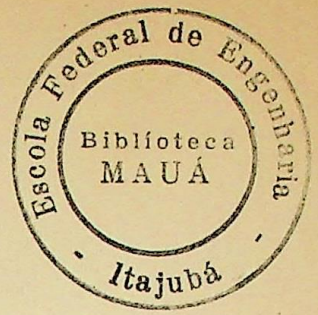


TESE

435

IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DE
ESTADO DO SISTEMA ELÉTRICO DE
POTÊNCIA RESPONSÁVEIS POR MODOS
DE INSTABILIDADE DINÂMICA

- NELSON GREBOGI -



IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DE
ESTADO DO SISTEMA ELÉTRICO DE
POTÊNCIA RESPONSÁVEIS POR MODOS
DE INSTABILIDADE DINÂMICA

- NELSON GREBOGI -

IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ESTADO DO SISTEMA
ELÉTRICO DE POTÊNCIA RESPONSÁVEIS POR MODOS
DE INSTABILIDADE DINÂMICA

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ESTADO DO SISTEMA
ELÉTRICO DE POTÊNCIA RESPONSÁVEIS POR MODOS
DE INSTABILIDADE DINÂMICA

NELSON GREBOGI

ITAJUBÁ - DEZEMBRO / 1983

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FÍSICA

EXERCÍCIOS

LISTA DE EXERCÍCIOS DE FÍSICA

Nome do Aluno: _____
Nº de Matrícula: _____
Data: _____

RESPOSTAS

QUESTÃO	RESPOSTA	NOTA
01	A	1,0
02	A	1,0
03	A	1,0

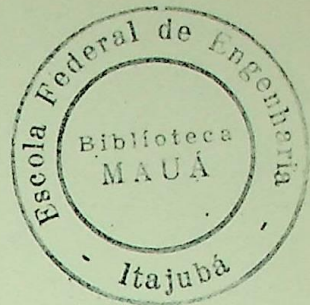
Nota Média: _____
Assinatura do Aluno: _____

Orientador

PROF. HÉLIO MOKARZEL



Ministério da Educação e Cultura
 ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ESTADO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA RESPONSÁVEIS POR MODOS DE INSTABILIDADE DINÂMICA"

Autor: NELSON GREBOGI

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	<i>[Assinatura]</i>
2º	A	<i>[Assinatura]</i>
3º	A	<i>[Assinatura]</i>

Resultado médio: Conceito A, ou seja Aprovado

Observações: _____

Itajubá, 05 de junho de 1985

[Assinatura]

1º Examinador

ENGº NELSON MARTINS - CEPEL

[Assinatura]

2º Examinador

PROF. CARLOS ALBERTO DIAS COELHO
 EFEI

[Assinatura]

3º Examinador

PROF. HÉLIO MOKARZEL - EFEI
 ORIENTADOR

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meu agradecimento à COPEL - Companhia Paranaense de Energia, através dos Eng^{os} Juracy Rezende Castro Andrade, Niromar Alves de Rezende, Francisco Roberto Borges Piccione, João Carlos Cascaes e Sêrgio Fanha Soares, pela indicação de meu nome para o Curso de Pós-Graduação e pelo apoio que recebi durante a realização deste trabalho, de maneira especial ao colega Nataniel Gomes de Oliveira pela colaboração prestada, ao Professor Hêlio Mokarzel pelo empenho e dedicação com que me orientou, às datilôgrafas Rosane Martins e Edna Maria Pereira e à desenhista Regina Maria da Silva Torquato pelo eficiente trabalho.

Aproveito a oportunidade para manifestar o meu reconhecimento pelo incentivo que sempre tenho recebido do meu irmão Celso.

À minha esposa
e aos meus pais

RESUMO

Os estudos elaborados com o intuito de verificar condições de estabilidade de sistemas elétricos de potência, tem sido conduzidos através da análise dos autovalores da matriz característica do sistema. Uma vez mostrada, por esta análise, a existência de instabilidade, uma informação importante para indicar quais as medidas corretivas eficazes, que deveriam ser tomadas para alterar a condição de estado do sistema, no sentido de levá-lo para um ponto de operação estável, é a identificação das variáveis de estado que mais influenciam os possíveis modos de instabilidade. Com a identificação destas variáveis de estado, fica imediata a associação destas com os componentes do sistema elétrico de potência.

ABSTRACT

The studies developed with the purpose of verifying stability in electric power systems have been conducted through the eigenvalue analysis of the system characteristic matrix. Since the arising of instability conditions have been detected by these analysis, an important information that helps to indicate which effectual corrective measures should be taken to modify the state of the system in order to lead it to a safe and stable operation, is the identification of the state variables that have major participation in the fastest growing modes. With this identification, the association of these state variables with the electric power system components is immediate.

S I M B O L O G I A

- x - Vetor das variáveis de estado
- A - Matriz característica do sistema
- λ - Autovalor da matriz característica
- y - Autovetor direito da matriz característica
- u^T - Autovetor esquerdo (transposto) da matriz característica
- δ_{ij} - Delta de Kronecker, no capítulo 1
Deslocamento angular entre as máquinas i e j , no capítulo 3
- C, T - Matrizes quadradas quaisquer
- Y - Matriz modal direita
- U - Matriz modal esquerda
- I - Matriz identidade
- Λ - Matriz diagonal formada pelos autovalores
- t - Tempo
- $\phi(t)$ - Matriz de transição
- P_{ki} - Fator de participação índice k, i
- P_F - Matriz dos fatores de participação

- V_t - Tensão terminal da máquina síncrona
- RAT - Regulador automático de tensão
- P - Potência ativa gerada
- Q - Potência reativa gerada
- R_e - Resistência externa
- X_e - Reatância externa
- V_∞ - Tensão na barra infinita
- E'_q - Tensão proporcional ao enlace de fluxo
- E_{FD} - Tensão no campo
- ω - Velocidade angular
- δ - Ângulo interno da máquina
- T_m - Torque mecânico aplicado à máquina
- K_1 a K_6 - Constantes de proporcionalidade da máquina
- T_j - Constante de tempo associada à inércia da máquina
- T'_{do} - Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto
- λ_q - Enlace de fluxo relativo ao eixo q
- λ_d - Enlace de fluxo relativo ao eixo d
- ω_R - Velocidade angular nominal
- H - Constante de inércia da máquina

