

UNIVERSIDADE-FEDERAL DE SANTA-CATARINA

PLANEJAMENTO A CURTO PRAZO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA COM RESTRIÇÃO DE ESTABILIDADE
TRANSITÓRIA.

Dissertação submetida a Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia.

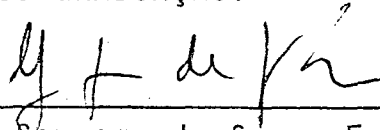
Carlos Raul Borenstein

Dezembro - 1977

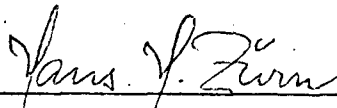
PLANEJAMENTO A CURTO PRAZO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM RESTRIÇÃO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Carlos Raul Borenstein

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

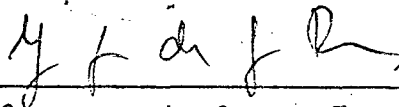


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.
Orientador

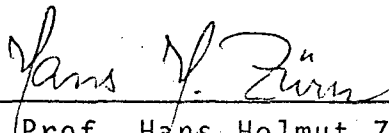


Prof. Hans Helmut Zörn, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES:



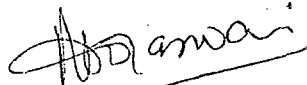
Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.



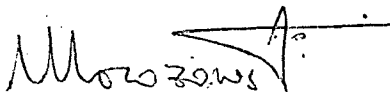
Prof. Hans Helmut Zörn, Ph.D.



Prof. Clovis Caesar Gonzaga, D.Sc.



Prof. Rajamani Doraiswami, Ph.D.



Prof. Marciano Morozowski Filho, M.Sc.

À Miriam, minha esposa

À meus pais e irmãos

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca que além da orientação para a realização deste trabalho, revelou-se um amigo pela dedicação e esforço dispendido.

Agradeço, igualmente, a todos os colegas que colaboraram com sugestões para este trabalho.

Minha gratidão especial à Miriam, pela compreensão e incentivo durante a execução deste trabalho.

A realização deste trabalho foi possível graças ao apoio financeiro da UFSC e CAPES.

S U M Á R I O

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO DO SISTEMA	5
2.3. REDUÇÃO A BARRA INTERNA DE MÁQUINA	12
2.4. MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA ...	14
2.5. ESTABILIDADE DO EQUILÍBRIO DE SISTEMA DE POTÊNCIA.	17
2.6. DETERMINAÇÃO DE DOMÍNIOS DE ESTABILIDADE	23
2.7. CONCLUSÕES	34
3. O PROBLEMA DO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO	35
3.1. INTRODUÇÃO	35
3.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DO PLANEJAMENTO DA TRANSMIS- SÃO	35
3.3. CRITÉRIO DE SOBRECARGA	42
3.4. ELIMINAÇÃO DE SOBRECARGA	43
3.5. ORDENAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES VIÁVEIS DO PONTO DE VIS <u>U</u> TA SEGURANCA	46
3.6. CONCLUSÕES	48
4. A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DO PLANEJAMENTO A CURTO PRAZO ...	49
4.1. INTRODUÇÃO	49
4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO ...	49
4.3. ALGORÍTMO PARA O PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TRANS- MISSÃO A CURTO PRAZO	50

4.4. FLUXOGRAMA PARA O PLANEJAMENTO A CURTO PRAZO	54
4.5. CONCLUSÕES	61
5. EXEMPLOS	62
5.1. INTRODUÇÃO	62
5.2. EXEMPLOS	62
5.3. CONCLUSÕES	90
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	91
6.1. CONCLUSÕES	91
6.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	94
BIBLIOGRAFIA	96
APÊNDICES	
- MANUAL PARA O PROGRAMA DE PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO A CURTO PRAZO	99
- PROGRAMA DE PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO A CURTO PRAZO	102
- RESULTADOS REFERENTES AO EXEMPLO 2	109

R E S U M O

São utilizados domínios de estabilidade obtidos pelo uso da função energia tomada como função de Liapunov, para proposição de índices de sobrecargas a serem usados em planejamento do sistema de transmissão de energia elétrica. É desenvolvido um algoritmo para a solução do problema do planejamento a curto prazo utilizando-se o índice de sobrecarga proposto. É proposto, também, um índice de segurança que pode ser usado na ordenação das configurações viabilizadas pela eliminação da sobrecarga. Mostra-se que a estabilidade transitória determinada pelo domínio de estabilidade pode ser incluída na resolução de problemas de planejamento, garantindo-se com isso que o ponto de equilíbrio em contingência é alcançado a partir do estado do sistema antes da contingência. São incluídos exemplos que ilustram o procedimento desenvolvido.

A B S T R A C T

In this work stability domains obtained from the use of the energy function utilized as a Liapunov function are employed to propose indices of overload to be used in planing the transmission of electrical energy. An algorithm is developed as a solution to the problem of short term planning, using the proposed overload indices. Also, an index of security is proposed which can be used in ordering feasible configurations by overload elimination. It is shown that transient stability determined by the stability domain can be included in the solution of planning problems, guaranteeing there by that the point of equilibrium in contingency is achieved from the system's state prior to the contingency. Examples are included to illustrate the procedure developed.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O constante aumento no consumo de energia elétrica conduz à necessidade de expandir-se a capacidade de transmissão dos sistemas de potências. Um sistema de potência deve, então, ser projetado e operado de modo a manter continuidade de atendimento a consumidores, mesmo sob certas situações de emergência introduzidas por modificações corriqueiras como variações na carga, remanejamento da geração, desconexão de linhas ou transformadores para manutenção ou por faltas. É necessário então que o sistema seja planejado de modo a suportar pelo menos as perturbações introduzidas por estas modificações. Deste modo uma etapa do problema de planejamento consiste na enumeração de testes a que o sistema deve ser submetido sem sofrer descontinuidade na operação. Os testes, ditos testes de contingências, constituem uma condição que deve ser satisfeita no problema de planejamento. Se uma dada configuração do sistema de transmissão deixa de satisfazer a um teste de contingência ela é dita sobrecarregada e deve ter sua capacidade aumentada. O indicador de sobrecarga que tem sido utilizado é baseado numa sugestão da ([1]) que considera um ângulo máximo de defasagem entre barras do sistema. Este indicador é escolhido empiricamente de modo a ter-se garantia de estabilidade transitória ([2], [3], [4], [5], [6], [7]). A defasagem fixada pela ([1]) significa um fluxo máximo permitido na linha. Isto não

garante, no entanto, que a trajetória do sistema em contingência, que começa no ponto de equilíbrio do sistema antes da contingência, evolua para o ponto de equilíbrio do sistema sob contingência. Além disso, o uso do critério sugerido em ([1]) tomado como restrição do problema do planejamento ([2], [3], [4]), não considera a estabilidade transitória do sistema na escolha de configurações promissoras do ponto de vista de custo. É verificado apenas se elas satisfazem ao teste de contingências. Tendo em vista estas considerações, propõe-se neste trabalho o uso da estabilidade transitória verificada através de domínios de estabilidade fornecidos com o auxílio do segundo método de Liapunov.

Considera-se, no capítulo 2, o modelo matemático do sistema e um desenvolvimento que permite a determinação eficiente de domínios de estabilidade utilizando-se a função energia do sistema como função de Liapunov ([8]). São apresentados procedimentos para a redução do sistema à barra de máquina.

No capítulo seguinte é definido o problema de planejamento da transmissão a longo e a curto prazo. É proposto, em seguida, um critério para a expansão do sistema, levando-se em conta a segurança, determinada através de índices que consideram a energia total do sistema. Também é fornecido um procedimento para ordenar as configurações do ponto de vista de segurança.

É apresentado no capítulo 4 o algoritmo e fluxogramas para o problema de planejamento a curto prazo.

No capítulo 5, são resolvidos vários exemplos para ilustrar o procedimento proposto e no capítulo que segue são reunidas as conclusões principais. Foram incluídos a listagem do programa codificado em Basic junto com manual de utilização e uma listagem de resultados correspondentes a um dos exemplos.

CAPÍTULO 2

MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o modelo matemático para análise da estabilidade transitória de Sistemas de Potência. São discutidos os modelos completo e linearizado do fluxo de potência e os procedimentos necessários para redução do sistema às barras de máquina.

Estuda-se as técnicas de análise de estabilidade como métodos numéricos e domínios de estabilidade. Discute-se ainda a estabilidade do ponto de equilíbrio, bem como os métodos de determinação de domínios de estabilidade.

Apresenta-se, também, um algoritmo de determinação de domínios de estabilidade a ser aplicado em problemas de Planejamento.

2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO DE SISTEMA

Será utilizado o modelo clássico do sistema, no qual fa

zêm-se as seguintes considerações ([9], [10], [11], [12], [13]) :

- a) a potência mecânica será considerada constante durante a análise, tendo em vista que os reguladores de velocidade tem constantes de tempo grandes comparada com o tempo de duração do transitório.
- b) representa-se a máquina síncrona por uma fonte de tensão constante em série com sua reatância transitória de eixo direto e supõe-se que as máquinas são de rotor liso.
- c) desconsidera-se o efeito de reguladores de excitação.
- d) despreza-se a reação de armadura.
- e) a inércia da máquina é tomada como um valor constante.
- f) as cargas são representadas por impedâncias constantes.
- g) supõe-se as potências de amortecimento como composta de duas parcelas. A primeira relaciona-se às perdas mecânicas e variações da carga com o escorregamento e é proporcional às velocidades de escorregamento. A segunda é ligada às diferenças de velocidades de escorregamento.

Com estas hipóteses as equações que regem o comportamento dinâmico do sistema são dadas por:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d\delta_i}{dt} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} \left(\frac{d\delta_i}{dt} - \frac{d\delta_j}{dt} \right) + P_{ei} - P_{mi} = 0 \quad (2.2.1)$$

onde

t - tempo

δ_i - ângulo em graus elétricos entre o eixo do rotor da i-ésima máquina

quina e um eixo girando a uma velocidade de referência;

M_i - constante de inércia de i -ésima máquina;

d_i - coeficiente de amortecimento da i -ésima máquina;

b_{ij} - constante de amortecimento assíncrono onde $b_{ij} \neq b_{ji}$ em geral;

P_{mi} - potência mecânica de entrada para a i -ésima máquina;

P_{ei} - potência elétrica entregue pela i -ésima máquina, dada por

$$P_{ei} = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |E_i E_j| B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j), \quad (2.2.2)$$

onde:

E_i - tensão na barra interna da i -ésima máquina

G_{ii} - carga equivalente na i -ésima barra de geração

B_{ij} - susceptância de transferência entre a barra interna da i -ésima e da j -ésima máquina.

Escreve-se, por conveniência,

$$|E_i E_j| B_{ij} = F_{ij}, \quad (2.2.3)$$

$$P_{mi} - G_{ii} E_i^2 = P_i, \quad (2.2.4)$$

onde os F_{ij} são chamados coeficientes de sincronização e P_i de injeção na barra i .

Observa-se que as equações acima dizem respeito a um sistema reduzido às barras internas de máquina. Esta não é, porém, a situação geral. Tem-se frequentemente outras barras diferentes das barras internas de máquinas. Para o estudo da estabilidade transitória, é então necessário, em geral, que se reduza o siste-

ma a um sistema constituído somente por barras internas de máquina.

Para se proceder à redução são necessários os seguintes passos:

a) determinação do ponto de equilíbrio do sistema. Isto é conseguido através de um fluxo de potência, onde determinam-se os ângulos e tensões das barras e fluxos de potência ativa e reativa nas linhas.

O fluxo de potência pode ser completo (A.C) ou linear (D.C.).

Para o modelo A.C. tem-se as seguintes expressões:

$$P_k = |V_i|^2 A_{ij} \sin(a_{ij}) + |V_i| |V_j| A_{ij} \sin(c_i - c_j - a_{ij}) \quad (2.2.5)$$

$$Q_k = |V_i|^2 (A_{ij} \cos(a_{ij}) - 1/2 B_{ij}) - |V_i| |V_j| \cos(a_i - a_j - c_{ij}) \quad (2.2.6)$$

onde:

P_k - é o fluxo de potência ativa na linha k, entre as barras i e j.

Q_k - é o fluxo de potência reativa na linha k, entre as barras i e j.

V_i - é a tensão na barra i.

A_{ij} - é a admitância da linha k entre as barras i e j.

a_{ij} - é o ângulo da impedância série da linha k entre a barra i e

a barra j subtraído de $\pi/2$ rd.

α_i - é o ângulo da tensão V_i em relação a referência

B_{ij} - é a susceptância de transferência entre as barras i e j .

Tendo em vista que as expressões acima são não-lineares, a determinação da solução das mesmas para encontrar o ponto de equilíbrio é conseguida através de métodos iterativos (Newton-Raphson, Gauss, Gauss-Seidel). Isto demanda tempo e memória do computador.

No problema de planejamento, selecionam-se alternativas favoráveis dentro de uma grande variedade de casos, tornando-se difícil a utilização do modelo completo do fluxo de potência, embora obtenha-se resultados precisos.

Torna-se necessário utilizar uma simplificação que não sacrifique a qualidade dos resultados e que além disso leve a um tempo computacional menor.

Isto é conseguido através da aproximação linear do fluxo de potência (D.C.) no qual obtém-se uma estimativa dos fluxos de potência ativa no sistema, aproximando-se o seno do ângulo pelo ângulo. Consideram-se também que as tensões nas barras em módulo sejam 1.0 p.u, uma vez que estes valores são próximos a um. São desprezadas as resistências das linhas, pois em geral, as reatâncias série das linhas são maiores que suas resistências ($|Z| \approx |X|$).

Para este modelo tem-se as seguintes expressões:

$$\theta = Z_{bus} \cdot S \quad (2.2.7)$$

$$P_k = (\theta_i - \theta_j) / X_k \quad (2.2.8)$$

onde θ é o vetor de ângulos das barras de n componentes, S é o vetor de potências líquidas nas barras de n componentes, Z_{bus} é a matriz $n \times n$ das impedâncias do sistema e X_k a reatância série da linha k entre a barra i e a barra j .

Se necessário, posteriormente à fase inicial do planejamento, para os casos mais críticos indicados pela análise com o modelo linear, poderia ser realizada uma análise mais precisa com o modelo completo (A.C.).

Tendo em mãos os dados do fluxo de potência passa-se ao próximo item;

b) Cálculo das tensões e ângulos internos das barras de máquina

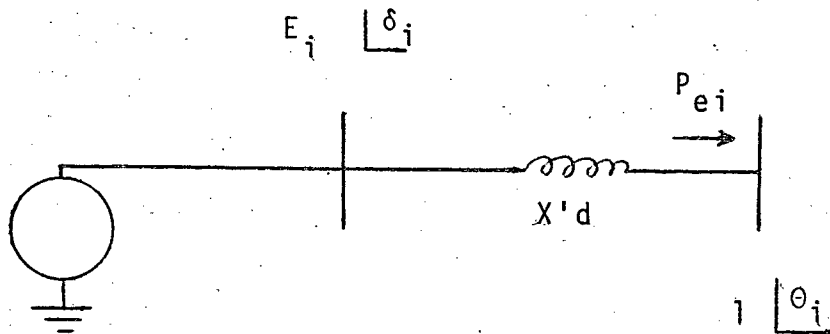


Fig. 2.1. Representação do modelo de uma máquina síncrona.

Para o cálculo de $|E_i|$ e δ_i , ângulo da barra interna de máquina, usam-se as expressões (| 12 |)

$$|E_i| = \sqrt{1 + (P_{ei} \cdot X'_d)^2} \quad (2.2.9)$$

onde P_{ei} é a potência elétrica injetada na barra i e

$$\delta_i = \theta_i + \text{TAN}^{-1} (P_{ei} \cdot X'_d) \quad (2.2.10)$$

Isto também pode ser deduzido da figura 2.1.

c) Transformação das cargas em impedâncias equivalentes. Isto é conseguido do modo indicado na figura 2.2 (|12|) e dado pela relação

$$R = 1/p \quad (2.2.11)$$

onde R é a impedância equivalente a uma carga P .

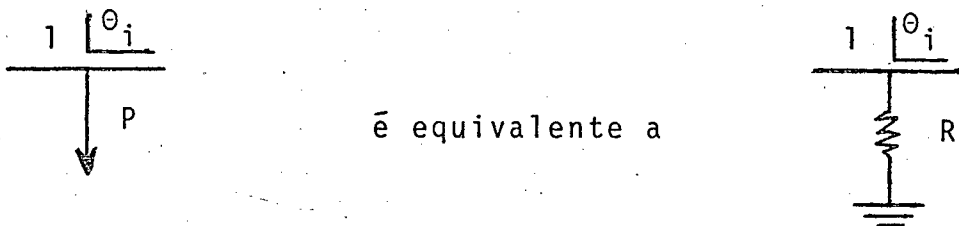


Fig. 2.2. - Representação de cargas

d) Cálculo das potências mecânicas das máquinas. Sabe-se que em regime

$$P_{ei} = P_{mi} \quad (2.2.12),$$

isto é, a potência elétrica injetada no nó i pela i -ésima máquina é igual a potência mecânica entregue a esta máquina. Desse modo a potência mecânica fica conhecida em seguida à obtenção da potência elétrica.

Após esta seqüência de cálculos passa-se, no próximo item, à redução do sistema a um sistema equivalente só com barras internas de máquinas.

2.3. REDUÇÃO À BARRA INTERNA DE MÁQUINA

Para redução à barra interna de máquina deve-se eliminar todos os nós com exceção dos nós atrás das reatâncias transitórias das máquinas, nos quais pelos passos anteriores já são conhecidos a tensão e o ângulo. Isto é obtido através de operações matriciais levando-se em conta que só existem injeções de corrente nos nós de barras de máquina. Considera-se que as cargas estão na forma de impedâncias equivalentes constantes.

Assim sendo temos

$$I = Y V \quad (2.3.1)$$

onde I é o vetor de correntes injetadas no sistema, V é o vetor das tensões de barras e I pode ser escrito como:

$$I = \begin{bmatrix} I_g \\ 0 \end{bmatrix}$$

Particionando (2.3.1) tem-se

$$\begin{bmatrix} I_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gr} \\ Y_{rg} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ V_r \end{bmatrix} \quad (2.3.2)$$

onde o índice g refere-se a barra de máquina e o índice r às outras barras.

Efetuada-se o produto matricial obtém-se

$$I_g = Y_{gg} V_g + Y_{gr} V_r \quad (2.3.3)$$

$$0 = Y_{rg} V_g + Y_{rr} V_r \quad (2.3.4)$$

Resolvendo-se para I_g e V_g

$$I_g = \left[Y_{gg} - Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg} \right] V_g \quad (2.3.5)$$

A matriz

$$Y_{red} = \left[Y_{gg} - Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg} \right] \quad (2.3.6)$$

é a matriz de admitância de barra do sistema reduzido, que será necessário para o estudo da estabilidade transitória do sistema, possuindo dimensão $g \times g$, onde g é o número de máquinas.

A matriz reduzida pode então ser escrita como

$$Y_{red} = G_{red} + j B_{red} \quad (2.3.7)$$

Para os estudos que se seguem despreza-se a parte real de Y_{red} , do mesmo modo que (|8|, |15|, |13|, |16|).

Com o uso da parte imaginária de (2.3.7) o sistema é descrito por equações diferenciais como em (2.2.1).

Obtida uma descrição do sistema por (2.2.1), pode-se proceder à análise da estabilidade transitória. Para isto são descritos, no ítem seguinte, os procedimentos realizados.

2.4. MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

O problema da estabilidade pode ser entendido como a capacidade que apresenta o sistema de recuperar o regime de funcionamento normal, a partir do estado em que o mesmo se encontrava no instante em que cessa uma perturbação.

O modelo (2.2.1) descreve a evolução do ângulo δ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) em relação a um ângulo girando a uma velocidade constante tomada como referência. Definindo-se δ_i e $\dot{\delta}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), como variáveis de estado, onde

$\dot{\delta}_i = \frac{d\delta_i}{dt}$, pode-se escrever (2.2.1) na forma

$$\dot{\delta}_i = w_i$$

$$M_i \dot{w}_i = -d_i w_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (w_i - w_j) + P_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n F_{ij} \sin (\delta_i - \delta_j) \quad (2.4.1)$$

Tendo-se n -máquinas, o número de variáveis de estado necessárias será $(2n - 2)$, ao desprezar-se o amortecimento ou considerá-lo uniforme, isto é, $\frac{d_i}{M_i} = \text{constante}$ ($[24]$, $[13]$, $[15]$, $[16]$).

Entretanto, no caso mais geral tem-se amortecimento não uniforme, e neste caso, são necessárias $(2n - 1)$ variáveis de estado ($[8]$, $[13]$, $[15]$). Nesta situação fixa-se um dos ângulos por exemplo δ_n , como referência.

Assim:

$$\alpha_i = \delta_i - \delta_n \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.4.2)$$

com isso (2.4.1) fica

$$\begin{aligned} \dot{w} &= -M^{-1} R w - M^{-1} T^t f(P, F, \alpha) \\ \dot{\alpha} &= T w \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

onde

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{12} & \dots & F_{1n} & F_{23} & \dots & F_{2n} & \dots & F_{n-1,n} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} & -1 \\ I_{n-1} & \vdots \\ & -1 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$M = \text{diag} [M_i]$$

$$R = [r_{ij}] \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$r_{ij} = \begin{cases} -b_{ij} & \text{se } i \neq j \\ d_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n b_{ik} & \text{se } i = j \end{cases}$$

onde

$$f_i(P_i, F, \alpha) = -P_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} \sin(\alpha_i - \alpha_j) + \\ + F_{in} \sin(\alpha_i)$$

Definida as equações dinâmicas do sistema, na forma (2.4.3), uma das maneiras de analisar-se a estabilidade transitória consiste no uso de métodos numéricos. A integração numérica das equações fornece a evolução dos ângulos no tempo. Analisando-se estas curvas decide-se sobre a estabilidade transitória do sistema.

Este método apresenta como desvantagem o que segue:

- a) dependência da interação homem-computador, para decidir sobre a evolução dos ângulos no tempo.
- b) a priori não pode-se determinar o tempo final de observação.
- c) se o número de máquinas for grande, a observação de todas as curvas é dificultada.
- d) deve ser observado para cada condição inicial.

Assim sendo não é indicado a sua utilização como método de análise.

Um outro procedimento possível consiste na utilização de métodos diretos baseado no segundo método de Liapunov, com o uso de domínios de estabilidade.

Pode-se conceituar domínio de estabilidade exato, de um ponto de equilíbrio estável, como sendo o conjunto aberto formado

por todas as condições iniciais, de tal modo que as trajetórias que passam por eles, permanecem na vizinhança do ponto de equilíbrio, e que contenha o ponto de equilíbrio.

A qualquer subconjunto conexo deste conjunto, que contenha o ponto de equilíbrio, denomina-se domínio de estabilidade.

Com o uso de domínios a estabilidade pode ser decidida testando-se se o estado do sistema no instante em que cessa a perturbação pertence ao domínio de estabilidade. Enfatiza-se o fato de que o estado do sistema no instante em que cessa a perturbação é considerado como condição inicial para o sistema de pois de retirada a perturbação.

No ítem seguinte estuda-se a estabilidade do ponto de equilíbrio como condição necessária para a determinação de domínios de estabilidade.

2.5. ESTABILIDADE DO EQUILÍBRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Colocando-se em (2.4.3)

$$\dot{\alpha} = \dot{w} = 0$$

obtêm-se as equações dos pontos de equilíbrio do sistema. Isto fornece:

$$w = 0 \quad (2.5.1)$$

$$f(P, F, \alpha) = 0 \quad (2.5.2)$$

Os pontos de equilíbrio possuem, então, a forma

$$\left[0, \alpha^e \right]^t, \quad 0 \in \mathbb{R}^n$$

Em (|17|) escreve-se

$$h_i(F, \alpha) = \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} \sin(\alpha_i - \alpha_j) + F_{in} \sin \alpha_i$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (2.5.3)$$

e portanto (2.5.2) fica.

$$P_i = h_i(F, \alpha) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.5.4)$$

Desde que h_i é diferenciável (|17|), o Jacobiano J_h é uma matriz $(n-1) \times (n-1)$ onde

$$\left[J_h(\alpha) \right]_{ij} = \begin{cases} F_{in} \cos \alpha_i + \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} \omega(\alpha_i - \alpha_j) & \text{se } i = j \\ - F_{ij} \cos(\alpha_i - \alpha_j) & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (2.5.5)$$

Pode-se definir, pois, a região chamada região principal (π), que de (|17|) tem-se

$$\pi = \left[\alpha \mid \det \left[J_h(\lambda \alpha) \right] > 0, \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \right] \quad (2.5.6)$$

Mostra-se também que esta região contém o politopo L de finido por (|20|)

$$L = \left[\alpha \mid |\alpha_i| \leq \pi/2, \quad |\alpha_i - \alpha_j| \leq \pi/2, \quad i, j = 1, 2, \dots, (n-1) \right] \quad (2.5.7)$$

e que depende apenas da topologia do sistema.

