TESE
196

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
COPEL

Engº Niromar Alves de Rezende

MEDIDAS DE ESTABILIDADE DE REGIME PERMANENTE EM GRANDES SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

TESE DE MESTRADO

1979

Ministério da Educação e Cultura

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

MEDIDAS DE ESTABILIDADE DE REGIME PERMANENTE EM GRANDES SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

(PRINTEC DOP 01 79)

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

TESE DE MESTRADO

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinado, nomeado por Portaria nº 509 de 14 /12 /78, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "MEDIDAS DE ESTABILIDADE DE REGIME PERMANENTE EM GRANDES SISTEMAS ELETRICOS DE POTÊNCIA"

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à NIROMAR ALVES DE REZENDE.

Itajubá, 16 de Dezembro de 19 78.

1º Examinador
Prof. ERNESTO JOÃO ROBBA

2º Examinador
Prof. JOÃO ROBERTO COGO

3º Examinador
Prof. HÉLIO MOKARZEL

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "MEDIDAS DE ESTABILIDADE DE REGIME PERMANENTE EM GRANDES SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA"

Autor: NIROMAR ALVES DE REZENDE

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	
2º	A	
3º	A	

Resultado médio: Conceito A, ou seja Aprovado

Observações:

Itajubá, 16 de Dezembro de 19 78

1º Examinador
Prof. ERNESTO JOÃO ROBBA

2º Examinador
Prof. JOÃO ROBERTO COGO

3º Examinador
Prof. HÉLIO MOKARZEL

Rua Cel. Renó, 7 - 37.500 - ITAJUBÁ - MG

REZENDE, Niromar Alves de. Medidas de Estabilidade de Regime Permanente em Grandes Sistemas Elétricos de Potência. Curitiba, COPEL, 1979.

RESUMO

Medidas de estabilidade de regime permanente em grandes sistemas elétricos de potência. Preconizam-se soluções para o elenco de problemas de estabilidade de regime permanente de sistemas elétricos de potência, a partir de um número intrínseco a uma dada configuração submetida a uma certa condição de carga, após a análise da condição de estabilidade feita através da equação característica do sistema, pelo critério de Routh. Para tanto, desenvolveu-se o programa NIVELSTAB para computadores digitais, o qual utiliza técnicas visando tirar total vantagem da esparsidade de matrizes. Tal programa foi dimensionado para sistemas de até 2 500 linhas de transmissão, 1500 barras e até 100 barras com inércias associadas.

ABSTRACT

Measurements of steady state stability in large electric power systems. It presents a method for solving a set of steady state stability problems in large electric power systems, from a number which is typical of a given system under certain loading conditions. Prior to this, the steady state stability condition of the system is investigated from an analysis of its characteristic equation through Routh's criterion. In order that this might be done, the digital computer program NIVELSTAB has been developed, by making use of certain techniques for taking advantage of the sparsity of matrices. By employing such techniques, it was possible to adapt the NIVELSTAB program for 2 500 transmission lines, 1500 busses and 100 busses with associated inertias.

REZENDE, Niromar Alves de. Medidas de Estabilidade de Regime Permanente em Grandes Sistemas Elétricos de Potência. Curitiba, COPEL, 1979.

RESUMO

Medidas de estabilidade de regime permanente em grandes sistemas elétricos de potência. Preconizam-se soluções para o elenco de problemas de estabilidade de regime permanente de sistemas elétricos de potência, a partir de um número intrínseco a uma dada configuração submetida a uma certa condição de carga, após a análise da condição de estabilidade feita através da equação característica do sistema, pelo critério de Routh. Para tanto, desenvolveu-se o programa NIVELSTAB para computadores digitais, o qual utiliza técnicas visando tirar total vantagem da esparsidade de matrizes. Tal programa foi dimensionado para sistemas de até 2 500 linhas de transmissão, 1500 barras e até 100 barras com inércias associadas.

ABSTRACT

Measurements of steady state stability in large electric power systems. It presents a method for solving a set of steady state stability problems in large electric power systems, from a number which is typical of a given system under certain loading conditions. Prior to this, the steady state stability condition of the system is investigated from an analysis of its characteristic equation through Routh's criterion. In order that this might be done, the digital computer program NIVELSTAB has been developed, by making use of certain techniques for taking advantage of the sparsity of matrices. By employing such techniques, it was possible to adapt the NIVELSTAB program for 2 500 transmission lines, 1500 busses and 100 busses with associated inertias.

PREFÁCIO

A estabilidade de sistemas elétricos de potência, desde os primeiros dias de nossa vida profissional, vem se apresentando como um desafio.

No início, trabalhávamos na Seção de Despacho de Carga da Companhia Paranaense de Energia Elétrica, onde, na época, estavam sendo iniciadas as interligações dos vários pequenos sistemas, hoje integrantes do sistema interligado Sul-Sudeste do Brasil.

Devido às grandes distâncias entre os centros de carga e os de geração e à então fragilidade do tronco do sistema, as pertubações no serviço, em conseqüência das perdas de estabilidade, eram inúmeras.

Não existiam boas ferramentas para atacar o problema e a literatura disponível era escassa, para alguns casos específicos.

Dessa forma, muitas vezes tivemos que partir para a experimentação no modelo real, como única solução.

Em 1973, fomos indicado para o programa de pós-graduação CESE-EFEI - 2, e outro desafio, não menor e também relacionado com o mesmo assunto, se apresentou na pessoa do Professor Otto J.M. Smith.

Apesar da dificuldade que tínhamos em acompanhar os brilhantes ensinamentos deste professor, ele muito fez para aumentar o nosso interesse e conhecimentos a respeito de estabilidade de sistemas elétricos.

À minha Família e
em memória de meu Pai

MEDIDAS DE ESTABILIDADE DE REGIME PERMANENTE EM GRANDES SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

S U M Á R I O

Pág.

1 - INTRODUÇÃO 01

1.1 - Escopo do Trabalho 01

1.2 - Resumo do Método e Definições Básicas 02

2 - ASPECTOS TEÓRICOS 07

2.1 - Descrição do Sistema Elétrico 07

2.2 - O Modelo da Máquina Síncrona 09

2.2.1 - Coeficientes de Potência do Gerador Síncrono 12

2.2.2 - Tensão Transitória Resultante das Máquinas Síncronas 16

2.3 - Caracterização das Barras do Sistema Elétrico 18

2.4 - Equações do Equilíbrio de Potência nas Barras do Sistema 19

2.5 - Teste da Estabilidade de Regime Permanente do Sistema 20

2.6 - Matriz dos Coeficientes Pesados 25

2.7 - Eliminação da Dependência Linear das Equações Dinâmicas 27

2.8 - Análise da Condição de Estabilidade de Regime Permanente do Sistema 31

Pág.

4.2.2.1 - Primeiro Conjunto de Dados das Centrais Geradoras 69

4.2.2.2 - Segundo Conjunto de Dados das Centrais Geradoras 72

4.2.3 - Resumo da Entrada de Dados 74

Anexo 1 - Folhas de Codificação para a Entrada de Dados no Programa NIVELSTAB 75

Anexo 2 - Listagem do Programa NIVELSTAB 85

Anexo 3 - Relatórios do Programa NIVELSTAB 101

Anexo 4 - Exemplos de Aplicação do Programa NIVELSTAB-Casos-Teste 111

Referências Bibliográficas 123

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Escopo do Trabalho

No planejamento de sistemas elétricos é necessário, muitas vezes, escolher uma dentre várias alternativas. Atualmente, a apreciação destas alternativas, em termos de desempenho em regime permanente, é feita pelos estudos de fluxo de carga.

A análise feita desta maneira não pode, no entanto, resumir-se a uma simples relação quantitativa. Não se pode dizer, por exemplo, que o resultado do fluxo de carga de uma alternativa seja tantos por cento melhor ou pior que o de outra.

Por esta razão, a análise de custo-benefício, no planejamento de grandes sistemas elétricos é, na maioria das vezes, uma tarefa difícil.

Bem mais fácil poder-se-ia tornar a escolha da melhor alternativa de planejamento, se os estudos de regime permanente possibilitassem uma quantificação do grau de desempenho de uma dada configuração submetida a um certo regime de carga.

Desta forma, a relação custo-benefício poderia ser facilmente utilizada como importante fator de decisão.

A programação imediata dos sistemas elétricos seria beneficiada, tanto na melhor avaliação dos riscos associados às opções, quanto na programação ótima de geração, onde se poderia introduzir uma restrição referente ao grau de desempenho em regime permanente do sistema.

Os benefícios da utilização de um valor intrínseco associado a um sistema sob uma dada condição de carga, poderiam, até mesmo, estender-se ao dia-a-dia da operação, pois, no desempenho de

Um sistema com uma dada configuração pode ser mais ou menos capaz de gerar e abastecer os centros de carga e suportar perturbações.Esta capacidade depende, essencialmente, dos valores das inércias associadas aos geradores e algumas cargas e dos valores das impedâncias entre barras.

Uma dada configuração e os valores das impedâncias entre barras e das inércias associadas às cargas e geradores definem a estrutura do sistema. A condição de estado de uma dada estrutura varia com as condições de carga e geração e pode ser bem definida, em termos de regime permanente,pelos fasores das tensões em todas as barras do sistema.

Partindo-se de um sistema elétrico assim definido , é analisada a possibilidade de tal sistema suportar uma pequena tendência de variação de estado. Em caso positivo, o sistema é dito estável em regime permanente.

Esta possibilidade é analisada equacionando-se o sistema, em termos dinâmicos, para uma pequena variação de carga ativa, da qual decorre uma pequena variação,somente da posição angular, de todos os fasores de tensão do sistema. Das equações dinâmicas é obtida a equação característica do sistema e a estabilidade da resposta natural do sistema a esta tendência de variação de estado é analisada pelo critério de Routh.

Sendo o sistema estável,sua estrutura é analisada sob o aspecto de suportar carga,tomando-se,convenientemente,uma condição de estado para referência.

Foi escolhida como referência a condição de estado na qual a estrutura é menos solicitada, ou seja,nas condições de máximo acoplamento eletromagnético das inércias do sistema.

Partindo-se do resultado de um fluxo de carga,a condição de

- Se seu valor é negativo, o sistema é seguramente instável.

observa-se, no entanto, que este determinante dá a condição necessária, porém não suficiente, para análise da estabilidade de regime permanente do sistema.

A não-suficiência decorre, por exemplo, da possibilidade de o sistema ser instável, por pares de freqüências não amortecidas positivas, quando o número total de inércias do sistema é ímpar e o determinante, positivo.

Por esta razão, a análise da estabilidade é feita a partir da equação característica pelo critério de Routh.

Para utilizar este método para análise da estabilidade de regime permanente, foi desenvolvido o programa NIVELSTAB para computadores digitais.

Este programa, para ser útil ao estudo de grandes sistemas de potência, utiliza técnicas para tirar total vantagem da esparsidade de matrizes.

Utilizando estas técnicas, foi possível demensionar o programa NIVELSTAB para sistemas de até 2500 linhas de transmissão, 1500 barras e até 100 barras com inércias associadas.

Neste programa, as máquinas síncronas são representadas pelo modelo 2 do IEEE, sendo considerados os efeitos desmagnetizantes da reação da armadura.

2 - ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 - Descrição do Sistema Elétrico

O sistema elétrico estudado neste trabalho é considerado em regime permanente e pode ser descrito da seguinte forma:

- As máquinas síncronas ou conjunto de máquinas síncronas são representadas por uma tensão resultante, considerados os efeitos desmagnetizantes de reação da armadura, atrás da reatância síncrona do eixo em quadratura;
- O sistema de transmissão é representado pelas impedâncias entre barras, podendo-se considerar ou não, resistências-séries e impedâncias em derivação;
- As cargas sem inércias são consideradas potências constantes conectadas em derivação às barras do sistema;
- As cargas com inércias devem ser representáveis por uma tensão atrás de uma reatância;
- Todas as inércias do sistema são consideradas finitas.

No desenvolvimento teórico, será considerada a seguinte notação:

P_{jj} - Potência na barra j. Esta potência pode ser uma carga com ou sem inércia ou uma geração na barra;

P_{jk} - Fluxo de potência na barra j para a barra k, medido em j e tomado em valor por unidade;

V_j - Módulo do fasor da tensão na barra j, tomado em valor por unidade;

2.2 - O Modelo da Máquina Síncrona

Os geradores e motores síncronos serão representados basicamente pelo chamado modelo 2 do IEEE, onde são admitidas as seguintes simplificações, por se tratar de um estudo de regime permanente:

a. Os efeitos dos enrolamentos amortecedores são desprezados;

b. A resistência do estator é desprezada;

c. As tensões devidas às variações no tempo dos enlaçamentos de fluxos do estator $(-\frac{d\psi_d}{dt}$ e $\frac{d\psi_q}{dt})$ são desprezadas na presença das chamadas tensões de velocidade ($\omega\psi_d$ e $\omega\psi_q$);

d. As tensões de velocidade ($\omega\psi_q$ e $\omega\psi_d$) serão consideradas aproximadamente iguais às tensões da velocidade síncrona ($\omega_s\psi_q$ e $\omega_s\psi_d$);

e. São negligenciados os efeitos da saturação;

f. As máquinas são consideradas não reguladas, isto é, a tensão do campo será considerada sempre constante;

g. As condições de carga são consideradas equilibradas.

No desenvolvimento das equações deste modelo, será usada a seguinte notação:

X_d - reatância síncrona do eixo direto;

X_q - reatância síncrona do eixo em quadratura;

X'_d - reatância transitória do eixo direto;

i_d - corrente do eixo direto;

i_q - corrente do eixo em quadratura;

I_t - fasor da corrente no terminal da máquina;

DIAGRAMA FASORIAL DO MODELO II DE GERADOR SÍNCRONO

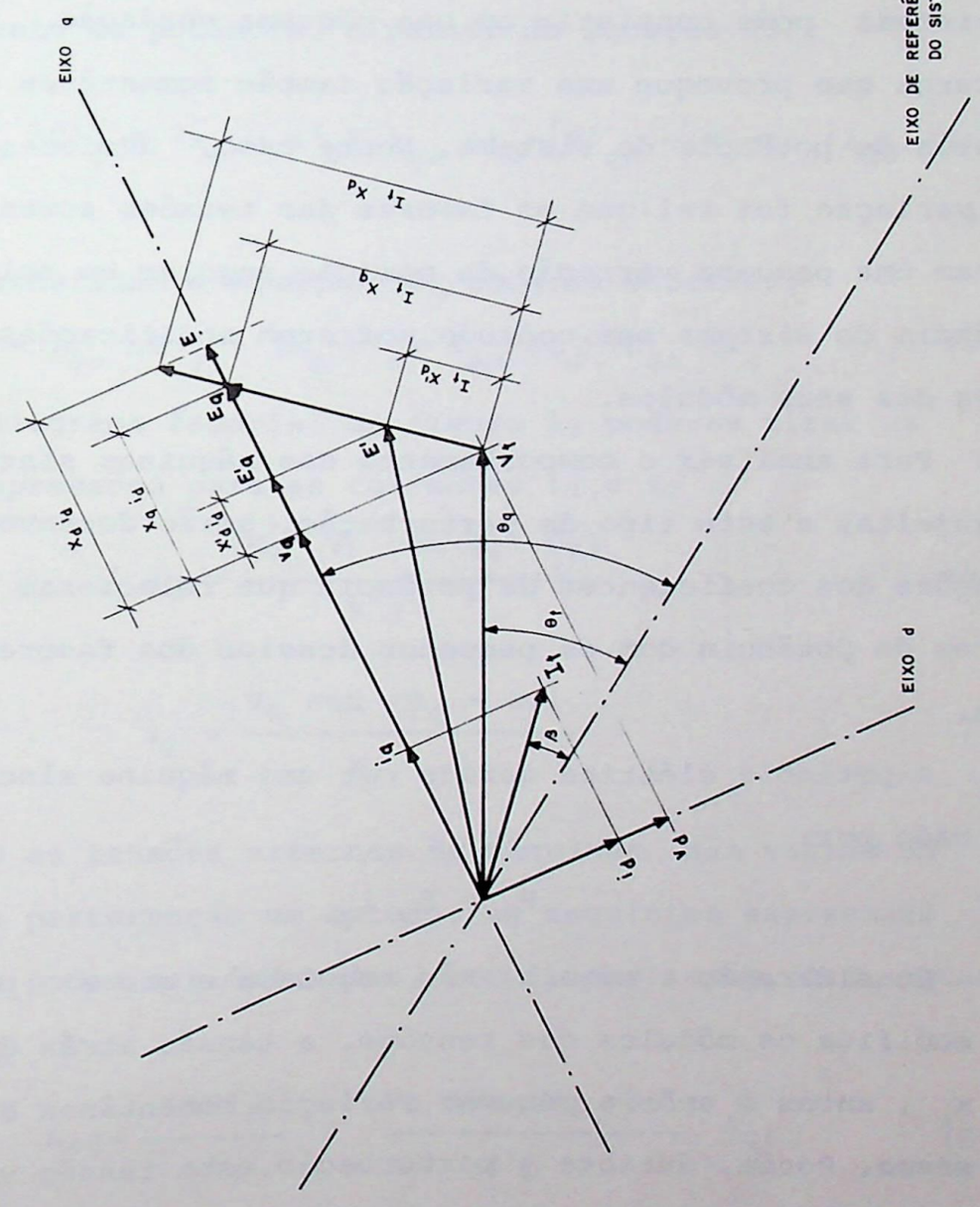


FIG. 1

sorial da figura 1:

$$E_q = E'_q + (x_q - x'_d) i_d \qquad (2)$$

Substituindo (2) em (1), tem-se:

$$P_e = E'_q i_q + (x_q - x'_d) i_d i_q \qquad (3)$$

Linearizando, pode-se encontrar a seguinte expressão para um incremento de potência, a partir da equação (3):

$$\Delta P_e = i_{qo}\, \Delta E'_q + (x_q - x'_d)\, i_{qo}\, \Delta i_d + \left[E'_{qo} + (x_q - x'_d) i_{do}\right] \Delta i_q \qquad (4)$$