- T_e - Torque elétrico fornecido pela máquina
- θ - Ângulo pelo qual a corrente está atrasada da tensão
- β - Ângulo entre a tensão terminal e a referência, no capítulo 2
- α - Ângulo entre a tensão na barra infinita e a referência
- R_m - Resistência da armadura
- X_q - Reatância síncrona de eixo em quadratura
- X_d - Reatância síncrona de eixo direto
- V_q - Componente de eixo em quadratura da tensão terminal
- V_d - Componente de eixo direto da tensão terminal
- I_q - Componente de eixo em quadratura da corrente terminal
- I_t - Corrente terminal da máquina
- I_d - Componente de eixo direto da corrente terminal
- I_r - Componente da corrente terminal em fase com a tensão terminal
- I_x - Componente da corrente terminal em quadratura com a tensão terminal
- E_{qa} - Tensão atrás da reatância em quadratura
- E - Tensão proporcional à corrente de campo, no capítulo 2
Tensão interna da máquina, no capítulo 3
- S - Potência aparente

- $V_{\infty r}$ - Componente da tensão na barra infinita em fase com a tensão terminal
- $V_{\infty x}$ - Componente da tensão na barra infinita em quadratura com a tensão terminal
- K_I - Constante calculada em função das reatâncias da máquina e da impedância externa
- X'_d - Reatância transitória de eixo direto
- K_R - Ganho do circuito de medição do regulador de tensão
- T_R - Constante de tempo do circuito de medição do regulador de tensão
- K_A - Ganho do amplificador
- T_A - Constante de tempo do amplificador
- K_F - Ganho da malha estabilizadora
- T_F - Constante de tempo da malha estabilizadora
- K_E - Constante da excitatriz relacionada à excitação própria do campo pró
- T_E - Constante de tempo da excitatriz
- S_E - Função de saturação da excitatriz
- V_{REF} - Tensão de referência do regulador de tensão
- V_1, V_3 - Tensões internas ao regulador de tensão
- V_R - Tensão na saída do regulador de tensão

- $V_{Rm\bar{x}}$ - Tensão máxima na saída do regulador de tensão
- $V_{Rm\bar{i}n}$ - Tensão mínima na saída do regulador de tensão
- α_t - Ângulo entre a tensão terminal e a referência, no capítulo 3
- P_m - Potência mecânica aplicada à máquina
- P_e - Potência elétrica fornecida pela máquina
- Y_L - Representação da carga por admitância
- P_L - Potência ativa da carga
- Q_L - Potência reativa da carga
- V - Tensão na barra de carga
- G - Matriz de condutância
- B - Matriz de susceptância
- P_s - Coeficiente de potência sincronizante
- A' - Matriz dos coeficientes das equações diferenciais do sistema multimáquinas
- O subscrito "o" refere-se a condições iniciais de operação
- O subscrito " Δ " refere-se a variações em torno do ponto de operação
- [n] indicação de referência bibliográfica

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1	
MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPAÇÃO	5
1.1 - Representação de modelos através do espaço de estado	5
1.2 - Autovalores e autovetores	7
1.3 - Transformação da matriz característica	11
1.4 - Definição da matriz dos fatores de participação	16
1.5 - Exemplo genérico de determinação da matriz dos fatores de participação	26
CAPÍTULO 2	
MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA À BARRA INFINITA	30
2.1 - Modelo da máquina síncrona	30
2.2 - Modelo do regulador de tensão	37
2.3 - Matriz característica do sistema	38
2.4 - Programa computacional para análise da matriz característica	43
2.5 - Casos estudados	47
2.6 - Conclusões sobre os casos estudados	60
CAPÍTULO 3	
ESTUDO DE UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS	83
3.1 - Representação da máquina síncrona	83
3.2 - Representação da rede	85
3.3 - Matriz característica do sistema	86
3.4 - Programação desenvolvida para a análise da estabilidade dinâmica do sistema	94

3.5 - Casos estudados	98
3.6 - Conclusões sobre os casos estudados	114
CAPÍTULO 4	
CONCLUSÕES	124
REFERÊNCIAS	127
ANEXO 1	
Listagem do programa para análise da máquina síncrona conectada à barra infinita	129
ANEXO 2	
Listagem da programação desenvolvida para a análise do sistema multimáquinas	135

INTRODUÇÃO

I N T R O D U Ç Ã O

O desenvolvimento tecnológico da humanidade tem sido acompanhado por um constante aumento das necessidades de energia, notadamente da energia elétrica. Em razão disto, os sistemas elétricos de potência tem evoluído em tamanho e complexidade. A interconexão de sistemas menores para formar os grandes sistemas interligados, tem sido uma prática empregada para se obter um melhor aproveitamento energético global, com a exploração das características distintas de cada região, através da transferência de grandes blocos de energia entre áreas.

Uma das características mais importantes do suprimento de energia elétrica aos consumidores é a continuidade do fornecimento. Em consequência, a maior preocupação dos responsáveis por este importante serviço público é a de manter esta continuidade, através de um sistema o mais confiável possível, dentro da capacidade de investimento disponível.

Em razão desta preocupação estão sendo constantemente desenvolvidos inúmeros estudos de análise do desempenho do sistema elétrico de potência, frente às mais variadas condições, seja na fase de planejamento da expansão do sistema, ou na fase de planejamento da operação. Uma das partes destes estudos diz respeito à verificação da estabilidade dinâmica do sistema, que está associada à condição de estado (ponto de operação) e à configuração do sistema elétrico de potência. Estas análises visam principalmente a detecção de configurações e/ou condições de carregamento do sistema, que podem torná-lo dinamicamente instável.

Na análise destas questões, entre os caminhos a serem se-

guidos, destacam-se: os estudos feitos através da simulação do sistema com a obtenção da resposta no tempo, frente a pequenas perturbações e, mais recentemente, considerando o sistema representado por um modelo linearizado em torno do ponto de operação, passou-se a verificar a condição de estabilidade dinâmica, através da análise dos coeficientes da equação característica do sistema, ou por meio da determinação e análise dos autovalores da matriz característica, já que a resposta livre de um sistema é dada pelos autovalores da matriz característica.