Prova-se ([8] , [17]) que se (2.4.3) possui solução então existe uma única solução na região principal. Para o presente trabalho considera-se que os pontos examinados tem coordenada α tal que $\alpha^e \in L$, onde L é o interior de L .

Pode-se realizar uma mudança de variáveis, de modo a analisar-se a estabilidade da origem, descrita por

$$z_i = \alpha_i - \alpha_i^e \quad i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2.5.8)$$

Então (2.4.3) pode ser escrito como ([8])

$$\begin{aligned} \dot{w} &= -M^{-1} R w - M^{-1} T^t f (P, F, z + \alpha^e) \\ \dot{z} &= T w \end{aligned} \quad (2.5.9)$$

Tem-se agora o ponto do equilíbrio de (2.4.7) como sendo a origem de (2.5.9).

A estabilidade da origem de (2.5.9) pode ser estudada por um dos seguintes modos.

- 1) através do teorema da aproximação linear, analisando-se a parte real dos autovalores da matriz de derivadas primeiras do segundo membro de (2.5.9) calculados em $z = 0$.
- 2) pela análise da natureza do extremo da função energia potencial em $z = 0$.
- 3) pelo segundo método de Liapunov.

A origem de (2.5.9) conforme ([8]) é assintoticamente estável no sentido de Liapunov se

a. $(\forall \epsilon > 0) (\exists \delta (\epsilon) > 0) (\forall t \geq 0) (\|z^0\| < \delta \rightarrow \|z(t; z^0)\| < \epsilon)$

b. $\lim_{t \rightarrow \infty} \|z(t; z^0)\| = 0$ com $t \rightarrow \infty$

Se somente a condição a é satisfeita a origem é dita estável no sentido de Liapunov. De outro modo a origem é instável.

O segundo método de Liapunov é uma generalização da idéia do uso de energia interna do sistema.

Seja um sistema de equações diferenciais de primeira ordem da forma:

$$\dot{x} = \Psi(x) \quad (2.5.10)$$

onde

$$\Psi(0) = 0$$

Seja, também, uma região conexa E que contém a origem e uma função V com as propriedades.

$$V(x) > 0, \quad x \neq 0 \quad (2.5.11)$$

$$V(x) = 0, \quad x = 0 \quad (2.5.12)$$

$$\dot{V}(x) \leq 0, \quad x \neq 0 \quad (2.5.13)$$

$$\dot{V}(x) = 0, \quad x = 0, \quad x \in E \quad (2.5.14)$$

onde

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} = \nabla V^t \Psi(x) \quad (2.5.15)$$

é chamada derivada de V ao longo das trajetórias do sistema (2.5.10).

Encontrada uma função V com as propriedades acima, conforme (|18|), a estabilidade da origem de (2.5.10) é garantida, e a função V é chamada de função de Liapunov para a estabilidade da origem de (2.5.10). Se a condição (2.5.13) é trocada para $\dot{V}(x) < 0$, a V é dita uma função de Liapunov para estabilidade assintótica da origem.

Em alguns casos, mesmo com a condição (2.5.13), é possível provar-se estabilidade assintótica. Em (|19|) mostra-se que a condição suficiente para isto é que o conjunto de pontos dado por $\dot{V}(x) = 0$ não contenha nenhuma trajetória de (2.5.10) inteiramente com exceção dos pontos de equilíbrio.

Em (|8|) mostra-se que a derivada desta função ao longo das trajetórias de (2.4.3) é semidefinida negativa numa vizinhança da origem, mas pode ser usada para estabilidade assintótica da origem se os amortecimentos são positivos.

Nota-se que o gradiente de E_p , ∇E_p , é dado por

$$\nabla E_p = f(P, F, \alpha) \quad (2.5.19)$$

Portanto as soluções de (2.5.2) são pontos extremos da função energia potencial.

A expressão da energia potencial, usando-se a mudança de variáveis (2.5.8) é:

$$E_p(P, F, z) = \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=j+1}^{n-1} F_{ij} \left[-\cos(\bar{z}_{ij} + \alpha_{ij}^e) \right] +$$

$$\begin{aligned}
 & + \cos \alpha_{ij}^e - z_{ij} \operatorname{sen} \alpha_{ij}^e \Big] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} \left[\cos (z_i + \alpha_i^e) + \right. \\
 & \left. + \cos \alpha_i^e - z_i \operatorname{sen} \alpha_i^e \right] \quad (2.5.20)
 \end{aligned}$$

onde

$$z_{ij} = z_i - z_j \quad \text{e} \quad \alpha_{ij}^e = \alpha_i^e - \alpha_j^e \quad (2.5.21)$$

Mostra-se em (|8| , |17|) que a matriz de derivadas primeiras do primeiro membro de (2.5.2) é a matriz Hessiana da energia potencial e é definida positiva no interior de L_Z , que é a região correspondente do politopo L , quando efetua-se a mudança de variáveis (2.5.8).

Portanto, considerando-se (2.4.3) com α^e pertencente a L , e $[0, \alpha^e]^t$ trasladado para a origem de (2.5.9), a origem de (2.5.9), é assintoticamente estável (|8|).

A expressão da energia potencial de (2.4.3) como em (|8| , |20|) é

$$E_p(P, F, \alpha) = \int_c \langle f(P, F, \alpha), d\alpha \rangle + Q \quad (2.5.22)$$

sendo Q uma constante arbitrária, escolhida de modo que $E_p(P, F, \alpha^e) = 0$, onde denota-se α^e ao ângulo α no equilíbrio. Logo.

$$Q = - \int_c \langle f(P, F, \alpha), d\alpha \rangle \Big|_{\alpha = \alpha^e} \quad (2.5.23)$$

Como

$$\frac{df_i}{d\alpha_j} = \frac{df_j}{d\alpha_i},$$

tem-se que o valor de (2.5.22) independe do caminho de integração e, portanto, conforme (|8|) e (|20|), de (2.5.22):

$$\begin{aligned}
 E_p (P, F, \alpha) = & \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} - \cos (\alpha_i - \alpha_j) + \\
 & + \cos (\alpha_i^e - \alpha_j^e) - (\alpha_i - \alpha_j - \alpha_i^e + \alpha_j^e) \sin (\alpha_i - \alpha_j) \\
 & + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} - \cos \alpha_i + \cos \alpha_i^e - (\alpha_i - \alpha_i^e) \sin \alpha_i \quad (2.5.24)
 \end{aligned}$$

Assegurada a estabilidade do ponto de equilíbrio e tendo em vista o item 2.4. onde nota-se que a análise da estabilidade transitória através de domínios de estabilidade é conveniente, passa-se no item seguinte ao estudo da determinação de domínios de estabilidade.

2.6. DETERMINAÇÃO DE DOMÍNIOS DE ESTABILIDADE

Muitos trabalhos foram apresentados com a finalidade de determinação de domínios de estabilidade, conforme citado e discutido em (|8|, |21|). Vários autores tem usado os pontos de equilíbrio instáveis com menor energia potencial como referência para cálculo do domínio de estabilidade (|20|, |23|, |24|, |27|).

Entretanto, este tipo de procedimento possui certos inconvenientes quanto a convergência dos algoritmos propostos, tempo de computação e dependência da escolha da máquina de referência.

Já em (|8|) a determinação de domínios de estabilidade está baseada na decomposição da energia potencial em parcelas positivas. Demonstrou-se (|8|) que a Energia total é uma função de Liapunov em uma região, e considerando-se as superfícies de nível da energia potencial, chega-se a um domínio de estabilidade dado pelo conjunto de nível que tem intersecção não vazia com a fronteira de L_2 e está contida em L_2 , onde L_2 é definido como

$$L_2 = \left[z \mid (-\pi - 2\alpha_k^e) \leq z_k \leq (\pi - 2\alpha_k^e) \wedge (-\pi - 2(\alpha_p^e - \alpha_p^e)) \leq z_{kp} \leq (\pi - 2(\alpha_k^2 - \alpha_p^e)) \mid k, p = 1, \dots, n-1, k \neq p \right]$$

Sabe-se (|8|) que a energia cinética do sistema (2.5.9) tem a forma:

$$E_C = 1/2 \sum_{i=1}^n M_i w_i^2 \quad (2.6.1)$$

Portanto a energia total do sistema (2.5.9) é igual à energia potencial em pontos da forma $(0, z)^t$. Sabendo-se que os pontos de equilíbrio são desta forma, e que a energia cinética, conforme (2.6.1), é uma forma quadrática, conclui-se que a região de validade da energia total como função de Liapunov é dependente só da energia potencial, podendo-se então obter-se índices para os domínios de estabilidade utilizando-se somente pontos da forma $(0, z)^t$, o que é equivalente a utilizar como referência para o domínio de estabilidade somente a energia potencial. Assim o domínio de estabilidade será especificado pelo conjunto D onde

$$D = \{(w, z)^t \in R^{n-1} \mid V(z, w) \leq k, k > 0\}$$

onde k é o valor da superfície de nível da energia potencial cujo conjunto de nível tem intersecção não vazia com a fronteira de L_2 e está contido em L_2 .

Usando-se o procedimento de (|8|) não são observadas as desvantagens da determinação de domínios através do ponto de equilíbrio instável com menor energia potencial.

No presente trabalho será utilizado o algoritmo proposto em (|8|) e modificado por (|21|), no qual a determinação do domínio de estabilidade pode ser resolvido como um problema de otimização, sujeito a restrições, empregando-se o algoritmo de Newton - Raphson, tendo em vista o grau de convergência deste método em função quase quadráticas como é o caso da Energia potencial em L_2 .

Nota-se de (2.5.20) que a E_p pode ser escrita como uma soma de m parcelas da forma

$$g_k = F_{ij} \left[- \cos (z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - z_{ij} \operatorname{sen} \alpha_{ij}^e \right] \quad (2.6.2)$$

O problema consiste em encontrar-se o mínimo entre todos os números da energia potencial calculado nas faces do politopo L_2 , isto é

$$\min_k \{ \min_{\bar{z}} E_p(\bar{z}) \} \quad (2.6.3)$$

$$s. a. \quad z \in W_k \cap L_2$$

onde W_k é um hiperplano que contém a k -ésima face de dimensão

máxima. As faces $W_k \cap L_2$ do politopo L_2 são do tipo (|8|, |21|)

$$z_k = z_k - \left(\frac{\pi}{2} - 2 \alpha_k^e \right) = 0 \quad (2.6.4)$$

$$z_{kp} = z_k - z_p - \left(\frac{\pi}{2} - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e) \right) = 0 \quad (2.6.5)$$

A procura do ponto de tangência em uma dada face pode ser feita tendo uma das variáveis (z_k) ou a diferença de duas ($z_k - z_p$) constante durante a busca nesta face, conforme tivermos faces do tipo (2.6.4) ou (2.6.5). Assim a parcela da função objetiva que depende de (z_k) ou ($z_k - z_p$) é constante e chamada de limite inferior da energia potencial na face correspondente.

Pode-se decompor o problema (2.6.3) em subproblemas de dois tipos (|8|), conforme se tenha face do tipo (2.6.4) ou (2.6.5). Encontrar a solução do problema (2.6.3) consiste em encontrar o mínimo entre os mínimos dos subproblemas. Para faces do tipo (2.6.4) o subproblema fica (|8|):

$$\begin{aligned} & \min_z E_p(z) \\ \text{S. a. } & z_k - \left(\frac{\pi}{2} - 2 \alpha_k^e \right) = 0 \end{aligned}$$

Usando-se o multiplicador de Lagrange, tem-se:

$$\min \{ E_p(z) + \lambda [z_k - \left(\frac{\pi}{2} - 2 \alpha_k^e \right)] \} \quad (2.6.7)$$

$$\text{S. a. } z \in L_2$$

Para a obtenção da solução de (2.6.7) calcula-se o gradiente de

$$E = E_p(z) + \lambda Z_k$$

que é dado por

$$\begin{aligned} \nabla E_i = & \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} \left[\operatorname{sen}(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) - \right. \\ & \left. - \operatorname{sen} \alpha_{ij}^e \right] + F_{in} \left[\operatorname{sen}(z_i + \alpha_i^e) - \operatorname{sen} \alpha_i^e \right] \end{aligned}$$

$$\text{para } i = 1, 2, \dots, n-1, \quad i \neq k \quad (2.6.8)$$

$$\begin{aligned} \nabla E_k = & \sum_{j=1}^{n-1} F_{kj} \left[\operatorname{sen}(z_{kj} + \alpha_{kj}^e) - \operatorname{sen} \alpha_{kj}^e \right] + \\ & + F_{kn} \left[\operatorname{sen}(z_k + \alpha_k^e) - \operatorname{sen} \alpha_k^e \right] + \lambda \end{aligned} \quad (2.6.9)$$

$$\nabla E_n = z_k - \left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha_k^e \right) \quad (2.6.10)$$

onde

$$E_i = \frac{\partial}{\partial z_i} (E_p(z) + \lambda Z_k) \quad i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2.6.11)$$

$$e \quad \nabla E_n = \frac{\partial}{\partial \lambda} (E_p(z) + \lambda Z_k) \quad (2.6.12)$$

Logo o vetor gradiente é

$$\nabla E_i = \left[\nabla E_i \right] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6.13)$$

A Hessiana de $(E_p(z) + \lambda Z_k)$ será dado por

$$J_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} (\cos z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + F_{in} \cos (z_i + \alpha_i^e) & i = j \\ - F_{ij} \cos (z_{ij} + \alpha_{ij}^e) & i \neq j \end{cases}$$

$$\text{para } i, j = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2.6.14)$$

$$J_{ni} = J_{in} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq k \quad (2.6.15)$$

$$J_{nk} = J_{kn} = 1 \quad (2.6.16)$$

onde

$$J_{ij} = \frac{\partial}{\partial z_j} (\nabla E_i) \quad i, j = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2.6.16)$$

$$J_{in} = J_{ni} = \frac{\partial}{\partial \lambda} (\nabla E_i) \quad i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2.6.17)$$

$$J = | J_{ij} | \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2.6.18)$$

Para o m̄nimo de (2.6.6) a condiç̄o necess̄ria ẽ que

$$\nabla E = 0 \quad (2.6.19)$$

Conclui-se, pois, que resolver (2.6.6) ẽ resolver-se (2.6.19).

Para faces do tipo de (2.6.5), o subproblema fica: (|21|)

$$\min_z E_p (z)$$

$$S. a. \quad z_k - z_p - \left[\frac{\pm}{-} \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e) \right] = 0 \quad (2.6.20)$$

Com o multiplicador de Lagrange λ , chega-se a

$$\min \{ E_p(z) + \lambda [z_k - z_p - (\frac{\pm}{-} \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e))] \}$$

$$S. a. \quad z \in L_2 \quad (2.6.21)$$

O gradiente de $E = E_p(z) + \lambda Z_{kp}$ será

$$\begin{aligned} \nabla E_i &= \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} \left[\text{sen}(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) - \text{sen} \alpha_{ij}^e \right] + \\ &+ F_{in} \left[\text{sen}(z_i + \alpha_i^e) - \text{sen} \alpha_i^e \right] \end{aligned}$$

$$\text{para } i = 1, 2, \dots, (n-1), \quad i \neq k, \quad i \neq p \quad (2.6.22)$$

$$\begin{aligned} \nabla E_k &= \sum_{j=1}^{n-1} F_{kj} \left[\text{sen}(z_{kj} + \alpha_{kj}^e) - \text{sen} \alpha_{kj}^e \right] + \\ &+ F_{kn} \left[\text{sen}(z_k + \alpha_k^e) - \text{sen} \alpha_k^e \right] + \lambda \end{aligned} \quad (2.6.23)$$

$$\begin{aligned} \nabla E_p &= \sum_{j=1}^{n-1} F_{pj} \left[\text{sen}(z_{pj} + \alpha_{pj}^e) - \text{sen} \alpha_{pj}^e \right] + \\ &+ F_{pn} \left[\text{sen}(z_p + \alpha_p^e) - \text{sen} \alpha_p^e \right] - \lambda \end{aligned} \quad (2.6.24)$$

$$\nabla E_n = z_k - z_p - \left[\frac{\pm}{-} \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e) \right] \quad (2.6.25)$$

$$\nabla E = \left[\nabla E_i \right], \quad i = 1, \dots, n$$

Tem-se, entretanto que no ponto solução de (2.6.20) o vetor gradiente da energia potencial \bar{e} é normal a face Z_{kp} , e de componentes

$$\left[0 \ 0 \dots \nabla E_k \ 0 \dots 0 \ \nabla E_p \ 0 \dots 0 \right]^t \quad (2.6.26)$$

Visto que no ponto ótimo $Z_{kp} = 0$, isto é,

$$z_k - z_p = \frac{\pi}{2} - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e) \quad (2.6.27) \text{ e}$$

conclui-se que

$$\nabla E_k = - \nabla E_p \quad (2.6.28)$$

Tendo em vista que a solução será por um algoritmo tipo Newton - Raphson de modo que no ponto solução o vetor gradiente tenha todas as componentes nulas, pode-se eliminar a componente p somando as componentes p e q do vetor e fazendo uso de (2.6.28):

$$\nabla E'_i = \nabla E_i \quad i = 1, 2, \dots, (n-1), \quad i \neq k, \quad i \neq p \quad (2.6.29)$$

$$\nabla E'_k = \nabla E_k + \nabla E_p \quad (2.6.30)$$

$$\nabla E'_p = \nabla E_n \quad (2.6.31)$$

Redefine-se o vetor gradiente

$$\nabla E' = \left[\nabla E'_i \right] \quad i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2.6.32)$$

Logo a condição necessária para o mínimo (2.6.20) é

$$\nabla E = 0 \quad (2.6.33)$$

Para o algoritmo de Newton-Raphson deve-se calcular a matriz Jacobiana, J , de (2.6.32).

Logo:

$$J_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} \cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + F_{in} \cos(z_i + \alpha_i^e) & i = j \\ -F_{ij} \cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) & i \neq j \end{cases}$$

$$\text{para } i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad i \neq k, \quad i \neq p \quad (2.6.34)$$

$$J_{kk} = \sum_{j=1}^{n-1} F_{kj} \cos(z_{kj} + \alpha_{kj}^e) + F_{kn} \cos(z_k + \alpha_k^e) - F_{pk} \cos(z_{pk} + \alpha_{pk}^e) \quad (2.6.35)$$

$$J_{kp} = \sum_{j=1}^{n-1} F_{pj} \cos(z_{pj} + \alpha_{pj}^e) + F_{pn} \cos(z_p + \alpha_p^e) - F_{kp} \cos(z_{kp} + \alpha_{kp}^e) \quad (2.6.36)$$

$$J_{kj} = -F_{kj} \cos(z_{kj} + \alpha_{kj}^e) - F_{pj} \cos(z_{pj} + \alpha_{pj}^e) \\ j = 1, 2, \dots, (n-1), \quad j \neq k, \quad j \neq p \quad (2.6.37)$$

$$J_{kp} = 1, \quad J_{pp} = -1, \quad J_{pj} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, (n-1), \quad j \neq k,$$

$$j \neq p \quad (2.6.38)$$

logo

$$J = [J_{ij}] \quad , \quad i, j = 1, 2, \dots, (n-1)$$

A solução iterativa de (2.6.7) e (2.6.21) por Newton - Raphson será dada por

$$z^{i+1} = z^i - J^{-1}(z^i) \nabla L(z^i) \quad (2.6.39)$$

onde ∇L representa o valor do gradiente do Lagrangiano calculado no ponto z do passo i .

Tendo em vista que a cada iteração i do método, z^{i+1} é calculado através da minimização de uma forma quadrática do tipo

$$\left[z^i \right]^t \left[J(z^i) \right] \left[z^i \right] \quad (2.6.40)$$

o uso de uma condição inicial zero conduz a um ponto que é solução de

$$\min_z \{ z^t H(0) z \} \quad (2.6.41)$$

$$S. A. \quad z_k = 0$$

ou

$$\min_z \{ z^t H(0) z \} \quad (2.6.42)$$

$$S. a. \quad z_{kp} = 0$$

onde $H(0)$ é a matriz Hessiana da função objetivo de (2.6.3), calculada na origem. Em consequência do uso desta condição inicial a primeira iteração de (2.6.7) ou (2.6.21) tem como ponto de partida a solução de (2.6.41) ou (2.6.42), ponto de tangência de z^t $H(0)$ z com $Z_k = 0$ ou $Z_{kp} = 0$, respectivamente. Pode-se, pois, utilizar um procedimento aproximado com o uso da primeira iteração apenas, tendo com isso uma razoável vantagem no tempo de cálculo e não sacrificando muito os resultados, conforme verificado em diversos exemplos. Isto se deve ao fato ([24]) que a função energia potencial varia muito pouco nas proximidades do ponto de equilíbrio instável com maior energia potencial e como o ponto solução de (2.6.7) ou (2.6.21) é próximo a este ponto, a solução (2.6.41) ou (2.6.42), por sua vez é próxima do ponto de tangência solução de (2.6.3). Logo, a análise feita em ([24]) é ainda válida e o valor de energia potencial calculada no ponto solução de (2.6.41) ou (2.6.42) fornece uma estimativa otimista do valor da energia potencial no ponto de tangência.

Deve-se levar em conta, entretanto, que o domínio de estabilidade dado pelo ponto de tangência é conservativo em relação aquele dado pelo ponto de equilíbrio instável com menor energia potencial, sendo pois, esta aproximação plenamente válida em problemas de planejamento em que o número de casos a examinar é grande. Com este procedimento economiza-se duas a quatro iterações em cada subproblema.

No algoritmo desenvolvido por ([8]) é proposto ainda uma heurística para o problema da face a ser pesquisada a tangência e uma regra de parada do algoritmo tendo por base a observação dos limites inferiores da energia potencial em cada face.

2.7. CONCLUSÕES

Neste capítulo introduziu-se o modelo matemático do sistema para o estudo da estabilidade transitória, tendo em vista o problema de planejamento. Para o uso deste modelo é necessário reduzir-se o sistema às barras internas de máquinas. Neste sentido discute-se o procedimento para redução do sistema a um sistema equivalente com somente barras internas de máquina. Discutiu-se os métodos de análise da estabilidade transitória, sendo escolhido o domínio de estabilidade como mais conveniente. Foram incluídos resultados da literatura referentes à estabilidade do ponto de equilíbrio, e a utilização da função energia do sistema como função de Liapunov para determinação de domínios de estabilidade. Para isto optou-se, por sua eficiência, pelo algoritmo proposto em (|8|) e modificado por (|21|). Este algoritmo foi apresentado enfatizando-se a possibilidade do uso da primeira iteração do algoritmo do ponto de tangência para problemas de Planejamento.

No próximo capítulo será colocado o problema do planejamento da Transmissão, suas restrições, critérios adotados, assim como a utilização dos conceitos abordados neste capítulo para a resolução do problema.

CAPÍTULO 3

3.0 PROBLEMA DO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é definido o problema do planejamento da transmissão a longo e a curto prazo, baseado na literatura existente. A seguir, propõe-se um critério para a expansão do sistema de transmissão tendo em vista a segurança.

Estuda-se a obtenção de configurações expandidas a partir de uma configuração inicial, de modo a eliminar as sobrecargas existentes.

Sugere-se um modo de ordenar do ponto de vista da segurança, várias configurações obtidas a partir do critério de expansão adotado, segundo um índice de segurança igualmente proposto.

3.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO

O problema do planejamento da transmissão em sistemas de potências consiste em indicar a evolução da rede de transmissão a partir de uma configuração inicial conhecida, com parâmetros associados a seus nós e ramos, durante um número finito de estágios de Planejamento, procurando-se a cada passo do problema,

minimizar o custo e obter o máximo de segurança.

Como definido acima, temos o problema do planejamento a longo prazo. No presente trabalho aborda-se o planejamento a curto prazo, em que considera-se somente um estágio do problema, no qual procura-se o máximo de segurança.

Vários autores ([2], [3], [5], [6], [7]) tem escrito sobre o problema do planejamento da transmissão.

Em ([2]) utiliza-se o fluxo de potência linear (D.C.) para estimar os fluxos nas linhas. A segurança da configuração é testada segundo uma análise de contingências em que se verifica a defasagem e a potência transmitida que não devem ultrapassar certo limite. Através de um algoritmo de busca em grafos adicionam-se linhas, o que leva a configurações ordenadas em razão do custo.

