nº FINAL
ADIÇÕES (REFORÇO)	2	4
	36	39
	35	51
	36	46
	34	39

TABELA 4.2: ADIÇÕES E RETIRADAS
SIST. NORTE/NORDESTE (1990)

FASE	Nº INICIAL	Nº FINAL
	69	73
	0	71
	4	70
	73	85
	13	14
	70	85
	74	75
	73	74
	8	75
	75	76
	18	76
	74	85
	16	79
	79	86
	75	86
	74	75
	69	71
	4	83
	83	85
	43	60
	24	43
	5	60
	25	57
	43	57
	82	83
	5	82
	82	84
	84	86
	75	76
	5	58
	20	58
	84	81
	79	81

ADIÇÕES

FASE	Nº INICIAL	Nº FINAL
	56	81
	26	56
	82	85
	4	83
	56	65
	30	65
	18	76
	12	86
	16	79
	4	6
	41	66
	65	66
	13	15
	14	17
	43	60
	5	60
	80	82
	80	81
	63	87
	16	63
	56	57
	22	60
	4	83
	5	62
	2	62
	18	76
	56	81
	18	50
	25	57
	58	59
	21	59
	69	73
	16	79

ADIÇÕES

TABELA 4.3

(CONTINUA)

FASE	Nº INICIAL	Nº FINAL
ADIÇÕES	18	50
	12	86
	16	44
	4	83
	18	50
	18	76
	52	61
	16	44
	70	85
	18	50
	63	87
	16	79
	49	50
	18	50
	16	44
	41	66
	60	80
	18	50
	25	57
	16	44
	18	50
	49	50
	18	50
	16	44
	0	3
	18	50
	21	59
	49	50
	63	87
	30	31
	30	65
	56	65
	22	60

FASE	Nº INICIAL	Nº FINAL
ADIÇÕES	49	50
	41	66
	24	43
RETIRADAS	0	3
	75	86
	73	85
	5	82
	0	71
	13	14
	20	58
	60	80
ADIÇÕES (REFORÇO)	73	85
	70	71
	13	14
	56	81
	12	86
	69	73
	52	61
	26	56
	70	85
	18	76
	40	45
	15	46
	21	59
	30	65
	4	83
	25	57
	16	79
	31	53
	63	87
	16	44
	34	54

TABELA 4.3

(CONTINUA)

FASE	Nº INICIAL	Nº FINAL
	56	81
	41	66
	18	50
	31	53
	22	60
	79	86
	12	86
	75	76
	8	75
	18	76
	83	85
	65	66
	16	63
ADIÇÕES	1	2
(REFORÇO)	5	58
	58	59
	74	75
	73	74
	43	57
	17	18
	48	50
	4	5
	5	60
	14	45
	56	65
	30	31
	35	47
	47	48
	8	9

TABELA 4.3: ADIÇÕES E RETIRADAS
SIST.NORTE/NORDESTE (2008)

CAPÍTULO V

COMENTÁRIOS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste trabalho desenvolveu-se um método de Síntese Conceitual Estática visando-se os estudos iniciais do planejamento da expansão a longo prazo de sistemas de transmissão. As redes obtidas pela aplicação do método apresentam capacidade de transmissão compatível com os níveis de geração/demanda especificado. Ou seja o método é capaz de gerar soluções que devem então ser estudadas através de técnicas de análise convencionais como por exemplo o Fluxo de Potência AC. O método foi aplicado com sucesso nas redes Sul e Norte/Nordeste do Brasil, que por serem sistemas com características bastante distintas podem ser consideradas como bons testes de validação.

A Síntese Conceitual Dinâmica, que será objeto de trabalhos futuros, deve se basear na aplicação de uma seqüência de testes estáticos (um estágio) que por sua vez devem ser rápidos de modo a possibilitar que os estudos sejam realizados de forma interativa (conversacional).

Uma outra perspectiva de trabalho consiste na utilização de métodos exatos de cálculo de fluxo de potência no acompanhamento

to dos estudos de síntese (fases finais), permitindo uma avaliação mais acurada do desempenho das redes. Também deve-se levar em consideração os modos de representação das áreas nas quais não se têm interesse direto nos estudos de expansão (equivalentes externas).