Neste último enfoque, denominado de análise modal, apesar de ficar numericamente determinada a existência de instabilidade dinâmica no sistema, com o aparecimento de autovalores com parte real positiva, falta ainda a informação complementar sobre quais os componentes do sistema são mais responsáveis pelo aparecimento destes autovalores.

O desenvolvimento de uma metodologia para relacionar os autovalores do sistema (modos) com as variáveis de estado deste, vem complementar a análise modal da maneira como vem sendo feita. O presente trabalho objetiva exatamente mostrar este relacionamento entre as variáveis de estado e os modos do sistema, através da indicação da influência relativa que determinado modo experimentalmente de todas as variáveis de estado do sistema.

Uma vez estabelecido este relacionamento passa-se a conhecer as variáveis de estado que mais influenciam possíveis modos de instabilidade dinâmica. Por sua vez, estas variáveis de estado, ao estarem associadas a componentes do sistema, passam a fornecer subsídios para a escolha adequada de medidas corretivas eficazes, que façam o sistema retornar a uma condição estável.

O relacionamento entre os modos do sistema e as variáveis de estado deste é obtido em função dos autovetores direito e esquerdo referentes ao modo sob análise, que dão origem aos fatores de participação, estes por sua vez, medem a influência relativa de todas as variáveis de estado no modo sob consideração. No primeiro capítulo do trabalho é feita uma análise da matriz característica do sistema, com a definição de seus valores e vetores próprios (autovalores e autovetores) e, principalmente, é mostrada a obtenção dos fatores de participação a partir da matriz característica.

Uma aplicação desta metodologia é o assunto tratado no segundo capítulo, onde são experimentadas várias condições de operação de uma máquina síncrona, com regulador de tensão, conectada à barra infinita através de uma impedância externa. Já no terceiro capítulo é estudado um sistema que representa parte do Sistema Interligado Sul-Sudeste Brasileiro. Desta feita as máquinas síncronas são representadas pelo modelo clássico, ou seja, tensão interna constante atrás da reatância transitória.

Nas duas aplicações estudadas o objetivo é verificar as condições de estabilidade dinâmica. No caso de haver instabilidade procede-se a adoção de medidas corretivas, que são orientadas pela influência relativa das variáveis de estado nos modos de instabilidade dinâmica, indicada pelos fatores de participação. Como a estabilidade dinâmica está ligada ao desempenho do sistema elétrico frente às chamadas pequenas perturbações, considerou-se válida a linearização dos modelos em torno do ponto de operação.

Os fatores de participação permitem não apenas associar os

modos de instabilidade às variáveis de estado que mais os influenciam, como também fazer um acompanhamento de como variam os vários modos do sistema em função da alteração de parâmetros dos seus componentes, ou da mudança do estado em que se encontra o sistema.

CAPÍTULO 1

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPAÇÃO

Considerando os sistemas de qual se deseja analisar a estabilidade dinâmica, neste capítulo será apresentada a representação gráfica através de diagramas no espaço de estados. Após definir a matriz característica do sistema, proceder-se-á a uma análise de estabilidade a ser realizada nos polos da matriz dos fatores de participação. O capítulo é dividido em duas partes: a primeira trata dos elementos de matriz.

1.1 - Representação de sistemas através de diagramas de espaço de estados

Os sistemas dinâmicos são descritos por equações diferenciais de ordem superior. A representação de espaço de estados é uma forma compacta de descrever a dinâmica de um sistema. Ela é baseada na ideia de que o estado de um sistema em um determinado instante de tempo pode ser descrito por um vetor de estado. A evolução temporal desse estado é governada por equações diferenciais de primeira ordem. A matriz dos fatores de participação é uma matriz quadrada formada pelos autovalores e autovetores da matriz dos coeficientes do sistema. Ela fornece informações importantes sobre a estabilidade e o comportamento dinâmico do sistema. A análise de estabilidade é realizada verificando se os polos do sistema (raízes da equação característica) possuem parte real negativa. Se todos os polos tiverem parte real negativa, o sistema é estável. Caso contrário, o sistema é instável. A matriz dos fatores de participação também é utilizada para determinar o tempo de acomodação e o tempo de subida do sistema.

CAPÍTULO 1

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPAÇÃO

Considerando um sistema do qual se deseja verificar a estabilidade dinâmica, neste capítulo será mostrada a sua representação genérica através de equações no espaço de estado. Após definida a matriz característica do sistema, proceder-se-á a uma análise da mesma, que culminará com a definição da matriz dos fatores de participação. O capítulo é finalizado com a apresentação de um exemplo genérico.

1.1- Representação de modelos através do espaço de estado

O sistema elétrico de potência está constantemente sofrendo pequenas alterações na sua condição de estado, a todo instante estão sendo conectadas novas cargas, enquanto que outras são retiradas. Em função disto, o montante de geração do sistema está sendo continuamente ajustado à carga. O controle de tensão também é afetado com a mudança da carga e influencia a condição de estado do sistema. As alterações de maior porte no estado do sistema, ocorrem em decorrência de faltas: curto circuito e/ou saída de operação de componentes, perda de grandes blocos de carga e/ou geração.

O desempenho dinâmico que o sistema elétrico de potência apresenta, ao passar de uma condição de estado para outra, pode ser descrito por um conjunto de equações diferenciais, que descrevem o comportamento dos vários elementos que compõem o sistema. Assim, existem equações diferenciais para descrever, por exemplo, a dinâmica das máquinas síncronas e

o comportamento dos reguladores de tensão e velocidade. Estes componentes somente poderiam ser representados fielmente, através de equações diferenciais não lineares.

No entanto, como interessa verificar o comportamento do sistema frente a pequenas perturbações (por exemplo, pequenas alterações da carga), quando se admite que o novo estado é bastante próximo do anterior, a ponto de permitir que se considere o sistema como tendo comportamento linear em torno do estado em que se encontra, todas as equações que formam o modelo matemático, que descreve o sistema, podem ser linearizadas em torno do ponto de operação, inclusive as equações diferenciais. Desta maneira, o modelo do sistema poderá ser analisado através dos procedimentos existentes para sistemas lineares.