Considerando a equação (2), pode-se escrever:

$$\Delta P_e = i_{qo}\, \Delta E'_q + (x_q - x'_d)\, i_{qo}\, \Delta i_d + E_{qo}\, \Delta i_q \qquad (5)$$

Do diagrama fasorial da figura 1, pode-se tirar as seguintes expressões para as correntes i_d e i_q .

$$i_d = \frac{E'_q - V_t \cos(\Theta_q - \Theta_t)}{x'_d} \qquad (6)$$

$$i_q = \frac{V_t \operatorname{sen} (\Theta_q - \Theta_t)}{x_q} \qquad (7)$$

Como as tensões externas às máquinas não variam em módulo com a perturbação em estudo, as seguintes expressões incrementais podem ser deduzidas, por linearização, das equações (6) e (7):

$$\Delta i_d = \frac{\Delta E'_q}{x'_d} + \frac{V_t \operatorname{sen} (\Theta_q - \Theta_t)}{x'_d} \delta_{qt} \qquad (8)$$

$$\Delta i_q = \frac{V_t \cos (\Theta_q - \Theta_t)}{x_q} \delta_{qt} \qquad (9)$$

$$(1+\frac{x'_d}{x_d}\,T'_{do}s)\,\frac{x_d}{x'_d}\,\Delta E'_q + (\frac{x_d-x'_d}{x'_d})V_t\,\mathrm{sen}(\Theta_q-\Theta_t)\delta_{qt}=0 \tag{16}$$

Portanto:

$$\Delta E'_q = -\,(\frac{x_d-x'_d}{x_d})\;\frac{V_t\,\mathrm{sen}(\Theta_q-\Theta_t)}{(1+\frac{x'_d}{x_d}\,T'_{do}s)}\;\delta_{qt} \tag{17}$$

Em condição de regime permanente ou com freqüências de oscilação nula, tem-se:

$$\Delta E'_q = -\,(\frac{x_d-x'_d}{x_d})\;V_t\,\mathrm{sen}(\Theta_q-\Theta_t)\;\delta_{qt} \tag{18}$$

Substituindo (18 em (13), tem-se:

$$\Delta P_e = K_1\,\delta_{qt} - (i_{qo}+\frac{x_d-x'_d}{x'_d}\,i_{qo})(\frac{x_d-x'_d}{x_d})V_t\,\mathrm{sen}(\Theta_q-\Theta_t)\,\delta_{qt} \tag{19}$$

Substituindo na equação (19) o valor de i_{qo} dado pela expressão (7), o incremento de potência no gerador pode ser dado da seguinte maneira:

$$\Delta P_e = K_1\,\delta_{qt} - [\frac{V_t\,\mathrm{sen}(\Theta_q-\Theta_t)}{x'_d}](\frac{x'_d}{x_d})[\frac{(x_d-x'_d)}{x'_d}\,V_t\,\mathrm{sen}(\Theta_q-\Theta_t)]\delta_{qt} \tag{20}$$

O primeiro fator do segundo termo de ΔP_e é a variação da potência elétrica para uma pequena variação dos enlaçamentos de fluxos no eixo direto, mantendo-se constante o ângulo do rotor. Este fator é designado por K2, ou seja:

$$K_2 = \frac{\Delta P_e}{\Delta E_q}\Big|_{\Theta_q} = \frac{V_t\,\mathrm{sen}(\Theta_q-\Theta_t)}{x'_d} \tag{21}$$

O segundo fator do segundo termo de ΔP_e é chamado de fator de impedância e designado por K3, ou seja:

$$K_3 = \frac{x'_d}{x_d} \tag{22}$$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BM

$$\Delta P_e = \left[\frac{E_{qo} V_t}{x_q} \cos(\Theta_q - \Theta_t) + \frac{(x_q - x'_d)}{x_q\, x'_d} V^2_t \operatorname{sen}^2(\Theta_q - \Theta_t) - \frac{(x_d - x'_d)}{x_d\, x'_d} V^2_t \operatorname{sen}^2(\Theta_q - \Theta_t) \right] \delta_{qt} \quad (25)$$

Ou melhor:

$$\Delta P_e = \left[\frac{E_{qo}\ V_t}{x_q} \cos(\Theta_q - \Theta_t) - \left(\frac{x_d - x_q}{x_d\ x_q}\right) V^2_t \operatorname{sen}^2(\Theta_q - \Theta_t) \right] \delta_{qt} \quad (26)$$

Esta expressão pode, ainda, ser escrita da seguinte maneira:

$$\Delta P_e = \left\{ \left[E_{qo} - \left(\frac{x_d - x_q}{x_d}\right) V_t \operatorname{sen}(\Theta_q - \Theta_t)\, tg(\Theta_q - \Theta_t) \right] \frac{V_t}{X_q} \cos(\Theta_q - \Theta_t) \right\} \delta_{qt} \quad (27)$$

Mas, do diagrama fasorial da figura 1, é fácil ver que

$$V_d = V_t \operatorname{sen}(\Theta_q - \Theta_t) \quad (28)$$

Então

$$\Delta P_e = \left\{ \left[E_{qo} - \frac{(x_d - x_q)}{x_d} V_d\ tg(\Theta_q - \Theta_t) \right] \frac{V_t}{x_q} \cos(\Theta_q - \Theta_t) \right\} \delta_{qt} \quad (29)$$

A equação (29) possibilita definir a tensão transitória resultante, como segue:

$$E_t = E_{qo} - \left(\frac{x_d - x_q}{x_d}\right) V_d\ tg(\Theta_q - \Theta_t) \quad (30)$$

Assim, a equação (20) se reduz a:

$$\Delta P_e = \left[\frac{E_t\ V_t}{X_q} \cos(\Theta_q - \Theta_t) \right] \delta_{qt} \quad (31)$$

Desta forma, o coeficiente de potência sincronizante resultante é dado por

$$K_r = \frac{E_t\ V_t}{X_q} \cos(\Theta_q - \Theta_t) \quad (32)$$

A tensão transitória resultante E_t é, então, a tensão vista pelo terminal da máquina durante um pequeno desvio angular das tensões, quando os efeitos desmagnetizantes da reação da armadura são considerados.

A equação (32) é a mesma equação do incremento de potência para o modelo clássico, com exceção da tensão E_t, que, para aque-

As barras internas, a rigor, são fictícias, quando o sistema de potência é observado sob o aspecto físico, mas no modelamento matemático, como pode ser visto no desenvolvimento deste trabalho, sua existência justifica-se plenamente.

É importante observar que, diferentemente das barras externas, as barras internas não se conectam diretamente entre si, e são sempre interligadas radialmente a uma barra externa do sistema.

Quando as barras internas são ignoradas e o sistema é considerado a partir das barras terminais das máquinas com inércia, os estudos de estabilidade de regime permanente ficam bastante limitados, pois são perdidas importantes informações relativas aos torques exercidos através das reatâncias internas e sobre os efeitos da condição de excitação da máquina.

2.4 - Equações do Equilíbrio de Potência nas Barras do Sistema

Em condições de regime permanente, a conservação da energia nas barras externas do sistema elétrico é dada pela seguinte expressão:

$$\sum_{\substack{K=1 \\ K\neq j}}^{K=n} \left[\frac{V^2_j \operatorname{sen}\alpha_{jk}}{Z_{jk}} + \frac{V_j\, V_k}{Z_{jk}} \operatorname{sen}(\theta_{jk}-\alpha_{jk}) \right] + P_j = 0 \qquad (33)$$

Nesta expressão, as barras $\underline{K}$ são todas as barras diretamente conectadas à barra j, podendo, inclusive, ser uma barra interna, se j for a barra terminal de uma máquina.

A potência P_j é o somatório das cargas ativas, sem inércias, conectadas à barra j .

uma pequena variação da carga do sistema, provocando uma pequena variação angular das tensões, sem, contudo, provocar variação de seus módulos.

Para efetuar o teste de estabilidade, o sistema será então equacionado para um pequeno desvio angular, devido a esta variação de carga. A resposta natural será analisada a partir das equações diferenciais homogêneas, que se obtêm anulando os termos forçantes das equações dinâmicas do sistema.

Assim, admita-se uma pequena variação ΔP_j das potências em derivação nas barras externas do sistema.

Em decorrência, as potências passantes serão modificadas em função dos desvios angulares e, sendo mantidos constantes os módulos das tensões, as equações de equilíbrio para as barras externas passam a ser escritas como segue:

$$\sum_{\substack{K=1 \\ K\neq j}}^{K=n} \left[\frac{V^2_j \ \text{sen}\alpha_{jk}}{Z_{jk}} + \frac{V_j \ V_k}{Z_{jk}} \ \text{sen}(\theta_{jk}+\delta_{jk}-\alpha_{jk}) \right] + P_j + \Delta P_j = 0 \qquad (35)$$

Sendo a variação de carga ΔP_j suficientemente pequena, de tal forma que

$$\cos\delta_{jk} \simeq 1 \qquad (36)$$

$$\text{sen}\delta_{jk} \simeq \delta_{jk} \qquad (37)$$

a equação (35) pode ser assim escrita:

$$\sum_{\substack{K=1 \\ K\neq j}}^{K=n} \left[\frac{V^2_j \ \text{sen}\alpha_{jk}}{Z_{jk}} + \frac{V_j V_k}{Z_{jk}} \ \text{sen}(\theta_{jk}-\alpha_{jk}) \right] + P_j + \sum_{\substack{K=1 \\ K\neq j}}^{K=n} \left[\frac{V_j V_k}{Z_{jk}} \cos(\theta_{jk}-\alpha_{jk})\delta_{jk} \right] + \Delta P_j = 0 \qquad (38)$$

Como é nula a soma dos dois primeiros termos das equações (38), obtêm-se as seguintes equações para os incrementos de potência nas barras externas do sistema:

Escola Federal de Engenharia Biblioteca MAUÁ - Itajubá

e, levando-se em conta a definição de coeficiente de torque sincronizante, as equações (39) e (41) podem ser assim escritas:

$$-\sum_{\substack{K=1\\K\neq j}}^{K=n} S_{jk}\,\delta_j + \sum_{\substack{K=1\\K\neq j}}^{K=n} S_{jk}\,\delta_k = \Delta P_j \qquad (46)$$

$$M_i\,\ddot{\delta}_i - S_{il}\,\delta_i + S_{il}\,\delta_l = 0 \qquad (47)$$

As equações (46) e (47) possibilitam escrever as equações dinâmicas de um sistema elétrico de potência.

Para se escrever este conjunto de equações, suponha-se que, no sistema em consideração, as barras g, h e i representem as barras internas, e que as barras l, p e q sejam as respectivas barras terminais.

Lembrando que os momentos angulares nas barras externas são nulos e desprezando os amortecimentos, as equações dinâmicas do sistema podem ser escritas como mostram as equações (48).

No conjunto de equações dinâmicas, os coeficientes correspondentes ao primeiro termo da equação (46) foram designados da seguinte maneira:

$$S_{jj} = \sum_{\substack{K=1\\K\neq j}}^{K=n} S_{jk} \qquad (49)$$

Nas equações dinâmicas, a matriz dos momentos angulares é uma matriz diagonal, com valores nulos para as barras externas do sistema.

Os coeficientes dos desvios angulares constituem uma

e, levando-se em conta a definição de coeficiente de torque sincronizante, as equações (39) e (41) podem ser assim escritas:

$$-\sum_{\substack{K=1\\K\neq j}}^{K=n} S_{jk}\,\delta_j + \sum_{\substack{K=1\\K\neq j}}^{K=n} S_{jk}\,\delta_k = \Delta P_j \qquad (46)$$

$$M_i\,\ddot{\delta}_i - S_{il}\,\delta_i + S_{il}\,\delta_l = 0 \qquad (47)$$

As equações (46) e (47) possibilitam escrever as equações dinâmicas de um sistema elétrico de potência.

Para se escrever este conjunto de equações, suponha-se que, no sistema em consideração, as barras g, h e i representem as barras internas, e que as barras l, p e q sejam as respectivas barras terminais.

Lembrando que os momentos angulares nas barras externas são nulos e desprezando os amortecimentos, as equações dinâmicas do sistema podem ser escritas como mostram as equações (48).

No conjunto de equações dinâmicas, os coeficientes correspondentes ao primeiro termo da equação (46) foram designados da seguinte maneira:

$$S_{jj} = \sum_{\substack{K=1\\K\neq j}}^{K=n} S_{jk} \qquad (49)$$

Nas equações dinâmicas, a matriz dos momentos angulares é uma matriz diagonal, com valores nulos para as barras externas do sistema.

Os coeficientes dos desvios angulares constituem uma

matriz de coeficientes de potência sincronizante. Nesta matriz são mostrados os valores que devem ser nulos.Os demais valores, representados pela letra S , podem ser nulos ou não,dependendo da existência de uma conexão direta entre duas barras.

O segundo membro das equações dinâmicas é uma matriz diagonal com os termos forçantes, que,no caso em consideração,são as pequenas variações de carga nas barras externas. Esta matriz possui valores nulos nos elementos da diagonal,correspondentes às barras nas quais não ocorre variação de carga.

É importante observar que o conjunto de equações dinâmicas para todas as barras do sistema constitui um sistema linearmente dependente,pois um sistema com m inércias tem m-1 graus de liberdade. A eliminação da dependência linear será objeto de consideração no desenvolver deste trabalho.

2.6 - Matriz dos Coeficientes Pesados

Nas equações dinâmicas, anulando-se a matriz dos termos forçantes,obtém-se o conjunto de equações homogêneas que descrevem a resposta natural do sistema.

No conjunto de equações homogêneas assim obtido, o acoplamento entre as barras com inércia, ainda é dado indiretamente através das equações das barras externas do sistema.

Pela redução de Kron, as equações correspondentes às barras externas podem ser eliminadas,resultando,assim,o conjunto de equações homogêneas que descrevem o acoplamento direto entre as barras internas do sistema.

Obviamente, a redução de Kron é aplicada somente à matriz dos coeficientes de potência sincronizante ,pois são nulos

Na equação (52), a matriz dos coeficientes dos desvios angulares é chamada de matriz dos coeficientes pesados de potência sincronizante.Esta matriz é singular,pois existe ainda dependência linear neste conjunto de equações dinâmicas.

Lembrando que a redução de Kron apenas elimina as equações por substituição de variável , a singularidade da matriz dos coeficientes pesados de potência sincronizante é facilmente evidenciada a partir das equações (46), (47) e (49). Destas equações depreende-se que:

$$SP_{jj} = \sum_{\substack{K=1 \\ k\neq j}}^{K=n} SP_{jk} \qquad (53)$$

A equação (53) confirma a singularidade da matriz dos coeficientes pesados de potência sincronizante.

Portanto, a solução do conjunto de equações (52) somente é possível após determinado o subconjunto de equações linearmente independentes que define o sistema.

A partir deste ponto,a matriz dos coeficientes pesados de potência sincronizante será chamada simplesmente de matriz dos coeficientes pesados.

2.7 - Eliminação da Dependência Linear das Equações Dinâmicas

Como se viu, o conjunto de equações dinâmicas para todas a n barras internas de um sistema elétrico é linearmente dependente,pois o sistema tem n-1 graus de liberdade.

Existe,pois, um conjunto de n-1 equações homogêneas, linearmente independentes,que define a resposta natural do sistema.

Quando existe uma inércia suficientemente maior que as

$$\begin{bmatrix} \overset{''}{\delta}_d \\ \hline -K^T \overset{''}{\delta}_d \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} -SP_d & -C_{sp} \\ \hline -L_{sp} & -SP_{nn} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \delta \\ \hline -K^T \delta_d \end{bmatrix} \qquad (55)$$

Onde,

SP_d - Restante da matriz dos coeficientes pesados, quando se excluem a linha e a coluna correspondente ao desvio angular tomado para a definição da dependência linear;

C_{sp} - Vetor da coluna excluída, a menos do termo da diagonal;

L_{sp} - Vetor da linha excluída, a menos do termo da diagonal;

SP_{nn} - Termo da diagonal correspondente ao desvio angular, tomado para a definição da dependência linear.