APÊNDICE A

MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA LINEARIZADO

Os fluxos de potência ativa em uma rede de transmissão podem ser calculados através de expressões simplificadas que constituem um modelo linear.

A.1. Fluxo de Potência Ativa em Linhas e Transformadores

As linhas de transmissão e os transformadores de uma rede são representados por um modelo π -equivalente, como mostra a Figura A.1, onde:

$z_{kl} = r_{kl} + j x_{kl}$ - impedância série;

$j b_{kl}^{sh}$ - susceptância shunt.

A corrente I_{kl} é calculada como

$$I_{kl} = (E_k - E_\ell) y_{kl} + j b_{kl}^{sh} E_k \quad (A.1)$$

onde :

E_k, E_ℓ - tensões das barras terminais k e ℓ ;

y_{kl} - admitância série

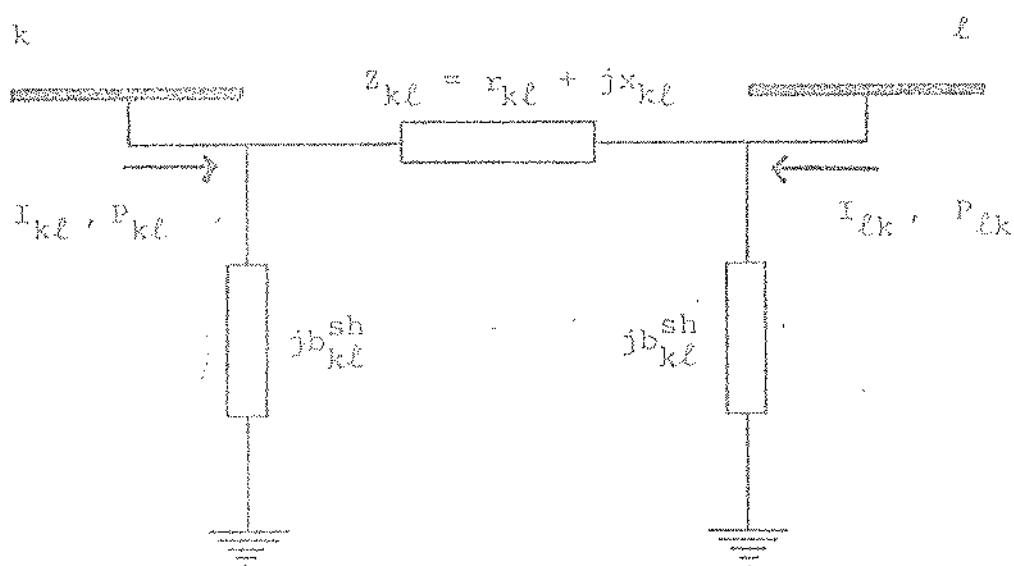


FIGURA A.1: MODELO π -EQUIVALENTE

As tensões E_k e E_ℓ são representadas como

$$\begin{aligned} E_k &= V_k \exp (j \theta_k) \\ E_\ell &= V_\ell \exp (j \theta_\ell) \end{aligned} \quad (A.2)$$

onde :

V_k, V_ℓ - magnitude das tensões das barras terminais;

θ_k, θ_ℓ - ângulos das tensões das barras terminais.

A admitância série y_{kl} é dada por

$$y_{kl} = z_{kl}^{-1} = g_{kl} + j b_{kl} \quad (A.3)$$

onde :

$$g_{kl} = \frac{r_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \quad (A.4)$$

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

O fluxo de potência ativa P_{kl} é calculado como

$$P_{kl} = \text{Real} \{ E_k I_{kl}^* \} \quad (A.5)$$

Identificando-se a parte real do produto $E_k I_{kl}^*$, obtém-se

$$P_{kl} = g_{kl} v_k^2 - g_{kl} v_k v_l \cos \theta_{kl} - b_{kl} v_k v_l \sin \theta_{kl} \quad (A.6)$$

onde:

$$\theta_{kl} = \theta_k - \theta_l - \text{abertura angular entre as barras } k \text{ e } l.$$