Assim, considerar-se-á que a representação do sistema elétrico de potência poderá ser reduzida a um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem. Como pretende-se conhecer a resposta natural, os termos forçantes são desprezados, ficando as equações do sistema genericamente representadas, na forma de espaço de estado, pela seguinte equação:

$$\dot{x} = Ax \quad (1-1)$$

onde: x - é um vetor contendo as n variáveis de estado

A - é uma matriz de ordem $n \times n$ contendo os coeficientes das n equações diferenciais

A equação (1-1) pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1i} x_i + \dots + a_{1n} x_n \\
 \dot{x}_2 &= a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2i} x_i + \dots + a_{2n} x_n \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_i &= a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + \dots + a_{ii} x_i + \dots + a_{in} x_n \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_n &= a_{n1} x_1 + a_{n2} x_2 + \dots + a_{ni} x_i + \dots + a_{nn} x_n
 \end{aligned} \tag{1-1e}$$

Nesta forma (1-1e) ficam perfeitamente identificadas as n variáveis de estado e os coeficientes das equações diferenciais.

A matriz A, dos coeficientes, é denominada matriz característica do sistema, os seus elementos são formados em função dos parâmetros dos componentes do sistema elétrico e do estado em que se encontra este sistema (ponto de operação).

No decorrer do trabalho serão mostradas as formas particulares que assumirá a equação (1-1), quando se referir à verificação de estabilidade da máquina conectada à barra infinita, no segundo capítulo - equação (2-20), e do sistema, no terceiro capítulo - equação (3-26).

1.2- Autovalores e autovetores

Uma vez caracterizado o sistema através da equação (1-1), passar-se-á a fazer uma análise da matriz característica A, quando serão definidos os seus autovalores e autovetores, bem como apresentadas algumas de suas características.

1.2.1- Com a matriz característica A já estabelecida, a de finição de um dos autovetores direitos de A , juntamen te com o seu respectivo autovalor $\bar{\lambda}$ é dada pela seguin te expressão [4,7]:

$$Ay = \lambda y \quad (y \neq 0) \quad (1-2)$$

onde: A - $\bar{\lambda}$ é a matriz característica do sistema de ordem $n \times n$

λ - $\bar{\lambda}$ é um escalar, que $\bar{\lambda}$ é definido como sendo au- tovalor de A

y - \bar{y} é um vetor de ordem n , que \bar{y} é definido como sendo autovetor direito de A . Deve-se ressaltar que somente são válidos os vetores y diferentes de zero.

A partir da equação (1-2) pode-se escrever:

$$Ay - \lambda y = (A - \lambda I) y = 0 \quad (1-3)$$

A equação (1-3) representa um sistema de equações lineares homogêneas, que somente terá solução não tri vial ($y \neq 0$), se a classe da matriz $(A - \lambda I)$ for inferior \bar{a} sua dimensão, o que implica dizer que $(A - \lambda I)$ deve ser singular [7], ou seja:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (1-4)$$

O determinante indicado na equação (1-4), uma vez de se envolvido, resultará num polinômio de grau n em λ . A equação (1-4) assim obtida é denominada equação ca- racterística da matriz A , e por extensão do sistema que A representa, as suas raízes são os autovalores

de A conforme foi definido em (1-2).

- 1.2.2- De forma análoga a que se definiram os autovetores direitos, pode-se definir os autovetores esquerdos [1, 2,3], através da expressão:

$$u^T A = \lambda u^T \quad (u \neq 0) \quad (1-5)$$

onde: A e λ já foram definidos anteriormente.

u^T - é um vetor (transposto) de ordem n , que é definido como sendo autovetor esquerdo de A. Aqui também somente são válidos os vetores u diferentes de zero.

- 1.2.3- A interpretação que se dá aos autovalores e autovetores pode ser descrita da seguinte maneira: ao se considerar A como uma matriz de transformação, os autovetores (casos particulares de todos possíveis vetores) ao serem transformados por A, resultam em vetores de mesma direção, somente com a amplitude alterada pelo escalar λ (autovalor) correspondente. Ou seja, um autovetor (esquerdo ou direito) ao ser transformado pela matriz A mantém a sua direção, altera-se apenas o seu módulo. Como esta transformação pode se dar pela esquerda ou pela direita, resultam os autovetores direito e esquerdo respectivamente.

- 1.2.4- A cada autovalor estará relacionado um autovetor direito e um autovetor esquerdo, sendo que a matriz característica A de ordem $n \times n$ possuirá n autovalores (autovetores direitos e esquerdos).

No caso particular do problema que está sendo estudado, qual seja a verificação das condições de estabilidade de um sistema elétrico de potência, no qual todos os seus componentes são distintos (com parâmetros distintos), além do que operando em condições também diferentes, admitir-se-á que a matriz característica do sistema resultará por possuir todos os seus autovalores distintos. Por consequência, também serão distintos os seus autovetores, que, além disso, serão linearmente independentes [4,7]:

1.2.5- Pode-se dizer que cada conjunto formado por um autovalor e seus correspondentes autovetores direito e esquerdo (λ, y, u) , define um modo natural da matriz característica A e portanto do sistema que A representa.

1.2.6- Qualquer autovetor direito (esquerdo) de A é ortogonal a qualquer autovetor esquerdo (direito) desta mesma matriz A , exceto ao seu par correspondente [1,7], ou seja:

$$u_i^T y_j = 0 \quad \text{para } i \neq j$$

$$u_i^T y_j \neq 0 \quad \text{para } i = j$$

Desta maneira os autovetores podem ser normalizados de tal forma que $u_i^T y_i = 1$, ficando válida a expressão:

$$u_i^T y_j = \delta_{ij} \quad \text{para } i, j = 1, n \quad (1-6)$$

onde: δ_{ij} - é o delta de Kronecker

$$\delta_{ij} = 0 \quad \text{para } i \neq j$$

$$\delta_{ij} = 1 \quad \text{para } i=j$$

u, y - são os autovetores esquerdo e direito já normalizados

1.3- Transformação da matriz característica

A matriz característica A pode ser transformada por operadores lineares. Um caso particular é a transformação de semelhança, definida pela expressão [4,7]:

$$C = T^{-1}AT \quad (1-7)$$

onde: T - é uma matriz de ordem $n \times n$, não singular

C - é a matriz transformada semelhante à original A

Os autovalores da matriz transformada C são os mesmos da matriz original A , ou seja, a transformação de semelhança definida em (1-7) tem a propriedade de conservar inalterados os autovalores. Esta característica será empregada mais tarde, para transformar a matriz característica do sistema para uma forma especial.