Da equação (55) podem-se escrever as seguintes equações:

$$\overset{''}{\delta d} = - SP_d \cdot \delta_d + C_{sp} K^T \delta_d \qquad (56)$$

$$-K^T \overset{''}{\delta}_d = - L_{sp} \delta_d + SP_{nn} K^T \delta_d \qquad (57)$$

Pré-multiplicando a equação matricial (56) pelo vetor K^T e somando a equação resultante com a equação (57), obtém-se:

$$\left[-K^T .SP_d + K^T .C_{sp} .K^T - L_{sp} + SP_{nn} K^T\right] .\delta_d = 0 \qquad (58)$$

O produto dos dois vetores da equação (58) tem que ser nulo para todos os desvios δ_d. Portanto, o vetor operando em δ_d precisa ser um vetor nulo, ou seja:

$$[SC] = [SP_d + C_{sp}.L_{sp}.SP_d^{-1}] \qquad (65)$$

Como poderá ser visto a seguir, toda a análise de estabilidade de regime permanente do sistema poderá ser feita a partir da matriz característica do sistema.

A importância da matriz característica, no entanto, se resumirá ao seu aspecto didático, como poderá ser visto no próximo capítulo, onde será reabordado o problema da eliminação da dependência linear.

2.8 - Análise da Condição de Estabilidade de Regime Permanente do Sistema

Levando-se em conta as equações (65) e (66), o conjunto de (n-1) equações dinâmicas do sistema linearmente independente, pode ser escrito como segue:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \\ \vdots \\ \ddot{\delta}_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} SC_{11} & -SC_{12} & \cdots & =SC_{1n-1} \\ -SC_{21} & SC_{22} & \cdots & =SC_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -SC_{n-1,1} & -SC_{n-1,2} & \cdots & SC_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{n-1} \end{bmatrix} = 0 \qquad (67)$$

Utilizando o operador diferencial de segunda ordem λ, esta equação pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} (\lambda+SC_{11}) & -SC_{12} & \cdots & =SC_{1n-1} \\ -SC_{21} & (\lambda+SC_{22}) & \cdots & =SC_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -SC_{n-1;1} & -SC_{n-1;2} & \cdots & (\lambda+SC_{n-1;n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{n-1} \end{bmatrix} = 0 \qquad (68)$$

que é o determinante da matriz dos coeficientes dos desvios angulares na equação (67), é o produto de todas as freqüências naturais não amortecidas do sistema.

Este determinante tem as seguintes propriedades:

a) É único para um dado sistema submetido a uma dada condição de carga e geração.

A unicidade decorre da independência linear do conjunto de equações (67).

b) Seu valor aumenta com a redução do carregamento do sistema em condições favoráveis de geração.

Reduzindo o carregamento do sistema, e existindo boas condições para compensação da energia reativa, de forma a possibilitar que sejam mantidos em níveis razoáveis as tensões nas barras internas, os coeficientes de torque sincronizante do sistema aumentam de forma generalizada.

Sendo as freqüências não amortecidas funções diretas destes coeficientes, como se pode ver a partir da equação (51), e não havendo aumento da inércia do sistema, as freqüências não amortecidas também aumentam e, conseqüentemente, o produto de todas elas.

c) Seu valor se reduz com o aumento da carga ativa do sistema e/ou com o aumento das condições de subexcitação das máquinas síncronas.

Esta redução também é decorrência do fato de serem as freqüências não amortecidas funções diretas dos coeficientes de torques sincronizantes.

necessária, porém não suficiente, como se pode ver no item 2.8 deste trabalho.

f) Seu valor é nulo no limite de estabilidade.

Considerando que o produto de todas as freqüências naturais precisa ser positivo, para o sistema ser estável, e que, sendo negativo, o sistema é seguramente instável, é-se levado, intuitivamente, a concluir que no limite de estabilidade este produto é nulo.

Torna-se oportuno, no entanto, explicar este fato, descrevendo a trajetória dos pólos em função de variações no sistema.

Um sistema em boas condições de estabilidade tem freqüências naturais não amortecidas negativas, com grandes valores absolutos.

Sendo desprezados os amortecimentos, isto significa pólos sobre o eixo imaginário, distantes do eixo real.

Admita-se,agora,que este sistema sofra uma série de modificações nas suas condições, de tal forma que seja conduzido no sentido da instabilidade. À medida que são reduzidos os coeficientes de torque sincronizantes e/ou aumentadas as inércias, estes pólos vão-se aproximando do eixo real. A aproximação vai-se verificando e o produto das freqüências naturais não amortecidas vai sendo reduzido, até um par de pólos juntar-se sobre o eixo real. Um par de pólos coincidente sobre o eixo real significa uma freqüência natural não amortecida nula, que anula o termo independente da equação característica. Este é

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Assim sendo, além do nível correspondente à condição de carga, será necessário também conhecer qual o nível máximo que o sistema pode alcançar.

O nível máximo possibilitará definir a estrutura de um sistema quanto à capacidade de suportar carga, sendo uma ótima referência para compará-lo com outros sistemas.

A relação entre o nível correspondete a uma dada condição de carga e o nível máximo, que será chamada margem de estabilidade, dará, então, o desejado percentual referente à condição de carregamento. Ou seja:

$$M = \frac{n}{n_{max}} \times 100\% \qquad (70)$$

Onde:

M - Margem de estabilidade do sistema;

n - Nível de estabilidade correspondente à condição de carga em estudo;

n_{max} - Nível máximo de estabilidade que o sistema pode alcançar.

2.11 - Nível Máximo de Estabilidade de Regime Permanente

O conceito de margem de estabilidade obriga a definir a condição referente ao nível máximo de estabilidade de um sistema.

Nesta condição, obviamente, deverão ser máximos todos os coeficientes de potência sincronizante do sistema.

Como estes coeficientes são funções cosenoidais das diferenças dos ângulos de fase das tensões nas barras, para condição de nível máximo de estabilidade, não deverá haver

rente de zero nas tensões atrás das reatâncias — os coeficientes de torque sincronizantes dos geradores diminuiriam e, conseqüentemente, o nível de estabilidade resultaria inferior.

Diferentemente das barras do sistema de transmissão, nas barras internas as tensões podem ser significativamente maiores que o valor nominal no terminal do gerador. Assim, se fosse adotado o mesmo critério de considerar as tensões nas barras internas iguais ao valor nominal da tensão no terminal do gerador, o nível de estabilidade considerado máximo resultaria inferior e, em determinadas condições, poder-se-ia ter margem de estabilidade superior a cem por cento. Assim, a condição para o nível máximo de estabilidade fica melhor definida se se admitir que os geradores se encontram nos seu limites de sobreexcitação.

Para garantir a tensão igual ao valor nominal na barra terminal, que é uma barra externa do sistema, na condição de nível máximo de estabilidade, deve-se admitir uma compensação nos bornes do gerador igual à máxima potência relativa (Q_{max}) que pode ser por ele fornecida, como mostra a figura dada a seguir.

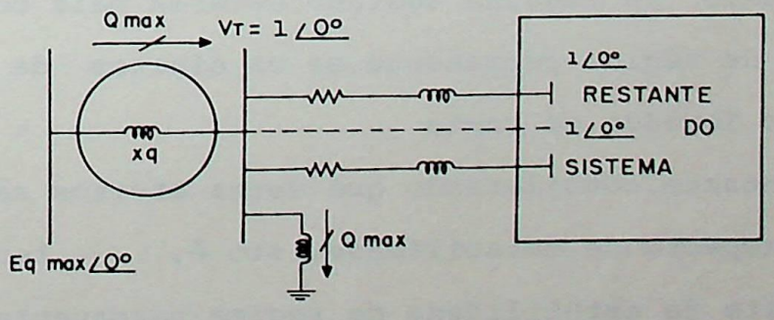


FIG. 2

O efeito dos reguladores também foram desprezados, pois o objetivo deste trabalho limitou-se à estabilidade de regime permanente, onde os reguladores com bom desempenho também exercem ação conservadora.

Além disso, não se considerando efeitos amortecedores, foi possível obter a equação característica em termos do operador diferencial de segunda ordem, o que simplifica bastante também a análise da estabilidade de regime permanente.

A análise pelo critério de Routh, quando as raízes da equação característica são as freqüências naturais não amortecidas, resulta simplificada, pois a pesquisa exclui a possibilidade da existência de outras raízes que não as reais negativas. Assim, as complicações adicionais com os termos nulos na segunda parte da análise pelo critério de Routh são descartadas, pois indicam a existência de raízes imaginárias ou complexas.

Desta forma, acredita-se que o método possibilita uma análise segura e sem maiores complicações da estabilidade de regime permanente dos sistemas elétricos de potência.

3 - CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA ELIMINAÇÃO DA DEPENDÊNCIA LINEAR DO CONJUNTO DE EQUAÇÕES DINÂMICAS

Dado o porte dos sistemas de potência hoje existentes, um método de análise não pode ser visto somente sob o aspecto teórico. É de suma importância considerar a viabilidade do método sob o aspecto computacional, principalmente no que se refere ao tempo de processamento.

Freqüentemente, os engenheiros de sistemas de potência são levados a assumir soluções de compromisso, introduzindo simplificações muitas vezes grosseiras, com o objetivo de reduzir custos computacionais dos estudos. A preocupação, neste capítulo, é analisar o aspecto mais crítico, sob o ponto de vista computacional, da solução proposta para a análise de estabilidade de regime permanente.

No método apresentado, com exceção da obtenção da matriz característica, os algoritmos necessários à solução do problema não são grandes consumidores de tempo de computação.

A obtenção da matriz característica, da forma apresentada em 2.6, pode ser um problema crítico, devido à inversão de matriz, quando o número de barras internas do sistema é grande.

Como este problema é, em última análise, o problema da eliminação da dependência linear do conjunto de equações dinâmicas do sistema, será abordado aqui novamente o assunto, com o objetivo de analisar duas soluções alternativas, mais viáveis sob o aspecto computacional.

3.1 - Barra Infinita

Uma forma de eliminar a dependência linear do conjunto

Escola Federal de Engenharia Biblioteca MAUÁ Itajubá

$$C_{sp}\ L_{sp} = \frac{1}{M_n}\begin{bmatrix} \frac{S_{1n}\cdot S_{n1}}{M1} & \frac{S_{1n}\ S_{n2}}{M1} & \cdots & \frac{S_{1n}\ S_{nn-1}}{M1} \\ \frac{S_{2n}\ S_{n1}}{M_2} & \frac{S_{2n}\ S_{n2}}{M_2} & \cdots & \frac{S_{2n}\ S_{nn-1}}{M_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{S_{(n-1)n}S_{n1}}{M_{n-1}} & \frac{S_{(n-1)n}S_{n2}}{M_{n-1}} & \cdots & \frac{S_{(n-1)n}S_{nn-1}}{M_{n-1}} \end{bmatrix} \tag{77}$$

Portanto,se M_n for significativamente maior que as demais inércias do sistema,os elementos da matriz $[C_{sp}\ .L_{sp}]$poderão ser suficientemente pequenos, de tal forma a anular o segundo termo da expressão da matriz característica.

Neste caso,a matriz característica é obtida simplesmente pela eliminação dos elementos referente à barra interna considerada infinita, ou seja:

$$[SC] = [SP_d] \tag{78}$$

Quando as inércias são da mesma ordem de grandeza, da escolha arbitrária de uma barra infinita,além da aproximação por se considerar nulo o segundo termo da expressão da matriz característica,decorre a dependência dos resultados com a barra escolhida. Ou seja, para cada barra escolhida como "infinita" ter-se-á resultado.

Somente em casos muitos especiais,poder-se-ia aconselhar a utilização deste método para eliminar a dependência linear das equações dinâmicas do sistema.

A dependência linear, em outras palavras,implica em ser nula uma raiz da equação fundamental.

A equação fundamental,no entanto,contém as demais raízes do sistema,que são as raízes da equação característica.

É fácil mostrar que o coeficiente A_{n-1} é o produto de todas as raízes da equação característica,pois o termo independente nulo e o coeficiente A_{n-1} podem ser dados,respectivamente, da seguinte maneira:

$$\lambda 1 \ . \lambda 2 . \ \ldots\ldots \ \lambda n = 0 \qquad (81)$$

$$A_{n-1}=(-1)^{n-1}\left[\lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_{n-1}+(\lambda_1\lambda_2\ldots\ \lambda_{n-2}+\ldots+\lambda 1.\lambda 3\ldots\lambda_{n-1}+\lambda_2\lambda_3\ldots\lambda_{n-1})\lambda_n\right] \qquad (82)$$

Admitindo que a raiz nula seja a enésima, tem-se:

$$A_{n-1} = (-1^{n-1})\left[\lambda_1 \ \lambda_2 \ \ldots\ldots \ \lambda_{n-1}\right] \qquad (83)$$

Ou seja, o penúltimo termo da equação fundamental é o produto de todas as raízes da equação característica do sistema.

Dividindo-se então a equação fundamental pelo monômio correspondente à raiz nula,obtém-se a equação característica do sistema:

$$\lambda^{n-1}+A_1 \ \lambda^{n-2}+ \ \ldots\ldots \ + A_{n-1} \ = 0 \qquad (84)$$

É importante observar que,se a equação fundamental tiver duas raízes nulas,isto implica em ser nula uma raiz da equação característica e,como foi visto no capítulo anterior,o sis-

4 - PROGRAMA NIVELSTAB

4.1 - Descrição e Objetivos

O programa NIVELSTAB tem por finalidade analisar a condição de estabilidade de regime permanente da estrutura e de uma condição de carregamento de um sistema elétrico de potência. Sendo o sistema estável, o programa calcula os níveis de estabilidade,o máximo e o correspondente a dada condição de carregamento, e a respectiva margem de estabilidade.

Esta análise parte de um fluxo de carga convergido, de onde são obtidos os fasores das tensões nas barras externas do sistema e os respectivos dados do sistema de transmissão.

Neste conjunto de dados são incluídos os dados das máquinas síncronas relacionados no item 4.2 .

A partir das tensões nos terminais das máquinas, são calculadas, inicialmente, as tensões na linha do entreferro para a condição de carregamento definida pelo fluxo de carga e a correspondente ao nível máximo de estabilidade, definida no item 2.11 .

Em seguida,são calculadas as matrizes dos coeficientes de potência sincronizante para as duas condições.

Após a eliminação das linhas e colunas correspondentes às barras externas, pela redução de Kron, é calculada a matriz dos coeficientes pesados.

Obtidas as matrizes dos coeficientes pesados,são determinadas, pelo método de Leverrier-Faddeev, as equações fundamentais correspondentes às condições de estado em estudo.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ B M

Apesar de se usarem técnicas de esparsidades, áreas de memória compartilhadas,e terem sido escolhidos os algoritmos mais rápidos,acredita-se que o programa possa ainda ser otimizado tanto em tempo de processamento quanto em espaço de memória.

No programa NIVELSTAB, cuja listagem é apresentada no anexo (2), a preocupação maior foi quanto ao desenvolvimento correto dos algoritmos,de forma a exemplificar o método proposto para a análise de regime permanente dos sistemas elétricos de potência.