No trabalho de ([3]) é definido um critério de sobrecarga através da defasagem máxima permitida e o limite térmico da linha. É definido também o termo contingência como sendo a perda de uma linha. Utiliza-se programação linear para obter a configuração em cada ano e programação dinâmica para definir a evolução ótima das configurações dentro do horizonte de estudo.

Já ([7]) utiliza um índice ponderado entre custo e segurança para decidir sobre locais de expansão do sistema. No fator segurança leva-se em conta a linha mais carregada em função da sua capacidade máxima. É utilizado um fluxo de potência linear (D.C.) para determinação do estado do sistema.

Em ([5]) utiliza-se o fluxo de potência linear (D.C.) para detectar sobrecargas no sistema de transmissão e uma regra

para adição de linhas conforme sua sobrecarga, levando em conta o custo mínimo, dependendo entretanto do julgamento final por parte da engenharia.

Em (|4|) do mesmo modo, encara-se o problema do ponto de vista da programação linear, estabelecendo-se como restrições elétricas os limites térmicos da linha, queda de tensão, defasagem entre barras adjacentes e como função objetivo o custo.

Observa-se da literatura, que os autores utilizam como critério para detectar problemas elétricos no sistema de transmissão o limite térmico das linhas e a defasagem máxima entre barras não superior a um valor pré-estabelecido, como indicador do limite de estabilidade, analisados para cada configuração do sistema a partir de um fluxo de potência.

Em (|14|) propõe-se um método utilizando-se o algoritmo de Newton - Raphson que busca o ponto de operação do sistema sob uma condição de emergência, tomando como condição inicial o ponto de operação normal.

Em (|16|) demonstra-se que para modelos do sistema sem reguladores, a convergência de algoritmos tipo gradiente no fluxo de potência leva a um ponto de operação estável e a sua não convergência implica na inexistência de ponto de operação estável.

No presente trabalho prefere-se utilizar como instrumento de análise para a segurança do sistema sob uma condição de emergência, o domínio de estabilidade do ponto de operação do sistema para esta condição de emergência. Isto porque a estabilidade deste ponto de operação não implica que a trajetória que passa pelo estado do sistema no instante em que ocorre a emergência,

tomado como condição inicial sob emergência, alcança o ponto de operação quando o tempo tende ao infinito.

A razão disto é que um sistema de potência é um sistema não-linear e apresenta diversos pontos de equilíbrio. A análise da estabilidade deve ser feita considerando-se separadamente cada ponto de equilíbrio. Se o sistema admite mais de um ponto de equilíbrio, então o domínio de estabilidade de um ponto de equilíbrio estável é um subconjunto próprio do espaço de estado considerado. Neste caso existirão condições iniciais não pertencentes ao domínio de estabilidade tais que as trajetórias que comecem nestas condições iniciais não evoluem para o ponto de equilíbrio considerado.

Este fato pode ser visualizado pelo exemplo a seguir.

Suponha uma máquina - barra infinita com a seguinte configuração inicial, na fig. 3.2.1.

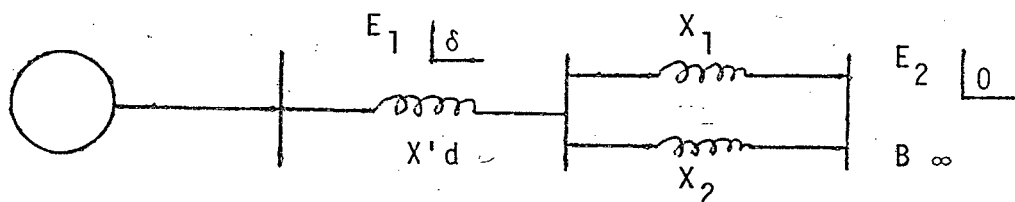


FIG. 3.2.1. Sistema Máquina-Barra Infinita

$$P_m = 1,3 \text{ pu}$$

$$X'd = 0,2 \text{ pu}$$

$$X_1 = 0,8 \text{ pu}$$

$$X_2 = 0,11 \text{ pu}$$

$$|E_1| = 1,5 \text{ pu}$$

$$|E_2| = 1,0 \text{ pu}$$

Tem-se que

$P_e = \frac{|E_1||E_2|}{X_{12}} \sin \delta$ é a potência elétrica que é

entregue pela máquina e X_{12} a reatância equivalente entre a barra 1 e a barra 2.

Para a situação da figura temos

$$X_{12} = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} + X_d = 0,3 \text{ pu, logo}$$

$P_e = 5 \sin \delta_e$. No equilíbrio $P_m = P_e$, logo

$$\delta_e = \sin^{-1} \frac{1,3}{5} = \frac{\pi}{12} \text{ rd}$$

Supondo a retirada da linha 2, temos

$$X_{12}^d = 1,0 \text{ pu}$$

$$P_e = 1,5 \sin \delta_e^d$$

$$\delta_e^d = \sin^{-1} \frac{1,3}{1,5} = \frac{\pi}{3} \text{ rd}$$

A energia potencial, relativa ao ponto de operação δ_e^d tem como expressão

$$E_p = -P_m \delta - \frac{E_1 E_2}{X_{12}^d} \cos \delta + P_m \delta_e^d + \frac{E_1 E_2}{X_{12}^d} \cos \delta_e^d$$

O ponto de equilíbrio instável com maior energia potencial é $\pi - \delta_e^d$, fixando um domínio de estabilidade para o ponto de equilíbrio em defeito, com energia potencial $E_p = 0,14$.

Os pontos de equilíbrio δ_e e δ_e^d são pontos de equilíbrio estáveis.

Pode-se obter o segundo resolvendo-se o algoritmo de Newton - Raphson para

$$P_m - \frac{|E_1||E_2|}{X_{12}} \sin \delta = 0$$

tomando-se como condição inicial $\delta_e = \pi/12$ rd.

O valor de energia potencial para $\delta_e = \pi/12$ é $E_p = 0,32$.

Em consequência disto as trajetórias do sistema que tem como condição inicial a condição inicial δ_e não evoluirão para o valor δ_e^d , pois δ_e não pertence ao domínio de estabilidade de δ_e^d , que neste caso é o exato. Chega-se ao mesmo resultado usando-se o método das áreas iguais.

É conveniente ressaltar que a convergência de um algoritmo numérico para solução das equações de equilíbrio, com condição inicial igual ao ponto de equilíbrio anterior à retirada de uma linha, não tem nenhuma relação com a trajetória do sistema que passa por esta condição inicial.

Nota-se, pois, que a utilização do fluxo de potência como ferramenta para análise de situações de emergência a partir de uma configuração inicial pode conduzir a resultados não válidos quanto a estabilidade transitória.

Determinando-se o domínio de estabilidade do ponto de equilíbrio obtido do fluxo de potência para a situação modificada e verificando-se se o ponto de equilíbrio da situação inicial pertence a este domínio, pode-se afirmar que o sistema evoluirá para o novo ponto de equilíbrio a partir da situação inicial. No caso do ponto de equilíbrio da situação inicial não pertencer ao domínio de estabilidade nada se afirma sobre a estabilidade do sistema, se o domínio usado não é o exato (|26|).

Outra vantagem da análise através do domínio de estabilidade é que muitas vezes pode-se garantir a estabilidade do sistema mesmo para situações que violem os limites pré-estabelecidos usualmente como o máximo de defasagem entre barras.

A seguir define-se uma série de termos que serão utilizados no decorrer deste trabalho.

a) Contingência - é a retirada de uma linha em um ramo e, no caso de existirem várias linhas no mesmo ramo, considera-se a retirada daquela de maior capacidade.

b) Teste de contingência - é a realização da contingência com a finalidade de analisar a segurança do sistema.

c) Sobrecarga - um sistema tem sobrecarga quando para alguma contingência é violada a segurança do sistema.

d) Configuração sobrecarregada - é uma configuração do sistema em que foram detectadas sobrecargas, isto é, existem situações de contingência que não satisfazem ao teste de contingência.

e) Configuração viável - é uma configuração do sistema em que foram eliminadas as sobrecargas por adição de novas linhas.

Com as definições acima, nos itens seguintes, é proposta uma abordagem do problema de planejamento a curto prazo do sistema de transmissão, iniciando pelo estabelecimento de um critério de sobrecarga.

3.3. CRITÉRIO DE SOBRECARGA

O critério de sobrecarga consiste em examinar a estabilidade transitória do sistema, para um teste de contingência, tomando-se como condição inicial o estado do sistema anterior à retirada da linha.

A resolução do problema de segurança baseia-se em dado um sistema com uma configuração inicial, aplicar-se um teste de contingência em cada ramo do sistema e, para cada contingência, verificar se existe ou não sobrecarga no sistema. Supõe-se que a retirada da linha (contingência) é instantânea e atua permanentemente de modo a deslocar o ponto de operação do sistema ([2], [3], [14]). Considera-se o estado do sistema antes da contingência como condição inicial para o ponto de operação sob contingência.

Estabelece-se um critério de sobrecarga, que diz se o sistema satisfaz ou não ao teste de contingência, examinando-se o domínio de estabilidade do ponto de operação do sistema sob contingência e verificando-se se o ponto de equilíbrio, antes da contingência pertence ou não a este domínio. Em caso positivo o teste de contingência foi satisfeito. Em caso negativo, foi detecta

da uma sobrecarga.

Se o teste de contingência foi satisfeito para contingências em todos os ramos do sistema, tem-se uma configuração viável.

Se para alguma contingência o teste não foi satisfeito, tem-se uma configuração sobrecarregada e deve-se tomar alguma medida para eliminar esta sobrecarga.

Tornou-se possível a adoção deste critério devido a utilização do algoritmo exposto no capítulo 2 ([8], [21]), que permite o cálculo de domínio de estabilidade de modo rápido, eficiente e sem excessiva utilização de memória computacional.

No teste de contingência é verificado se a trajetória do sistema que passa pela condição inicial, que é o ponto de operação antes da retirada da linha, alcança o ponto de operação do sistema sob contingência.

Tendo-se uma sobrecarga, isto é, para determinada contingência não foi satisfeito o teste, deve-se reforçar o sistema de transmissão de modo que para a nova configuração, que é obtida a partir da configuração inicial com o reforço necessário, o teste de contingências seja satisfeito para todos os ramos, conforme será comentado a seguir.

3.4. ELIMINAÇÃO DE SOBRECARGA

A eliminação da sobrecarga consiste na adição de linhas ao sistema de transmissão com a finalidade de viabilizar uma

configuração.

Conforme sugerido em ([2], [3]) o reforço no sistema é realizado mediante adição de linhas em ramos, com igual capacidade à da existente. Em caso de existirem várias linhas entre as duas barras, reforça-se com a construção de uma linha com a capacidade igual a de maior capacidade existente.

Deve-se adicionar linha(s) no sistema com a configuração inicial, na qual foi detectada a sobrecarga, com a finalidade de se conseguir uma nova configuração, que é uma expansão da inicial, e que seja uma configuração viável, isto é, satisfaça ao teste de contingência.

Surge então a questão de indicar-se ramos do sistema em que deve-se realizar esta adição de linha de modo a obter-se uma configuração viável.

Uma solução possível seria o reforço de cada ramo que sofreu a contingência e não satisfaz ao teste de contingência.

Outro caminho possível seria através da observação dos acréscimos de fluxos nas linhas do sistema ao se realizar a contingência, reforçando-se aquelas linhas que tivessem maior acréscimo de fluxo em relação a um valor de fluxo adotado como referência.

No presente trabalho estas duas soluções foram experimentadas e finalmente optou-se por uma terceira alternativa que, conforme os exemplos observados, revelou-se mais eficaz quanto ao número necessário de adições de linhas para a obtenção de uma configuração viável.

O esquema baseia-se no seguinte:

- a) a partir da configuração inicial, para as contingências que não passaram no teste, estabelece-se um índice de sobrecarga que é definido como a diferença entre a energia potencial do sistema calculada no ponto de operação antes da contingência e a energia potencial no ponto de tangência dada pelo algoritmo de ([8], [21]), que calcula o domínio de estabilidade.
- b) ordenam-se estes índices de sobrecarga em ordem decrescente.
- c) reforça-se, mediante a adição de linha de igual capacidade, ao ramo que sofreu a contingência que possui maior índice de sobrecarga.
- d) para a nova configuração obtida, realiza-se o teste de contingências. Se aprovar para todas as contingências, o problema de viabilização está resolvido. Caso contrário, calculam-se os índices de sobrecarga e repetem-se os passos b e c até a eliminação da sobrecarga.

Com esta sequência de passos finalmente pode-se chegar a uma configuração viável.

Nota-se também que podem ser obtidas outras configurações viáveis diferentes se no passo c, executado para a configuração inicial, utilizar-se outro índice de sobrecarga que não o maior e continuar a sequência exatamente como realizado para a obtenção da primeira configuração viável.

Se em qualquer contingência for ultrapassado o limite térmico de uma linha, deve-se adicionar em paralelo com esta uma

linha de igual capacidade e resolver o problema a partir desta configuração.

Tem-se, assim, um conjunto de configurações viáveis em número igual dos índices de sobrecarga, obtidos da configuração inicial.

Estabelece-se a seguir um critério de ordenação destas configurações viáveis do ponto de vista de segurança.

3.5. ORDENAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES VIÁVEIS DO PONTO DE VISTA SEGURANÇA

A ordenação de configurações consiste em ordenar configurações por meio de índices representativos da segurança do sistema.

Como visto no item anterior, obteve-se um número de configurações viáveis a partir de uma configuração inicial que apresenta sobrecarga. Fornece-se uma indicação de como relacioná-las tendo em vista uma maior segurança no sistema.

Isto é obtido do seguinte modo:

- a) para cada configuração viável obtida realizam-se os testes de contingência.
- b) para cada configuração estabelece-se um índice de segurança baseado na menor diferença entre a energia potencial calculada no ponto de tangência obtido pelo algoritmo de determinação do domínio de estabilidade

do ponto de operação sob contingência e a energia potencial no ponto de operação antes da contingência, para todas as contingências realizadas na configuração.

c) ordenam-se estes índices de segurança em ordem decrescente.

Obtem-se assim uma ordenação das configurações viáveis, segundo a ordem decrescente de seus índices de segurança, indicando desde a configuração mais segura até a menos segura conforme este critério.

Supondo que a retirada da linha não possa ser feita imediatamente durante uma emergência qualquer do sistema (um curto-circuito, por exemplo), o índice de segurança dá uma idéia da "folga" que o sistema possui para evoluir, até que a retirada da linha seja efetuada. Neste instante da retirada o estado do sistema é a condição inicial para as trajetórias que evoluem para o novo ponto de operação.

Em consequência disto a configuração com um índice de segurança maior que outra, poderá permanecer mais tempo em defeito antes da retirada da linha que apresenta a pior situação para esta configuração, do que aquela com índice menor em relação à sua própria pior situação. Em outras palavras as configurações são comparadas considerando-se a pior situação de defeito.

3.6. CONCLUSÕES

Neste capítulo escolheu-se um critério para analisar sobrecargas no sistema baseado na análise da estabilidade transitória utilizando-se de domínios de estabilidade para decidir sobre a necessidade de expansão do sistema de transmissão a partir de uma configuração inicial.

Define-se configuração viável e configuração sobrecarregada tendo em vista a satisfação ou não de um teste de contingências estabelecido a partir da comparação entre a energia potencial do sistema no ponto de equilíbrio após a contingência e a energia potencial calculada no ponto de tangência através do algoritmo para determinar o domínio de estabilidade.

Propõe-se um índice de sobrecarga com a finalidade de mais facilmente obter-se configurações viáveis a partir de expansão da configuração inicial através de adição de linhas em ramos.

Indicou-se também um critério de ordenação de configuração viáveis a partir de um índice de segurança.

No capítulo seguinte aborda-se em detalhes o algoritmo utilizado para a solução do problema do planejamento a curto prazo.

CAPÍTULO 4

A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DO PLANEJAMENTO A

CURTO PRAZO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a solução do planejamento do sistema de transmissão a curto prazo através de um algoritmo. É incluída uma descrição geral do mesmo, enumerando-se as etapas principais da solução proposta. São indicados os dados necessários para a utilização do algoritmo. Em seguida são listados os passos necessários para sua utilização.

Mostra-se, também, um fluxograma geral e vários parciais das etapas mais importantes.

4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO

A solução do problema de planejamento a curto prazo envolve diversas etapas conforme explicitado no capítulo anterior. De modo sucinto o algoritmo que é proposto compreende as seguintes etapas:

- a) fluxo de potência
- b) simulação de contingências
- c) teste da estabilidade transitória
- d) esquema de viabilização
- e) ordenação de configurações viáveis conforme a segurança.

A primeira etapa envolve a determinação do ponto de operação normal do sistema, a partir dos dados iniciais. Em seguida, na simulação de contingências, são modificados alguns valores, que traduzem a retirada de linhas do sistema, no sentido de detectar possíveis sobrecargas. No teste da estabilidade transitória determina-se o domínio de estabilidade sob contingência para análise da sobrecarga do sistema, ocasionada pela retirada de uma linha. Detectada sobrecarga, deve-se indicar um esquema de reforço que viabilize a configuração. O esquema de viabilização fornece, em geral, várias configurações. Utilizando-se certos índices, ordenam-se as configurações do ponto de vista da segurança.

Nos itens seguinte é apresentado em detalhe o algoritmo para a solução do problema de planejamento a curto prazo.

4.3. ALGORÍTMO PARA O PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO A CURTO PRAZO

Para a aplicação do algoritmo desenvolvido é necessário o conhecimento dos dados mencionados abaixo:

- a) diagrama unifilar do sistema, possuindo a localização de linhas de transmissão, carga e geração, que será considerada a configuração inicial do sistema.
- b) dados das linhas de transmissão, através do seu equivalente π , assim como limite térmico.
- c) reatância equivalente de transformadores.
- d) reatância transitória das máquinas.
- e) valor de injeções de potência nas barras.

Coloca-se todos os dados na forma por unidade (p.u.).

Além disso, para a utilização do algoritmo será preciso estipular o número de iterações para o método de Newton - Raphson contido no cálculo de domínio de estabilidade, assim como a precisão de convergência para o mesmo.

O algoritmo proposto é constituído dos seguintes passos:

- a) associa-se a cada barra e linha de transmissão um número, com a finalidade de montar-se a matriz do sistema.
- b) monta-se a matriz Y_{BUS} do sistema.
- c) inverte-se Y_{BUS} para obter-se Z_{BUS} .
- d) através de um fluxo de potência linear (D.C.), determinam-se os fluxos nas linhas, tensões e ângulos nas barras, conforme comentado no item 2.2.
- e) calculam-se as tensões e ângulos nas barras internas de máquina, conforme comentado no item 2.2.
- f) verifica-se se o ponto de equilíbrio pertence ao polítopo L_Z , para decidir sobre sua estabilidade. Se não pertencer, pare. Caso contrário, siga.
- g) modifica-se a matriz Y_{BUS} do sistema com a finalidade

de simular uma contingência.

- h) obtêm-se por inversão a nova matriz Z_{BUS} .
- i) determinam-se através de um fluxo de potência as tensões e ângulos nas barras assim como os fluxos nas linhas para o sistema sob contingência.
- j) compara-se o fluxo obtido pelo passo anterior com o limite térmico de cada linha. Se em alguma linha o limite térmico foi ultrapassado, coloca-se uma linha em paralelo com características semelhantes e retorna-se ao passo b.
- l) calculam-se as tensões e ângulos nas barras internas de máquina.
- m) verifica-se se o ponto de equilíbrio do sistema sob contingência está contido no politopo L_2 , garantindo-se com isso sua estabilidade. No caso afirmativo, siga. Não sendo estável, adicione uma linha em paralelo com a que sofreu a contingência e retorne ao passo b.
- n) reduz-se o sistema a barra interna de máquina, conforme descrito no ítem 2.3., obtendo-se a matriz reduzida do sistema, assim como os coeficientes F_{ij} , chamados coeficientes de sincronização entre as máquinas i e j .
- o) através do algoritmo citado no capítulo 2, determina-se a energia potencial no ponto de tangência da superfície de nível da energia potencial com o politopo L_2 , obtendo-se o domínio de estabilidade do ponto de equilíbrio do sistema sob contingência.
- p) Calcula-se a energia potencial correspondente ao ponto de equilíbrio antes da contingência.

- q) compara-se o valor obtido no passo o com aquele obtido no passo p. Se o primeiro for maior que o segundo, temos que o sistema satisfaz o teste de contingência. Caso isto não ocorra, o valor absoluto da diferença da energia potencial calculada em p é feito igual ao índice de sobrecarga da contingência.
- r) se esta é a última contingência a ser efetuada, po de-se seguir adiante. Caso contrário retorna-se ao passo g.
- s) ordenam-se em ordem decrescente os índices de sobrecarga.
- t) adiciona-se uma linha em paralelo com aquela cuja contingência deu origem ao maior índice de sobrecarga e retorna-se ao passo b.
- u) o procedimento deve ser repetido até obtermos uma configuração viável.
- v) outras configurações viáveis são obtidas ao executar-se o passo s para os outros índices de sobrecarga obtidos da configuração inicial.
- x) após obter-se as várias configurações viáveis, para cada uma delas calcula-se o índice de segurança como sendo o valor absoluto da menor diferença da energia potencial calculada no passo o e da energia potencial calculada no passo p entre todas as contingências efetuadas na configuração.
- z) ordenam-se em ordem decrescente estes índices de segurança.

O algoritmo descrito acima torna-se mais rápido com algumas modificações como indicado abaixo:

- a) no passo g, ao invés de modificar-se a matriz Y_{BUS} do sistema e após, no passo h, invertê-la, pode-se encontrar a nova matriz Z_{BUS} a partir da calculada no passo c, utilizando-se o método citado em (|5|). Fica assim suprimido o passo h.
- b) no passo o, devido aos motivos expostos no item 2.6., utiliza-se só a primeira iteração do algoritmo de Newton - Raphson como estimativa do domínio de estabilidade.

Conforme observado nos exemplos descritos adiante, a melhoria em termos de diminuição de tempo do computador foi sensível com estas duas modificações.

No próximo item apresenta-se um fluxograma do algoritmo descrito acima e no apêndice encontra-se a sua programação em Basic.

4.4. FLUXOGRAMA PARA PLANEJAMENTO A CURTO PRAZO

Neste item apresenta-se um fluxograma geral do procedimento proposto e, onde necessário, acrescenta-se um detalhamento maior através de um fluxograma a parte.

Nas figuras 4.4.1.a e 4.4.1.b é apresentado o algoritmo geral para o planejamento da transmissão.

No sentido de clareza, na figura 4.4.2. é apresentado o fluxograma para o fluxo de potência linear. Da mesma forma é

apresentado o fluxograma para cálculo do domínio de estabilidade na figura 4.4.3.

Apresenta-se ainda, na fig. 4.4.4., o fluxograma para modificação da matriz Z_{BUS} do sistema devido a sua importância para economia de tempo computacional.