1.3.1- A matriz formada pelos n autovetores direitos da matriz característica A é denominada de matriz modal direita.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & & y_{1i} & & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & & y_{2i} & & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \dots & y_{ii} & \dots & y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & & y_{ni} & & y_{nn} \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

1.3.2- De maneira análoga, define-se a matriz modal esquerda, formada pelos n autovetores esquerdos:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1i} & \dots & u_{1n} \\ \hline u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2i} & \dots & u_{2n} \\ \hline & & & \vdots & & \\ \hline u_{i1} & u_{i2} & \dots & u_{ii} & \dots & u_{in} \\ \hline & & & \vdots & & \\ \hline u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{ni} & \dots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

1.3.3- Considerando que os autovetores tenham sido normalizados conforme (1-6), pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} u_1^T \\ \hline u_2^T \\ \hline \vdots \\ \hline u_i^T \\ \hline \vdots \\ \hline u_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} | & | & & | & | \\ y_1 & y_2 & \dots & y_i & \dots & y_n \\ | & | & & | & | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

ou seja:

$$UY = I \quad (1-10)$$

onde: I - é a matriz identidade

A equação (1-10) implica dizer que as matrizes U e Y , formadas segundo (1-9) e (1-8) respectivamente, são inversas entre si:

$$U = Y^{-1} \quad e \quad Y = U^{-1} \quad (1-11)$$

1.3.4- O conjunto dos n autovetores diretos, que formam a matriz modal direita, por serem estes linearmente independentes, pode ser considerado como uma base do espaço vetorial de dimensão n .

Desta forma, qualquer vetor x , de ordem n , pode ser expresso nesta nova base como:

$$x = \sum_{i=1}^n x_{Ti} y_i = Yx_T \quad (1-12)$$

onde: x_T - é o vetor transformado, de ordem n .

Y - é a matriz modal direita

A partir de (1-12) pode-se explicitar as novas variáveis em função das antigas:

$$Y^{-1} x = Y^{-1} Y x_T$$

$$x_T = Y^{-1} x$$

ou então, considerando (1-11)

$$x_T = Ux \quad (1-13)$$

reescrevendo (1-13) de forma expandida:

$$\begin{bmatrix} x_{T1} \\ x_{T2} \\ \vdots \\ x_{Ti} \\ \vdots \\ x_{Tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^T \\ \text{-----} \\ u_2^T \\ \text{-----} \\ \vdots \\ \text{-----} \\ u_i^T \\ \text{-----} \\ \vdots \\ \text{-----} \\ u_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (1-13e)$$

A partir da equação (1-13e), pode-se facilmente escrever que o i -ésimo elemento do vetor transformado x_T é definido pela expressão:

$$x_{Ti} = u_i^T x \quad (1-14)$$

1.3.5- Ao se fazer a transformação de semelhança da matriz característica A , conforme ficou definido em (1-7),

considerando como operador da transformação a matriz modal direita, a matriz semelhante resultante assume a forma particular de uma matriz diagonal, diz-se que esta matriz está na forma canônica diagonal [4]. Facilmente se verifica que os elementos da diagonal desta matriz são seus próprios autovalores, que são os mesmos da matriz original:

$$\Lambda = Y^{-1} AY = UAY \quad (1-15)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_i & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} = \text{diag}\{\lambda_i\}_1^n \quad (1-16)$$

Assim, ao considerar-se a transformação de coordenada mostrada em (1-12), na equação (1-1) que define o sistema, resultará:

$$\dot{x} = Ax$$

$$Y\dot{x}_T = AYx_T$$

$$\dot{x}_T = Y^{-1}AYx_T$$

$$\dot{x}_T = UAYx_T$$

$$\dot{x}_T = \Lambda x_T \quad (1-17)$$

O sistema original (1-1), ao ser expresso na nova base (1-17), fica decomposto em n sub-sistemas de 1ª ordem desacoplados:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{T1} \\ \dot{x}_{T2} \\ \vdots \\ \dot{x}_{Ti} \\ \vdots \\ \dot{x}_{Tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_i & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{T1} \\ x_{T2} \\ \vdots \\ x_{Ti} \\ \vdots \\ x_{Tn} \end{bmatrix} \quad (1-17e)$$

ou seja:

$$\dot{x}_{Ti} = \lambda_i x_{Ti} \quad \text{para} \quad i = 1, n \quad (1-18)$$

1.4- Definição da matriz dos fatores de participação

A solução no tempo do conjunto de equações diferenciais (1-1) ($\dot{x} = Ax$) será obtida através do desenvolvimento do vetor de estado em série de Maclaurin, visto que o sistema é considerado não perturbado, a solução a ser obtida será a resposta livre [4]:

$$x(t) = x(0) + \dot{x}(0)t + \ddot{x}(0) \frac{t^2}{2!} + \dots + \frac{(i)}{x} (0) \frac{t^i}{i!} + \dots$$

$$x(t) = \left(I + tA + \frac{t^2}{2!} A^2 + \dots + \frac{t^i}{i!} A^i + \dots \right) x(0)$$

(1-19)

considerando que:

$$e^{At} = I + tA + \frac{t^2}{2!} A^2 + \dots + \frac{t^i}{i!} A^i + \dots$$

a equação (1-19) poderá ser reescrita:

$$x(t) = e^{At} x(0) \quad (1-20)$$

onde $x(0)$ é o vetor de condições iniciais dado por:

$$x(0) = [x_1(0) \quad x_2(0) \quad \dots \quad x_i(0) \quad \dots \quad x_n(0)]^T$$

Definindo a matriz de transição $\phi_A(t)$ pela seguinte relação [4]:

$$\phi_A(t) = e^{At} \quad (1-21)$$

a solução no tempo de (1-1) passa a ser:

$$x(t) = \phi_A(t) x(0) \quad (1-22)$$

O objetivo agora será obter uma maneira de relacionar as variáveis de estado com os modos do sistema, através da verificção da influência relativa que as variáveis de estado exercem nos modos.