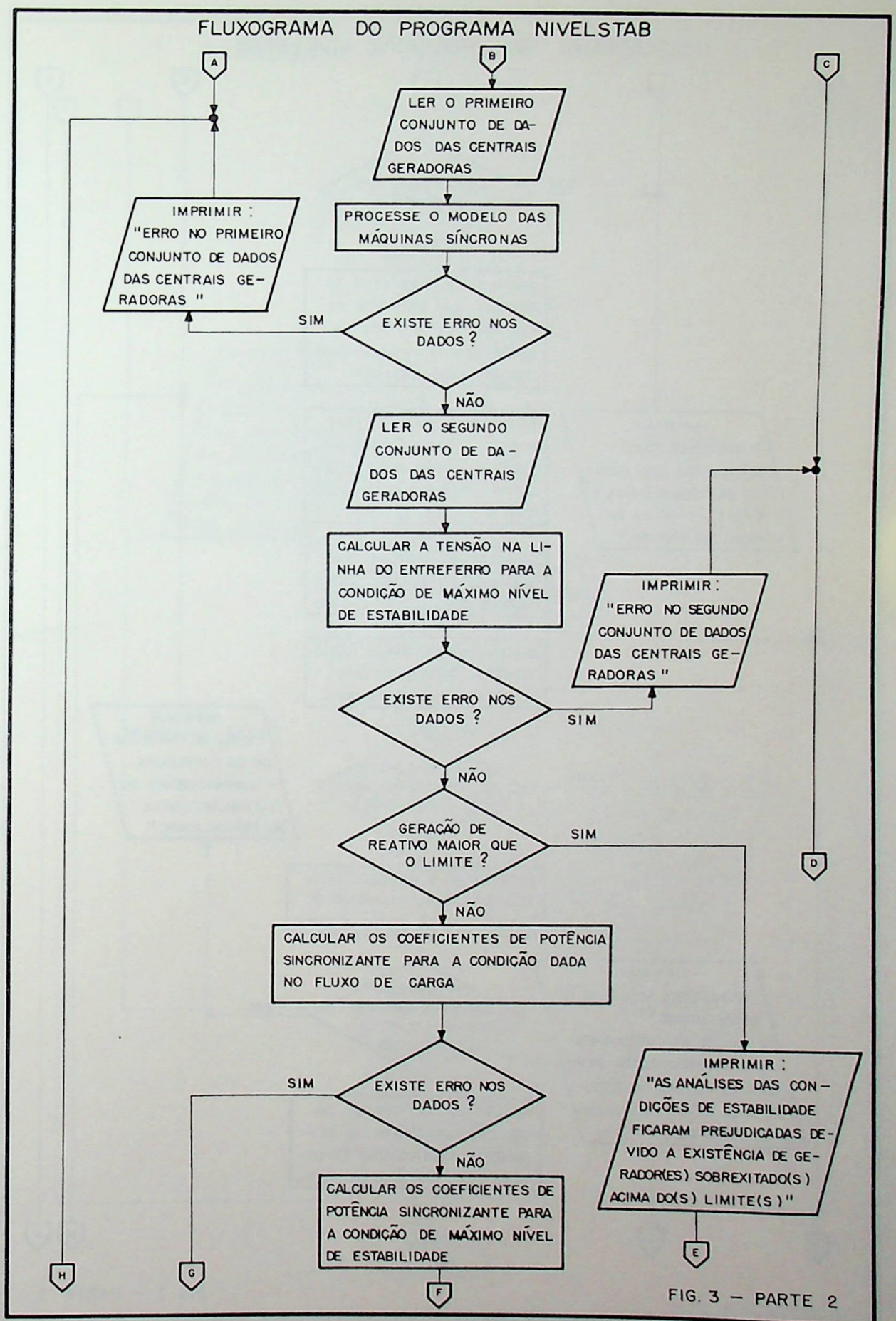

FLUXOGRAMA DO PROGRAMA NIVELSTAB
A
B
C
LER O PRIMEIRO CONJUNTO DE DADOS DAS CENTRAIS GERADORAS
PROCESSE O MODELO DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS
IMPRIMIR : "ERRO NO PRIMEIRO CONJUNTO DE DADOS DAS CENTRAIS GERADORAS "
SIM
EXISTE ERRO NOS DADOS ?
NÃO
LER O SEGUNDO CONJUNTO DE DADOS DAS CENTRAIS GERADORAS
CALCULAR A TENSÃO NA LINHA DO ENTREFERRO PARA A CONDIÇÃO DE MÁXIMO NÍVEL DE ESTABILIDADE
IMPRIMIR : "ERRO NO SEGUNDO CONJUNTO DE DADOS DAS CENTRAIS GERADORAS "
EXISTE ERRO NOS DADOS ?
SIM
NÃO
GERAÇÃO DE REATIVO MAIOR QUE O LIMITE ?
SIM
NÃO
D
CALCULAR OS COEFICIENTES DE POTÊNCIA SINCRONIZANTE PARA A CONDIÇÃO DADA NO FLUXO DE CARGA
IMPRIMIR : "AS ANÁLISES DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE FICARAM PREJUDICADAS DEVIDO A EXISTÊNCIA DE GERADOR(ES) SOBREXITADO(S) ACIMA DO(S) LIMITE(S)"
SIM
EXISTE ERRO NOS DADOS ?
NÃO
E
CALCULAR OS COEFICIENTES DE POTÊNCIA SINCRONIZANTE PARA A CONDIÇÃO DE MÁXIMO NÍVEL DE ESTABILIDADE
F
G
H

FIG. 3 – PARTE 2

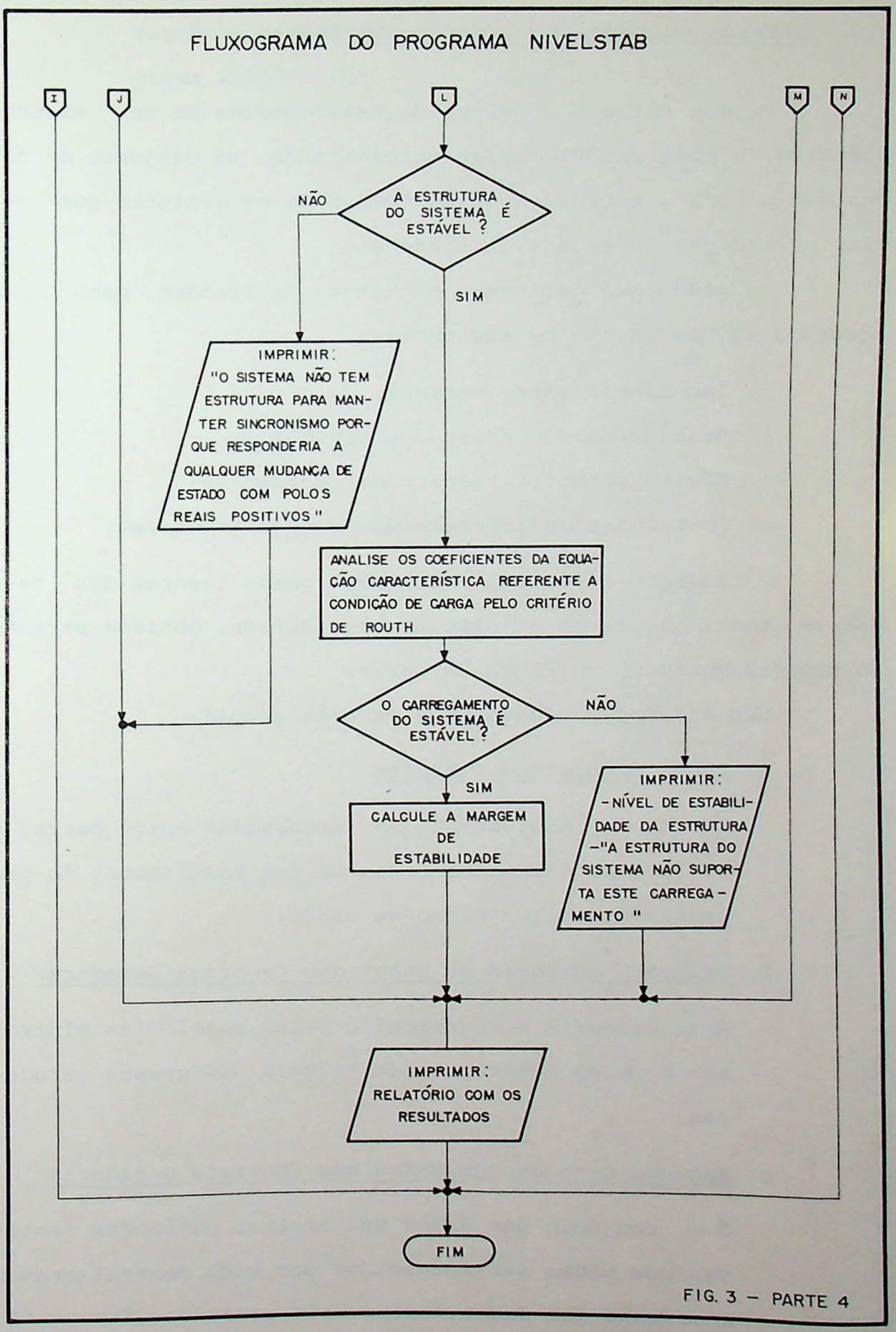

FLUXOGRAMA DO PROGRAMA NIVELSTAB
I
J
L
M
N
A ESTRUTURA DO SISTEMA É ESTÁVEL ?
NÃO
SIM
IMPRIMIR: "O SISTEMA NÃO TEM ESTRUTURA PARA MANTER SINCRONISMO PORQUE RESPONDERIA A QUALQUER MUDANÇA DE ESTADO COM POLOS REAIS POSITIVOS"
ANALISE OS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA REFERENTE A CONDIÇÃO DE CARGA PELO CRITÉRIO DE ROUTH
O CARREGAMENTO DO SISTEMA É ESTÁVEL ?
NÃO
SIM
CALCULE A MARGEM DE ESTABILIDADE
IMPRIMIR: -NÍVEL DE ESTABILIDADE DA ESTRUTURA -"A ESTRUTURA DO SISTEMA NÃO SUPORTA ESTE CARREGAMENTO"
IMPRIMIR: RELATÓRIO COM OS RESULTADOS
FIM

FIG. 3 – PARTE 4

cessária devido à forma como eles são lidos pelo programa NIVELSTAB.

ICOD = 1 Os dados do sistema elétrico serão lidos de cartões;

ICOD ≠ 1 A leitura dos dados é feita de um arquivo ("DATA SET");

b) O maior número atribuído a uma barra do sistema em consideração. Esta informação é transmitida pela variável inteira LASTBS;

c) Para o caso da leitura dos dados de um arquivo:

c1 - O número de registro do fluxo de carga arquivado. Este número é dado pela variável inteira I1, que pode variar dentro do intervalo 0<I1<99;

c2 - O número da unidade para as operações E/S. Se for zero, é assumido como sendo 16 (FT 16 FØØ1), caso contrário, deverá estar compreendido entre 16 e 20. Este número é fornecido ao programa pela variável I2.

Obs. Quando os dados do sistema elétrico são lidos de cartões, os campos correspondentes às variáveis I1 e I2, no cartão-código, deverão ficar em branco.

d) O nome do caso em estudo. Pode-se atribuir ao caso em estudo qualquer designação constituída por uma combinação alfa-numérica de oito caracteres.

A posição destas informações no cartão-código é a seguinte:

ICOD - Da 1ª à 3ª coluna

LASTBS- Da 5ª à 8ª coluna

I1 - 10ª e 11ª colunas

I2 - 13ª e 14ª colunas

CASO - Da 16ª à 23ª coluna

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI Biblioteca MAUÁ BIM

4.2.1.1-ENTRADA DOS DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO ATRAVÉS DE CARTÕES

Neste caso, após o cartão-código, devem ser colocados os cartões contendo os dados das impedâncias entre as barras e os dos fasores das tensões nas barras, como segue:

a- Impedância entre Barras (LTs e Trafos)

São informados ao programa os números das barras que identificam a conexão,seguidos dos valores, em percentual, da resistência e da reatância referentes a esta conexão.

Se entre duas barras houver apenas uma impedância, esta deve ser dada ao programa através de somente um cartão,pois, de outra forma, o programa entenderá impedâncias em paralelo.

No caso da existência de duas ou mais impedâncias em paralelo,entre duas barras, deve-se ter um cartão para cada impedância. Neste caso, os números das barras que identificam a conexão, nos diversos cartões,poderão estar em qualquer ordem dentro dos campos correspondentes.

Os números das barras que identificam a conexão e os valores da impedância assumem as seguintes posições nos cartões de dados:

1º nº de Barra	-	Da 1ª à 4ª coluna
2º nº de Barra	-	Da 9ª à 12ª coluna
Resistência em %	-	Da 18ª à 23ª coluna (F6.2)
Reatância em %	-	Da 24ª à 29ª coluna (F6.2)

A folha de codificação para os dados das impedâncias entre barras é dada no anexo 1 /2 .

Cartão "Flag" Após o último cartão de dados das impedâncias, deverá seguir o cartão 'flag', que informa ao programa o término destes dados. O cartão "flag" é o cartão que contém o número

Caso não haja modificação a fazer, este campo deverá ficar em branco;

Da 18ª à 23ª coluna - O valor da resistência, em percentual, do elemento a ser acrescentado ou retirado da configuração em modificação, quando for o caso;

Da 24ª à 29ª coluna - O valor da reatância, em percentual, a ser acrescentado ou retirado da configuração em modificação quando for o caso;

Da 32ª à 36ª coluna - O valor da variável INDEP descrita a seguir.

Variável INDEP - Esta variável inteira informa ao programa a modificação a ser feita, conforme a seguinte codificação:

ØlØØ - Nenhuma modificação a fazer;

0555 - Acrescentar a impedância (R + jx) entre as barras dadas;

5555 - Retirar a impedância (R + jx) entre as barras dadas;

ØØ55 - Retirar toda a impedância entre as barras dadas;

ØØØ5 - Retirar todas as impedâncias conectadas à barra, cujo número se encontra nas quatro primeiras colunas do cartão INDEP.

A folha de codificação correspondente ao cartão INDEP é dada no anexo 1 /3.

4.2.1.2 - ENTRADA DOS DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO ATRAVÉS DE LEITURA DE UM ARQUIVO

Neste caso, os dados e o resultado de um estudo de fluxo de carga são armazenados em um arquivo de acesso direto, e o programa NIVELSTAB recebe as informações que lhe são necessárias através de consulta a este arquivo.

Na COPEL, foi desenvolvido uma interface com a versão 4-28 do programa de fluxo de carga da PECO, que é utilizado procedendo-se da seguinte maneira:

a - A opção de utilização da interface é informada ao programa através do cartão-código (vide item 4.2.1). Neste caso, no cartão-código, além de outras informações, deverão constar o número de registro do fluxo de carga (I1) e o número da unidade para operações E/S (I2);

b - No conjunto de cartões de controle para utilização do programa NIVELSTAB deverão estar incluídos os seguintes:

b1 - Cartão "DD"

```
// FT16FØØ1     DD DSN = PFL.MØ1,DISP=SHR
```

para I2 = Ø ou 16 ou,

```
// FT17FØØ1     DD DSN = PFL.MØ1,DISP=SHR
```

para I2 = 17, e assim por diante, até I2=2Ø;

b2 - Cartões de Acesso à Livraria

```
// LKED.SYSLIB  DD DSN=SYS1.FOTLIB,DISP=SHR
//               DD DSN=DAE.OBJLIB,DISP =SHR
```

As subrotinas DACALL e DABIN, que realizam esta interface, estão integradas ao programa e necessitam das subrotinas ENQ, DSTAS e DEQ do programa de fluxo de carga da PECO.

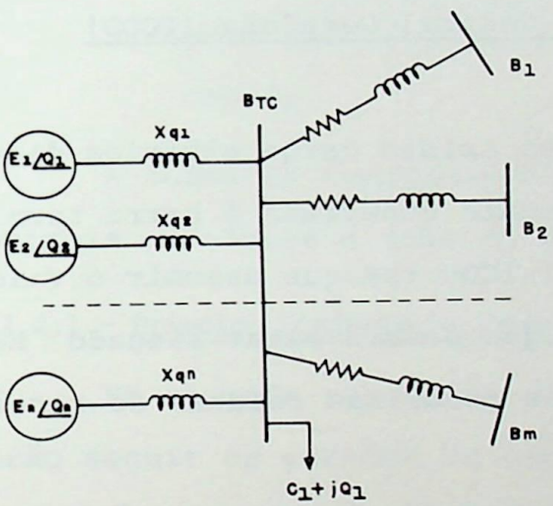
Escola Federal de Engenharia Biblioteca MAUÁ

Na configuração B, a parte elétrica dos grupos geradores é constituída pelo gerador e um transformador elevador, que convergem a uma barra comum na tensão de transmissão.

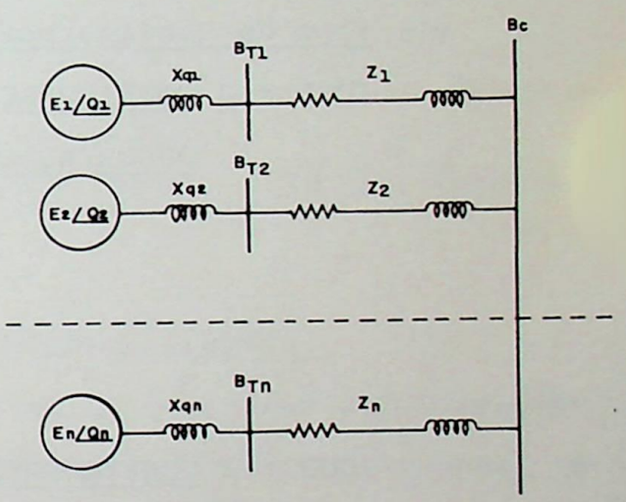
A configuração A, sempre que possível, deve ser evitada, pois o programa presume que a corrente total, sendo fornecida pela central geradora, é igualmente distribuída entre os geradores.