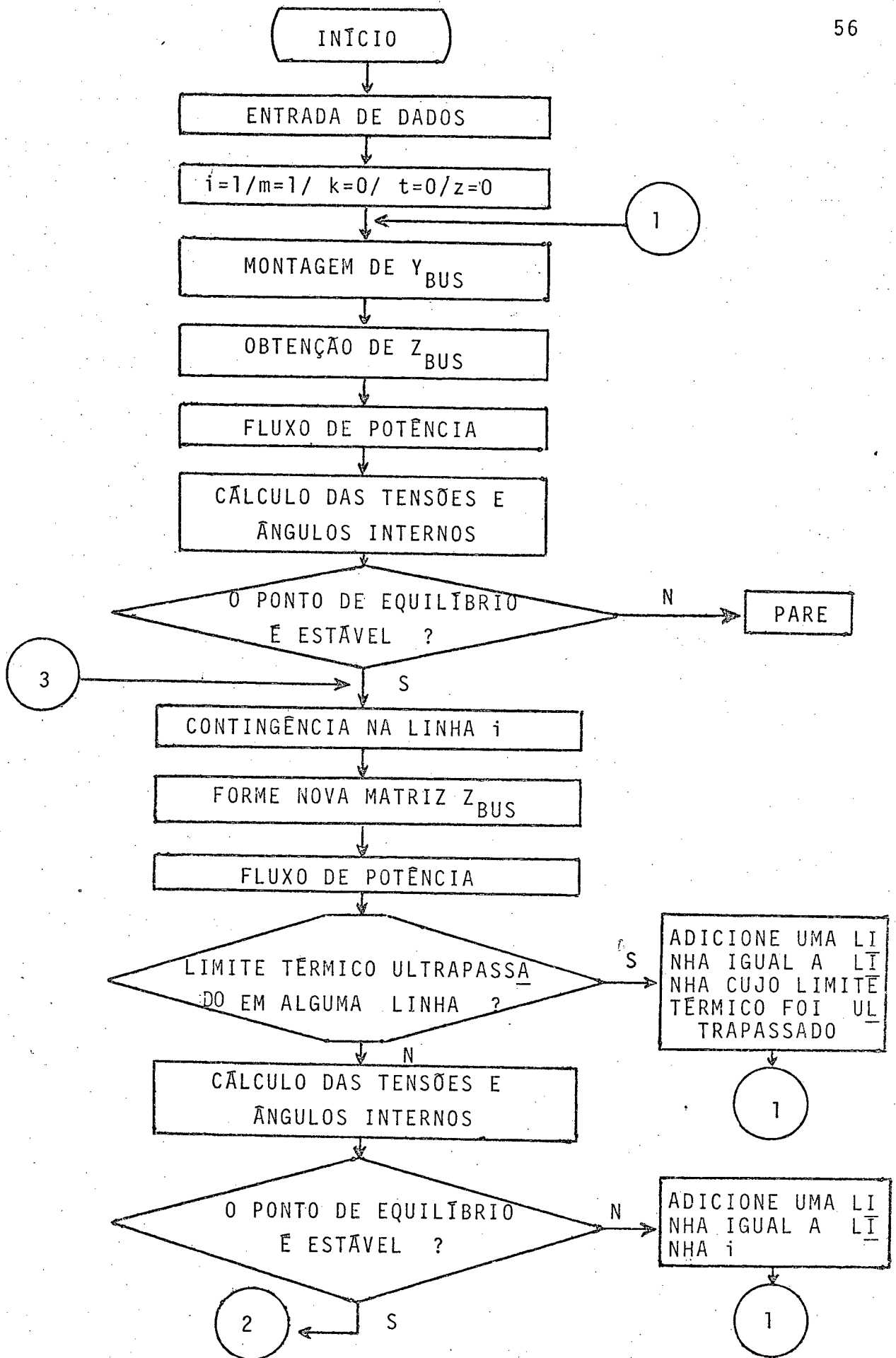


FIG. 4.4.1a. Fluxograma para o algoritmo de Planejamento

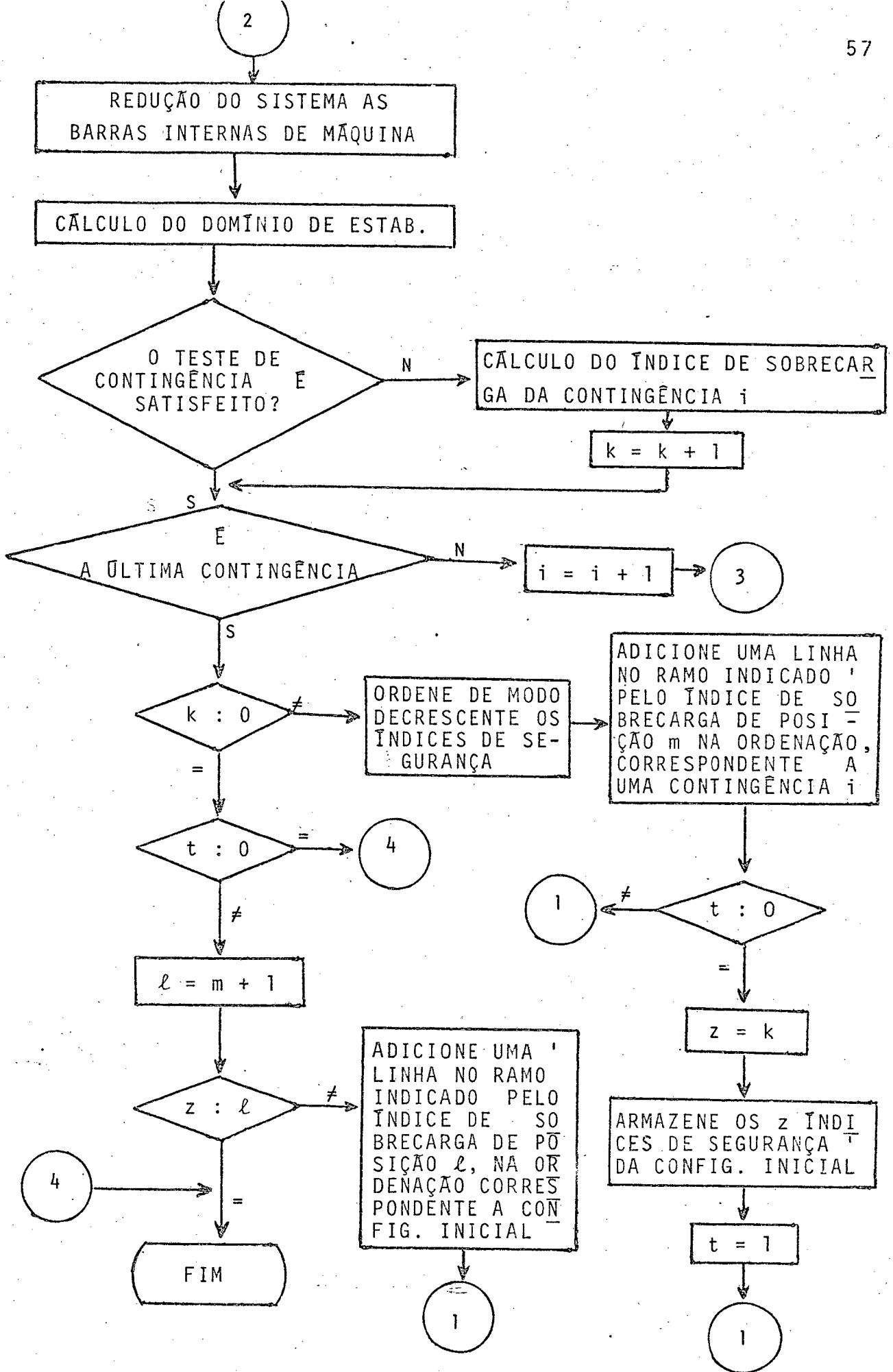


FIG. 4.4.1.b. Continuação da Fig. 4.4.1a.

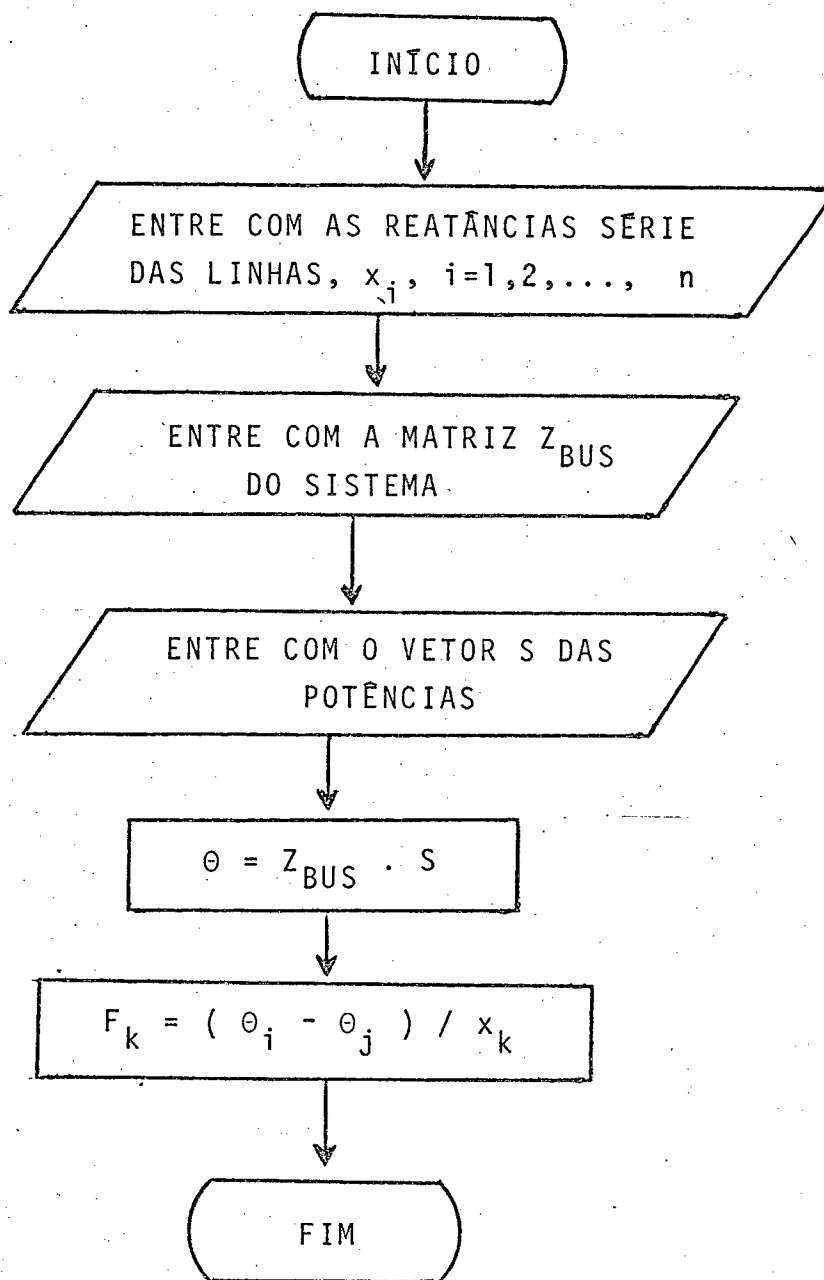


FIG. 4.4.2. Fluxograma para o fluxo de potência linear

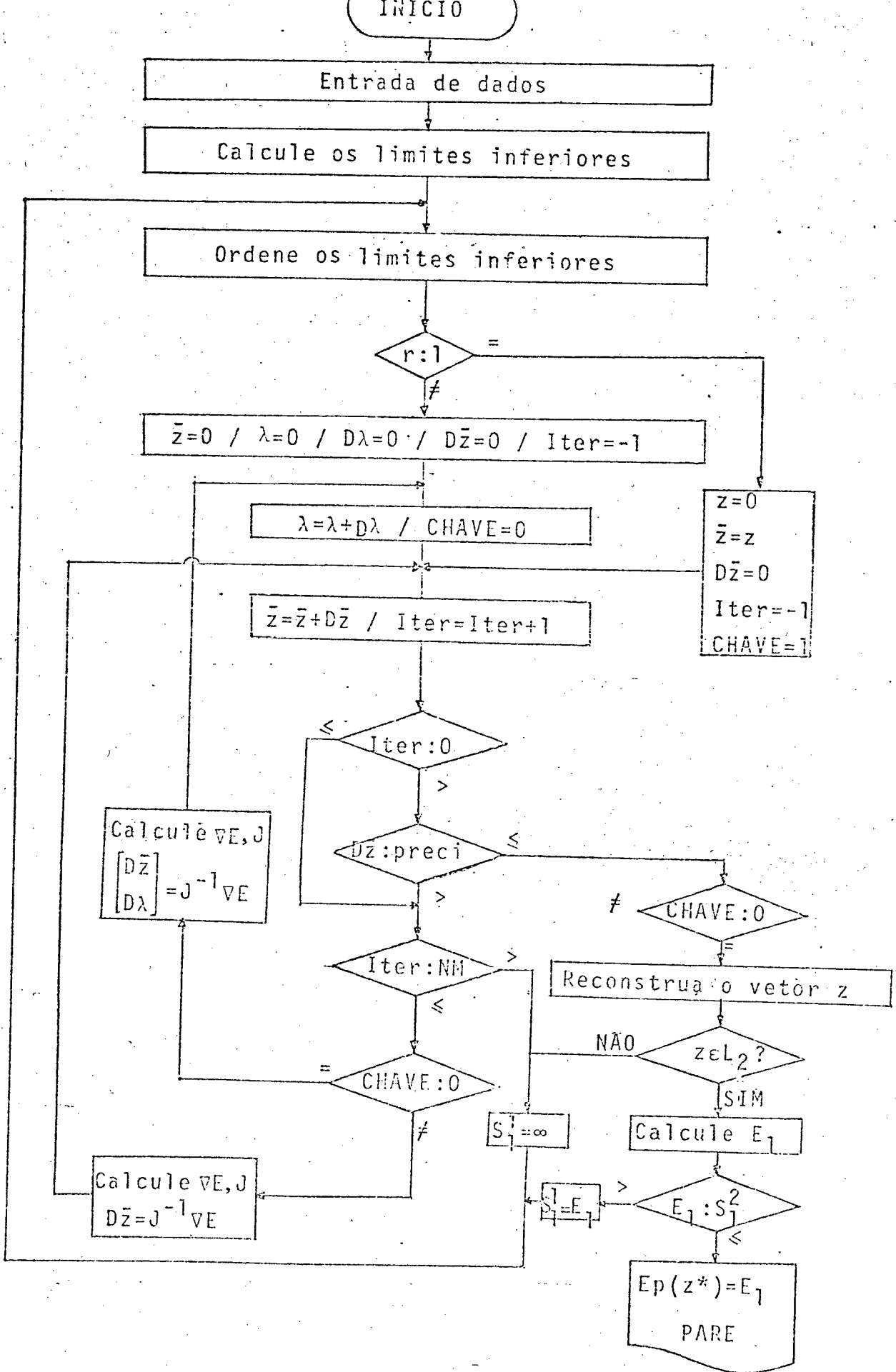


FIG. 4.4.3. Fluxograma para o cálculo de domínio de estabilidade

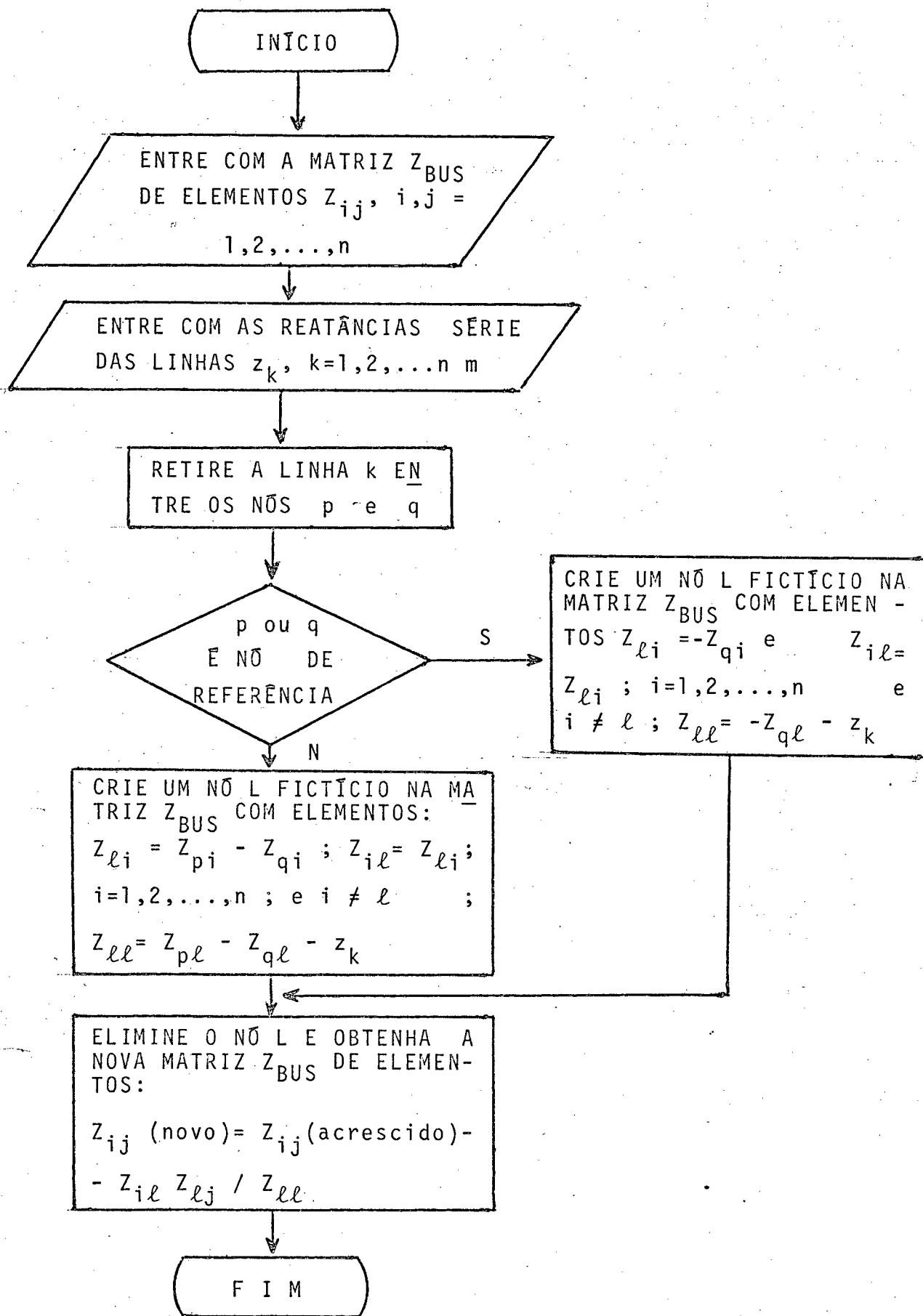


FIG. 4.4.4. Fluxograma para modificações na Matriz Z_{BUS}

4.5. C O N C L U S Õ E S

Neste capítulo foram descritas detalhadamente todas as etapas necessárias para a utilização do algoritmo proposto para o problema de planejamento a curto prazo. Foram citados os dados necessários para o algoritmo e descritos todos os passos para a obtenção da solução do problema. Foram apresentados um fluxograma geral e fluxogramas parciais para facilitar um melhor entendimento.

No próximo capítulo apresenta-se alguns exemplos nos quais usa-se o algoritmo deste capítulo.

CAPÍTULO 5

EXEMPLOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os dados e os resultados da utilização do algoritmo proposto em três sistemas distintos. Comenta-se sobre os resultados obtidos pelo cálculo iterativo do domínio de estabilidade e aqueles encontrados com o uso de apenas a 1ª. iteração no problema de tangência. Faz-se comentários sobre os resultados obtidos comparativamente àqueles fornecidos pelo critério recomendado em (|1|) e usados em (|2|, |3|).

5.2. EXEMPLOS

Neste item apresentam-se três exemplos de sistemas de potência em que se estudará o planejamento da transmissão a curto prazo, por meio do algoritmo apresentado no capítulo 4.

EXEMPLO 1

Neste exemplo possui-se um sistema com quatro máquinas,

seis barras e sete linhas de transmissão.

Na fig. 5.2.1. apresenta-se o diagrama unifilar com a topologia do sistema e na tabela 1 as potências líquidas nas barras.

Na tabela 2, colocam-se os dados do sistema de transmissão e na tabela 3, os dados das máquinas. Para este sistema, aplicando-se o algoritmo de planejamento, verifica-se que a configuração inicial apresenta-se sobrecarregada, pois o sistema não satisfaz o teste de contingências para a retirada da linha 2 e também a retirada da linha 4.

Na tabela 4, estão colocados os índices de sobrecarga obtidos, já ordenados. Em consequência, adiciona-se uma linha de igual capacidade que a da linha 4 à configuração inicial.

Isto feito, verifica-se, pela aplicação do algoritmo, que obteve-se uma configuração viável cujo diagrama está na fig. 5.2.2. e que será denominada configuração 1.

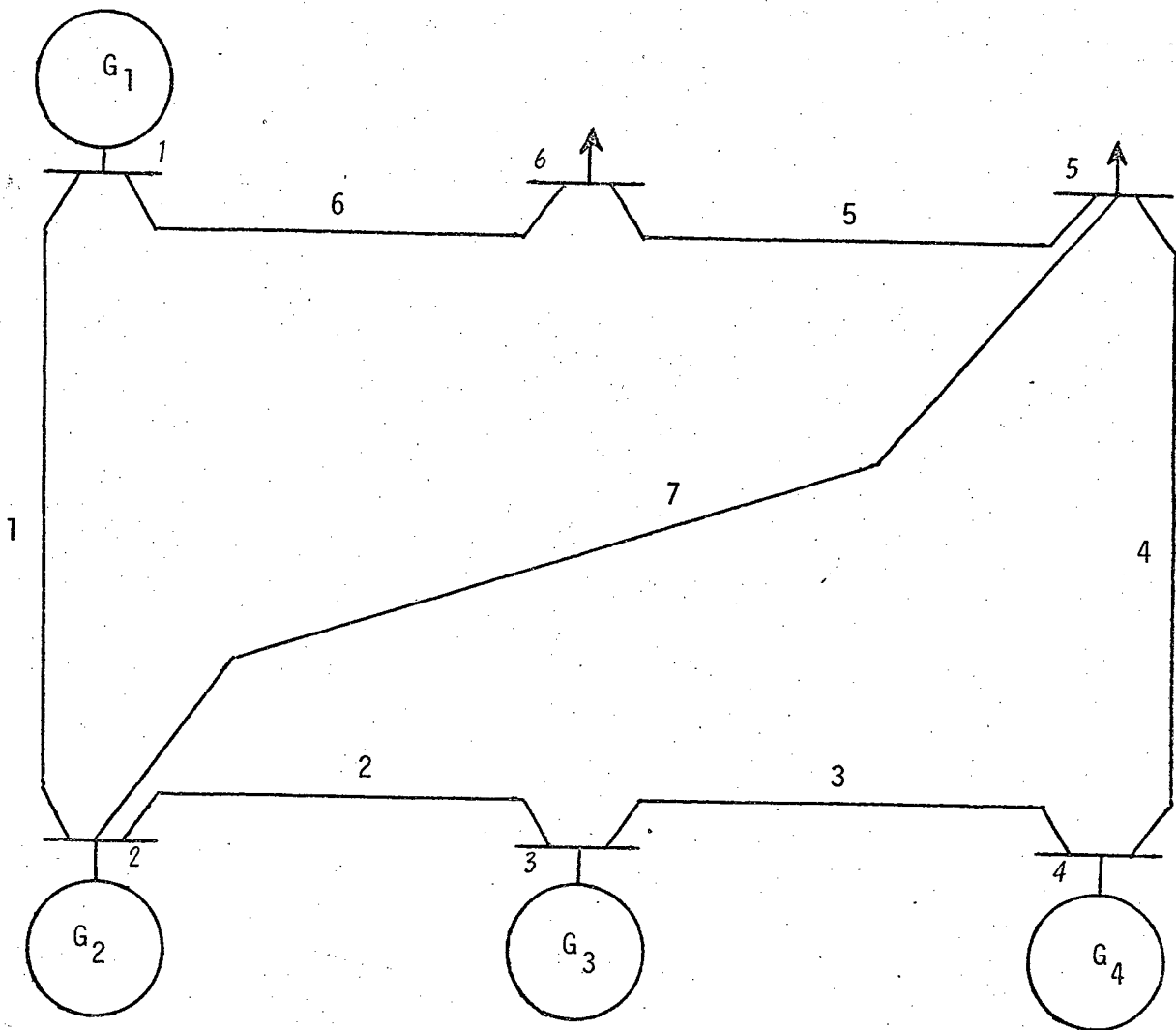


FIG. 5.2.1. CONFIGURAÇÃO INICIAL (EXEMPLO 1)

POTÊNCIA LÍQUIDA NAS BARRAS	
BARRA NÚMERO	P (p.u.)
1	. 25
2	. 1
3	. 35
4	. 2
5	- . 5
6	- . 4

TABELA 1

TABELA 2

DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO		
NÚMERO DA LINHA	X (p.u.)	LIMITE TÉRMICO (p.u.)
1	0.60	0.70
2	1.50	0.56
3	2.40	0.45
4	0.70	0.65
5	1.20	0.60
6	0.45	0.75
7	1.50	0.50