1.4.1- Considerando que a matriz característica A tenha sido diagonalizada por uma transformação de semelhança, conforme ficou definido por (1-15), a matriz resultante Λ terá a sua matriz de transição correspondente $\phi_\Lambda(t)$ dada por:

$$\phi_\Lambda(t) = \text{diag} \{ e^{\lambda_i t} \}_1^n \quad (1-23)$$

Aplicando a matriz $\phi_\Lambda(t)$ a transformação de coordenadas inversa da indicada em (1-15), resultará:

$$Y\phi_{\Lambda}(t)Y^{-1} = Y\phi_{\Lambda}U = \phi_A(t) \quad (1-24)$$

Através de (1-24) fica relacionada a matriz de transição original \bar{a} matriz de transição transformada, que é diagonal (1-23) e portanto é uma representação bem mais simples do sistema. Desta forma a equação (1-22) poderá ser escrita em função de $\phi_{\Lambda}(t)$:

$$x(t) = Y\phi_{\Lambda}(t)Ux(0) \quad (1-25)$$

1.4.2- A partir da relação (1-13) pode-se escrever que:

$$Ux(0) = x_T(0)$$

E a equação (1-25) passa a ser escrita:

$$x(t) = Y\phi_{\Lambda}(t)x_T(0) \quad (1-26)$$

Esta mesma equação escrita de forma expandida fica:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_i(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1i} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2i} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ii} & \cdots & y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{ni} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 t} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{\lambda_i t} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & e^{\lambda_n t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{T1}(0) \\ x_{T2}(0) \\ \vdots \\ x_{Ti}(0) \\ \vdots \\ x_{Tn}(0) \end{bmatrix}$$

(1-26e)

Visto que \bar{e} é de interesse analisar a influência das variáveis de estado no i -ésimo modo, far-se-á com que o vetor de condições iniciais $x_T(0)$, seja tal que:

$$\begin{aligned} x_{Ti}(0) &= 1 \\ x_{Tj}(0) &= 0 \quad \text{para} \begin{cases} j = 1, n \\ j \neq i \end{cases} \end{aligned} \quad (1-27)$$

Desta maneira, apenas o i -ésimo modo de (1-26) será excitado, que \bar{e} exatamente aquele que interessa ser analisado.

Ao aplicar-se o disposto em (1-27), a equação (1-26) ficará:

$$x(t) = Y \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ e^{\lambda_i t} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-28)$$

ou, reescrevendo esta equação na forma expandida:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_i(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1i} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2i} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ii} & \cdots & y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{ni} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ e^{\lambda_i t} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-28e)$$

realizando a última operação indicada, resulta:

$$x(t) = y_i e^{\lambda_i t} \quad (1-29)$$

ou, na forma expandida:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_i(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1i} e^{\lambda_i t} \\ y_{2i} e^{\lambda_i t} \\ \vdots \\ y_{ii} e^{\lambda_i t} \\ \vdots \\ y_{ni} e^{\lambda_i t} \end{bmatrix} \quad (1-29e)$$

Prē-multiplicando ambos os membros de (1-29) pela matriz modal esquerda U , de tal forma que o vetor $x(t)$ tambēem seja transformado de base para $x_T(t)$, como o foi o vetor de condiçōes iniciais $x(0)$, resultarā o seguinte:

$$U x(t) = U y_i e^{\lambda_i t}$$

porē, levando em conta (1-13):

$$x_T(t) = U y_i e^{\lambda_i t} \quad (1-30)$$

Como os autovetores que compōe a matriz modal esquerda sōo ortogonais aos autovetores direitos, exceto os pares correspondentes, todos os elementos de $x_T(t)$, a menos de $x_{Ti}(t)$, serāo nulos. Da equaçāo (1-30) resultarā apenas o seguinte:

$$u_i^T x(t) = u_i^T y_i e^{\lambda_i t}$$

que, por meio de (1-14) resulta:

$$x_{Ti}(t) = u_i^T y_i e^{\lambda_i t} \quad (1-31)$$

ou seja:

$$x_{Ti}(t) = \sum_{k=1}^n (u_{ik} y_{ki}) e^{\lambda_i t} \quad (1-32)$$

onde: u_{ik} - é o k -ésimo elemento do autovetor esquerdo referente ao i -ésimo modo

y_{ki} - é o k -ésimo elemento do autovetor direito referente ao i -ésimo modo

A equação (1-32) pode ser reescrita na forma expandida:

$$x_{Ti}(t) = u_{i1} y_{1i} e^{\lambda_i t} + u_{i2} y_{2i} e^{\lambda_i t} + \dots \\ + u_{ij} y_{ji} e^{\lambda_i t} + \dots + u_{in} y_{ni} e^{\lambda_i t}$$

$$x_{Ti}(t) = (u_{i1} y_{1i} + u_{i2} y_{2i} + \dots + u_{ij} y_{ji} + \dots \\ + u_{in} y_{ni}) e^{\lambda_i t} \quad (1-32e)$$

levando em consideração (1-6), verifica-se que a equação (1-31) também significa:

$$x_{Ti}(t) = e^{\lambda_i t} \quad (1-33)$$

Nas várias parcelas apresentadas pela equação (1-32) e (1-32e) aparecem os fatores $u_{ik} y_{ki}$, que podem ser entendidos como uma medida da influência relativa da variável de estado x_k , no modo definido por λ_i e ora considerado. Deve ser lembrado que os k -ésimos elementos, u_{ik} e y_{ki} , dos autovetores esquerdo e direito respectivamente, relacionados ao modo definido por λ_i , referem-se à matriz característica A dos coefi-

cientes das variáveis de estado originais x .

As grandezas determinadas por u_{ik} y_{ki} serão denominadas fatores de participação, ficando definidas pela seguinte equação [1,2,3]:

$$p_{ki} \triangleq u_{ik} y_{ki} \quad \text{para} \quad k = 1, n \quad (1-34)$$

O fator de participação p_{ki} mede a influência relativa da variável de estado x_k no i -ésimo modo.