Os desenhos abaixo mostram as duas configurações:

CONFIGURAÇÃO A



CONFIGURAÇÃO B



Onde:

B_{TC} - Barra terminal comum de geração;

B_m - Barra $\underline{m}$ diretamente conectada a B_{TC} ;

X_{qn} - Reatância síncrona de eixo direto do gerador $\underline{n}$ da central;

$E_n \quad Q_n$ - Fasor da tensão na linha do entreferro do gerador n ;

B_{Tu} - Barra terminal do gerador n;

Z_n - Impedância do transformador elevador do grupo gerador n;

B_c - Barra comum, à qual convergem os grupos geradores.

d - Carga Ativa Ligada à Barra Terminal (somente para a configuração A)

Esta carga deve ser dada em valor por unidade,ficando este dado situado entre as colunas 17 e 25 do cartão-código.

e - Carga Reativa Ligada à Barra Terminal (somente para a configuração A)

Esta carga deve ser dada em valor por unidade,ficando este dado situado entre as colunas 25 e 33 do código.

A folha de codificação correspondente ao cartão-código das centrais geradoras é dada no anexo 1 /5.

4.2.2.1 - Primeiro Conjunto de Dados das Centrais Geradoras

Em seguida ao cartão-código de cada central geradora, deverão seguir os cartões de dados com as reatâncias síncronas e as constantes de inércia dos grupos geradores.Deverá haver um cartão para cada grupo gerador.

No caso da configuração B, além da barra comum à qual convergem os grupos geradores, informada no cartão-código, deverão ser informadas as barras de geração e fictícia,designadas, respectivamente, por IBGER e IBARF.

Na configuração A, a barra de geração se confunde com a barra comum, já informada no cartão-código. Então, nos cartões de dados referentes a esta configuração,só se informa o número atribuído à barra fictícia IBARF.

As reatâncias síncronas do eixo direto e do eixo em quadratura são fornecidas ao programa em valores percentuais,na

Biblioteca MAUÁ BIM de Irajubá - EEM

gas.

Se for fornecido um valor nulo para H_T , o programa entenderá a barra em questão como uma barra externa,e a máquina correspondente não entrará na composição da equação característica do sistema.

O primeiro conjunto de dados das centrais geradoras deve ocupar os seguintes campos nos cartões:

Da 1ª à 4ª coluna - Configuração A : O número atribuído à barra fictícia (IBARF).

Configuração B : O número da barra de geração (IBGER).

Da 6ª à 13ª coluna - O valor da reatância síncrona do eixo em quadraduta (XMAQ) em percentual na base escolhida para o fluxo de carga do sistema em estudo.

Da 15ª à 22ª coluna - O valor da reatância síncrona do eixo direto (XMAD) em percentual na base escolhida para o fluxo de carga do sistema em estudo.

Da 24ª à 31ª coluna - O valor da constante de inércia H_T, em valor por unidade na mesma base das reatâncias síncronas.

Da 33ª à 36ª coluna - O número atribuído à barra fictícia para a casa da configuração B.
No caso da configuração A, nada é lido neste campo.

Cartão "Flag" do Segundo Conjunto de Dados das Centrais Geradoras

Imediatamente após o último cartão da máxima potência reativa,deve seguir um cartão com um número negativo nas quatro primeiras colunas.

Este cartão indica ao programa o término de todos os dados necessários ao processamento dos níveis de estabilidade do sistema em estudo.

A folha de codificação correspondente ao segundo conjunto de dados das centrais geradoras é dada no anexo 1/7.

ANEXO 1

FOLHAS DE CODIFICAÇÃO PARA A ENTRADA DE DADOS NO PROGRAMA NIVELSTAB

NIVELSTAB CARTÃO CÓDIGO DO SISTEMA ELÉTRICO NIVELSTAB

ESTUDO: CODIFICADO POR: DATA:

ICOD	LASTBS	I1	I2	CASO
1 2 3	5 6 7 8	10 11	13 14	16 17 18 19 20 21 22 23

ICOD - Esta variável informa ao programa se os dados do sistema elétrico serão lidos de cartões ou de um arquivo de acesso direto,

ICOD = 1 - Dados lidos de cartões

ICOD ≠ 1 - Dados lidos de um arquivo

LASTBS - Maior número atribuído a uma barra do sistema elétrico em estudo .

I 1 - Número de registro do fluxo de carga arquivado 0 < I 1 < 99 .

I 2 - Número da unidade para operações E/S.
Se o campo for deixado em branco, o programa assume o número 16;
De outra forma, 16 < I 2 < 20 .

CASO - Nome do caso em estudo. Pode-se atribuir qualquer combinação alfa-numérica de oito caracteres.

PRINTEC DOP 01 78

NIVELSTAB — CARTÃO INDEP — NIVELSTAB

ESTUDO:

CODIFICADO POR

DATA:

IDENTIFIC. DA CONEXÃO				IMPEDÂNCIA DA CONEXÃO			
Nº BARRA		Nº BARRA		R%		X%	
1 2 3 4	5 6 7 8	9 10 11 12	13 14 15 16 17	18 19 20 21 22 23	24 25 26 27 28 29	30 31	32 33 34 35 36

INDEP	
32 33 34 35 36	37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

OBSERVAÇÕES

1 - Este cartão deve seguir o cartão "FLAG" dos dados das impedâncias entre barras, mesmo quando não há modificação a fazer na configuração do sistema elétrico em estudo.

2 - A variável INDEP informa ao programa se há modificação a fazer e, em caso positivo, qual seja ela, segundo a seguinte codificação:

0100 - Nenhuma modificação a fazer;

0555 - Acrescentar a impedância (R+JX) entre as barras dadas;

5555 - Retirar a impedância (R+JX) entre as barras dadas;

0055 - Retirar toda a impedância entre as barras dadas;

0005 - Retirar todas as impedâncias conectadas à barra cujo número se encontra nas quatro primeiras colunas do cartão INDEP.

PRIMEC DOP 01 79

NIVELSTAB CARTÃO CÓDIGO DAS CENTRAIS GERADORAS NIVELSTAB

ESTUDO: | CODIFICADO POR: | DATA:

ICOD	IBARC	NGG		CARGA NA BARRA DE GERAÇÃO	
				ATIVA (pu)	REATIVA (pu)
1 2	3 4 5 6 7	8 9 10 11	12 13 14 15 16	17 18 19 20 21 22 23 24	25 26 27 28 29 30 31 32

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

OBSERVAÇÕES

1 - Configuração A

1.1 - Com carga na barra terminal - ICOD = 1Ø

1.2 - Sem carga na barra terminal - ICOD ≠ 2 e ≠ 1Ø

2 - Configuração B - ICOD =2

3 - IBARC

Para a configuração A : Número da barra terminal.

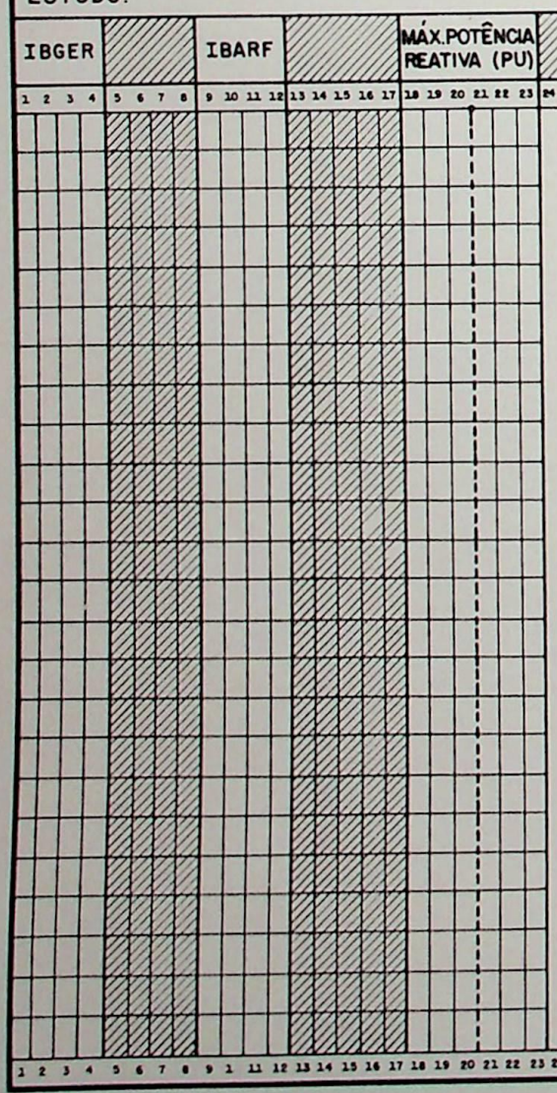
Para a configuração B : Número da barra à qual convergem os grupos geradores.

4 - NGG - Números de grupos da central geradora.

NIVELSTAB — SEGUNDO CONJUNTO DE DADOS DAS CENTRAIS GERADORAS (MÁXIMA POTÊNCIA REATIVA DOS GRUPOS GERADORES) — NIVELSTAB

ESTUDO: | CODIFICADO POR: | DATA:

IBGER		IBARF		MÁX.POTÊNCIA REATIVA (PU)	
1 2 3 4	5 6 7 8	9 10 11 12	13 14 15 16 17	18 19 20 21 22 23	24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80



OBSERVAÇÕES

1 - IBGER - Número da barra comum, no caso da configuração A de centrais geradoras, ou o número da barra de geração, no caso da configuração do tipo B;

2 - IBARF - Número da barra fictícia atrás da reatância síncrona da máquina equivalente à central geradora;

3 - Cartão "FLAG" - Após o último cartão de máxima potência reativa tem que seguir um cartão com um número negativo nas quatro primeiras colunas (-ØØØ, p.ex.). Este cartão informa ao programa o término de todos os dados necessários ao processamento dos níveis de estabilidade do caso em estudo.

ANEXO 2

LISTAGEM DO PROGRAMA NIVELSTAB

```
C      **********   P R O G R A M A      N I V E L S T A B   **********
C
C      ESTE PROGRAMA TEM POR OBJETIVO CALCULAR OS NIVEIS E A MARGEM DE ES
C      TABILIDADE DE UM SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA.
C      DADO UM SISTEMA ELETRICO,DEFINIDO PELAS IMPEDANCIAS ENTRE BARRAS ,
C      REATANCIAS SINCRONAS DOS EIXOS D E Q DAS MAQUINAS SINCRONAS, CONS-
C      TANTES DE INERCIA DOS GRUPOS GERADORES E OS FASORES DAS TENSOES EM
C      TODAS AS BARRAS DO SISTEMA, DOIS NIVEIS DE ESTABILIDADE SAO CALCU-
C      LADOS-
C          1)NIVEL MAXIMO-REFERENTE A UMA CONDICAO IDEAL DE CARREGAMENTO
C                         NA QUAL  EXISTE O MAXIMO ACOPLAMENTO ELETROMAG
C                        NETICO ENTRE AS INERCIAS DO SISTEMA.
C
C          2)NIVEL REAL  -REFERENTE A CONDICAO DE ESTADO EM QUE SE ENCON
C                         TRA O SISTEMA,DEFINIDA PELAS CONDICOES DE CAR-
C                         GA E GERACAO.
C      A RELACAO DO SEGUNDO  NIVEL PARA O PRIMEIRO DENOMINA-SE MARGEM DE
C      ESTABILIDADE E PRESTA-SE A DEFINICAO DA  CONDICAO DE CARREGAMENTO
C      DO SISTEMA EM TERMOS PERCENTUAIS.
C      CURITIBA,24 DE JANEIRO DE 1978. NIROMAR ALVES DE REZENDE
C
ISN 0002            IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0003            INTEGER N,NBD,NBG,NKD,NEM
ISN 0004            DIMENSION AMD(100,100),AY(100,100),AMS(100,100),AYS(100,100),ROW(1
                   100),COL(100),QCT1(101),QCT2(101),AUX1(101),SCM(5000),SCMAX(5000),D
                   2IASCO(1500),DIASCM(1500),VINE(100),L2(2,5000),LDIAG(1500),L(2,5000
                   3),L3(2,5000),LDI(1500),TMAR(100),LVI(100),CASO(2),VEC(52,52)
ISN 0005            COMMON/RCEL/LINE(2,5000),Y(5000),ANG(5000),PG(100),QG(100),EA(1500
                   1),EB(1500),NPGE(100)
ISN 0006            COMMON/COUNTS/NOBUS,NOLIN,NOGEN,LASTBS,NSWING
ISN 0007            EQUIVALENCE (AMS(1),SCM(1)),(AMS(5001),SCMAX(1)),(AMD(1),Y(1)),(AM
                   4G(5001),ANG(1)),(ROW(1),PG(1)),(COL(1),QG(1)),(AYS(1),DIASCO(1)),(
                   54YS(1501),DIASCM(1)),(AYS(3001),EA(1)),(AYS(4501),EB(1))
ISN 0008            ICT=2
ISN 0009            READ 1000,ICOD,LASTBS,I1,I2,CASO(1),CASO(2)
ISN 0010       1000 FORMAT(I3,1X,I4,1X,I2,1X,I2,1X,2A4)
ISN 0011            IF(ICOD.EQ.1)GO TO 1001
ISN 0012            CALL DACALL(I1,I2,MSGNO)
ISN 0013            IF(MSGNO.EQ.0)GO TO 1002
ISN 0014            PRINT 1003
ISN 0015       1003 FORMAT(1HO,'-ERRO NO ACESSO AO ARQUIVO DO FLUXO DE CARGA'//)
ISN 0016            GO TO 1004
ISN 0017       1002 N=5000
ISN 0018            NBD=1500
ISN 0019            NBG=100
ISN 0020            CALL CONVER(LDIAG)
ISN 0021            GO TO 1005
ISN 0022       1001 N=5000
ISN 0023            NBD=1500
ISN 0024            NBG=100
ISN 0025            CALL ADALFA(L2,N,NOL2,INDER)
ISN 0026            IF(INDER.EQ.1)GO TO 1006
ISN 0027            CALL LEDATA(LDIAG,IFAB,NBD)
ISN 0028            IF(IFAB.EQ.0)GO TO 1005
ISN 0029            PRINT 1007
ISN 0030       1007 FORMAT(1H1,'-ERRO NOS CARTOES DE DADOS DAS TENSOES'//)
ISN 0031            GO TO 1004
ISN 0032       1006 PRINT 1008
ISN 0033       1008 FORMAT(1H1,'-ERRO NOS CARTOES DE DADOS DOS PARAMETROS DAS LTS'//)
ISN 0034            GO TO 1004
ISN 0035       1005 CALL EQUISE(LDIAG,NBD,N,NBG,L2,VINE,NOL2,INDER,LVI,TMAR,NTA)
ISN 0036            IF(INDER.EQ.1)GO TO 1009
ISN 0037            CALL TAREAT(TMAR,LVI,NTA,NBG,LDIAG,NBD,N,INDI)
ISN 0038            IF(INDI.EQ.0)GO TO 1031
ISN 0039            IF(INDI.EQ.3)GO TO 1032
ISN 0040            CALL SPCONI(SCM,L,NOL3,LDIAG,NBD,N,NOL2,L2,IFAB)
ISN 0041            IF(IFAB.EQ.0)GO TO 1029
ISN 0042            GO TO 1030
ISN 0043       1029 CALL SPCOMA(SCMAX,L3,NOL4,LDIAG,NBD,N,NOL2,L2,IFAB,LVI,TMAR,NBG,NT
                   1A)
ISN 0044            IF(IFAB.EQ.0)GO TO 1010
ISN 0045       1030 PRINT 1011
ISN 0046       1011 FORMAT(1H1,'-IMPOSSIBILITADO O CALCULO DOS COEFICIENTES DE TORQUE
                   1SINCRONIZANTE-ERRO NA NUMERACAO DE BARRAS'//)
ISN 0047            GO TO 1004
ISN 0048       1009 PRINT 1012
ISN 0049       1012 FORMAT(1H1,'-ERRO NO PRIMEIRO CONJUNTO DE DADOS DAS CENTRAIS GERAD
                   1ORAS'//)
ISN 0050            GO TO 1004
ISN 0051       1032 PRINT 1033
ISN 0052       1033 FORMAT(1H1,'-ERRO NO SEGUNDO CONJUNTO DE DADOS DAS CENTRAIS GERADO
                   3RAS'//)
ISN 0053            GO TO 1004
ISN 0054       1010 CALL ADAMAT(LDIAG,DIASCO,SCM,L,N,NOL3,LASTBS,ICT,NBD,NOBUS)
ISN 0055            CALL ADAMAT(LDIAG,DIASCM,SCMAX,L3,N,NOL4,LASTBS,ICT,NBD,NOBUS)
ISN 0056            CALL KRONRE(SCM,DIASCO,VINE,L,LDIAG,LINE,LDI,NOBUS,MB,N,NOL3,NOL3,
                   3NBD,LASTBS,IND,NPGE,NBG,NOGEN)
ISN 0057            IF(IND.EQ.0)GO TO 1013
```