TABELA 3

CONSTANTES DAS MÁQUINAS	
GERADOR NÚMERO	x'_d (p.u.)
1	0.004
2	1.00
3	0.50
4	0.40

TABELA 4

ÍNDICES DE SOBRECARGA DA CONFIGURAÇÃO INICIAL	
LINHA NÚMERO	ÍNDICE
4	. 0438614
2	. 0158851

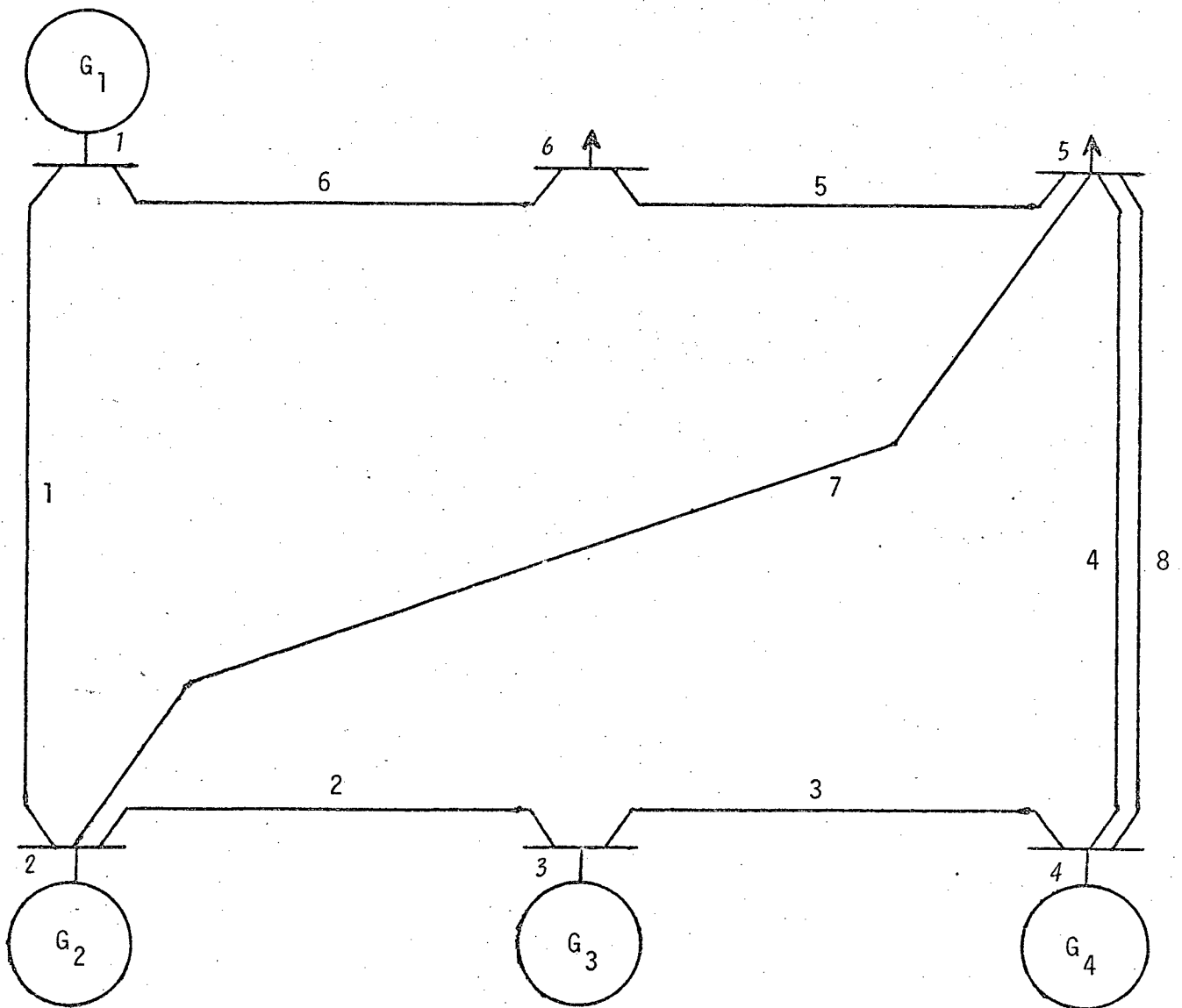


FIG. 5.2.2. CONFIGURAÇÃO VIÁVEL 1

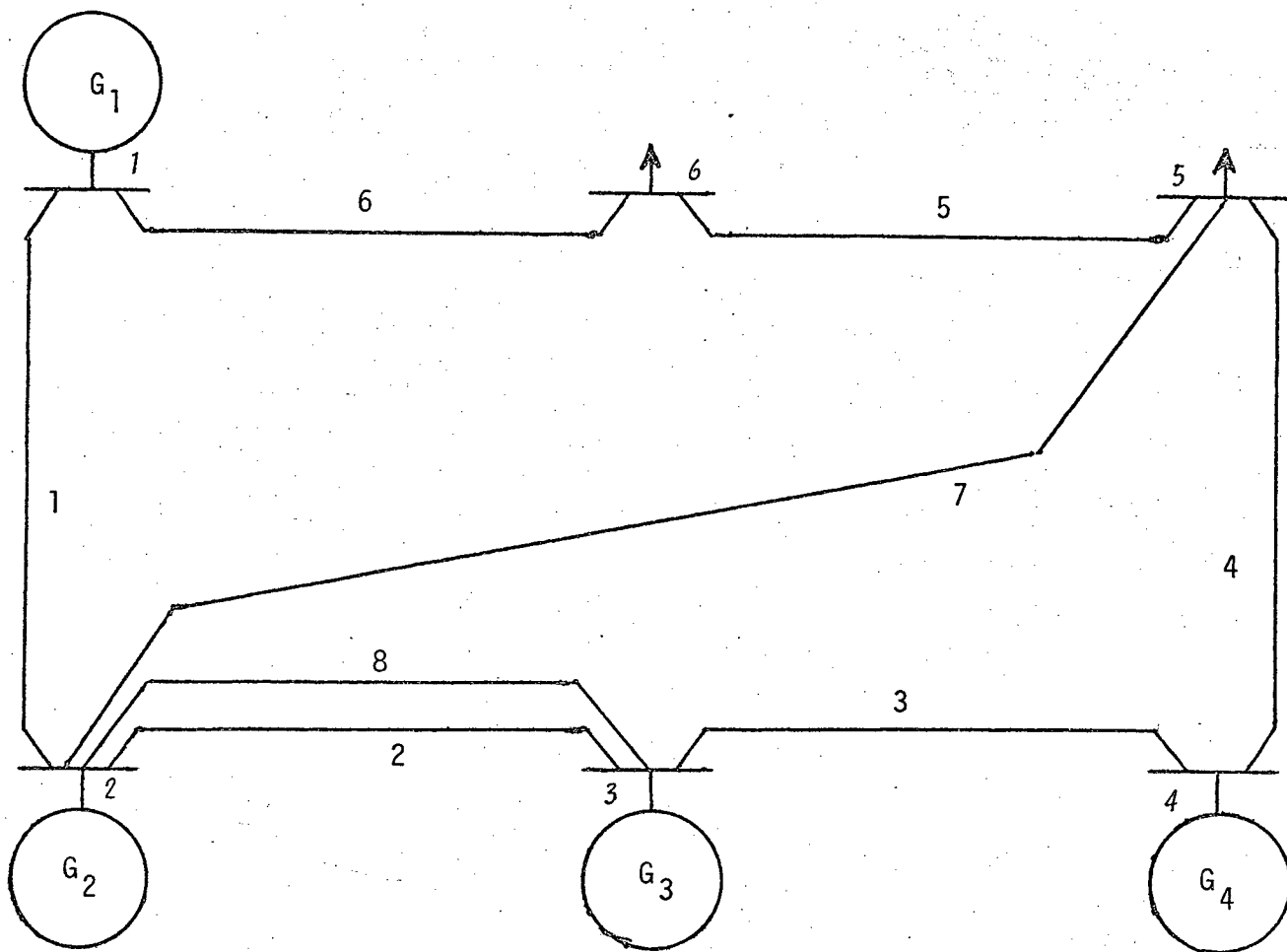


FIG. 5.2.3. CONFIGURAÇÃO VIÁVEL 2

ÍNDICES DE SEGURANÇA	
CONFIG. NÚMERO	ÍNDICE
1	0.0027
2	0.0032

TABELA 5

TABELA 6

ÍNDICE DE SOBRECARGA DA CONFIGURAÇÃO INICIAL 1a. ITERAÇÃO	
LINHA NÚMERO	ÍNDICE
2	. 0438614
4	. 0158148

TABELA 7

ÍNDICE DE SEGURANÇA 1a. ITERAÇÃO	
CONFIGURAÇÃO NÚMERO	ÍNDICE
1	0. 0042
2	0. 0044

Outra configuração será obtida adicionando-se uma linha semelhante à linha 2, conforme a fig. 5.2.3., que pela aplicação do mesmo algoritmo, verifica-se que é viável.

De acordo com a tabela 5, a configuração que apresenta o melhor índice de segurança é a configuração 2, sendo esta configuração a mais conveniente de acordo com o critério de segurança estabelecido no capítulo 4.

Nas tabelas 6 e 7, apresentam-se os resultados obtidos considerando-se somente a primeira iteração do algoritmo de Newton - Raphson, no cálculo do domínio de estabilidade. Pela observação conclui-se que os resultados da 1ª. iteração são compatíveis com aqueles obtidos pelo método usual, com exceção daqueles casos em que a ordem de grandeza dos resultados é próximo do valor adotado como critério de convergência do algoritmo de Newton-Raphson. Entretanto, a economia de tempo conseguida pelo uso da 1ª. iteração justifica plenamente o seu uso.

EXEMPLO 2

O sistema do exemplo consta de quatro máquinas, sete barras e treze linhas de transmissão. Os dados de potência líquida nas barras, sistema de transmissão e constantes de máquinas e transformadores estão nas tabelas 8, 9 e 10, respectivamente.

Na fig. 5.2.3. apresenta-se a configuração inicial do sistema.

Ao aplicar-se o algoritmo para o planejamento a curto prazo, verifica-se que o sistema está com sobrecarga ao realizarse contingências nas linhas 12, 5, 4 e 13.

Na tabela 11, transcreve-se os índices de sobrecarga calculados e, a partir deles, chega-se a configurações viáveis da figura 5.2.4., 5.2.5. e 5.2.6., respectivamente.

A configuração da figura 5.2.4. foi obtida ao reforçar-se as linhas 12 e 5, utilizando-se a indicação do primeiro índice de sobrecarga. Ao utilizar-se o segundo índice de sobrecarga, que indicou a linha 5 para reforço e logo após a linha 12, chegou-se a uma configuração viável semelhante à indicada pelo primeiro índice de sobrecarga.

Na fig. 5.2.5., obteve-se a configuração viável 2 ao reforçar-se as linhas 4 e 12. A configuração 3 foi obtida ao acrescentar-se linhas semelhantes as linhas 13 e 4, conforme a fig. 5.2.6.

Na tabela 12 têm-se os índices de seguranças das configurações 1, 2 e 3, que indicam como mais segura a configuração 3.

Nas tabelas 13 e 14 apresenta-se os índices de sobrecarga e segurança, respectivamente, obtidos com o uso da primeira iteração.

Também neste exemplo comprova-se a vantagem de utilizar-se a aproximação da 1ª. iteração.

No apêndice 3, encontram-se as listagens de saída do exemplo 2 com um maior número de dados, até a obtenção da primeira configuração viável.

É importante verificar que para algumas contingências que satisfizeram o teste, as defasagens entre barras são superiores aos limites usualmente adotados como garantia da estabilidade.

de transitória do sistema ($|1|$, $|2|$, $|3|$). Em consequência com o procedimento utilizado neste trabalho garante-se a estabilidade do sistema mesmo para situações em que ($|1|$, $|2|$, $|3|$) consideram como de sobrecarga, levando assim a um planejamento mais econômico, pois o número de situações com sobrecarga é menor, isto é, garante-se que o sistema pode operar para diversas contingências que pelos outros critérios adotados para a estabilidade transitória levariam a uma situação de sobrecarga.

Inclue-se, também, no apêndice 3, uma lista com os fluxos nas linhas em relação ao fluxo máximo permitido, ao retirar-se a linha 13, verificando-se que a linha 3 possui o maior carregamento percentual. Entretanto, esta linha não foi reforçada ao viabilizar-se as configurações conforme o algoritmo proposto.

TABELA 8

POTÊNCIA LÍQUIDA NAS BARRAS	
BARRA NÚMERO	P (p.u.)
1	0.83
62	- 2.00
53	- 1.80
24	2.00
75	- 2.10
36	1.50
47	1.57

TABELA 9

DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO		
NÚMERO DA LINHA	X (p.u.)	LIMITE TÉRMICO (p.u.)
51	. 425	2.00
62	. 805	1.70
3	. 360	2.20
4	1. 008	1.50
5	1. 000	1.45
6	. 460	1.90
7	. 805	1.70
8	. 850	1.65
9	2. 500	1.20
10	3. 500	1.00
11	3. 500	1.00
12	. 450	1.90
13	1. 000	1.45

TABELA 10

CONSTANTES DE MÁQUINAS E TRANSFORMADORES		
GERADOR NÚMERO	X'_d (p.u.)	X_{eq} (p.u.) DO TRANSFORMADOR
1	. 0608	. 0576
2	. 1198	. 0625
3	. 1813	. 0586
4	. 0608	. 0576

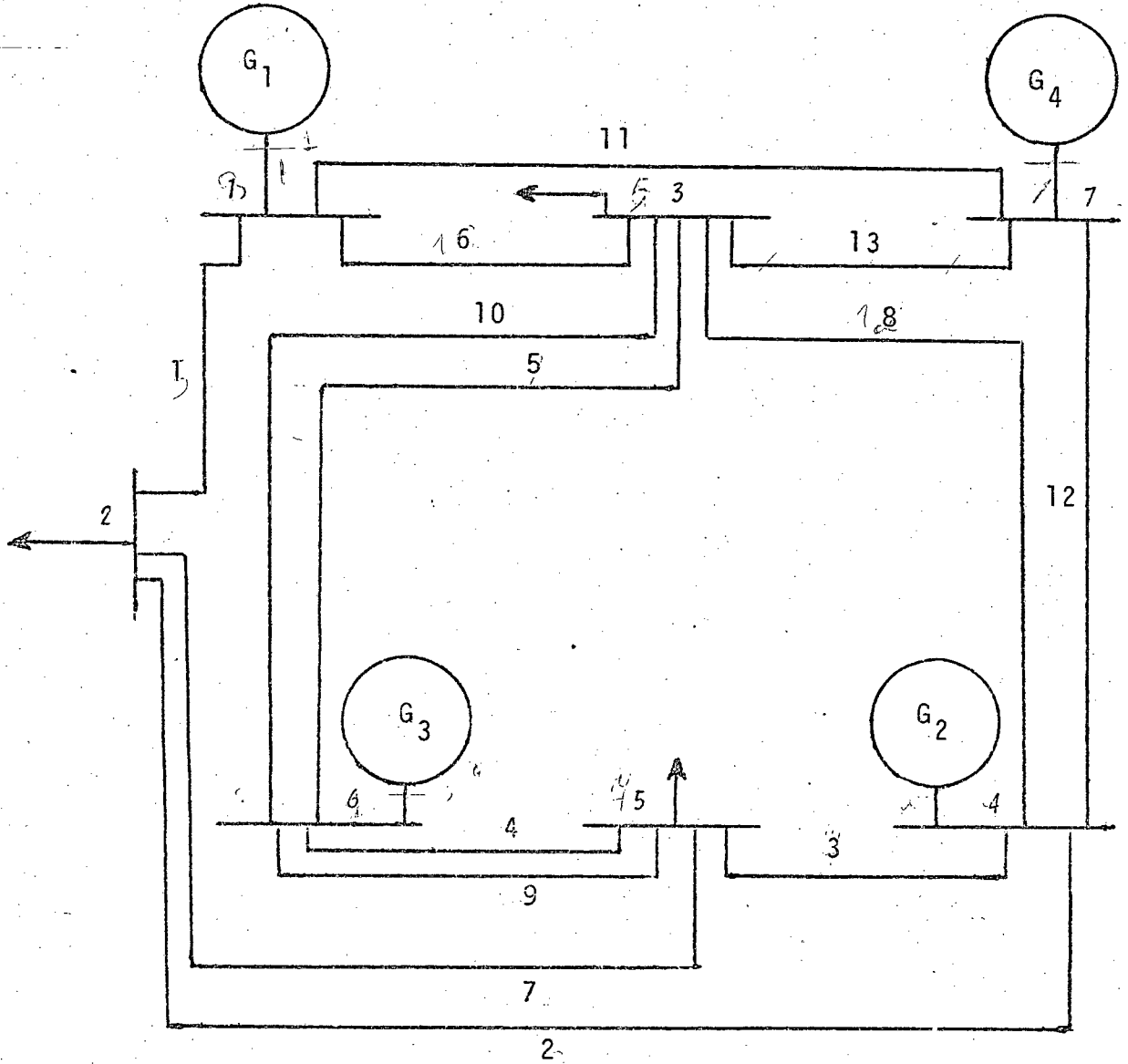


FIG. 5.2.3. CONFIGURAÇÃO INICIAL (EXEMPLO 2)