A equação (1-34), ao ser variado o k de 1 até n , dará origem a um vetor de ordem n , que informará a participação relativa de todas as variáveis de estado no i -ésimo modo.

1.4.3- A formulação apresentada até aqui, poderá ser generalizada para todos os n modos do sistema, para tanto, nas equações de (1-26) a (1-34) deverá ser feito variar o índice i de 1 até n . Com isto, ter-se-á obtido a influência relativa de todas as variáveis de estado em todos os modos do sistema, ficando assim definida a formação da matriz dos fatores de participação P_F [1,2,3]:

$$P_F \triangleq \{p_{ki}\} \quad (1-35)$$

onde: $p_{ki} = u_{ik} y_{ki}$

$i, k = 1, n$

ou, na forma expandida:

$$P_F = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1i} & \dots & p_{1k} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2i} & \dots & p_{2k} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \dots & p_{ii} & \dots & p_{ik} & \dots & p_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{k1} & p_{k2} & \dots & p_{ki} & \dots & p_{kk} & \dots & p_{kn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{ni} & \dots & p_{nk} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

(1-35e)

1.4.4- Dado que o conjunto de autovetores u_i^T e y_i formam as matrizes modais esquerda e direita U e Y e que estas, desde que os autovetores tenham sido normalizados segundo (1-6), são inversas entre si ($U = Y^{-1}$), resulta que a matriz dos fatores de participação apresenta a propriedade de ter a soma dos elementos de suas linhas e colunas sempre igual à unidade:

$$\sum_{k=1}^n p_{ki} = 1 \quad \text{para } i = 1, n \quad (1-36)$$

$$\sum_{i=1}^n p_{ki} = 1 \quad \text{para } k = 1, n \quad (1-37)$$

Anteriormente foi introduzido o conceito de que os fatores de participação representam a influência relativa das n variáveis de estado x_k no i -ésimo modo

(1-34). Agora, em função do que foi exposto em (1-36) e (1-37), verifica-se que os fatores de participação também representam a influência relativa da variável de estado x_k em todos os modos do sistema (λ_i , com $i = 1, n$).

Assim, a matriz P_F dos fatores de participação terá os elementos de suas colunas, representando a influência relativa de todas as variáveis de estado, no modo sob consideração. Já, os elementos das linhas da matriz P_F , estarão representando a influência relativa da variável de estado sob consideração, em todos os modos do sistema.

1.4.5- Uma vez determinada a matriz P_F , fica imediatamente estabelecida a relação entre os modos do sistema e as variáveis de estado deste. Nos estudos de verificação de condições de estabilidade de um sistema elétrico de potência, através da matriz P_F dos fatores de participação ficariam determinadas quais as variáveis de estado, que mais influenciam possíveis modos de instabilidade dinâmica.

Deve ser ressaltado que não é necessária a determinação global da matriz P_F , podendo ser determinadas apenas as colunas de P_F que se referirem a modos que se deseje analisar.

1.5- Exemplo genérico de determinação da matriz dos fatores de participação

Com o objetivo de exemplificar numericamente a determinação da matriz dos fatores de participação, será utilizado o sistema qualquer de equações diferenciais de 1ª ordem, dado a seguir:

$$\frac{dx_1}{dt} = -32x_1 + 20x_2 + 3x_3 + 4x_4 \quad (1-38.1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = 24x_1 - 40x_2 + 8x_3 + 3x_4 \quad (1-38.2)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = 7x_1 + 10x_2 - 42x_3 + 20x_4 \quad (1-38.3)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = 4x_1 + 5x_2 + 25x_3 - 39x_4 \quad (1-38.4)$$

1.5.1- O sistema de equações dado por (1-38) pode ser escrito na forma genérica $\dot{x} = Ax$ (1-1), ficando facilmente identificados o vetor das variáveis de estado x e a matriz característica A :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -32 & 20 & 3 & 4 \\ 24 & -40 & 8 & 3 \\ 7 & 10 & -42 & 20 \\ 4 & 5 & 25 & -39 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (1-39)$$

1.5.2- Da equação (1-39) e em função do disposto em (1-4), obtem-se a equação característica do sistema:

$$\lambda^4 + 153\lambda^3 + 7638\lambda^2 + 131925\lambda + 487175 = 0 \quad (1-40)$$

De sua solução resultam os autovalores da matriz característica, que estão relacionados a seguir:

$$\lambda_1 = -5,0000$$

$$\lambda_2 = -26,4668$$

$$\lambda_3 = -57,4238$$

$$\lambda_4 = -64,1094$$

Ao serem analisados os autovalores, verifica-se que o sistema representado por (1-39) tem comportamento estável, visto que seus autovalores são todos reais e negativos. No entanto, pode ser de interesse saber quais as variáveis de estado, que mais influenciam o autovalor negativo com menor valor absoluto, no caso $\lambda_1 = -5,0$, ou mesmo, pode interessar o conhecimento da influência relativa de todas as variáveis de estado em todos os autovalores do sistema. Isto será obtido com a determinação da matriz dos fatores de participação.

1.5.3- Inicialmente, determinam-se os autovetores direitos através de (1-2) e os autovetores esquerdos através de (1-5). O passo seguinte consiste em normalizar estes dois conjuntos de vetores, de forma a atender o

que ficou estabelecido em (1-6). Pode-se então formar as matrizes modais direita Y e esquerda U , que são mostradas a seguir:

$$Y = \begin{bmatrix} 1,0000 & -0,6270 & 1,8342 & -0,4421 \\ 1,0000 & -0,4780 & -2,4506 & 0,6699 \\ 1,0000 & 0,6973 & -0,5403 & -1,0676 \\ 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} 0,3263 & 0,2739 & 0,2123 & 0,1875 \\ -0,4411 & -0,2627 & 0,3496 & 0,3542 \\ 0,1968 & -0,1949 & -0,1061 & 0,1042 \\ -0,0820 & 0,1836 & -0,4558 & 0,3542 \end{bmatrix}$$

Finalmente, pode-se calcular a matriz dos fatores de participação P_F através das relações (1-34) e (1-35):

$$P_F = \begin{bmatrix} 0,3263 & 0,2765 & 0,3609 & 0,0363 \\ 0,2739 & 0,1256 & 0,4775 & 0,1230 \\ 0,2123 & 0,2437 & 0,0573 & 0,4866 \\ 0,1875 & 0,3542 & 0,1042 & 0,3541 \end{bmatrix} \quad (1-41)$$

Da maneira como foi definida a matriz dos fatores de participação, as colunas de (1-41) referem-se aos modos do sistema, enquanto que suas linhas referem-se às variáveis de estado.