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Biblioteca MAUÁ BIM

```
ISN 0035            GO TO 1000
ISN 0037      1017  G=G1*COS(B1)
ISN 0038            E=G1*SIN(B1)
ISN 0039            GK=G+R/(R*R+X*X)
ISN 0040            EK=E-X/(R*R+X*X)
ISN 0041            AMOD=SQRT(GK*GK+EK*EK)
ISN 0042            ARG=ATAN2(EK,GK)
ISN 0043      1006  CALL AGNARG(IDE,IPARA,AMOD,IPG1,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0044            CALL AGNARG(IDE,IPARA,ARG,IPG2,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0045      1001  CONTINUE
ISN 0046            GO TO 1005
ISN 0047      1003  READ 1004,IDE,IPARA,R,X,IMODE
ISN 0048      1004  FORMAT(I4,4X,I4,5X,F6.2,F6.2,2X,I2)
ISN 0049            IF(INDEP-100)1010,1011,1012
ISN 0050      1010  IF(INDEP.GT.10)GO TO 1013
ISN 0051            CALL AGNARG(IDE,ALG1,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0052            CALL AGNARG(IDE,ALF,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0053            GO TO 1011
ISN 0054      1013  CALL AGNARG(IDE,IPARA,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0055            CALL AGNARG(IDE,IPARA,G2,ALF,G2,ALF,
ISN 0056            GO TO 1011
ISN 0057      1012  CALL AGNARG(IDE,IPARA,ARG,IPG1,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0058            IF(IPG1.LT.3)GO TO 1002
ISN 0059            CALL AGNARG(IDE,IPARA,AMOD,IPG2,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0060            IF(IPG2.LT.3)GO TO 1002
ISN 0061            G1=AMOD*COS(ALA)
ISN 0062            E1=AMOD*SIN(ALA)
ISN 0063            G2=100*R/(R*R+X*X)
ISN 0064            E2=-100*X/(R*R+X*X)
ISN 0065            IF(INDEP.GT.100)GO TO 1014
ISN 0066            GK=G1+G2
ISN 0067            EK=E1+E2
ISN 0068            GO TO 1015
ISN 0069      1014  GK=G1-G2
ISN 0070            EK=E1-(E2)
ISN 0071      1015  AMOD=SQRT(GK*GK+EK*EK)
ISN 0072            ARG=ATAN2(EK,GK)
ISN 0073            CALL AGNARG(IDE,IPARA,AMOD,IPG1,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0074            CALL AGNARG(IDE,IPARA,ARG,IPG2,G1,ALF,G2,ALF,
ISN 0075      1011  DO 1016 J=1,NALF
ISN 0076            ALF(J)=1.5708*ALF(J)
ISN 0077      1016  CONTINUE
ISN 0078      1007  CONTINUE
ISN 0079            RETURN
ISN 0080            END


ISN 0001            SUBROUTINE AGNARG(IDE,IPARA,R,X,IMODE)
ISN 0002            IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0003            INTEGER R,R00,R90
ISN 0004            COMMON/AGLLL/LINE(2,900),Y(5999),AGL(1000),PAGL(1000),
                   1001),VARG(1999),NPAGE(10)
ISN 0005            COMMON/CONST/PI,RAD,LIN,SCALE,LOG,SMIN
ISN 0006            DIMENSION LOIA(1000)
ISN 0007            NAGE=0
ISN 0008            NSE=0
ISN 0009            IPOS=0
ISN 0010            IFAG=0
ISN 0011            DO 1001 K=1,900
ISN 0012            LOIA(K)=0
ISN 0013            Y(K)=0.0
ISN 0014            VARG(K)=0.0
ISN 0015      1001  CONTINUE
ISN 0016            DO 1002 K=1,10
ISN 0017            NAGE(K)=0
ISN 0018      1002  AGL(K)=0.0
ISN 0019            IF(IDE.EQ.1)GO TO 1003
ISN 0020            AL=VALUE*3.1415926D/180.
ISN 0021            CALL AGNARG(IDE,IPARA,R,X,AL,
ISN 0022            VALUE=AL*180.D/3.1415926D
ISN 0023            GO TO 1004
ISN 0024      1003  AL=VALUE
ISN 0025            CALL AGNARG(IDE,IPARA,R,X,AL,
ISN 0026      1004  RETURN
ISN 0027            END


ISN 0002            SUBROUTINE CALCALL(I1,I2,MSUNG)
ISN 0003            IMPLICIT INTEGER*2 ( I-N )
ISN 0004            LOGICAL*1 USE(44)
ISN 0005            INTEGER*2 EXTRA(55)
ISN 0006            INTEGER*4 I, J, K, L, M, NO, JJ, LL, M2, II, NALL, JJJ, MSUN,
                   1          NAXA, NAXE, NAXJ, NAXC, INSERA(2)
ISN 0007            REAL*8 TITLE(10), VALUE
                   C
ISN 0008            COMMON / AUX / II, NALL, MSIZE, A
                   C
ISN 0009            COMMON / ALL / LINE(2,900), Y(5999), AGL(1000), PAGE(10),
                   1                EA(1500), EB(1500), NPAGE(10)
                   C
```

```
ISN 0035            GO TO 1005
ISN 0037       1017 G=G1*COS(B1)
ISN 0038            E=G1*SIN(B1)
ISN 0039            GR=G+R/(R*R+X*X)
ISN 0040            ER=E-X/(R*R+X*X)
ISN 0041            AMOD=SQRT(GR*GR+ER*ER)
ISN 0042            ARG=ATAN2(ER,GR)
ISN 0043       1008 CALL ADNAR5(IDE,IPARA,AMOD,IPG1,L1,ADM,N,NOL1,IR,LB)
ISN 0044            CALL ADNAR5(IDE,IPARA,ARG,IPG2,L2,ALF,N,NOL2,IR,LB)
ISN 0045       1001 CONTINUE
ISN 0046            GO TO 1005
ISN 0047       1005 READ 1009,IDE,IPARA,R,X,INDEP
ISN 0048       1009 FORMAT(I4,4X,I4,5X,F6.2,F6.2,2X,I5)
ISN 0049            IF(INDEP-100)1010,1011,1012
ISN 0050       1010 IF(INDEP.GT.10)GO TO 1013
ISN 0051            CALL ADNAR4(IDE,ADM,L1,N,NOL1,IR)
ISN 0052            CALL ADNAR4(IDE,ALF,L2,N,NOL2,IR)
ISN 0053            GO TO 1011
ISN 0054       1013 CALL ADNAR3(IDE,IPARA,L1,ADM,N,NOL1)
ISN 0055            CALL ADNAR3(IDE,IPARA,L2,ALF,N,NOL2)
ISN 0056            GO TO 1011
ISN 0057       1012 CALL ADNAR1(IDE,IPARA,AMO,IPG1,L1,ADM,N,NOL1,LB)
ISN 0058            IF(IPG1.LT.0)GO TO 1005
ISN 0059            CALL ADNAR1(IDE,IPARA,ALA,IPG2,L2,ALF,N,NOL2,LB)
ISN 0060            IF(IPG2.LT.0)GO TO 1005
ISN 0061            G1=AMO*COS(ALA)
ISN 0062            E1=AMO*SIN(ALA)
ISN 0063            G2=100*R/(R*R+X*X)
ISN 0064            E2=-100*X/(R*R+X*X)
ISN 0065            IF(INDEP.GT.100)GO TO 1014
ISN 0066            GR=G1+G2
ISN 0067            ER=E1+E2
ISN 0068            GO TO 1015
ISN 0069       1014 GR=G1-G2
ISN 0070            ER=E1-E2
ISN 0071       1015 AMOD=SQRT(GR*GR+ER*ER)
ISN 0072            ARG=ATAN2(ER,GR)
ISN 0073            CALL ADNAR5(IDE,IPARA,AMOD,IPG1,L1,ADM,N,NOL1,IR,LB)
ISN 0074            CALL ADNAR5(IDE,IPARA,ARG,IPG2,L2,ALF,N,NOL2,IR,LB)
ISN 0075       1011 DO 1016 J=1,NOL2
ISN 0076            ALF(J)=1.5708+ALF(J)
ISN 0077       1016 CONTINUE
ISN 0078       1007 CONTINUE
ISN 0079            RETURN
ISN 0080            END


ISN 0002            SUBROUTINE LEDATA(LDIAG,IFAB,NBD)
ISN 0003            IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0004            INTEGER N,NBD,NDG
ISN 0005            COMMON/REEL/LINE(2,5000),Y(5000),ANG(5000),PG(100),QG(100),VTEN(15
                   1(0),VANG(1500),NPGE(100)
ISN 0006            COMMON/COUNTS/NB,NOLIN,NCGEN,LB,NSWING
ISN 0007            DIMENSION LDIAG(1500)
ISN 0008            NAR=0
ISN 0009            NB=0
ISN 0010            IPGD=0
ISN 0011            IFAB=0
ISN 0012            DO 1001 K=1,NBD
ISN 0013            LDIAG(K)=0
ISN 0014            VTEN(K)=0.0
ISN 0015            VANG(K)=0.0
ISN 0016       1001 CONTINUE
ISN 0017            DO 1002 J=1,1501
ISN 0018            READ 1003,IBARRA,VALOR1,VALOR2
ISN 0019       1003 FORMAT(I4,I3X,F6.3,F6.2)
ISN 0020            IF(IBARRA)1004,1005,1005
ISN 0021       1005 CALL ACNAR7(LDIAG,VTEN,IBARRA,IPGD,VALOR1,NB,NBD,NAR)
ISN 0022            VAL=VALOR2*3.1415926/180.
ISN 0023            CALL ADITA(VANG,VTEN,LDIAG,IBARRA,VAL,NB,NBD,LB,IFAB)
ISN 0024            IF(IFAB.EQ.1)GO TO 1004
ISN 0025       1002 CONTINUE
ISN 0026            IFAB=1
ISN 0027       1004 RETURN
ISN 0028            END


ISN 0002            SUBROUTINE DACALL(I1,I2,MSGNO)
ISN 0003            IMPLICIT INTEGER*2 ( I-N )
ISN 0004            LOGICAL*1 DSN(44)
ISN 0005            INTEGER*2 EXTRA(56)
ISN 0006            INTEGER*4 I, J, K, L, M ,N, J2, L2, M2, IT, NREC, JJ, MSIZE,
                   1          MAXAJ, MAXRE, MAXJO, MAXOC, IRECK(200)
ISN 0007            REAL*8 TITLE(10), VOLID
                C
ISN 0008            COMMON / AUX / IT, NREC, MSIZE, K
                C
ISN 0009            COMMON / ROLL / LINE(2,5000),Y(5000),ANG(5000),PG(100),QG(100),
                   1                VA(1500),ER(1500),NPGE(100)
                C
```

```
ISN 0041          M2 = (M+1)/2
ISN 0042          J = MAXO(NCELTO*1,1)
ISN 0043          J2 = (J+1)/2
ISN 0044          JJ = MAXO(NSPHS*1,1)
ISN 0045          CALL DABIN (9*MAXAR,DUMMY,1)
ISN 0046          CALL DABIN ((MAXAR+1)/2,DUMMY,1)
ISN 0047          CALL DABIN (MAXAR*1,DUMMY,1)
ISN 0048          CALL DABIN (MAXAR*1,DUMMY,1)
ISN 0049          CALL DABIN (L2,DUMMY,1)
ISN 0050          CALL DABIN (L2,DUMMY,1)
ISN 0051          CALL DABIN (3*L,DUMMY,1)
ISN 0052          CALL DABIN (L,DUMMY,1)
ISN 0053          CALL DABIN (L,EA,2)
ISN 0054          CALL DABIN (L,EB,2)
ISN 0055          CALL DABIN (L,DUMMY,1)
ISN 0056          CALL DABIN (L,DUMMY,1)
ISN 0057          CALL DABIN (L,PG1,2)
ISN 0058          CALL DABIN (L,JG1,2)
ISN 0059          CALL DABIN (N,LINE,2)
ISN 0060          CALL DABIN (N,Y,2)
ISN 0061          CALL DABIN (N,ANG,2)
ISN 0062          CALL DABIN (N,DUMMY,1)
ISN 0063          CALL DABIN (42,NPGE,2)
ISN 0064          II = 0
ISN 0065          NN = LASTBS
ISN 0066          DO 65 I = 1, NN
ISN 0067          IF( (PG1(I) .EQ. 0 ) .AND. (JG1(I) .EQ. 0) ) GO TO 65
ISN 0068       10 II = II + 1
ISN 0070          IF( II .GT. NOGEN ) GO TO 15
ISN 0072          IF( NPGE(II) .GE. I ) GO TO 20
ISN 0074          GO TO 10
ISN 0075       15 NOGEN = NOGEN + 1
ISN 0076          NPGE(II) = I
ISN 0077          GO TO 30
ISN 0078       20 IF( NPGE(II) .EQ. I ) GO TO 30
ISN 0080          JJ = NOGEN + 2
ISN 0081          DO 25 J = II, NOGEN
ISN 0082          JJ = JJ - 1
ISN 0083          J1 = JJ - 1
ISN 0084          NPGE(JJ) = NPGE(J1)
ISN 0085       25 CONTINUE
ISN 0086          NPGE(II) = I
ISN 0087          NOGEN    = NOGEN + 1
ISN 0088       30 PG(II)   = PG1(I)
ISN 0089          JG(II)   = JG1(I)
ISN 0090       65 CONTINUE
ISN 0091          N = NOGEN + 1
ISN 0092          DO 70 I = N,100
ISN 0093          PG(I) = 0
ISN 0094       70 JG(I) = 0
ISN 0095          I = IT / 10
ISN 0096          J = IT - I * 10
ISN 0097          WRITE(6,75) II, I, J, TITLE
ISN 0098       75 FORMAT(1H1,'REGISTRO ',I2,' DO LIVRO DO ARQUIVO ',
                    1       ' SOBRE O PT',2I1,'POSI COM O TITULO -----',' / '0',8X,
                    2       10A8 / )
ISN 0099          CALL DSTATS(IT,DSN,VOLID)
ISN 0100          WRITE(6,77) VOLID, DSN
ISN 0101       77 FORMAT(' O ARQUIVO DO USUARIO SOBRE O VOLUME ',A6,
                    1       ' TEM DSNAME=',44A1)
ISN 0102          NRECS = 0
ISN 0103          DO 78 I = 1, 99
ISN 0104          IF( I48LOK(I+2) .GT. 0 ) NRECS = NRECS + 1
ISN 0106       78 CONTINUE
ISN 0107          PCTUSD = NRECS / 99.00
ISN 0108          WRITE(6,79) NRECS, PCTUSD
ISN 0109       79 FORMAT(' DOS 99 REGISTROS,',I3,' SAO USADOS.' /,
                    1       ' O ARQUIVO ESTA',2PF5.1,'% UTILIZADO.' / )
ISN 0110          NOLIN1 = 1
ISN 0111          N = NOLIN + 1
ISN 0112          LINE(1,N) = 1
ISN 0113          NBIT = 0
ISN 0114          DO 550 I = 1, NOLIN
ISN 0115          N = I + 1
ISN 0116          IF( LINE(1,I) .NE. LINE(1,N)) GO TO 520
ISN 0117          IF( LINE(2,I) .NE. LINE(2,N)) GO TO 520
ISN 0120          IF( NBIT .EQ. 0) GO TO 510
ISN 0122          Y(NOLIN1) = Y(N) + Y(NOLIN1)
ISN 0123          ANG(NOLIN1) = ANG(N) + ANG(NOLIN1)
ISN 0124          GO TO 550
ISN 0125       510 Y(NOLIN1) = Y(I) + Y(N)
ISN 0126          ANG(NOLIN1) = ANG(I) + ANG(N)
ISN 0127          NBIT = 1
ISN 0128          GO TO 550
ISN 0129       520 LINE(1,NOLIN1) = LINE(1,I)
ISN 0130          LINE(2,NOLIN1) = LINE(2,I)
ISN 0131          IF( NBIT .EQ. 0) GO TO 530
ISN 0133          NBIT = 0
ISN 0134          GO TO 540
```

```
ISN 0004          COMMON/COUNTS/NOBOS,NOLIN,NOSEN,LASTBS,NSWING
ISN 0006          DIMENSION LDIAG(1500)
ISN 0007          NIRO=0
ISN 0008          DO 1000 I=1,1500
ISN 0009          IF(EA(I).EQ.0.0)GO TO 1000
ISN 0011          NIRO=NIRO+1
ISN 0012          LDIAG(NIRO)=I
ISN 0013          EA(NIRO)=EA(I)
ISN 0014          EB(NIRO)=EB(I)*3.14159265/180.
ISN 0015     1000 CONTINUE
ISN 0016          RETURN
ISN 0017          END

ISN 0018          SUBROUTINE EQUISE(LDIAG1,NBO,N,NBG,L2,VINE,NOLIM,INDER,LVI,TMAR,AT
                  1A)
ISN 0019          IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0020          INTEGER N,NBO,NBG
ISN 0021          DIMENSION LDIAG1(NBO),L2(2,N),VINE(NBG),TMAR(NBG),LVI(NBG)
ISN 0022          COMMON/ROLL/L1(2,5000),ADM(5000),ALF(5000),PG(100),CG(100),VTEN(15
                  100),VANG(1500),LVGER(100)
ISN 0023          COMMON/COUNTS/NBI,NOLIN,NBO,LB,NSWING
ISN 0024          NAR=0
ISN 0025          INDER=0
ISN 0026          IC1=1
ISN 0027          IC2=2
ISN 0028          DO 1000 K=1,NBG
ISN 0029          READ 1005,ICOD,IBARG,NGG,CARAT,CARRE
ISN 0030     1005 FORMAT(I2,1X,I4,1X,I3,6X,F7.2,1X,F7.2)
ISN 0031          IF(IBARG.EQ.-999)GO TO 1006
ISN 0032          CALL AGNAR2(IBARG,VTG,IPG,LDIAG1,VTEN,NBO,NBI,LB)
ISN 0033          VTA=VANG(IPG)
ISN 0034          CORRE=0.0
ISN 0035          CORIM=0.0
ISN 0036          IF(ICOD.EQ.2)GO TO 1007
ISN 0037          DO 1001 I=1,NOLIN
ISN 0038          IF(L1(1,I)-IBARG)1001,1005,1009
ISN 0039     1006 CALL AGNAR2(L1(2,I),VTI,IPI,LDIAG1,VTEN,NBO,NBI,LB)
ISN 0040          VTJ=VANG(IPI)
ISN 0041          CALL AGNAR1(IBARG,L1(2,I),VTK,IPK,L1,ADM,N,NOLIN,LB)
ISN 0042          CALL AGNAR1(IBARG,L1(2,I),VTL,IPL,L2,ALF,N,NOLIM,LB)