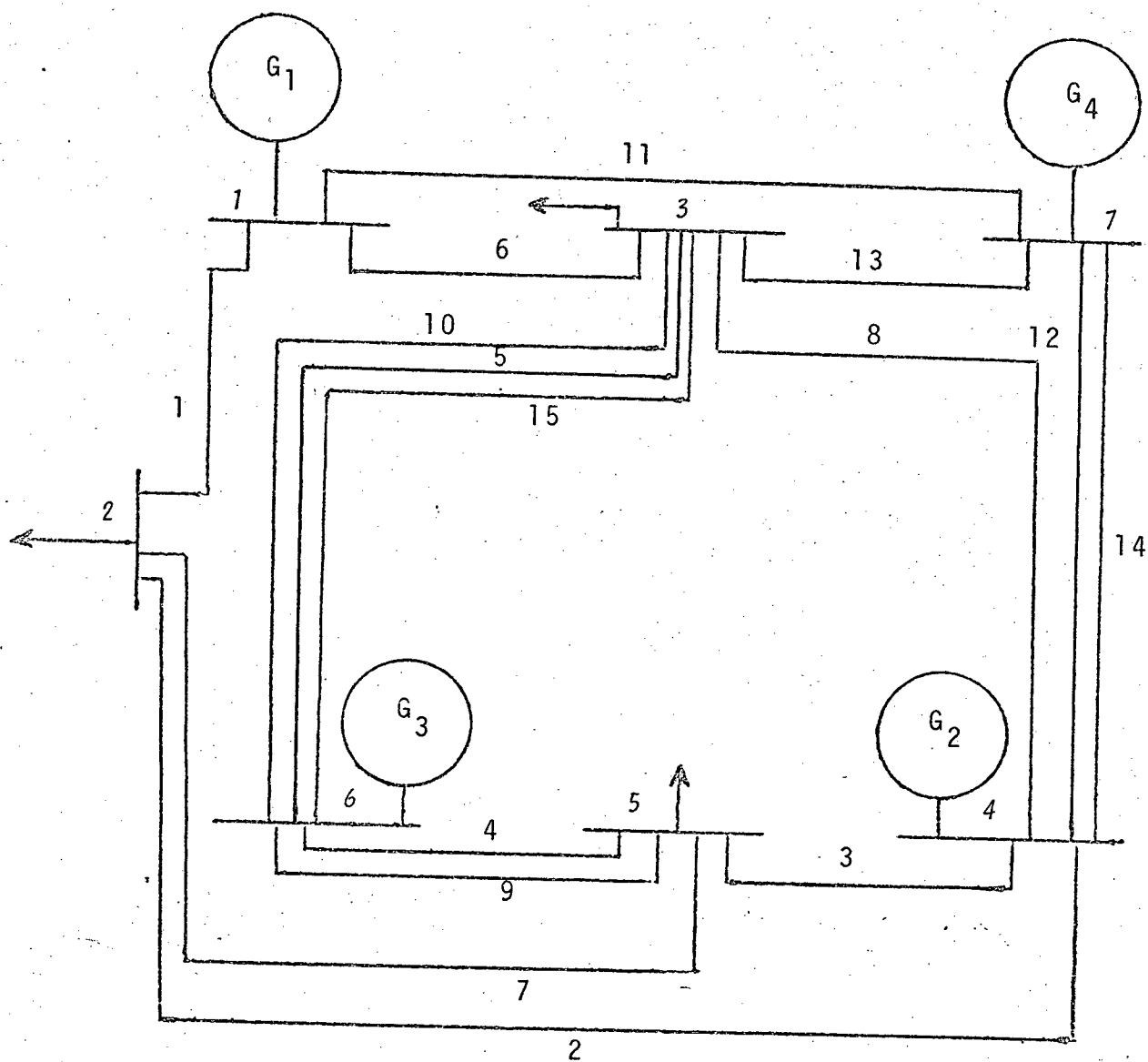


FIG. 5:2.4. CONFIGURAÇÃO VIÁVEL 1

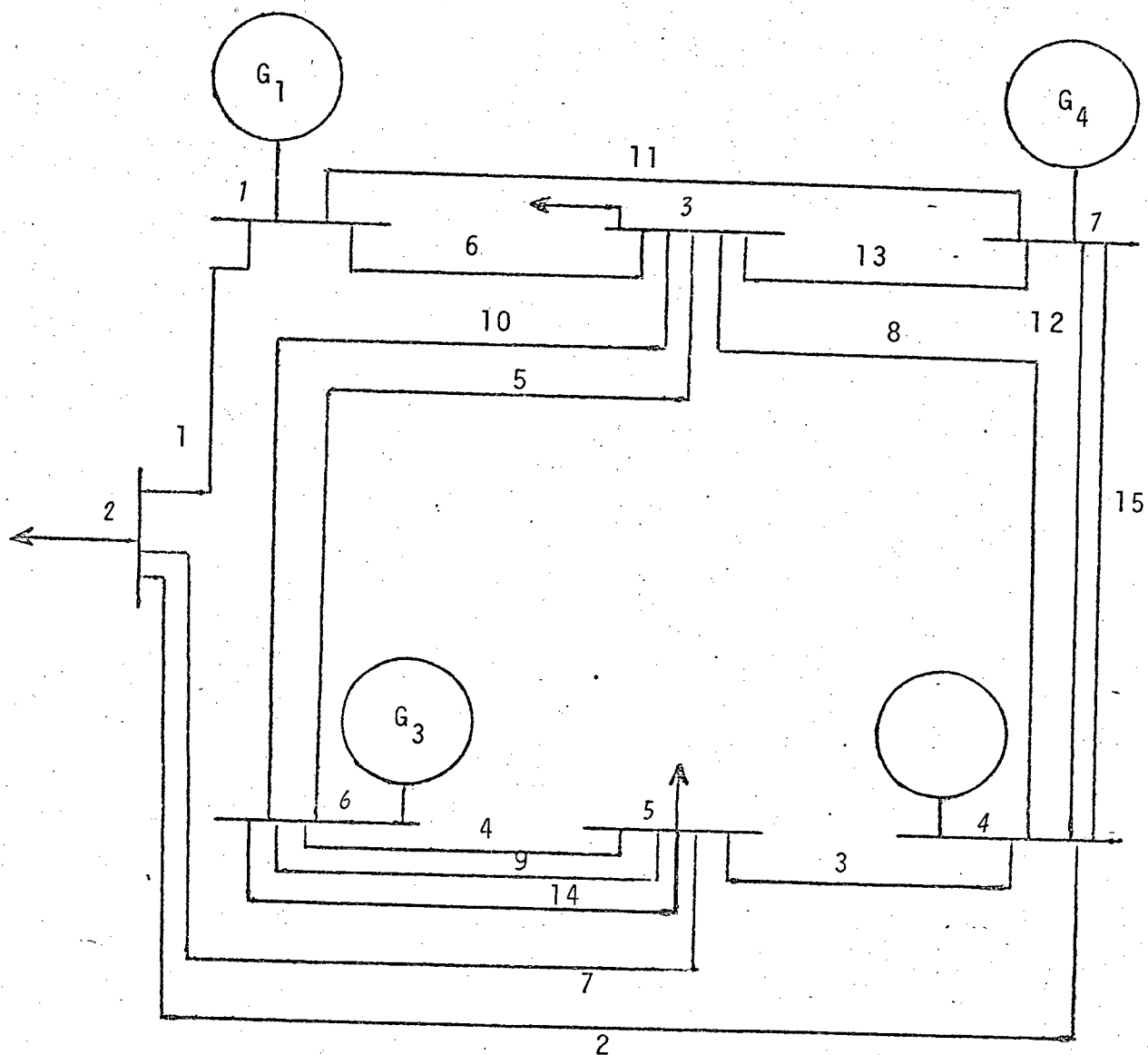


FIG. 5.2.5. CONFIGURAÇÃO VIÁVEL 2

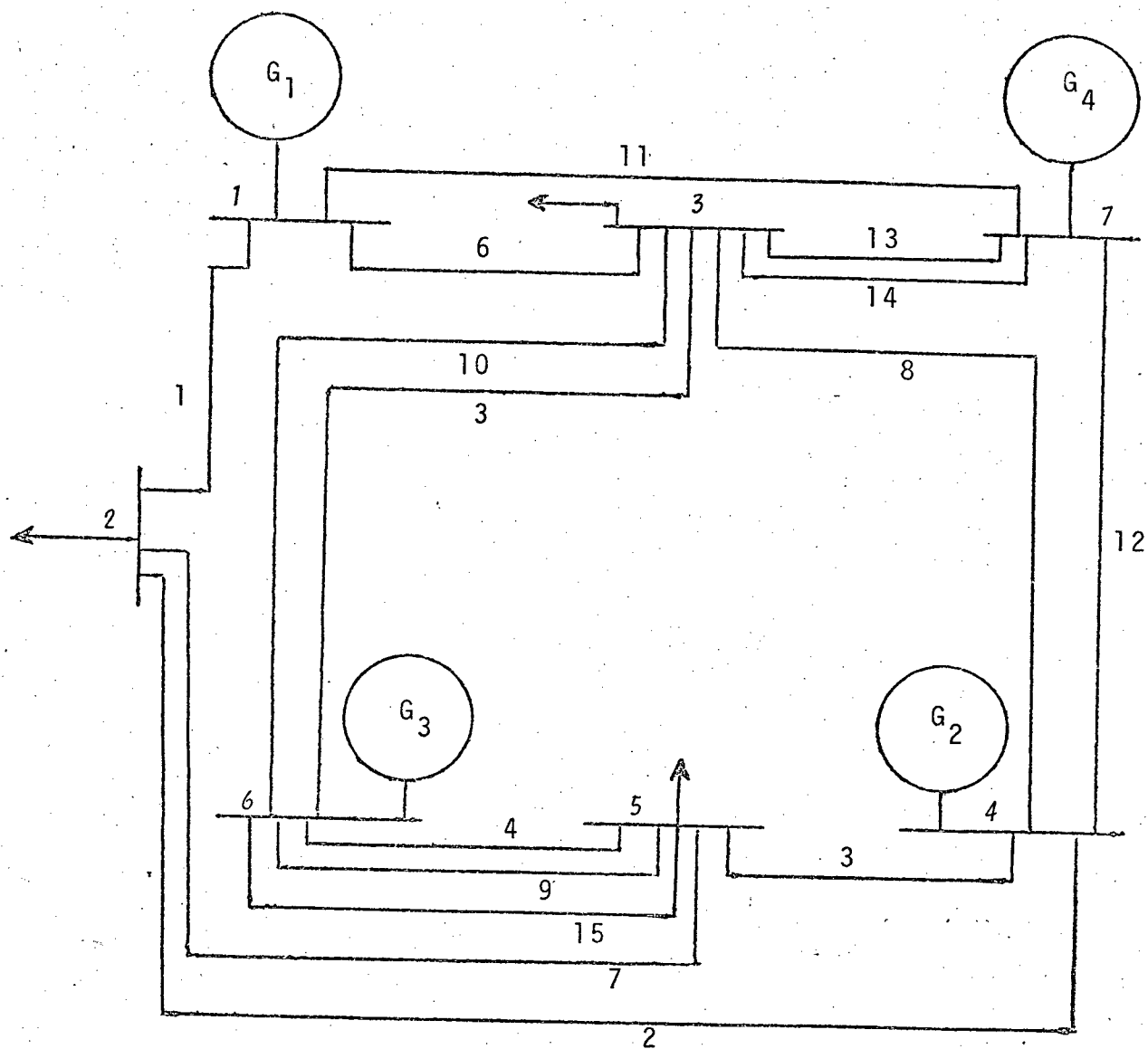


FIG. 5.2.6. CONFIGURAÇÃO VIÁVEL 3

TABELA 11

ÍNDICES DE SOBRECARGA DA CONFIGURAÇÃO INICIAL	
LINHA NÚMERO	ÍNDICE
12	. 1141
5	. 0539
4	. 0535
13	. 0050

TABELA 12

ÍNDICES DE SEGURANÇA	
CONFIG. NÚMERO	ÍNDICE
1	. 0533
2	. 0398
3	. 1895

TABELA 13

ÍNDICES DE SOBRECARGA DA CONFIGURAÇÃO INICIAL 1a. ITERAÇÃO	
LINHA NÚMERO.	ÍNDICE
12	. 1139
5	. 0538
4	. 0532
13	. 0036

TABELA 14

ÍNDICES DE SEGURANÇA 1a. ITERAÇÃO	
CONFIGURAÇÃO	ÍNDICE
1	. 0590
2	. 0502
3	. 2186

EXEMPLO 3

O terceiro exemplo consta de nove barras, cinco máquinas e dezesseis linhas de transmissão, cuja configuração inicial é a da fig. 5.2.7.

Nas tabelas 15, 16 e 17 apresentam-se as potências líquidas nas barras, dados do sistema de transmissão e constantes de máquinas e transformadores.

Os índices de sobrecarga obtidos neste exemplo estão na tabela 18. A partir do primeiro, reforçando-se as linhas 12 e 9, obteve-se a configuração viável 1 da fig. 5.2.8. O segundo índice indicou uma configuração semelhante. Na figura 5.2.9., consta a configuração 2, obtida pelo reforço das linhas 13, 12 e 15. A configuração viável 3, na qual adicionou-se linhas semelhantes às linhas 15 e 12 a partir da configuração inicial, é colocada na fig. 5.2.10.

Na tabela 19 estão os índices de segurança das 3 configurações, os quais apontam a configuração 1 como a mais conveniente quanto a segurança.

Nas tabelas 20 e 21 apresentam-se os índices de sobrecarga e segurança calculados pelo uso da primeira iteração. Nota-se na tabela 21 que na linha correspondente ao índice da configuração viável 2, consta a palavra prejudicado. Isto deve-se ao fato que neste caso não poder-se comparar o índice obtido pelo cálculo com várias iterações do domínio de estabilidade com aquele calculado somente na primeira iteração porque o segundo índice conduz a uma configuração viável mediante reforços somente nas linhas 13 e 12. Note-se que o índice de segurança dado pela 1a.

iteração é da ordem do critério de convergência de Newton-Raphson daí advindo a discrepância.

TABELA 15

POTÊNCIA LÍQUIDA NAS BARRAS	
BARRA NÚMERO	POTÊNCIA (p.u.)
1	0.5
2	- 2.3
3	- 2.0
4	2.0
5	- 2.0
6	1.5
7	1.0
8	2.8
9	- 1.5

TABELA 16

DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO		
LINHA	X(p.u.)	LIMITE TÉRMICO (p.u.)
1	. 121	2.70
2	. 230	2.30
3	. 102	2.75
4	. 286	2.10
5	. 285	2.10
6	. 131	2.65
7	. 230	2.30
8	. 242	2.25
9	. 714	1.45
10	1. 000	1.50
11	1. 000	1.50
12	. 128	2.65
13	. 285	2.10
14	. 285	2.10
15	. 285	2.10
16	. 714	1.45

TABELA 17

CONSTANTES DE MÁQUINAS E TRANSFORMADORES		
GERADOR	X'_d (p.u.)	X_{eq} DO TRANSFORMADOR
1	. 0608	. 0576
2	. 1198	. 0625
3	. 1813	. 0586
4	. 0608	. 0576
5	. 1200	. 0700

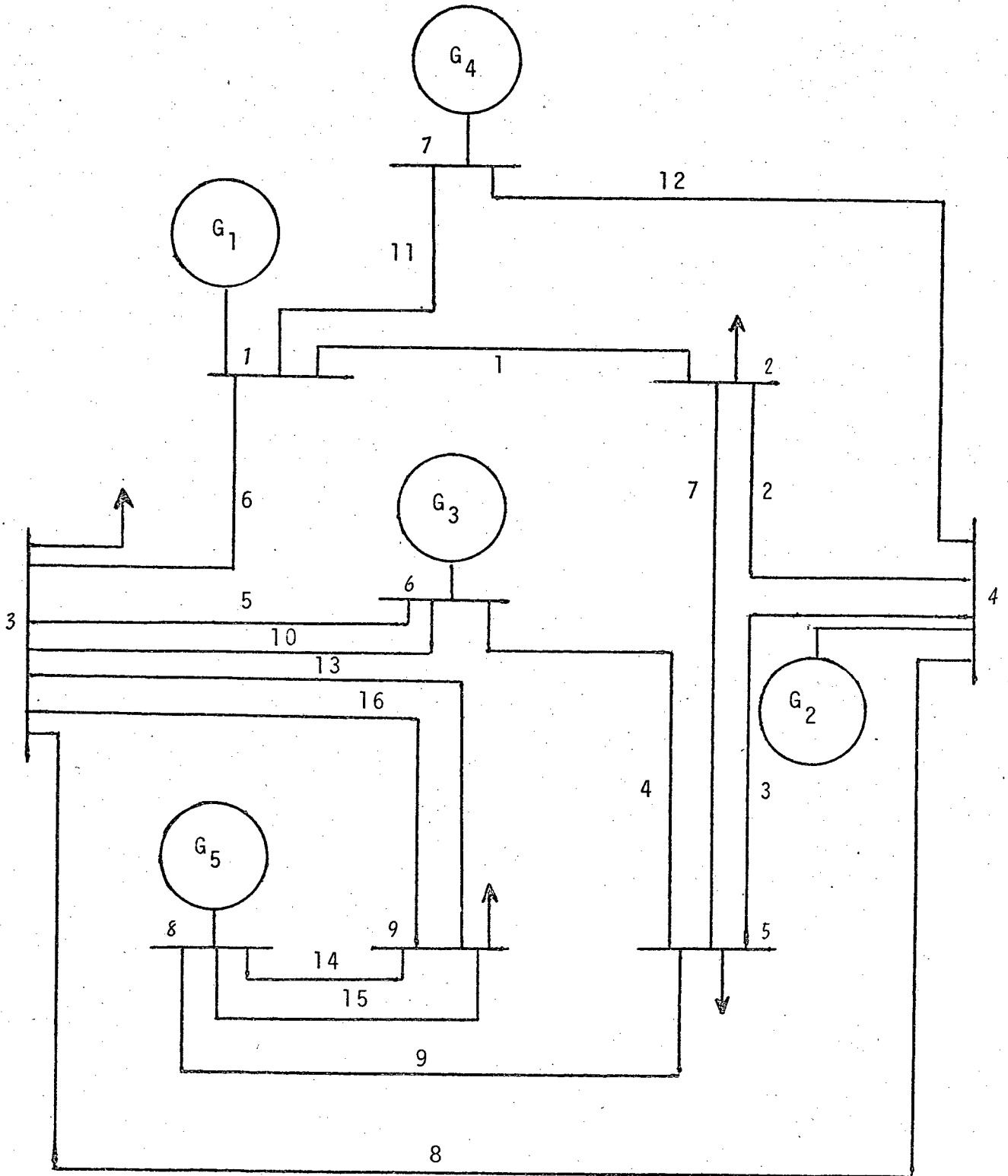


FIG. 5.2.7. CONFIGURAÇÃO INICIAL (EXEMPLO 3)

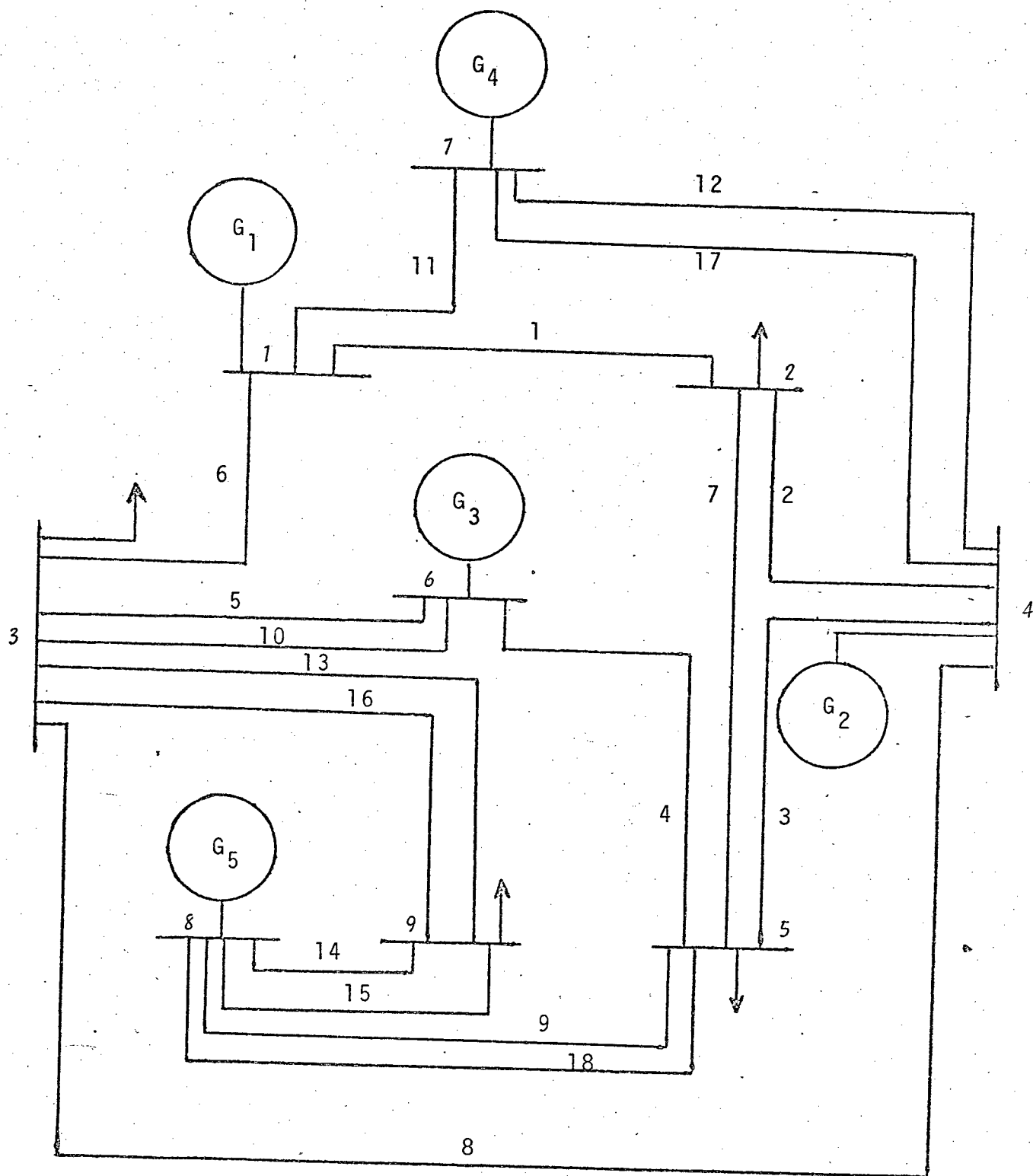


FIG. 5.2.8. CONFIGURAÇÃO VIÁVEL 1

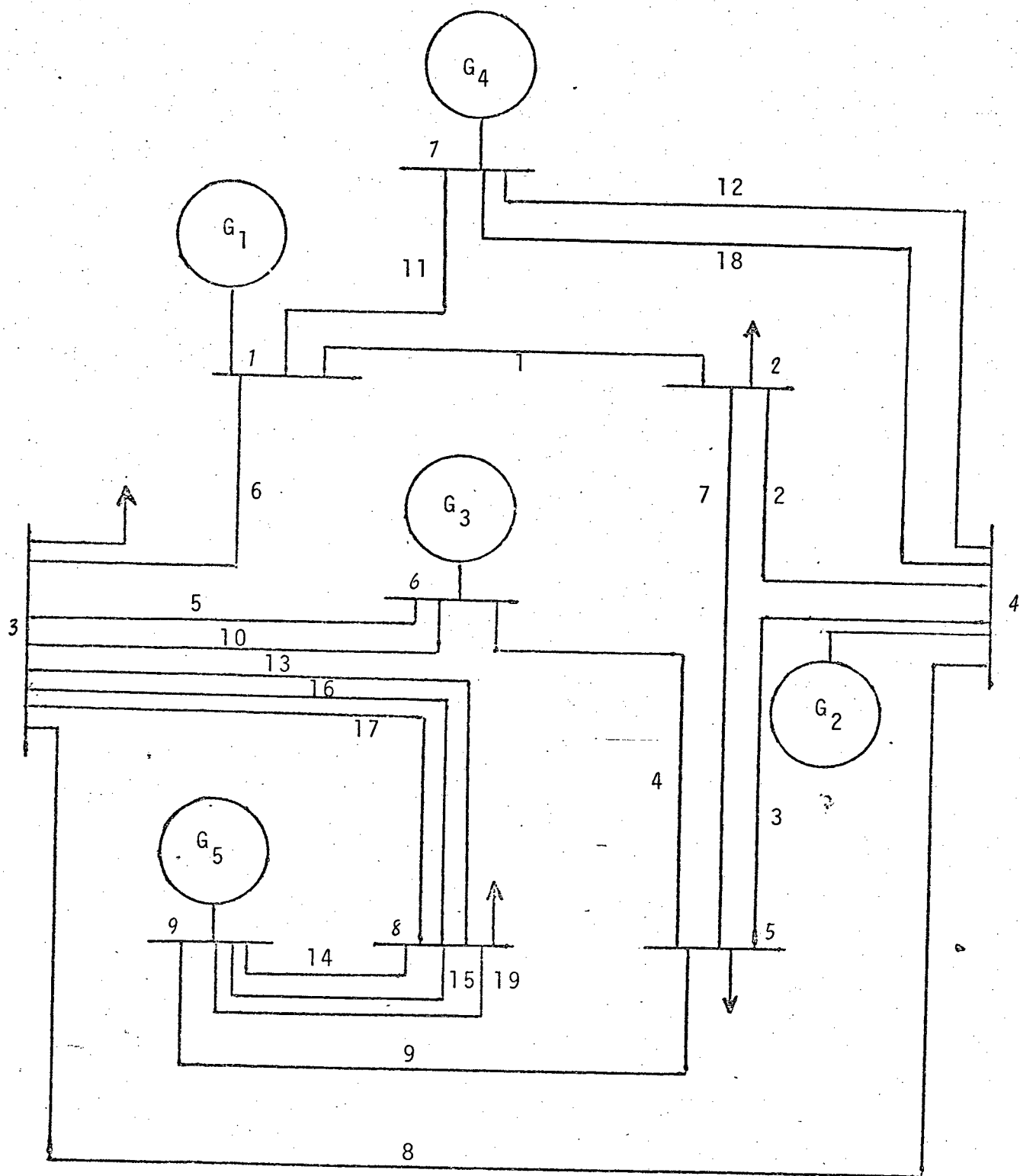


FIG. 5.2.9. CONFIGURAÇÃO VIÁVEL 2

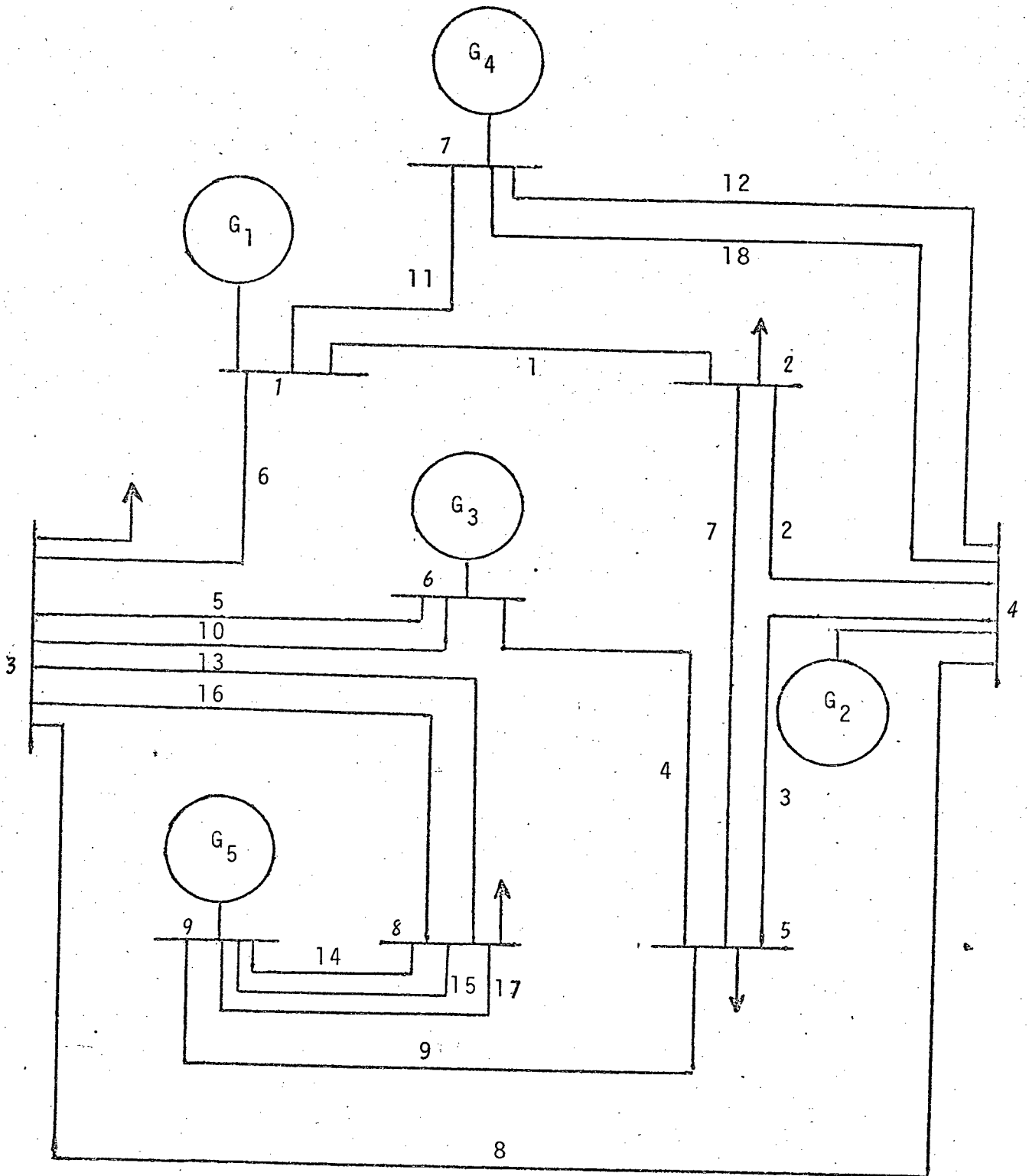


FIG. 5.2.10. CONFIGURAÇÃO VIÁVEL 3

TABELA 18.

ÍNDICES DE SOBRECARGA DA CONFIGURAÇÃO INICIAL	
LINHA NÚMERO	ÍNDICE
12	. 258678
9	. 117825
13	. 041992
15	. 034951

TABELA 19

ÍNDICES DE SEGURANÇA	
CONFIGURAÇÃO	ÍNDICE
1	. 2787
2	. 2603
3	. 0054

TABELA 20

ÍNDICES DE SOBRECARGA DA CONFIGURACÃO INICIAL 1a. ITERAÇÃO	
LINHA NÚMERO	ÍNDICE
12	. 257072
3	. 113236
13	. 0341506
15	. 0277919

TABELA 21

ÍNDICES DE SEGURANÇA 1a. ITERAÇÃO	
CONFIGURAÇÃO	ÍNDICE
1	. 296955
2	. 00053 (PREJ)
3	. 016086

5.3. CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentou-se três exemplos de sistemas de transmissão em que utilizou-se o algoritmo para o planejamento da transmissão a curto prazo. Comparou-se o uso da primeira iteração na determinação do domínio de estabilidade com o procedimento iterativo completo. Conclui-se que a primeira iteração é aceitável em problemas de planejamento devido a economia de tempo computacional obtida, que é fator importante neste tipo de problema em que temos um número grande de casos a estudar. A primeira iteração conduz a um domínio de estabilidade com maior energia potencial no ponto de tangência do que aquele calculado com o procedimento usual. Entretanto, este domínio de estabilidade é um subconjunto próprio do domínio exato, e pode-se confiar nos resultados obtidos.

Verifica-se também (exemplo 2) que através da utilização da análise da estabilidade transitória como indicador de sobrecargas nos sistemas chega-se a um planejamento mais realista do que o obtido pela aplicação dos critérios de segurança de (|1|, |2|, |3|).

O algoritmo utilizado pode ser acoplado aos procedimentos de (|2|, |3|), substituindo a parte referente a análise de sobrecargas no sistema adotado pelos mesmos. Com isto conseguiria-se também estudar-se o problema de custos do planejamento do sistema de transmissão.

No capítulo seguinte são apresentadas as conclusões finais sobre o uso do procedimento proposto e relevados os aspectos importantes encontrados no decorrer deste trabalho.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1. CONCLUSÕES

Abordou-se neste trabalho o problema do planejamento do sistema de transmissão a curto prazo. Inicialmente colocou-se o modelo matemático do sistema, indicando-se a necessidade de redução às barras internas de máquina para proceder a análise da estabilidade transitória. Esta redução é feita segundo (|12|), porém utilizando-se no cálculo da matriz Z_{BUS} do sistema, a cada iteração, a modificação da inversa da matriz Y_{BUS} original do sistema. Discutiu-se os métodos utilizados para análise da estabilidade transitória, optando-se pelo uso dos domínios de estabilidade, pois este procedimento não apresenta certas desvantagens dos métodos numéricos. Em (|8| , |21|) , a determinação de domínios de estabilidade foi colocada como um problema de otimização, em que deve-se determinar o ponto de tangência da superfície de nível da energia potencial com o politopo L_2 , e, como tal, é utilizada neste trabalho.