A.2 Modelo Linearizado

A expressão para o cálculo dos fluxos de potência ativa pode ser simplificada admitindo-se as seguintes hipóteses:

- . magnitudes de tensão consideradas constantes e iguais a 1,0 p.u.;

- . reatância e resistência das ligações tais que

$$x_{kl} \gg r_{kl}$$

- . as aberturas angulares são tais que podem-se fazer as aproximações

$$\sin \theta_{kl} \approx \theta_{kl}$$

$$\cos \theta_{kl} \approx 1.0$$

Aplicando-se as hipóteses acima sobre a expressão (A.6)

obtem-se

$$P_{kl} = \frac{1}{x_{kl}} (\theta_k - \theta_l) \quad (A.7)$$

onde o termo $(1/x_{kl})$ é normalmente denominado de capacidade de transmissão (em p.u) e representado por:

$$Y_{kl} = \frac{1}{x_{kl}} \quad (A.8)$$

Considerando-se uma rede composta por N barras, as equações independentes das injeções líquidas de potência para (N-1) barras são escritas como

$$P_k = \sum_{\ell \in \Omega_k} Y_{k\ell} (\theta_k - \theta_\ell) \quad (A.9)$$

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

onde Ω_k está definido na seção 3.1.

O sistema de equações (A.9) pode ser reescrito como

$$\underline{P} = \underline{B} \underline{\theta} \quad (A.10)$$

onde $\underline{P}$, $\underline{B}$ e $\underline{\theta}$ estão definidos na seção 3.1.

A.3. Modelo Linearizado com Perdas

A potência dissipada em uma ligação $k\ell$ pode ser obtida somando-se os fluxos $P_{k\ell}$ e $P_{\ell k}$

$$L_{k\ell} = g_{k\ell} (V_k^2 + V_\ell^2 - 2 V_k V_\ell \cos \theta_{k\ell}) \quad (A.11)$$

As hipóteses feitas para se obter o modelo linearizado, com exceção da aproximação

$$\cos \theta_{k\ell} \approx 1,0 \quad (A.12)$$

são introduzidas nas expressões (A.6) e (A.11) fornecendo

$$P_{kl} = g_{kl} (1 - \cos \theta_{kl}) + \gamma_{kl} \theta_{kl} \quad (A.13)$$

$$L_{kl} = 2g_{kl} (1 - \cos \theta_{kl}) \quad (A.14)$$

As expressões (A.13) e (A.14) mostram que as perdas aproximadas se dividem igualmente entre os terminais da ligação kl .

A aproximação (A.12), se introduzida em (A.13) e (A.14), equivale a não considerar o efeito das perdas. Esse efeito pode ser levado em consideração introduzindo-se a seguinte aproximação nas expressões (A.13) e (A.14)

$$\cos \theta_{kl} = 1 - \frac{\theta_{kl}^2}{2} \quad (A.15)$$

obtendo-se

$$L_{kl} = g_{kl} \theta_{kl}^2 \quad (A.16)$$

A inclusão aproximada do efeito das perdas na solução do fluxo de potência linearizado pode ser feita através do seguinte procedimento:

- . resolve-se inicialmente o sistema (A.10) e calculam-se as perdas em todas as linhas através da relação (A.16);
- . as perdas são consideradas como cargas adicionais nas barras terminais de cada ligação (metade para cada barra) obtendo-se um novo vetor de injeções de potência $\underline{P}'$ cujas componentes são dadas por:

$$P'_k = P_k - \sum_{l \in \Omega_k} L_{kl} \quad (A.17)$$

resolve-se novamente o sistema (A.10), obtendo-se uma solução que leva em conta o efeito das perdas.

APÊNDICE B

ALTERAÇÕES NA CONFIGURAÇÃO DA REDE

Nos estudos de síntese de redes de transmissão freqüente_{mente} surge a necessidade de se analisarem situações nas quais um ou mais circuitos são temporariamente adicionados ou removidos da rede. Isto tanto pode ocorrer quando se testa a adição ou retirada de circuitos como na análise de contingências que visa determinar se a rede obedece aos requisitos de segurança. Uma vez que tais alterações não são permanentes, é computacionalmente ineficiente considerá-las refatorando-se a matriz B. Neste apêndice é apresentado um método que permite considerar tais alterações sem ser necessária a refatoração da matriz B.