ISN 0043          VKE=VTG*COS(VTA)-VTI*COS(VTJ)
ISN 0044          VIM=VTG*SIN(VTA)-VTI*SIN(VTJ)
ISN 0045          CKE=VKE*VTK*SIN(VTL)+VIM*VTK*COS(VTL)
ISN 0046          CIM=VIM*VTK*SIN(VTL)-VKE*VTK*COS(VTL)
ISN 0047          CORRE=CORRE+CKE
ISN 0048          CORIM=CORIM+CIM
ISN 0049     1001 CONTINUE
ISN 0050     1009 IF(ICOD.EQ.10)GO TO 1010
ISN 0051          GO TO 1011
ISN 0052     1010 TETA=ATAN2(CARRE,CARAT)-VTA
ISN 0053          COR=((SQRT(CARAT*CARAT+CARRE*CARRE)/VTG))*COS(TETA)
ISN 0054          COI=((SQRT(CARAT*CARAT+CARRE*CARRE)/VTG))*SIN(TETA)
ISN 0055          CORRE=CORRE+COR
ISN 0056          CORIM=CORIM+COI
ISN 0057     1011 CORRE=CORRE/NGG
ISN 0058          CORIM=CORIM/NGG
ISN 0059          DO 1002 JX=1,NGG
ISN 0060          READ 1012,IBARF,XMAG,XMAD,AGA
ISN 0061     1012 FORMAT(I4,1X,F5.2,1X,F6.2,1X,F5.5)
ISN 0062          IF(XMAG.EQ.0.0)GO TO 1020
ISN 0063          IF(XMAD.EQ.0.0)GO TO 1031
ISN 0064          IF(XMAG.GT.XMAD)GO TO 1020
ISN 0065     1031 XMAG=XMAG/100
ISN 0066          XMAD=XMAD/100
ISN 0067          DVR=(-1)*CORIM*XMAG
ISN 0068          DVI=CORRE*XMAG
ISN 0069          DVR=DVR+VTG*COS(VTA)
ISN 0070          DVI=DVI+VTG*SIN(VTA)
ISN 0071          EAR=SQRT(DVR*DVR+DVI*DVI)
ISN 0072          EAN=ATAN2(DVI,DVR)
ISN 0073          CALL AGNAR7(LVI,TMAR,IBARF,NAR,EAR,NTA,NBG,NAR)
ISN 0074          IF(XMAD)1020,1021,1022
ISN 0075     1022 DTETA=EAN-VTA
ISN 0076          RARM=((XMAD-XMAG)/XMAD)*VTG*SIN(DTETA)*TAN(DTETA)
ISN 0077          EAR=EAR-RARM
ISN 0078     1021 CALL AGNAR7(LDIAG1,VTEN,IBARF,NAR,EAR,NBI,NBO,NAR)
ISN 0079          CALL ADITA(VANG,VTEN,LDIAG1,IBARF,EAN,NBI,NBO,LB,INDER)
ISN 0080          ADEG=1/XMAG
ISN 0081          CALF=0.00001
ISN 0082          CALL AGNAR5(IBARG,IBARF,ADEG,NAR,L1,ADM,N,NOLIN,IC1,LB)
ISN 0083          CALL AGNAR5(IBARG,IBARF,CALF,NAR,L2,ALF,N,NOLIM,IC1,LB)
ISN 0084          VINE=AGA/188.4955592
ISN 0085          CALL AGNAR7(LVGER,VINE,IBARF,NAR,DINE,NBO,NBG,IC2)
ISN 0086     1002 CONTINUE
ISN 0087          GO TO 1000
ISN 0088     1007 DO 1003 IX=1,NGG
ISN 0089          READ 1014,IBGER,XMAG,XMAD,AGA,IBARF
ISN 0090     1014 FORMAT(I4,1X,F5.2,1X,F6.2,1X,F6.5,1X,I4)
```

```
ISN 0021          1003 IFAB=1
ISN 0019                GO TO 1004
ISN 0020          1002 MI=NI
ISN 0021                DO 1001 K=MI,NOL1
ISN 0022                IF(L1(1,K).EQ.NBAR)GO TO 1005
ISN 0024                MI=K
ISN 0025                GO TO 1000
ISN 0026          1005 IF(L1(2,K).LT.NBAR)GO TO 1001
ISN 0028                CALL ADNAR2(L1(2,K),VTE,IPB,LDIAG1,VTEN,NBD,NB1,LB)
ISN 0029                IF(IPB.EQ.0)GO TO 1003
ISN 0031                VAN=VANG(IPB)
ISN 0032                CALL ADNAR1(L1(1,K),L1(2,K),ALFK,IX,L2,ALF,K,NOL2,LB)
ISN 0033                IF(IX.LT.0)GO TO 1003
ISN 0035                SOE1=VTEN(J)+VTE*ADM(K)*COS(VANJ-VAN-ALFK)
ISN 0036                SOE2=VTEN(J)+VTE*ADM(K)*COS(VAN-VANJ-ALFK)
ISN 0037                CALL ADNAR5(L1(1,K),L1(2,K),SOE1,NA,L,SOM,N,NOL3,IC,LB)
ISN 0038                CALL ADNAR5(L1(2,K),L1(1,K),SOE2,NA,L,SOM,N,NOL3,IC,LB)
ISN 0039          1001 CONTINUE
ISN 0041          1000 CONTINUE
ISN 0041          1004 RETURN
ISN 0042               END

ISN 0002               SUBROUTINE SPOMA(SOMAX,L3,NOL4,LDIAG,NBD,N,NOL2,L2,IFAB,LVI,TMAX,
                      1ABB,NTA)
ISN 0003               IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0004               INTEGER N,NBD,NBB
ISN 0005               DIMENSION L2(2,N),L3(2,N),LDIAG(NBD),SOMAX(N),TMAX(NBB),LVI(NBB)
ISN 0006               COMMON/COEL/L1(2,5000),ADM(5000),ALF(5000),PB(100),LB(100),VTEN(15
                      100),VANG(1000),LVOER(100)
ISN 0007               COMMON/COORTS/NB1,NOL1,NB3,L3,NSAING
ISN 0008               IC=1
ISN 0009               NI=1
ISN 0010               NA=0
ISN 0011               NOL4=0
ISN 0012               IFAB=0
ISN 0013               DO 1000 J=1,NB1
ISN 0014               NBAR=LDIAG(J)
ISN 0015               IF(L1(1,NI).EQ.NBAR)GO TO 1002
ISN 0017          1003 IFAB=1
ISN 0018               GO TO 1004
ISN 0019          1002 MI=NI
ISN 0020               DO 1001 K=MI,NOL1
ISN 0021               IF(L1(1,K).EQ.NBAR)GO TO 1005
ISN 0023               MI=K
ISN 0024               GO TO 1000
ISN 0025          1005 IF(L1(2,K).LT.NBAR)GO TO 1001
ISN 0027               CALL ADNAR1(L1(1,K),L1(2,K),ALFK,IX,L2,ALF,K,NOL2,LB)
ISN 0028               IF(IX.LT.0)GO TO 1003
ISN 0030               CALL ADNAR2(L1(1,K),VMAX1,IP01,LVI,TMAX,NBB,NTA,LB)
ISN 0031               IF(IP01.LT.0)GO TO 1003
ISN 0033               CALL ADNAR2(L1(2,K),VMAX2,IP02,LVI,TMAX,NBB,NTA,LB)
ISN 0034               IF(IP02.LT.0)GO TO 1003
ISN 0036               IF(IP01.EQ.0)GO TO 1006
ISN 0038               SOE=VMAX1*ADM(K)*COS(ALFK)
ISN 0039               GO TO 1007
ISN 0040          1006 IF(IP02.EQ.0)GO TO 1008
ISN 0042               SOE=VMAX2*ADM(K)=COS(ALFK)
ISN 0043               GO TO 1007
ISN 0044          1008 SOE=ADM(K)*COS(ALFK)
ISN 0045          1007 CALL ADNAR5(L1(1,K),L1(2,K),SOE,NA,L3,SOMAX,N,NOL4,IC,LB)
ISN 0046          1001 CONTINUE
ISN 0047          1000 CONTINUE
ISN 0048          1004 RETURN
ISN 0049               END

ISN 0002               SUBROUTINE ADAMAT(LDIAG,DIAGMA,FODIAG,L,N,NOLIN,LB,NAR,NBD,NB)
ISN 0003               IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0004               INTEGER N,NBD,NBB
ISN 0005               DIMENSION LDIAG(NBD),DIAGMA(NBD),L(2,N),FODIAG(N)
ISN 0006               DO 1000 J=1,NB
ISN 0007               IF(NAR.EQ.0)GO TO 1002
ISN 0009               DIAGMA(J)=0.0
ISN 0010          1002 DO 1000 K=1,NB
ISN 0011               IF(K.EQ.J)GO TO 1000
ISN 0013               CALL ADNAR1(LDIAG(J),LDIAG(K),V,LP,L,FODIAG,N,NOLIN,LB)
ISN 0014               DIAGMA(J)=DIAGMA(J)+V
ISN 0015          1000 CONTINUE
ISN 0016               DO 1001 IL=1,NOLIN
ISN 0017               FODIAG(IL)=-FODIAG(IL)
ISN 0018          1001 CONTINUE
ISN 0019               RETURN
ISN 0020               END

ISN 0002               SUBROUTINE KRONRE(SOM,DIAGMA,VINE,L,LDIAG,LMK,LDI,NB,NB,N,NOLIN,MH
                      1SR,NBD,LB,INO,NPOE,NBG,NOGEN)
ISN 0003               IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0004               INTEGER N,NBD,NBG
ISN 0005               DIMENSION SOM(1),DIAGMA(NBD),VINE(NBG),L(2,N),LDIAG(NBD),LDI(NBD),
                      1LMK(2,N),NPOE(NBG)
ISN 0006               MB=NB
```

```
ISN 0032          41 C(N+1)=0
ISN 0033             DO 4 J=1,N
ISN 0034             C(N+1)=C(N+1)-A(1,J)*F(J,1)
ISN 0035           4 CONTINUE
ISN 0036             DET=C(N+1)
ISN 0037             RETURN
ISN 0038             END


ISN 0002             SUBROUTINE TESTST(V,NB,NBB,INDI,VEC,NBV)
ISN 0003             IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0004             INTEGER NBB,NBV
ISN 0005             DIMENSION V(NBB),VEC(NBV,NBV)
                C    ESTA SUBROTINA UTILIZA O CRITERIO DE ROUTH PARA ASSEGURAR A NAO E-
                C    XISTENCIA DE RAIZES REAIS POSITIVAS,COMPLEXAS E IMAGINARIAS NA  E-
                C    QUACAO CARACTERISTICA.ELA E UTIL A ANALISE DE ESTABILIDADE QUANDO
                C    AS RAIZES DA EQUACAO CARACTERISTICA SAO AS  FREQUENCIAS  NATURAIS
                C    NAO AMORTECIDAS DE SISTEMA.
                C    A DIMENSAO NBV TEM QUE SER NO MINIMO IGUAL A (NBB/2)+2.
                C    CURITIBA 17 DE OUTUBRO DE 1978. NIROMAR ALVES DE REZENDE.
ISN 0006             NAR=0
ISN 0007             IF(NB.GT.1)GO TO 1004
ISN 0008             IF(V(NB).GT.0.0)GO TO 1005
ISN 0011             GO TO 1006
ISN 0012          1004 DO 1003 I=1,NB
ISN 0013             NAR=I+1
ISN 0014             IF(NAR.GT.NB)GO TO 1007
ISN 0016             PROCTS=V(I)*V(NAR)
ISN 0017             IF(PROCTS.LE.0.0)GO TO 1006
ISN 0019          1003 CONTINUE
ISN 0020          1007 IF(NB.GT.2)GO TO 1008
ISN 0022             GO TO 1005
ISN 0023          1008 NB=NB/2
ISN 0024             NBB=NBB/2
ISN 0025             IA=NB-NB
ISN 0026             IF(IA.EQ.0)GO TO 1009
ISN 0028             MB=NB-2
ISN 0029             NAR=(NB+1)/2
ISN 0030             VEC(1,NAR)=V(NB)
ISN 0031             VEC(2,NAR)=0.0
ISN 0032             GO TO 1010
ISN 0033          1009 MB=NB-1
ISN 0034          1010 NAR=0
ISN 0035             DO 1001 I=1,MB,2
ISN 0036             NAR=NAR+1
ISN 0037             VEC(1,NAR)=V(I)
ISN 0038             VEC(2,NAR)=V(I+1)
ISN 0039          1001 CONTINUE
ISN 0040             NAR=((NB+1)/2)+1
ISN 0041             VEC(1,NAR)=0.0
ISN 0042             VEC(2,NAR)=0.0
ISN 0043             IT=1
ISN 0044             DO 1002 I=3,NB
ISN 0045             IF(IT.EQ.1)GO TO 1011
ISN 0047             GO TO 1012
ISN 0048          1011 VEC(I,NAR)=0.0
ISN 0049             NAR=NAR-1
ISN 0050          1012 DO 1003 J=1,NAR
ISN 0051             VEC(I,J)=(VEC(I-1,1)*VEC(I-2,J+1)-VEC(I-2,1)*VEC(I-1,J+1))/VEC(I-1
                    1,1)
ISN 0052             IF(J.EQ.1)GO TO 1013
ISN 0054             GO TO 1003
ISN 0055          1013 PROCTS=VEC(I,1)*VEC(I-1,1)
ISN 0056             IF(PROCTS.LE.0.0)GO TO 1006
ISN 0058          1003 CONTINUE
ISN 0059             IF(IT.EQ.1)GO TO 1014
ISN 0061             IT=1
ISN 0062             GO TO 1002
ISN 0063          1014 IT=0
ISN 0064          1002 CONTINUE
ISN 0065          1005 INDI=100
ISN 0066             GO TO 1015
ISN 0067          1006 INDI=0
ISN 0068          1015 RETURN
ISN 0069             END


ISN 0002             SUBROUTINE PRINTA(INDICE,STANIV,DETX,DETY,CASO)
ISN 0003             IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
ISN 0004             DIMENSION CASO(2)
ISN 0005             IF(INDICE.EQ.200)GO TO 1021
ISN 0006             IF(INDICE.LT.10)GO TO 1000
ISN 0007             IF(INDICE.LT.50)GO TO 1001
ISN 0009             IF(INDICE.LT.90)GO TO 1002
ISN 0011             IF(INDICE.LT.7 )GO TO 1003
ISN 0013             IF(INDICE.LT.90)GO TO 1004
ISN 0015             IF(INDICE.LT.110)GO TO 1005
ISN 0017             PRINT 1007,CASO(1),CASO(2)
ISN 0019          1007 FORMAT(1H1,132('*')/90('*'),22X,55('*')/90('*'),' N I V E L S T A
```

```
ISN 0058            PRINT 1017
ISN 0059            GO TO 1006
ISN 0060       1004 PRINT 1007,CASO(1),CASO(2)
ISN 0061            PRINT 1012
ISN 0062       1012 FORMAT(5('*'),32X,'CONDICAO - INSTAVEL',73X,4('*')/5('*'),124X,4('
ISN 0063            PRINT 1015
ISN 0064            PRINT 1020
ISN 0065       1020 FORMAT(5('*'),32X,'CONDICAO - ',81X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*
                   1'),124X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),32X,'NIVEL DE ESTABILIDAD
                   2E - ',68X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),124X
                   3,4('*')/5('*'),32X,'MARGEM DE ESTABILIDADE -      ',63X,4('*')/5('*
                   4'),124X,4('*')/5('*'),32X,'OBSERVACAO - A ANALISE DO CARREGAMENTO
                   5FICOU PREJUDICADA DE-',32X,4('*')/5('*'),45X,'VIDO A INSTABILIDADE
                   6 DA ESTRUTURA DO SISTEMA.',34X,4('*'))
ISN 0066            PRINT 1017
ISN 0067            GO TO 1006
ISN 0068       1021 PRINT 1007,CASO(1),CASO(2)
ISN 0069            PRINT 1032
ISN 0070       1032 FORMAT(5('*'),32X,'CONDICAO - ',81X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*
                   1'),124X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),32X,'NIVEL DE ESTABILIDAD
                   2E - ',68X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),124X
                   3,4('*'))
ISN 0071            PRINT 1015
ISN 0072            PRINT 1033
ISN 0073       1033 FORMAT(5('*'),32X,'CONDICAO - ',81X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*
                   1'),124X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),32X,'NIVEL DE ESTABILIDAD
                   2E - ',68X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),124X
                   3,4('*')/5('*'),32X,'MARGEM DE ESTABILIDADE -      ',63X,4('*')/5('*
                   4'),124X,4('*')/5('*'),32X,'OBSERVACAO - AS ANALISES DAS CONDICOES
                   5DE ESTABILIDADE FICA-',32X,4('*')/5('*'),45X,'RAM PREJUDICADAS DEV
                   6IDO A EXISTENCIA DE GERADOR',32X,4('*')/5('*'),45X,'(ES) SOBREXCIT
                   7ADO(S) ACIMA DO(S) LIMITE(S).',36X,4('*'))
ISN 0074            PRINT 1017
ISN 0075            GO TO 1006
ISN 0076       1005 PRINT 1007,CASO(1),CASO(2)
ISN 0077            PRINT 1014,DETX
ISN 0078            PRINT 1015
ISN 0079            PRINT 1013
ISN 0080       1013 FORMAT(5('*'),32X,'CONDICAO - INSTAVEL',73X,4('*')/5('*'),124X,4('
                   1*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),32X'NIVEL DE ESTA
                   2BILIDADE - ',68X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),124X,4('*')/5('*
                   3'),124X,4('*')/5('*'),32X,'MARGEM DE ESTABILIDADE -      ',63X,4('*
                   4')/5('*'),124X,4('*')/5('*'),32X,'OBSERVACAO - A ESTRUTURA DO SIST
                   5EMA NAO SUPORTA ESTE CARREGAMENTO.',26X,4('*')/5('*'),124X,4('*'))
ISN 0081            PRINT 1017
ISN 0082       1006 RETURN
ISN 0083            END
```