Comenta-se sobre a estabilidade do ponto de equilíbrio e a utilização da função energia como função de Liapunov para a estabilidade do ponto de equilíbrio trasladado para a origem e

também apresenta-se o algoritmo de determinação de domínios de estabilidade desenvolvido em ([8], [21]). A única condição imposta ao uso do algoritmo é que o ponto de equilíbrio em questão pertença ao politopo L_7 . Este algoritmo foi apresentado enfatizando-se a possibilidade do uso da primeira iteração do algoritmo do ponto de tangência para problemas de planejamento.

Definiu-se o planejamento da transmissão a longo prazo e a curto prazo. Foi proposto um índice de sobrecarga baseado na diferença de energia do sistema em operação normal e em contingência. Salienta-se que o índice de sobrecarga proposto não indica necessariamente a linha a ser reforçada como sendo aquela com maior percentagem de fluxo em relação a sua capacidade máxima. Isto pode ser verificado pela listagem anexa no apêndice 3 onde constam os carregamentos percentuais das linhas do sistema ao retirar-se a linha 13, indicando como a mais carregada a linha 3, a qual não foi reforçada ao viabilizar-se as configurações pelo critério proposto. O problema do planejamento a curto prazo foi visto como um problema de obter-se configurações viáveis pela eliminação da sobrecarga de uma configuração inicial, com reforço do sistema de transmissão. O índice de sobrecarga é construído baseado no valor da energia do sistema calculado no ponto de operação anterior à retirada da linha, em relação ao ponto de equilíbrio de depois do defeito, e no nível de energia correspondente ao domínio de estabilidade deste ponto de equilíbrio. No algoritmo proposto para solução do problema de planejamento são calculados os índices de sobrecarga para todas as situações que não satisfazem ao teste de contingência. O ramo mais crítico será aquele cuja perda de linha ocasione maior índice de sobrecarga. É proposto um esquema de reforço baseado nesta informação. Tendo em

vista o problema do planejamento a longo prazo, é conveniente obter-se diversas configurações viáveis, o que pode ser feito considerando-se os índices de sobrecarga que seguem ao primeiro em ordem decrescente. A razão disto decorre da necessidade de considerar-se o custo total das construções de linhas em várias etapas do planejamento a longo prazo. Para as configurações viáveis obtidas, foi proposto um índice de segurança que leva em conta a pior situação em defeito. A interpretação deste índice é semelhante ao índice de sobrecarga exceto pelo fato de que a energia correspondente ao ponto de equilíbrio de antes do defeito é menor que a energia correspondente a fronteira do domínio de estabilidade.

Foi apresentado um algoritmo para a solução do problema de planejamento a curto prazo bem como fluxogramas.

São dados três exemplos para ilustrar a utilização do algoritmo. A sugestão do uso da primeira iteração no problema de tangência ($|21|$) foi testada e fornecem resultados levemente otimistas para o domínio de estabilidade, mas que são perfeitamente aceitáveis tendo em vista a conservatividade dos resultados quando se usa o segundo método de Liapunov. Foi verificado que o uso das modificações no cálculo de Z_{BUS} e o uso da primeira iteração no cálculo do domínio de estabilidade reduzem sensivelmente o tempo de computação. A inclusão da análise da estabilidade transitória fornece um resultado mais realista, uma vez que é garantida a estabilidade do ponto de operação em contingência e também que a trajetória que começa no ponto de operação antes da contingência tende para o ponto de equilíbrio em contingência, quando o tempo tende para o infinito.

No apêndice 3 é apresentada uma listagem dos resultados

correspondentes ao exemplo 2. Pode-se observar que existem contingências onde os ângulos entre barras são de ordem de 50° , e a estabilidade transitória é garantida. Isto mostra, então, que além da vantagem introduzida pelo uso da estabilidade transitória, um planejamento feito com este critério de sobrecarga pode conduzir a um planejamento mais econômico, sem prejuízo da segurança, que o resultado obtido com o critério de defasagem seguido pela (|1|) e usado em (|2|, |3|, |4|, |14|).

6.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A principal dificuldade no uso de domínios de estabilidade em sistemas de potência consistiu, durante certo tempo, na inexistência de algoritmos eficientes para sua determinação. A partir do algoritmo desenvolvido em (|8|) tornou-se possível a utilização de domínios de estabilidade em todos os problemas onde é permitida a descrição do sistema pelo modelo (2.4.3.). Outras possibilidades de uso do algoritmo para o domínio de estabilidade seguem como em sugestão natural. É o caso, por exemplo, do remanejamento de geração visando a melhoria da segurança do sistema. Pode ser sugerida, também, o uso da estabilidade transitória para testes expeditos em operação em tempo real para situações de perda de carga, perda de geração ou ainda perda de linha.

Outra possibilidade consiste na procura de uma função objetivo para o problema de planejamento que leve em conta o cus-

to e a segurança do sistema. Seguiria, então, a extensão para o planejamento a longo prazo com o uso da função objetivo mencionada acima.

A eficiência do algoritmo proposto pode ser aumentada com a exploração da esparsidade de matriz jacobiana e da matriz Y_{BUS} do sistema.

BIBLIOGRAFIA

1. Federal Power Commission Advisory Committee Report nº 6: "Criteria for A.C. Transmission System Performance", National Power Survey, Federal Power Commission, U.S. Government Printing Office: 43-47, 1966.
2. GONZAGA, C. C. "Estudo de algoritmos de busca em grafos e sua Aplicação a Problemas do Planejamento - TESE D.SC., COPPE, RJ, 1973.
3. KALTENBACH, Jean-Claude. "A Mathematical Optimization Technique for the Expansion of Electric Transmission Systems". IEEE Pas, nº 89, Jan/70, pg. 113 a 119.
4. SOUZA, Luiz G. C. "Programação Linear Aplicada ao Planejamento da Transmissão" TESE M.SC., 1976, UFSC.
5. WHYSONG, URAM, BROWN, KUNG, DE SALVO. "Computer Program for Automatic Transmission Planning". IEEE Pas 81, PP 774-81, 1963.
6. GARVER. "Transmission Network Estimation Using Linear Programming". IEEE, Pas-89, nº 7, September/70.
7. PUNTEL, REPPEN, RINGLEE, PLATTS, SULLIVAN. "An Automated Method for Long-Range Planning of Transmission Networks", PSCC Proceedings, 1973.
8. FONSECA, L.G.S. "Determinação de Domínios de Estabilidade para Uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência". Tese de D.SC. - COPPE, U.F.R.J., Abril/1976.
9. STAGG, G.W. and EL-ABIAD, A.H. "Computer Methods in Power Systems Analysis". New York, Mc Graw-Hill, 1968.
10. ELGERD, O.I. "Electric Energy Systems Theory: An Introduction". TATA Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd, 1975.

11. KIMBARK, E.W. "Power System Stability". Vol. I e II, New York, John Willey and Sons, Inc., 1955.
12. ANDERSON, Paul M. and FOUAD, Aziza. "Power System Control and Stability. Vol. I, Publicações COPPE, UFRJ, R.J., 1972.
13. WILLEMS, J.C. "A Partial Stability Approach to the Problem of Transient Power System Stability". I.J.C., Vol. 19, nº 1, January/1974, pg. 1 a 14.
14. SACHDEV, M.S. "A Fast Aproximate Technique for Outage Studies in Power System Planning an Operation". IEEE Pes Summer Meeting, July/1973.
15. RIBBENS-PAVELLA, M. "Comments on Direct Methods for Transient Stability Studies in Power Systems Analysis". IEEE Trans. AC., Vol 17, June/1972, pg. 415 a 416.
16. TÁVORA, C.J. and SMITH, O.J.M. "Characterization of Equilibrium and Stability in Power Systems". IEEE Trans Pas, Vol. 91, nº 3, May-June/1972, pg. 1127 a 1130.
17. TÁVORA, C.J. and SMITH, O.J.M. "Equilibrium Analysis of Power System". IEEE Trans Pas, Vol. 91, nº 3, May-June/1972, pg. 1131 a 1137.
18. FONSECA, L.G.S. "Domínios de Estabilidade Assintótica" Tese de M.SC. - COPPE, UFRJ, R.J., Janeiro/71.
19. LASALLE, J.P. "Some Extensions of Liapunov's Second Method". IRE Trans. CT, Vol. 7, nº 4, December/1960, pg. 520 a 527.
20. TÁVORA, C.J. and SMITH, O.J.M. "Stability Analyses of Power Systems". IEEE Trans. Pas, Vol. 81, nº 3, May-June/1972, pg. 1138 a 1144.
21. COGO, J.R. "Determinação de domínios de Estabilidade para Sistemas de N-Máquinas". Tese M.SC., UFSC, 1977.
22. EL ABIAD, A.H. and NAGAPPAN, K. "Transient Stability Re

- gions of Multimachine Power Systems". IEEE Trans. Pas, Vol. 85, n^o 2, February/1966, pg. 169 a 179.
23. RIBBENS-PAVELLA, M. "Transient Stability of Multimachine Power Systems by Liapunov's Direct Method". IEEE, Conference Paper n^o 71, CP. 17, January-February / 1971, pp. 1 a 10.
 24. EL-ABIAD, A.H. and PRABHAKARA, F.S. "A Simplified Determination of Transient Stability Regions for Liapunov Method". IEEE Trans. Pas, Vol. 94, n^o 2, March-April/1975, pg. 672 a 689.
 25. KNIGHT, U.G. "Power Systems Engineering and Mathematics", N.Y., Pergamon Press, 1972.
 26. HAHN, W. "Stability of Motion". Springer-Verlag, 1967.
 27. EL-ABIAD, A.H. and GUPTA, C.C. "Determination of the Closed Instable Equilibrium State for Liapunov Methods in Transient Stability Studies". IEEE Trans. Pas, Vol. 95, n^o 5, September-October/1976, pg. 1699 a 1718.

APENDICE I

MANUAL PARA O PROGRAMA DE PLANEJAMENTO DO SISTEMA
DE TRANSMISSÃO A CURTO PRAZO

1. O programa perguntará:
 - a) Número de linhas do sistema reduzido
 - b) Número de linhas do sistema
 - c) Número de geradores
 - d) Número de barras

2. Nas declarações 30 a 54, através de declarações DATA, introduzem-se os seguintes dados:
 - a) O número da linha de transmissão
 - b) O número da barra inicial
 - c) O número da barra final
 - d) A reatância série da linha em p.u.

A cada declaração DATA corresponde uma linha de transmissão. Na presente versão são permitidos sistemas com até 16 linhas. Entretanto, pode-se facilmente ampliar a quantidade máxima de linhas, modificando-se as declarações DIM.

3. Nas declarações 55 a 60 colocam-se através de declarações DATA os limites térmicos em p.u. das linhas especificadas nas declarações 30 a 54, na mesma ordem.

4. Nas declarações 97 e 98, colocam-se através de DATA'S, as reatâncias transitória de máquina e reatância equivalente dos transformadores, nesta ordem, desde a primeira máquina e primeiro transformador até a última máquina e último transformador. Nesta versão pode-se colocar no máximo 8 máquinas e 8 transformadores.
5. Nas declarações 65 a 72, colocam-se DATA'S com a potência líquida em cada barra e um índice indicador de barra de geração (2) ou de barra de carga (1). Pode-se introduzir até 8 barras nesta versão.
6. O programa possui a seguinte saída:
 - a) Os ângulos em cada barra (em graus) para a configuração inicial.
 - b) O fluxo de potência linearizado para a configuração inicial.
 - c) Indica-se qual a linha que está sendo retirada.
 - d) Para cada contingência, escreve-se os ângulos em cada barra (em graus).
 - e) Indica-se se o sistema satisfaz ou não a contingência.
 - f) Escreve-se a energia potencial no ponto de tangência, a energia potencial na condição inicial e a diferença entre elas.
 - g) Indica-se os índices de sobrecarga, já ordenados, e a contingência correspondente a cada índice.
 - h) Escreve-se a linha reforçada com a finalidade de viabilizar o sistema.
 - i) Após conseguir-se uma configuração viável, o pro

grama escreve a mensagem: "Reforce a próxima linha indicada a partir da configuração inicial"

Neste caso deve-se rodar novamente o programa, acrescentando-se a linha indicada pelo próximo índice de sobrecarga da configuração inicial, conforme indicação dos itens 1, 2, 3, deste manual.

Se em qualquer fase do programa obtiver-se um ponto de equilíbrio que está fora do politopo, será escrita uma mensagem: "Ponto fora do politopo". Para esta possibilidade, existem duas atitudes a tomar:

- a) se a configuração for a inicial, para-se o programa.
- b) se a configuração for diferente da inicial, deve-se reforçar a linha cuja contingência ocasionou este problema.

Testa-se também, os limites térmicos das linhas de transmissão. Caso algum destes limites térmicos seja ultrapassado o programa diz: "Limite térmico ultrapassado na linha x. Reforce esta linha". Deve-se proceder a esta indicação.

Se o usuário desejar utilizar o método usual de cálculo do domínio de estabilidade deve bater as seguintes declarações:

```
5266 IF I6 < = I7 THEN 5560
5275 FOR I = 1 TO G9 \A1=ABS (D1 (I)) \IF A1 > P5 THEN 5250
5280 NEXT I
```

Além disso, desejando modificar o número máximo de iteração do algoritmo de Newton-Raphson (I6), assim como o critério de convergência (P5) deve-se bater

```
5206 P5 = xxxxx ... I6 = xxxxx ...
```

LIST

```

5 PRINT " PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSAO"
7 PRINT "===== "
8 PRINT " NO. DE LINHAS SIST. REDUZ.?"\INPUT G6
9 DIM F7(16)
10 DIM L1(16),N3(16),N4(16),B2(16),G4(8,8),B4(8,8),X1(8),X4(8)
12 DIM C(8),P(8),J(16,16),D(10),D0(10),F(16),F9(8,8)
14 DIM E(5),F2(6,6)
15 DIM Y(20),B3(16)
18 DIM G(12),Y6(6),F3(12,2)
19 DIM I2(12),I1(12)
22 PRINT "NO. DE LINHAS"\INPUT N1
24 PRINT "NO. DE GERADORES"\INPUT G7
26 PRINT " NO. DE BARRAS"\INPUT N5
30 REM- DADOS DO SISTEMA
35 DATA 1,1,2,.425
36 DATA 2,2,4,.805
37 DATA 3,4,5,.36
38 DATA 4,5,6,1.008
39 DATA 5,3,6,1
40 DATA 6,1,3,.46
41 DATA 7,2,5,.805
42 DATA 8,3,4,.85
43 DATA 9,5,6,2.5
44 DATA 10,3,6,3.5
45 DATA 11,1,7,3.5
46 DATA 12,4,7,.45
47 DATA 13,3,7,1
55 DATA 2,1,7,2.2,1.5,1.45,1.9,1.7,1.65,1.2,1,1,1.9,1.45
60 FOR I=1 TO N1\READ L1(I),N3(I),N4(I),B2(I)\B2(I)=1/B2(I)
62 NEXT I
63 FOR I=1 TO N1\READ F7(I)\NEXT I
65 DATA 0,2
66 DATA -2,1
67 DATA -1.8,1
68 DATA 2,2
69 DATA -2,1
70 DATA 1.5,2
71 DATA 1.57,2
95 FOR I=1 TO N5\READ P(I),C(I)\NEXT I
96 FOR I=1 TO N5\P(1)=P(1)+P(I)\NEXT I\P(1)=-P(1)
97 DATA .0608,.0576,.1190,.0625,.1813,.0586
98 DATA .0608,.0576
99 FOR I=1 TO G7\READ X1(I),X4(I)\NEXT I
100 T=N5-1\GOSUB 1500
105 Z1=0
150 FOR I=2 TO N5\FOR K=2 TO N5\L=I-1\M=K-1\J(L,M)=B4(I,K)
155 NEXT K\nEXT I
160 J3=N5-1\U7=5\GOSUB 4000
162 FOR I=1 TO J3\FOR K=1 TO J3\Z4(I,K)=J(I,K)\NEXT K\nEXT I
165 GOSUB 1645
170 K=1\FOR I=1 TO N5\IF C(I)<>2 THEN 195
180 B=X1(K)+X4(K)\B0(K,K)=1/B
185 B4(I,I)=B4(I,I)+B0(K,K)\B5(I,K)=-B0(K,K)
190 K=K+1
192 GO TO 200
195 G4(I,I)=-P(I)
200 NEXT I
205 J3=2*N5\U7=0\GOSUB 3000
210 FOR I=1 TO N5\FOR K=1 TO N5\F9(I,K)=B4(I,K)\NEXT K\nEXT I
230 REM REDUCAO DO SISTEMA
240 GOSUB 5000
245 Z7=1\FOR I=1 TO (G7-1)\D3(I)=D0(I)-D0(G7)\NEXT I
    
```

```

300 REM CONTINGENCIA
302 Z1=1\Z2=0
304 FOR I=1 TO N5\FOR K=1 TO N5\J(I,K)=0\NEXT K\NEXT I
305 FOR I9=1 TO N1
310 PRINT \PRINT "LINHA RETIRADA="I9\PRINT
315 FOR I=1 TO (N5-1)\FOR K=1 TO (N5-1)\J(I,K)=Z4(I,K)\NEXT K\NEXT I
320 FOR I=1 TO N5\FOR K=1 TO N5\L=N5-I+1\M=N5-K+1\T9=L-1
325 V=M-1\J(L,M)=J(I9,V)\NEXT K\NEXT I
326 K8=5
327 N=1/B2(I9)
330 J3=N5\GOSUB 7000
335 FOR I=2 TO N5\FOR K=2 TO N5\L=I-1\M=K-1\J(L,M)=J(I,K)
340 NEXT K\NEXT I
350 N=B2(I9)\B2(I9)=0
355 GOSUB 1645
357 B2(I9)=N
358 K8=0\N=1/B2(I9)
360 J3=N5\FOR I=1 TO J3\FOR K=1 TO J3\J(I,K)=-F9(I,K)\NEXT K\NEXT I
365 GOSUB 7000
367 FOR I=1 TO L\FOR K=1 TO L\B4(I,K)=J(I,K)\NEXT K\NEXT I
368 FOR I=1 TO N5\FOR K=1 TO N5\J(I,K)=G4(I,K)\NEXT K\NEXT I
369 N=0\GOSUB 7000
370 FOR I=1 TO J3\FOR K=1 TO J3
371 A=J(I,L)^2+B4(I,L)^2
372 B4(I,K)=B4(I,K)-((B4(L,K)*J(I,L)+B4(I,L)*J(L,K))*J(L,L))/A
373 B4(I,K)=B4(I,K)+((J(I,L)*J(L,K)-B4(I,L)*B4(L,K))*B4(L,L))/A
374 B4(I,K)=-B4(I,K)\NEXT K\NEXT I
375 GOSUB 5000
377 GOSUB 5137
378 GO TO 5200
380 FOR I=1 TO (67-1)\X(I)=D3(I)\NEXT I
385 K8=E1\V9=5\GO TO 5425
390 IF K8<E1 THEN 400
391 PRINT \PRINT
392 PRINT \PRINT "PASSOU NA CONTINGENCIA"\PRINT
394 PRINT "ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA" "K8
395 PRINT "ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL"E1
396 PRINT "DIFERENCA" "K8-E1
397 GO TO 410
400 K8(Z7)=ABS(K8-E1)
401 I7(Z7)=I9
402 PRINT "NAO PASSOU NA CONTINGENCIA"\PRINT
404 PRINT "ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL"E1
405 PRINT "ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA" "K8
406 PRINT "DIFERENCA" "K8(Z7)
409 PRINT \PRINT \Z7=Z7+1
410 NEXT I9
415 IF Z7=1 THEN 465 \Z7=Z7-1
420 N0=Z7\Z2=7
425 FOR J=1 TO Z7\G(J)=K8(J)\I1(J)=I7(J)\NEXT J
430 GOSUB 6092 \Z2=0
431 PRINT \PRINT
432 PRINT "CONTINGENCIA", "INDICE DE SOBRECARGA"
433 PRINT "=====", "=====" \PRINT
434 FOR J=1 TO Z7
435 PRINT I1(Z7-J+1), G(Z7-J+1)
436 NEXT J \PRINT
440 I3=I1(Z7)
445 PRINT \PRINT "FOI REFORCADA A LINHA" I3 \PRINT
455 N1=N1+1\N3(N1)=N3(I3)\N4(N1)=N4(I3)\B2(N1)=B2(I3)\L1(N1)=N1
457 F7(N1)=F7(I3)
460 GO TO 100
465 PRINT "REFORCE A PROXIMA LINHA INDICADA A PARTIR DA CONFIGURACAO"
470 PRINT " INICIAL"
475 END
1500 REM FORMACAO DA YBUS

```

```

1505 FOR I=1 TO N5\FOR K=1 TO N5\B4(I,K)=0\NEXT K\NEXT I
1510 FOR I=1 TO N1\L=N3(I)\M=N4(I)
1515 B4(L,L)=B4(L,L)+B2(I)
1520 B4(M,M)=B4(M,M)+B2(I)
1525 B4(L,M)=B4(L,M)-B2(I)
1530 B4(M,L)=B4(M,L)-B2(I)
1535 NEXT I
1540 RETURN
1645 REM- LOAD FLOW D.C.
1650 FOR I=1 TO J3\FOR K=1 TO J3\L=N5-I+1\M=N5-K+1\T9=L-1\Y=M-1
1655 J(L,M)=J(T9,Y)\NEXT K\NEXT I
1660 FOR I=1 TO N5\FOR K=1 TO N5\J(L,K)=0\J(L,1)=0\NEXT K\NEXT I
1700 FOR I=1 TO N5\D(I)=0\NEXT I
1720 FOR I=1 TO N5\FOR K=1 TO N5
1725 D(I)=J(I,K)*P(K)+D(I)\NEXT K\NEXT I
1727 PRINT \PRINT
1728 PRINT "BARRA", "ANGULO(GRAUS)"
1729 PRINT "=====", "====="
1730 FOR I=1 TO N5
1731 PRINT I, D(I)+57.2958
1732 NEXT I
1733 PRINT \PRINT
1740 FOR I=1 TO N1\R=N3(I)\S=N4(I)\Z=L1(I)
1745 F(Z)=(D(R)-D(S))*B2(Z)\NEXT I
1747 IF Z1<>0 THEN 1775
1750 PRINT "      RESULTADO DO LOAD FLOW D.C."
1755 PRINT "=====\PRINT
1760 PRINT "LINHA", "BARRA", "BARRA", "POTENCIA"
1765 PRINT "      ", "INICIAL", "FINAL", "(P.U.)"
1767 PRINT
1770 FOR I=1 TO N1\PRINT L1(I), N3(I), N4(I), F(I)\PRINT \NEXT I
1775 FOR I=1 TO N1\IF ABS(F(I))<F7(I) THEN 1790
1780 PRINT "LIMITE TERMICO ULTRAPASSADO NA LINHA" I
1785 PRINT "REFORCE ESTA LINHA"
1787 GO TO 475
1790 NEXT I
1795 RETURN
2000 IF N7(I3)<>G7 THEN 2125 \K9=1
2002 N2=G9\G9=G7-1
2005 FOR J=1 TO G9\FOR I=1 TO G9\A(I,J)=0\NEXT I\NEXT J
2010 FOR I=1 TO G9\Y1(I)=0\A(I,I)=0\FOR J=1 TO G8
2015 K1=N6(J)\K2=N7(J)\IF K1=1 THEN 2025
2020 IF K2=I THEN 2060 \GO TO 2070
2025 IF K2=G7 THEN 2045
2030 Y1(I)=Y1(I)+Y6(J)*(SIN(X(K1)-X(K2)+D0(K1)-D0(K2))-SIN(D0(K1)-D0(K2)))
2035 A(I,I)=A(I,I)+Y6(J)*COS(X(K1)-X(K2)+D0(K1)-D0(K2))
2040 GO TO 2070
2045 Y1(I)=Y1(I)+Y6(J)*(SIN(X(K1)+D0(K1))-SIN(D0(K1)))
2050 A(I,I)=A(I,I)+Y6(J)*COS(X(K1)+D0(K1))
2055 GO TO 2070
2060 Y1(I)=Y1(I)+Y6(J)*(-SIN(X(K1)-X(K2)+D0(K1)-D0(K2))+SIN(D0(K1)-D0(K2)))
2065 A(I,I)=A(I,I)+Y6(J)*COS(X(K1)-X(K2)+D0(K1)-D0(K2))
2070 NEXT J\NEXT I
2071 G9=N2
2075 FOR J=1 TO G8\K1=N6(J)\K2=N7(J)
2080 IF K2=G7 THEN 2095
2085 A(K1,K2)=-Y6(J)*COS(X(K1)-X(K2)+D0(K1)-D0(K2))
2090 A(K2,K1)=A(K1,K2)
2095 NEXT J
2100 IF K9=2 THEN 2130
2105 Y1(N6(I3))=Y1(N6(I3))+X(G7)
2110 Y1(G7)=X(N6(I3))-F3(I3,I4)
2115 FOR J=1 TO G7\A(J,G7)=0\A(G7,J)=0\NEXT J
2120 A(N6(I3),G7)=1\A(G7,N6(I3))=1
2122 RETURN
2125 K9=2\GO TO 2002