B.1. Alterações na Matriz B

A alteração na matriz B, correspondente à variação na capacidade de transmissão de apenas um ramo da rede, pode ser representada como

$$\Delta B = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \Delta Y_{kl} & -\Delta Y_{kl} \vdots \\ \vdots & -\Delta Y_{kl} & \Delta Y_{kl} \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{linha } k \\ \\ \leftarrow \text{linha } l \end{array} \quad (B.1)$$

$\uparrow$
coluna k

$\uparrow$
coluna l

onde:

ΔY_{kl} - variação na capacidade de transmissão do ramo kl .

A matriz ΔB pode ser reescrita como

$$\Delta B = \Delta Y_{kl} \begin{bmatrix} e_{kl} \\ e_{kl}^t \end{bmatrix} \quad (B.2)$$

onde:

$$e_{kl} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ +1 \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow \text{linha } k \\ \leftarrow \text{linha } l \end{array}$$

B.2. Análise de Sensibilidade

Seja uma configuração básica da rede à qual está associada a relação:

$$B^0 \underline{\theta}^0 = \underline{p} \quad (B.3)$$

Quando ocorrem variações nas capacidades de transmissão das ligações devidas a acréscimos ou retiradas de linhas ou transformadores, há uma variação correspondente nos ângulos das tensões nodais, uma vez que as injeções de potência são supostas constantes. A no-

va situação pode ser representada pela equação

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

que pode ser escrita como

$$\Delta \underline{\theta} = -Z^O \Delta B (\underline{\theta}^O + \Delta \underline{\theta}) \quad (B.5)$$

onde :

$$Z^O = B^O^{-1} \quad (B.6)$$

Substituindo-se (B.2) em (B.5) e considerando-se que

$$\underline{e}_{kl}^t \cdot \underline{\theta}^O = \theta_{kl}^O \quad (B.7)$$

$$\underline{e}_{kl}^t \Delta \underline{\theta} = \Delta \theta_{kl}$$

obtêm-se

$$\Delta \underline{\theta} = - \Delta \gamma_{kl} (\theta_{kl}^O + \Delta \theta_{kl}) Z^O \underline{e}_{kl} \quad (B.8)$$

Prê-multiplicando-se ambos os membros de (B.8) por $\underline{e}_{kl}^t$ e considerando-se (B.7) obtêm-se

$$\Delta \theta_{kl} = - \frac{\underline{e}_{kl}^t Z^O \underline{e}_{kl}}{\Delta \gamma_{kl}^{-1} + \underline{e}_{kl}^t Z^O \underline{e}_{kl}} \theta_{kl}^O \quad (B.9)$$

que substituída em (B.8) resulta em

$$\underline{\Delta\theta} = - \frac{\theta_{kl}^0}{\Delta\gamma_{kl}^{-1} + \underline{e}_{kl}^t Z^0 \underline{e}_{kl}} Z^0 \underline{e}_{kl} \quad (D.10)$$

A expressão (D.10) pode ser utilizada mesmo nos casos nos quais não se dispõem da matriz Z^0 como está sugerido na seção 3.2.

APÊNDICE C

ORDENAÇÃO DE ALTERAÇÕES NA CONFIGURAÇÃO DA REDE

A seleção de adições mais atraentes para a síntese de redes de transmissão é feita através de um critério baseado em uma propriedade segundo a qual a distribuição dos fluxos de potência ativa se dá segundo uma lei de mínimo esforço.

C.1. Propriedade de Mínima Potência Dissipada em Redes Resistivas

O modelo do fluxo de potência linearizado é análogo ao modelo de uma rede resistiva, na qual as fontes são representadas por injeções de corrente, como mostra o exemplo da Figura (C.1).