ANEXO 3

RELATÓRIOS DO PROGRAMA NIVELSTAB

N I V E L S T A B

CASO -TESTE001

A N A L I S E D A E S T R U T U R A D O S I S T E M A

CONDICAO

NIVEL DE ESTABILIDADE

N I V E L S T A B

A N A L I S E D O C A R R E G A M E N T O D O S I S T E M A

CONDICAO

NIVEL DE ESTABILIDADE

MARGEM DE ESTABILIDADE

OBSERVACAO - AS ANALISES DAS CONDICOES DE ESTABILIDADE FICARAM PREJUDICADAS DEVIDO A EXISTENCIA DE GERADOR (ES) SOBREXCITADO(S) ACIMA DO(S) LIMITE(S).

N I V E L S T A B

**ESTE PROGRAMA FOI DESENVOLVIDO COMO PARTE DA TESE
**DE MESTRADO DO ENGENHEIRO NIROMAR ALVES DE REZENDE,
**DEFENDIDA NA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

N I V E L S T A B

CASO -TESTE001

A N A L I S E D A E S T R U T U R A D O S I S T E M A

CONDICAO - ESTAVEL

NIVEL DE ESTABILIDADE -31950.2812

N I V E L S T A B

A N A L I S E D O C A R R E G A M E N T O D O S I S T E M A

CONDICAO - NO LIMITE DE ESTABILIDADE

NIVEL DE ESTABILIDADE - 0.0

MARGEM DE ESTABILIDADE - 0.0

N I V E L S T A B

ESTE PROGRAMA FOI DESENVOLVIDO COMO PARTE DA TESE
DE MESTRADO DO ENGENHEIRO NIROMAR ALVES DE REZENDE,
DEFENDIDA NA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca M.A.U.A. BIM

N I V E L S T A B

CASO - TESTE001

A N A L I S E D A E S T R U T U R A D O S I S T E M A

CONDICAO - ESTAVEL

NIVEL DE ESTABILIDADE -31950.2812

N I V E L S T A B

A N A L I S E D O C A R R E G A M E N T O D O S I S T E M A

CONDICAO - INSTAVEL

NIVEL DE ESTABILIDADE

MARGEM DE ESTABILIDADE

OBSERVACAO - A ESTRUTURA DO SISTEMA NAO SUPORTA ESTE CARREGAMENTO.

N I V E L S T A B

**ESTE PROGRAMA FOI DESENVOLVIDO COMO PARTE DA TESE
**DE MESTRADO DO ENGENHEIRO NIROMAR ALVES DE REZENDE,
**DEFENDIDA NA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

N I V E L S T A B

CASO - TESTE003

A N A L I S E D A E S T R U T U R A D O S I S T E M A

CONDICAO - ESTAVEL

NIVEL DE ESTABILIDADE - 0.5944017E+22

N I V E L S T A B

A N A L I S E D O C A R R E G A M E N T O D O S I S T E M A

CONDICAO - ESTAVEL

NIVEL DE ESTABILIDADE - 0.4577473E+21

MARGEM DE ESTABILIDADE - 7.70 PORCENTO

N I V E L S T A B

**ESTE PROGRAMA FOI DESENVOLVIDO COMO PARTE DA TESE **
DE MESTRADO DO ENGENHEIRO NIROMAR ALVES DE REZENDE,
DEFENDIDA NA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

ANEXO 4

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA NIVELSTAB

CASOS-TESTE

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA NIVELSTAB-

CASOS-TESTE

Na maioria das vezes, relaciona-se limite de estabilidade de regime permanente com carregamento excessivo de carga ativa.

Apesar da verdade existente nesta assertiva, não se pode esquecer a grande importância excercida pelas condições de excitação das máquinas síncronas.

Ou seja, para uma boa condição de excitação das máquinas síncronas, é verdade que o nível de estabilidade do sistema diminui com o aumento do carregamento do sistema.

Mas é, igualmente, verdade que, quando a redução da carga ativa obriga as máquinas síncronas a reduzir a tensão do sistema de transmissão, o nível de estabilidade também caí com o carregamento.

Para mostrar o importante papel desempenhado pelas condições de excitação das máquinas síncronas no nível de estabilidade do sistema, os casos-teste em estudo apresentam três condições de carregamento de um sistema e mostram que, para as condições de excitação das máquinas síncronas consideradas, o nível de estabilidade aumenta com o carregamento da carga ativa. Isto porque, com o aumento do carregamento do sistema, os níveis de tensão são reduzidos, obrigando as máquinas síncronas a passarem de subexcitadas para sobreexcitadas.

Na figura 4, é apresentado o digagrama unifilar do sistema considerado nos casos-teste.

Este sistema é constituído por quatro centrais gerado-

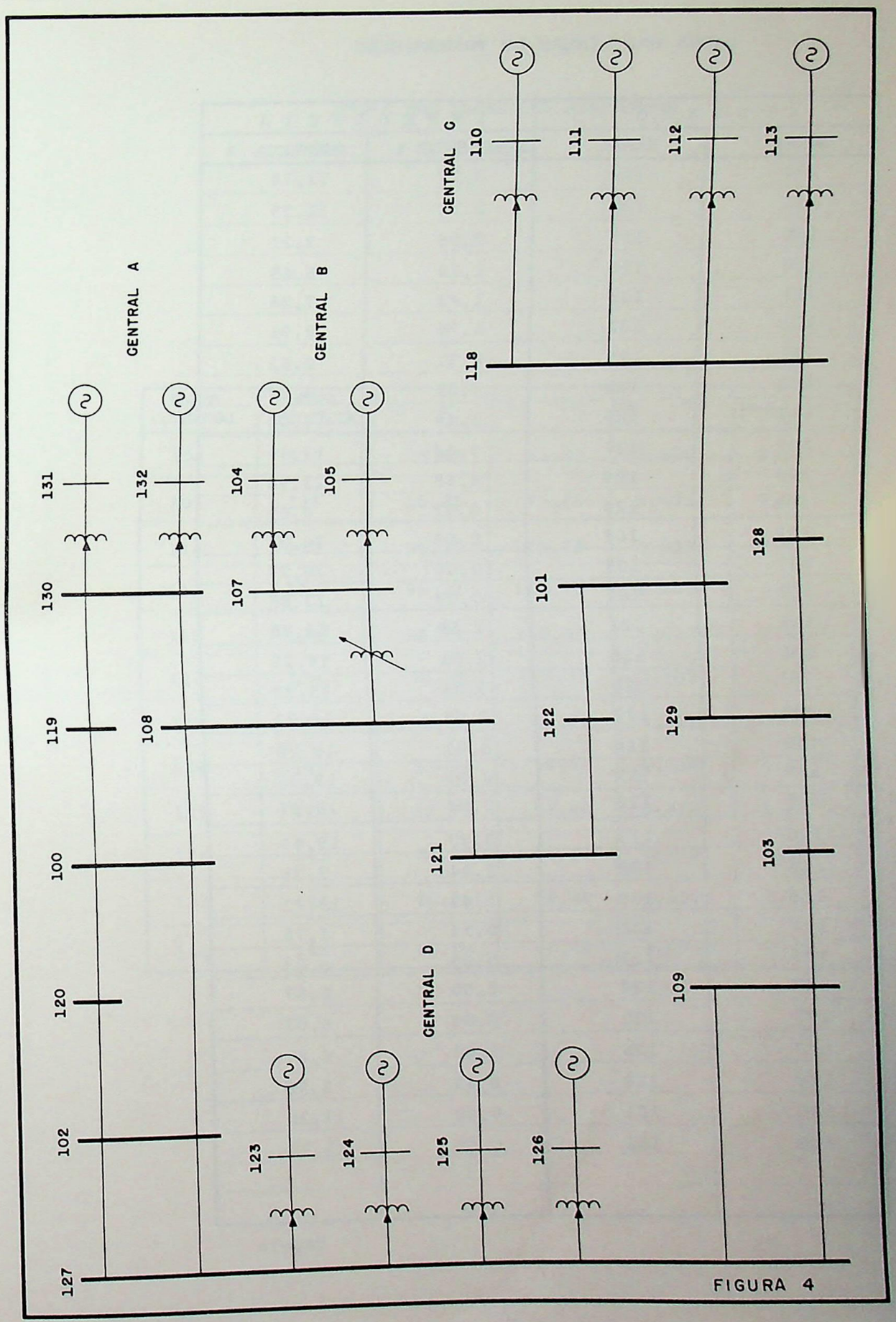

CENTRAL A
CENTRAL B
CENTRAL C
CENTRAL D
127
102
120
100
119
108
130
131
132
107
104
105
121
122
101
129
128
103
109
118
110
111
112
113
123
124
125
126

FIGURA 4

DADOS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

BARRA TERMINAL	BARRA FICTÍCIA	X_q (%)	X_d (%)	H_T (PU)	Q_{max} (PU)
104	133	15,85	15,85	1,699	0,06
105	134	15,85	15,85	1,699	0,06
110	136	96,21	145,75	1,699	0,46
111	137	96,21	145,75	1,612	0,46
112	138	96,21	145,75	1,612	0,46
113	139	96,21	145,75	1,612	0,46
123	140	32,93	58,80	1,612	1,03
124	141	32,93	58,80	6,644	1,03
125	142	32,93	58,80	6,644	1,03
126	143	32,93	58,80	6,644	1,03
131	144	46,10	68,40	4,690	0,43
132	145	46,10	68,40	4,690	0,43

Tabela 2

NÚMERO DA BARRA	FASORES DAS TENSÕES Tabela 4					
	CARGA MÍNIMA		CARGA MÉDIA		CARGA PESADA	
	MÓDULO (P.U.)	FASE	MÓDULO	FASE	MÓDULO	FASE
100	1,062	-2,4	1,014	- 4,3	1,015	-12,9
101	1,038	-5,7	0,974	-17,0	0,959	-31,1
102	1,052	-0,2	1,032	1,8	1,039	- 8,5
103	1,039	-5,9	0,975	-17,6	0,961	-32,0
104	0,960	-0,2(G)	0,980	- 3,0 (G)	0,985	-11,0(G)
105			0,980	- 3,0 (G)	0,985	-11,0(G)
107	1,012	-3,3	1,003	- 7,3	1,002	-15,3
108	1,060	-3,1	1,023	- 6,6	1,016	-14,3
109	1,033	1,0	1,030	4,3	1,027	- 8,5
110	0,970	0,7(G)	1,005	- 5,4 (G)	1,015	-19,9(G)
111	0,970	0,7(G)	1,005	- 5,4 (G)	1,015	-19,8(G)
112	0,950	-4,1(S)	1,005	- 5,4 (G)	1,015	-19,8(G)
113	0,950	-4,1(S)	1,005	- 5,4 (G)	1,015	-19,8(G)
118	1,029	-4,1	1,013	-12,4	1,009	-26,9
119	1,060	-2.6	1,013	- 4,9	1,014	-12,8
120	1,058	-2.1	1,010	- 3,7	1,012	-13,0
121	1,053	-5,0	0,980	-13 6	0,959	-25,0
122	1,052	-5,2	0,978	-14,3	0,958	-26,1
123	0,980	8,6(G)	1,030	18,1 (G)	1,037	5,6(G)
124	0,980	8.6(G)	1,030	18,1 (G)	1,037	5,6(G)
125	0,950	4,0(S)	1,030	18,1 (G)	1,037	5,6(G)
126	0,950	4,0(S)	1,030	18,1 (G)	1,037	5,6(G)
127	0,999	4,0	1,046	11,7	1,052	- 0,7
128	1,032	-5,6	0,969	-16,9	0,956	-31,4
129	1,039	-5,9	0,975	-17,6	0,961	-32,0
130	1,036	-1,8	1,037	- 2,8	1,046	- 7,2
131	0,940	-1,8(S)	0,980	1,3 (G)	1,000	- 0,6(G)
132	0,940	0,0(G)	0,980	0,0 (G)	1,000	0,0(G)

N I V E L S T A B

CASO -TESTE002

A N A L I S E D A E S T R U T U R A D O S I S T E M A

CONDICAO - ESTAVEL

NIVEL DE ESTABILIDADE - 3.5944017E+22

N I V E L S T A B

A N A L I S E D O C A R R E G A M E N T O D O S I S T E M A

CONDICAO - ESTAVEL

NIVEL DE ESTABILIDADE - 3.2872517E+21

MARGEM DE ESTABILIDADE - 4.83 PORCENTO

N I V E L S T A B

**ESTE PROGRAMA FOI DESENVOLVIDO COMO PARTE DA TESE **
DE MESTRADO DO ENGENHEIRO NIRDMAR ALVES DE REZENDE,
**DEFENDIDA NA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - CRARY, Selden B., *Power System Stability*, John Wiley & Sons, Inc., 1954. v.1.

2 - SMITH, Otto J.M. &TAVORA, Carlos. Characterization of Equilibrium And Stability In Power System, Equilibrium Analysis of Power System, Stability Analysis of Power System, *IEEE Transactions on Power Apparatus And Systems.:* 1127-1144. 1971

3 - SMITH, Otto J.M., Notas de Aula da Cadeira DEL 884- ESTABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS, do Curso CESE-EFEI-2, Itajubá-MG, 1974.

4 - PENNINGTON, Ralph H. *Introductory Computer Methods and Numerical Analysis*, Collies - Mac Millan International Editions, s. ed. 1970.

5 - BROWN, Homer E. *Grandes Sistemas Elétricos-Métodos Matriciais.*[Soluction of Large Networks by Matrix Methods], tradução autorizada da edição em língua inglesa, publicada por John Wiley & Sons Inc., 1975.

6 - ANDERSON, P. M. & FOOD, A.A. *Power System Control and Stability*, The Iowa State University, Press. 1977.

7 - OGATA, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, Prentice - Hall, Inc. 1970.

8 - DORF, Richard C. *Modern Control Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., s. ed. 1974.

9 - DE MELLO, F.P. & CONCORDIA, C. Concepts of Synchronous Machines Stability as Affected By Excitation Control *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems.:* 316 - 329. v. PAS-88, nº, April 1969.

10 - KIMBARK, Edward Wilson. *Power System Stability:* Synchronous Machines, John Wiley & Sons, Inc. 1956.

11 - BYERLY, R.T.; SHERMAN D.E.;MC LAIN, D.K. Normal Modes And Shapes Applied To Dynamic Stability Analysis.*IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems.* v. 94, nº 2 March/April 1975.