```

```

2130 K1=N6(I3)\K2=N7(I3)
2135 Y1(K1)=Y1(K1)+Y1(K2)
2140 Y1(K2)=X(K1)-X(K2)-F3(I3, I4)
2145 FOR J=1 TO G9\A(K1, J)=A(K1, J)+A(K2, J)\NEXT J
2150 FOR J=1 TO G9\A(K2, J)=0\next J
2155 A(K2, K1)=1\A(K2, K2)=-1
2160 RETURN
3000 REM CALCULO APROXIMADO
3005 V0=1\GO TO 5425
3010 V0=0
3015 RETURN
3800 REM - INVERSAO DE MATRIZ COMPLEXA
3801 REM - =====
3805 REM - TRANSFORMACAO DE MATRIZ COMPLEXA EM UMA MATRIZ REAL
3810 I1=1
3820 FOR I=1 TO J3 STEP 2\I2=I+1\K1=1
3825 FOR K=1 TO J3 STEP 2\K2=K+1
3830 J(I, K)=G4(I1, K1)\J(I, K2)=-B4(I1, K1)
3840 J(I2, K)=B4(I1, K1)\J(I2, K2)=G4(I1, K1)
3850 K1=K1+1\next K
3860 I1=I1+1\next I
4000 REM - INVERSAO DE MATRIZ REAL
4005 I8=1\Y1=0\Y2=0
4010 FOR I=1 TO J3\Y(I)=0\next I
4020 FOR K=1 TO J3\L=J3+1-K\IF Y(L)<>0 THEN 4100
4025 IF J(L, L)=0 THEN 4100
4030 Y(L)=1\Y2=Y2+1
4033 P8=J(L, L)\J(L, L)=-1/J(L, L)
4035 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4045
4040 J(I, L)=-J(I, L)/P8
4045 NEXT I
4050 FOR I1=1 TO J3\IF I1=L THEN 4075
4060 FOR I2=1 TO J3\IF I2=L THEN 4070
4065 J(I1, I2)=J(I1, I2)+J(I1, L)*J(L, I2)
4070 NEXT I2
4075 NEXT I1
4080 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4090
4085 J(L, I)=-J(L, I)/P8
4090 NEXT I
4100 IF Y1<>0 THEN 4120
4110 NEXT K
4120 IF J3=Y2 THEN 4190
4130 FOR I=1 TO J3\IF Y(I)<>0 THEN 4170
4140 IF J(I, I)=0 THEN 4170
4160 Y1=Y1+1\Y2=Y2+1\Y(I)=1\L=I
4165 GO TO 4033
4170 NEXT I
4180 I8=0\GO TO 4245
4190 FOR I=1 TO J3
4195 FOR K=1 TO J3\J(I, K)=-J(I, K)\NEXT K
4200 NEXT I
4203 IF U7=5 THEN 4250
4205 I1=1
4210 FOR I=1 TO J3 STEP 2\I2=I+1\K1=1
4220 FOR K=1 TO J3 STEP 2\K2=K+1
4230 G4(I1, K1)=J(I, K)\B4(I1, K1)=-J(I, K2)\K1=K1+1\next K
4240 I1=I1+1\next I
4241 GO TO 4250
4245 PRINT "MATRIZ SINGULAR"
4250 RETURN
5000 K=1
5005 FOR I=1 TO N5
5010 IF C(I)<>2 THEN 5025
5012 B=X1(K)+X4(K)
5015 E(K)=SQRT(1+(P(I)*B)^2)
5020 D0(K)=D(I)+ATN(P(I)*B)\K=K+1

```



```

5025 NEXT I
5027 FOR I=1 TO G7\IF ABS(D0(I))<1.57 THEN 5030
5028 PRINT 'PONTO FORA DO POLITOP0'
5029 GO TO 475
5030 NEXT I
5032 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\IF ABS(D0(I)-D0(K))<1.57 THEN 5035
5033 PRINT 'PONTO FORA DO POLITOP0'
5034 GO TO 475
5035 NEXT K\NEXT I
5040 RETURN
5137 REM
5140 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO N5\J(I,K)=0\FOR L=1 TO N5
5145 J(I,K)=J(I,K)+B5(L,I)*B4(L,K)
5150 NEXT L\NEXT K\NEXT I
5155 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\F2(I,K)=0
5160 FOR L=1 TO N5\F2(I,K)=F2(I,K)+J(I,L)*B5(L,K)
5165 NEXT L\NEXT K\NEXT I
5170 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\F2(I,K)=B0(I,K)+F2(I,K)
5171 NEXT K\NEXT I
5175 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\F2(I,K)=E(I)*E(K)*F2(I,K)
5177 NEXT K\NEXT I
5179 L=1
5180 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\IF K<=1 THEN 5184
5181 N6(L)=1\N7(L)=K\Y6(L)=-F2(I,K)
5183 L=L+1
5184 NEXT K\NEXT I
5185 RETURN
5200 P5=1.000000E-03\I6=7\I7=-1\FOR I=1 TO (G7-1)
5205 D0(I)=D0(I)-D0(G7)\NEXT I
5210 GOSUB 6000
5215 GOSUB 6085
5220 I3=I2(1)\I4=I1(1)
5225 IF N7(I3)<>G7 THEN 5240
5230 FOR J=1 TO G7\X(J)=0\NEXT J
5235 G9=G7\GO TO 5245
5240 G9=G7-1\FOR J=1 TO G9\X(J)=0\NEXT J
5245 FOR I=1 TO G9\D1(I)=0\NEXT I
5247 I7=-1
5250 FOR I=1 TO G9\X(I)=X(I)+D1(I)\NEXT I
5255 V0=0\GOSUB 3000
5260 GOSUB 2000
5265 I7=I7+1
5270 FOR I=1 TO G9\Y1(I)=-Y1(I)\NEXT I\IF I7=0 THEN 5290
5285 GO TO 5425
5290 FOR K=1 TO G9\D1(K)=0\K1=K+1\IF A(K,K)<>0 THEN 5345
5295 IF K<=G9 THEN 5305
5300 D1(K)=0\GO TO 5380
5305 FOR I=K1 TO G9
5310 IF A(I,K)<>0 THEN 5325
5315 NEXT I
5320 D1(K)=0\GO TO 5370
5325 A3=Y1(K)\Y1(K)=Y1(I)\Y1(I)=A3
5340 FOR J=K TO G9\A4=A(K,J)\A(K,J)=A(I,J)\A(I,J)=A4\NEXT J
5345 Y1(K)=Y1(K)/A(K,K)
5350 IF K>=G9 THEN 5375
5355 FOR J=K1 TO G9\A(K,J)=A(K,J)/A(K,K)\NEXT J
5360 FOR I=K1 TO G9\Y1(I)=Y1(I)-A(I,K)*Y1(K)
5365 FOR J=K1 TO G9\A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)\NEXT J\NEXT I
5370 NEXT K
5375 D1(G9)=Y1(G9)
5380 I=69
5385 S1=0
5390 L=I-1
5395 FOR J=1 TO G9\S1=S1+A(L,J)*D1(J)\NEXT J
5400 I=I-1\D1(I)=Y1(I)-S1
5405 IF I>1 THEN 5385

```

```

5410 GO TO 5250
5425 E3=0\FOR J=1 TO G8
5440 E1=0
5445 K1=N6(J)\K2=N7(J)
5450 IF K2=G7 THEN 5470
5455 E1=E1-COS(X(K1)-X(K2)+D0(K1)-D0(K2))+COS(D0(K1)-D0(K2))
5460 E1=Y6(J)*(E1-(X(K1)-X(K2))*SIN(D0(K1)-D0(K2)))
5465 GO TO 5475
5470 E1=E1+Y6(J)*(-COS(X(K1)+D0(K1))+COS(D0(K1))-X(K1)*SIN(D0(K1)))
5475 E3=E3+E1
5480 NEXT J
5485 E1=E3
5492 IF V0=5 THEN 390
5495 IF V0=1 THEN 3010
5500 FOR J=1 TO G8
5501 IF J=13 THEN 5535
5505 IF N7(J)=G7 THEN 5525
5510 IF (X(N6(J))-X(N7(J)))>F3(J,1) THEN 5560
5512 A1=X(N6(J))-X(N7(J))
5515 IF A1<F3(J,2) THEN 5560
5520 GO TO 5535
5525 IF X(N6(J))>F3(J,1) THEN 5560
5530 IF X(N6(J))<F3(J,2) THEN 5560
5535 NEXT J
5540 IF E1<=G(2) THEN 5575
5545 G(1)=E1
5550 GOSUB 6085
5555 GO TO 5220
5560 G(1)=G(1)*1.00000E+07
5565 GOSUB 6085
5570 GO TO 5220
5575 GO TO 380
6000 REM CALCULO DO D. E. I.
6010 P2=3.1416\FOR I=1 TO G8\K1=N6(I)\K2=N7(I)
6015 K=I+G8\IF K2<>G7 THEN 6045
6020 F3(I,1)=P2-2*D0(K1)\F3(I,2)=-P2-2*D0(K1)
6025 G(I)=Y6(I)*(-COS(F3(I,1)+D0(K1))+COS(D0(K1))-F3(I,1)*SIN(D0(K1)))
6030 I2(I)=I\I1(I)=1
6035 G(K)=Y6(I)*(-COS(F3(I,2)+D0(K1))+COS(D0(K1))-F3(I,2)*SIN(D0(K1)))
6040 I2(K)=I\I1(K)=2
6042 GO TO 6075
6045 F3(I,1)=P2-2*(D0(K1)-D0(K2))\F3(I,2)=-P2-2*(D0(K1)-D0(K2))
6048 G(I)=-COS(F3(I,1)+D0(K1)-D0(K2))+COS(D0(K1)-D0(K2))
6050 G(K)=Y6(I)*(G(I)-F3(I,1)*SIN(D0(K1)-D0(K2)))
6060 I2(I)=I\I1(I)=1
6065 G(K)=-COS(F3(I,2)+D0(K1)-D0(K2))+COS(D0(K1)-D0(K2))
6070 G(K)=Y6(I)*(G(K)-F3(I,2)*SIN(D0(K1)-D0(K2)))
6072 I2(K)=I\I1(K)=2
6075 NEXT I
6080 RETURN
6085 REM- ORDENACAO DO D. E. I.
6090 N0=2*G8
6092 N0=N0-1\FOR J=1 TO N0\K=J+1
6095 IF G(J)<=G(K) THEN 6110
6100 G1=G(K)\G(K)=G(J)\G(J)=G1\I=I1(K)\I1(K)=I1(J)
6105 I1(J)=I\IF Z2=7 THEN 6110
6107 I=I2(K)\I2(K)=I2(J)\I2(J)=I
6110 NEXT J
6115 N0=N0-1\IF N0>1 THEN 6092 \N0=2*G8
6116 RETURN
7000 P=N3(I9)\Q=N4(I9)\L=J3+1
7002 IF K8=0 THEN 7010
7005 IF P=1 THEN 7040
7010 FOR I=1 TO J3
7015 J(L,I)=J(P,I)-J(Q,I)
7020 J(I,L)=J(L,I)

```

```
7025 NEXT I
7030 J(L,L)=J(P,L)-J(Q,L)-N
7032 IF K8=0 THEN 7080
7035 GO TO 7065
7040 FOR I=1 TO J3
7045 J(L,I)=-J(Q,I)
7050 J(I,L)=J(L,I)
7055 NEXT I
7060 J(L,L)=-J(Q,L)-(1/B2(I9))
7065 FOR I=1 TO J3\FOR K=1 TO J3
7070 J(I,K)=J(I,K)-(J(I,L)*J(L,K))/J(L,L)
7075 NEXT K\NEXT I
7080 RETURN
```

```
READY
```

RUN

PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSAO

NO. DE LINHAS SIST. REDUZ. ?

26

NO. DE LINHAS

213

NO. DE GERADORES

24

NO. DE BARRAS

27BRT

27

BARRA ANGULO(GRAUS)

BARRA	ANGULO(GRAUS)
1	0
2	-20.9994
3	-1.45572
4	19.5642
5	-9.09211
6	26.6696
7	37.6217

RESULTADO DO LOAD FLOW D. C.

LINHA BARRA BARRA POTENCIA
INICIAL FINAL (P. U.)

LINHA	BARRA INICIAL	BARRA FINAL	POTENCIA (P. U.)
1	1	2	.862374
2	2	4	-.879463
3	4	5	1.38929
4	5	6	-.619206
5	3	6	-.490879
6	1	3	.0552329
7	2	5	-.258164
8	3	4	-.431607
9	5	6	-.249664
10	3	6	-.140251
11	1	7	-.187606
12	4	7	-.700364
13	3	7	-.68203

LINHA RETIRADA= 1

BARRA	ANGULO (GRAUS)
1	0
2	-78.0681
3	-20.5152
4	-15.9302
5	-47.9598
6	-2.68736
7	9.70332

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	1.32534
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	241283
DIFERENCA	1.08405

LINHA RETIRADA= 2

BARRA	ANGULO (GRAUS)
1	0
2	-31.3781
3	7.75145
4	39.7571
5	1.43443
6	36.5627
7	53.0383

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	161941
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	107747
DIFERENCA	0541939

LINHA RETIRADA= 3

BARRA	ANGULO (GRAUS)
1	0
2	-25.9437
3	1.73572
4	44.071
5	-52.0524
6	5.45282
7	54.0562

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	169791
--------------------------------	--------

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL .140204
DIFERENCA .029587

LINHA RETIRADA= 4

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-24.4421
3	2.45041
4	15.6448
5	-18.5789
6	48.4439
7	36.2524

NAO PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL .171501
ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA .118266
DIFERENCA .053235

LINHA RETIRADA= 5

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-17.9271
3	-4.9417
4	23.0619
5	-6.625741
6	49.864
7	38.8437

NAO PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL .157082
ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA .103197
DIFERENCA .0538853

LINHA RETIRADA= 6

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-22.0665
3	-4.73075
4	17.4255
5	-11.1088
6	24.0407
7	35.3333

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA 372949
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL 114566
DIFERENCA 258382

LINHA RETIRADA= 7

BARRA	ANGULO(GRAUS)
1	0
2	-23.7804
3	1.13591
4	23.4229
5	-1.18686
6	32.0236
7	40.805

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA 388545
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL 168929
DIFERENCA 219616

LINHA RETIRADA= 8

BARRA	ANGULO(GRAUS)
1	0
2	-17.422
3	-5.87389
4	28.1123
5	-3.70951
6	27.3464
7	41.7774

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA 407336
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL 166009
DIFERENCA 241326

LINHA RETIRADA= 9

BARRA	ANGULO(GRAUS)
1	0
2	-21.9116
3	-4.20726
4	18.5257
5	-11.6058

6 32.4391
7 37.2589

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA 383861
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL 190231
DIFERENCA 19363

LINHA RETIRADA= 10

BARRA ANGULO(GRAUS)

=====
1 0
2 -20.4762
3 -2.04943
4 20.1599
5 -7.65019
6 30.6199
7 37.8298

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA 420209
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL 187665
DIFERENCA 232543

LINHA RETIRADA= 11

BARRA ANGULO(GRAUS)

=====
1 0
2 -19.0576
3 1.38714
4 23.7349
5 -5.70127
6 29.7973
7 44.7162

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA 369316
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL 154832
DIFERENCA 214484

LINHA RETIRADA= 12

BARRA ANGULO(GRAUS)

=====	=====
1	0
2	-26.9171
3	533703
4	5.89118
5	-18.4631
6	22.8012
7	70.4574

NAO PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.135175
ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.0211765
DIFERENCA	.113999

LINHA RETIRADA= 13

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-17.7005
3	-8.01812
4	27.6697
5	-4.35122
6	25.9033
7	60.3853

NAO PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.131259
ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.127633
DIFERENCA	3.62654E-03

CONTINGENCIA	INDICE DE SOBRECARGA
=====	=====
12	.113999
5	.0530853
4	.053235
13	3.62654E-03

FOI REFORCADA A LINHA 12

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-20.0374
3	-1.79541
4	21.787
5	-7.56866
6	27.2985
7	32.2036

RESULTADO DO LOAD FLOW D.C.

LINHA	BARRA INICIAL	BARRA FINAL	POTENCIA (P. U.)
1	1	2	.822866
2	2	4	-.906798
3	4	5	1.4232
4	5	6	-.603716
5	3	6	-.507784
6	1	3	.0681212
7	2	5	-.270336
8	3	4	-.484224
9	5	6	-.243418
10	3	6	-.145081
11	1	7	-.160987
12	4	7	-.407111
13	3	7	-.59479
14	4	7	-.407111

LINHA RETIRADA= 1

BARRA	ANGULO (GRAUS)
1	0
2	-73.0869
3	-19.7722
4	-10.5696
5	-43.358
6	.0616937
7	4.64987

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	1.16846
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.202934
DIFERENCA	.965526

LINHA RETIRADA= 2

BARRA	ANGULO (GRAUS)
1	0

2	-30.9116
3	7.71242
4	41.8364
5	2.78445
6	37.2457
7	49.4937

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.168256
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.0871306
DIFERENCA	.0811255

LINHA RETIRADA= 3

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-25.4834
3	1.59252
4	45.614
5	-52.6033
6	5.51357
7	51.3556

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.155652
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.11808
DIFERENCA	.0375713

LINHA RETIRADA= 4

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-23.2501
3	1.95301
4	18.2841
5	-16.5756
6	48.5397
7	30.2208

NAO PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.149566
ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.109165
DIFERENCA	.0404006

LINHA RETIRADA= 5

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-16.9978
3	-5.34176
4	25.101
5	.953665
6	51.1063
7	34.2351

NAO PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.133149
ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.0872663
DIFERENCA	.0458824

LINHA RETIRADA= 6

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-21.3607
3	-5.82337
4	19.1317
5	-10.0667
6	24.0658
7	29.5212

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.361942
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.0920144
DIFERENCA	.269928

LINHA RETIRADA= 7

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-22.982
3	.926925
4	25.7337
5	.63517
6	32.8704
7	35.8198

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.353946
--------------------------------	---------

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 144662
DIFERENCA . 209284

LINHA RETIRADA= 8

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-16.3945
3	-6.5194
4	30.5119
5	-2.10757
6	27.8693
7	38.2264

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA . 410373
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 138974
DIFERENCA . 271399

LINHA RETIRADA= 9

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-20.8909
3	-7.99617
4	20.8564
5	-9.96165
6	32.9413
7	31.7356

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA . 353815
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 166336
DIFERENCA . 187479

LINHA RETIRADA= 10

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-19.5178
3	-2.40157
4	22.3534
5	-6.11197
6	31.3678
7	32.6171

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA . 383834
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 162882
DIFERENCA . 220951

LINHA RETIRADA= 11

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-18.2779
3	.543161
4	25.5874
5	-4.51737
6	30.8076
7	37.5097

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA . 387833
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 13824
DIFERENCA . 249594

LINHA RETIRADA= 12

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-20.9994
3	-1.45573
4	19.5641
5	-9.09211
6	26.6696
7	37.6217

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA . 489626
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 166479
DIFERENCA . 323148

LINHA RETIRADA= 13

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-16.8141
3	-7.19791

4	29.6163
5	-2.84608
6	27.1596
7	46.8446

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	294707
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	127008
DIFERENCA	167699

LINHA RETIRADA= 14

BARRA	ANGULO (GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-20.9994
3	-1.45573
4	19.5641
5	-9.09211
6	26.6696
7	37.6217

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	489626
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	166479
DIFERENCA	323148

CONTINGENCIA	INDICE DE SOBRECARGA
=====	=====

5	0458824
4	0404006

FOI REFORCADA A LINHA 5

BARRA	ANGULO (GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-21.0926
3	-1.564211
4	20.6364
5	-10.5274
6	19.033
7	31.606

RESULTADO DO LOAD FLOW D.C.

LINHA	BARRA	BARRA	POTENCIA
-------	-------	-------	----------

	INICIAL	FINAL	(P. U.)
1	1	2	.856202
2	2	4	-.904732
3	4	5	1.51086
4	5	6	-.511832
5	3	6	-.342036
6	1	3	.0214073
7	2	5	-.229066
8	3	4	-.435319
9	5	6	-.206371
10	3	6	-.0977247
11	1	7	-.157608
12	4	7	-.425457
13	3	7	-.561477
14	4	7	-.425457
15	3	6	-.342036

LINHA RETIRADA= 1

BARRA	ANGULO (GRAUS)
1	0
2	-75.6676
3	-19.5814
4	-12.4835
5	-46.6055
6	-6.44186
7	2.59866

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	1.64205
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.190281
DIFERENCA	1.45177

LINHA RETIRADA= 2

BARRA	ANGULO (GRAUS)
1	0
2	-31.9576
3	8.94018

4	40.6222
5	-242803
6	28.8327
7	48.7661

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	216683
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.0911162
DIFERENCA	125567

LINHA RETIRADA= 3

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-25.6614
3	1.77676
4	45.6546
5	-53.3368
6	4.28428
7	51.4192

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	169354
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	110308
DIFERENCA	.0590463

LINHA RETIRADA= 4

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-24.0808
3	2.92225
4	17.3784
5	-18.9058
6	31.6716
7	29.6874

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	400585
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	160702
DIFERENCA	.239883

LINHA RETIRADA= 5

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-20.0374
3	-1.79541
4	21.787
5	-7.56866
6	27.2985
7	32.2836

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.487808
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.152739
DIFERENCA	.335069

LINHA RETIRADA= 6

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-21.5097
3	-1.79532
4	19.8077
5	-11.3229
6	17.9662
7	30.7482

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.370361
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	.0839872
DIFERENCA	.286374

LINHA RETIRADA= 7

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-23.6372
3	1.00922
4	23.8373
5	-3.9203
6	23.0089
7	34.5029

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	.614905
--------------------------------	---------

ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL .147835
DIFERENCA . 467071

LINHA RETIRADA= 8

BARRA ANGULO(GRAUS)

=====
1 0
2 -18.0463
3 -4.53665
4 20.1537
5 -6.1818
6 18.209
7 36.7434

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA 536605
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL .143756
DIFERENCA .392849

LINHA RETIRADA= 9

BARRA ANGULO(GRAUS)

=====
1 0
2 -21.9385
3 42275
4 19.7141
5 -12.8992
6 22.6108
7 31.0529

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA 65078
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL .16661
DIFERENCA .48417

LINHA RETIRADA= 10

BARRA ANGULO(GRAUS)

=====
1 0
2 -20.8687
3 -825528
4 20.8806
5 -9.89941
6 20.7874
7 31.7498

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA . 700393
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 164953
DIFERENCA . 535441

LINHA RETIRADA= 11

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-19.3837
3	1.74001
4	24.3418
5	-7.57781
6	21.5815
7	36.7127

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA . 54781
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 137241
DIFERENCA . 410569

LINHA RETIRADA= 12

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-22.0599
3	- . 252526
4	18.3569
5	-12.0143
6	18.6639
7	37.1999

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA . 616311
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL . 162396
DIFERENCA . 453914

LINHA RETIRADA= 13

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-18.2588
3	-5.40481

4	27.7586
5	-6.61427
6	17.5058
7	45.0991

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	267346
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	131675
DIFERENCA	235671

LINHA RETIRADA= 14

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-22.8599
3	-2.252526
4	18.3569
5	-12.8143
6	18.6639
7	37.1999

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	616341
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	162396
DIFERENCA	453944

LINHA RETIRADA= 15

BARRA	ANGULO(GRAUS)
=====	=====
1	0
2	-20.8374
3	-1.79541
4	21.787
5	-7.56866
6	27.2985
7	32.2836

PASSOU NA CONTINGENCIA

ENERGIA POTENCIAL NA TANGENCIA	487888
ENERGIA POTENCIAL NA CONDICAO INICIAL	152739
DIFERENCA	335149

REFORCE A PROXIMA LINHA INDICADA A PARTIR DA CONFIGURACAO INICIAL

READY

13

LINHA RETIRADA- 13

LINHA =====	CARREGAMENTO(%) =====
1	. 263449
2	. 578633
3	. 705644
4	. 350157
5	. 409267
6	. 160117
7	. 170251
8	. 444114
9	. 176479
10	. 169553
11	. 301121
12	. 667831
13	0