A distribuição de correntes em uma rede resistiva, com N nós, é determinada resolvendo-se o sistema linear

$$\sum_{j \in \Omega_i} \frac{1}{r_{ij}} (e_i - e_j) = J_i \quad (C.1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1$$

onde:

e_i - tensão do nó i;

r_{ij} - resistência do ramo ij;

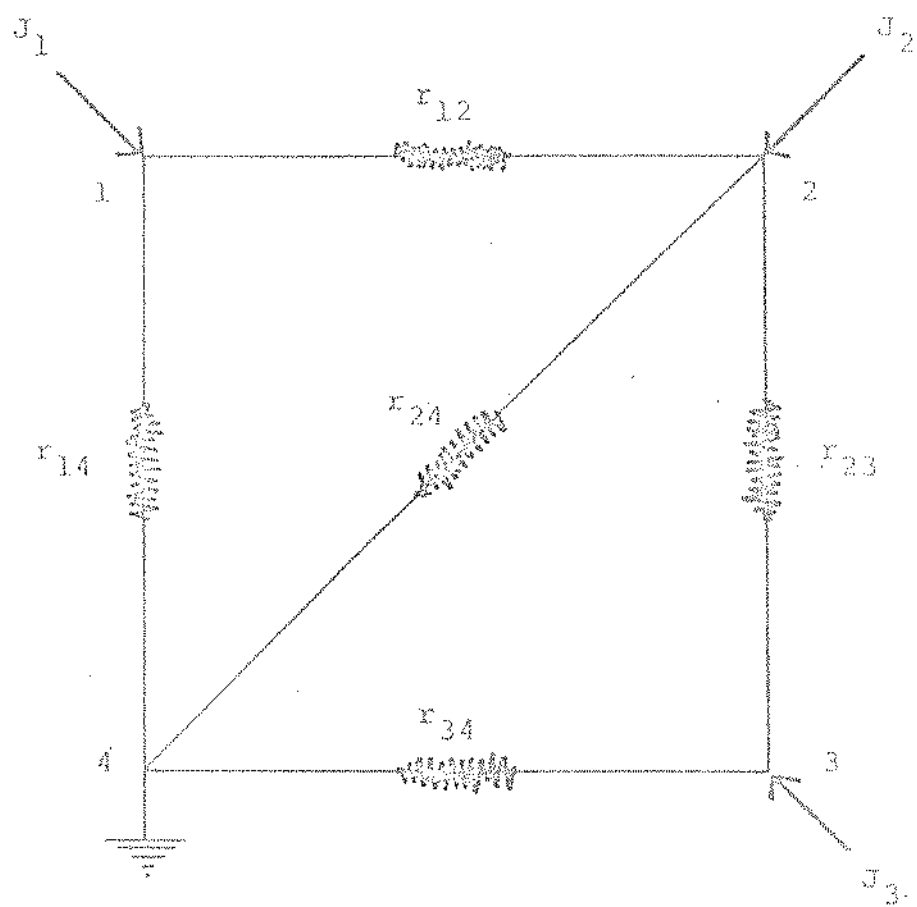


FIGURA C.1: REDE RESISTIVA

J_i - injeção de corrente no nó i ;

Ω_i - conjunto dos nós que se ligam ao nó i ;

e em seguida calculando-se as correntes através das relações

$$I_{ij} = \frac{1}{r_{ij}} (e_i - e_j) \quad (C.2)$$

$ij \in \Omega$

onde:

Ω - conjunto de todos os ramos da rede;

I_{ij} - corrente que parte do nó i para o nó j .

A distribuição das correntes obtida através de (C.1) e (C.2) corresponde a solução do problema

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{ij \in \Omega} r_{ij} I_{ij}^2 \\ \text{s.a.} \quad \sum_{j \in \Omega_i} I_{ij} &= J_i \end{aligned} \quad (C.3)$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1$$

ou seja, corresponde à distribuição de correntes para a qual a potência total dissipada nos resistores da rede é mínima.

A equivalência entre os problemas (C.1, C.2) e (C.3) pode ser verificada associando-se ao problema (C.3) a função Lagrangeana

$$w = \frac{1}{2} \sum_{ij \in \Omega} r_{ij} I_{ij}^2 - \sum_{i=1}^{N-1} \lambda_i \left[\sum_{j \in \Omega_i} (I_{ij} - J_i) \right] \quad (C.4)$$

onde:

λ_i - multiplicadores de Lagrange.

Aplicando-se as condições necessárias de primeira ordem para otimalidade

$$\frac{\partial w}{\partial \lambda_i} = 0 \quad (C.5)$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1$$

$$\frac{\partial w}{\partial I_{ij}} = 0 \quad (C.6)$$

$$ij \in \Omega$$

em (C.4), obtêm-se

$$\sum_{j \in \Omega_i} I_{ij} = J_i \quad (C.7)$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1$$

C.2. Analogia entre os Modelos de Fluxo de Potência Linearizado e de uma Rede Resistiva

Comparando-se as expressões (A.7, A.9) com (C.2, C.1) verifica-se a correspondência entre as variáveis e parâmetros dos dois modelos que são:

$$P_k \longleftrightarrow J_i$$

$$\theta_k \longleftrightarrow c_i$$

$$P_{kl} \longleftrightarrow I_{ij}$$

$$x_{kl} \longleftrightarrow r_{ij}$$

Analogamente ao modelo de uma rede resistiva, o modelo de fluxo de potência linearizado é equivalente ao problema de otimização

$$\min Z = \frac{1}{2} \sum_{ij \in \Omega} x_{ij}^2 P_{ij}^2 \quad (C.10)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = P_i$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1$$

onde

Ω está definido na seção 3.1.

C.3. Variação em Z devido a Alterações na Rede

Tomando-se Z como um índice de desempenho, estima-se sua variação devido a alterações na capacidade de transmissão de um ramo da rede conforme descrito em 3.3.2. Para isso utiliza-se o gradiente de Z em relação às capacidades de transmissão dos ramos, cujas componentes são deduzidas a seguir.

A função Z do problema (C.10) pode ser reescrita como:

$$Z = \frac{1}{2} \sum_{ij \in \Omega} \gamma_{ij} \theta_{ij}^2 \quad (C.11)$$

A componente do gradiente de Z em relação a capacidade de transmissão do ramo kl é dada por:

$$\frac{\partial Z}{\partial \gamma_{kl}} = \frac{1}{2} \theta_{kl}^2 + \sum_{ij \in \Omega} \gamma_{ij} \theta_{ij} \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \gamma_{kl}} \quad (C.12)$$

A relação

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \gamma_{kl}}$$

pode ser obtida pré-multiplicando-se ambos os membros da igualdade (B.9) por

$$\theta_{ij}^t$$

obtendo-se

cidade de transmissão ΔY_{kl} no ramo kl é dada aproximadamente por

$$\Delta Z_{kl} \approx - \frac{1}{2} \theta_{kl} \Delta Y_{kl} \quad (C.17)$$

O valor exato de ΔZ_{kl} é função também da relação entre ΔY_{kl} e a capacidade de transmissão equivalente da rede no ramo kl . Estudos para utilização dos valores exatos de ΔZ_{kl} na ordenação tanto de adições quanto de contingências já se iniciaram.

REFERÊNCIAS

- [1]- L.L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, p. 1688-1697, Setembro/Outubro 1970.

- [2]- G.D. Galloway, L.L. Garver, L.K. Kirchmayer e A. J. Wood, "Generation-transmission planning and economic evaluation", Power System Computation Conference (PSCC), 1969.

- [3]- A. Monticelli, "Métodos de análise e síntese aplicados ao planejamento a longo prazo de sistemas de transmissão de energia elétrica", Relatório nº 1 do Convênio CEPEL/UNICAMP sobre Planejamento de Redes de Transmissão, Campinas, 1979.

- [4]- L.L. Garver, "Experiences with applications of a transmission planning program", EPRI Trans. Planning Workshop, June, 1980, N.Y.

- [5]- W.F. Tinney, "Computer-aided transmission planning", pp. 5.32-5.51, EPRI EL-377-SR, Fevereiro 1977.

- [6]- 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.