1.5.4- Pela análise da matriz P_F (1-41) verifica-se que o primeiro autovalor ($\lambda_1 = -5,000$), sofre influência relativa mais acentuada da variável de estado x_1 ($p_{11} = 0,3263$), diminuindo de importância, pela sequência, a influência das demais variáveis de estado x_2 , x_3 e x_4 . Comportamento semelhante é apresentado pelo segundo autovalor ($\lambda_2 = -26,4668$), no qual a variável de estado que mais o influencia é x_4 ($p_{42} = 0,3542$), diminuindo de importância para x_1 , x_3 e x_2 , respectivamente.

Já para o terceiro autovalor ($\lambda_3 = -57,4238$), observa-se que duas variáveis de estado x_2 e x_1 apresentam uma influência relativa apreciável ($p_{23} = 0,4775$ e $p_{13} = 0,3609$, respectivamente), enquanto que uma terceira x_4 apresenta uma pequena influência relativa ($p_{43} = 0,1042$) e por último a variável de estado x_3 tem influência relativa quase desprezível neste autovalor ($p_{33} = 0,0573$). O quarto autovalor ($\lambda_4 = -64,1094$), como pode-se ver pela quarta coluna da matriz dos fatores de participação, é influenciado pelas variáveis de estado de maneira parecida à do terceiro autovalor.

CAPÍTULO 2

MAQUINA SINCRONA CONECTADA A CARGA INFINITA

A máquina com condições de estabilidade de uma máquina síncrona conectada a carga infinita é analisada em este capítulo. A máquina é considerada sob condições de tensão, sendo representada por uma fonte de tensão e uma carga infinita representada por uma impedância constante de valor Z_{inf} .

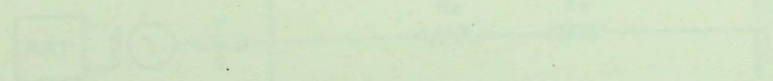
É que se pretende verificar sob as condições de uma máquina síncrona a influência da carga infinita na máquina síncrona, conforme se analisou anteriormente. A função deste capítulo é analisar a máquina síncrona conectada a uma carga infinita.

CAPÍTULO 2

2.1 - ANÁLISE DE ESTADO ESTACIONÁRIO

A máquina síncrona é analisada sob condições de estado estacionário sob condições de uma máquina síncrona, conforme se analisou anteriormente. A função deste capítulo é analisar a máquina síncrona conectada a uma carga infinita.

(2-1)



Este capítulo analisa a máquina síncrona conectada a uma carga infinita. A função deste capítulo é analisar a máquina síncrona conectada a uma carga infinita.

CAPÍTULO 2

MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA À BARRA INFINITA

A análise das condições de estabilidade de uma máquina síncrona conectada à barra infinita é o assunto a ser tratado neste segundo capítulo. A máquina é considerada com regulação de tensão, sendo representada pelo modelo originalmente desenvolvido por Heffron e Phillips, enquanto que o regulador de tensão empregado é aquele representado pelo modelo tipo 1 do IEEE.

O que se pretende verificar são as condições de estabilidade dinâmica da máquina síncrona, ou seja, frente a pequenas perturbações, conforme já ficou estabelecido anteriormente. Em função disto, os modelos da máquina e do regulador de tensão são considerados linearizados em torno do ponto de operação.

2.1- Modelo da máquina síncrona

A máquina síncrona é considerada operando conectada à barra infinita, através de uma impedância externa, conforme está esquematizado no diagrama unifilar simplificado da figura (2-1).

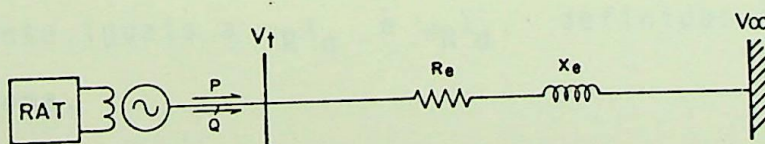


FIGURA (2-1) - MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA À BARRA INFINITA.

O modelo linear simplificado da máquina síncrona, operando conforme o diagrama unifilar da figura (2-1), é obtido através da análise das equações da máquina frente a pequenas perturbações. Este modelo foi primeiramente desenvolvido por Heffron e Phillips [5], resultando no diagrama de blocos da figura (2-2) e no conjunto de equações mostrado a seguir:

$$\dot{E}'_{q\Delta} = - \frac{1}{K_3 T'_{do}} E'_{q\Delta} - \frac{K_4}{T'_{do}} \delta_{\Delta} + \frac{1}{T'_{do}} E_{FD\Delta} \quad (2-1)$$

$$\dot{\omega}_{\Delta} = - \frac{K_2}{T_j} E'_{q\Delta} - \frac{K_1}{T_j} \delta_{\Delta} + \frac{1}{T_j} T_{m\Delta} \quad (2-2)$$

$$\dot{\delta}_{\Delta} = \omega_{\Delta} \quad (2-3)$$

$$V_{t\Delta} = K_5 \delta_{\Delta} + K_6 E'_{q\Delta} \quad (2-4)$$

A máquina síncrona, em particular, é basicamente representada pelo modelo II do IEEE, onde é assumido que:

- a operação da máquina se dá em condições equilibradas
- os efeitos dos enrolamentos amortecedores e da saturação são desprezados
- nas equações de tensão do estator as parcelas devidas a $\dot{\lambda}_d$ e $\dot{\lambda}_q$ são desprezadas na presença das parcelas devidas a $\omega\lambda_q$ e $\omega\lambda_d$. Estas, por sua vez, são assumidas como aproximadamente iguais a $\omega_R\lambda_q$ e $\omega_R\lambda_d$, definidas à velocidade síncrona.

A constante T_j é calculada em função da constante de inércia da máquina:

$$T_j = \frac{2H}{\omega_R} \quad (2-5)$$

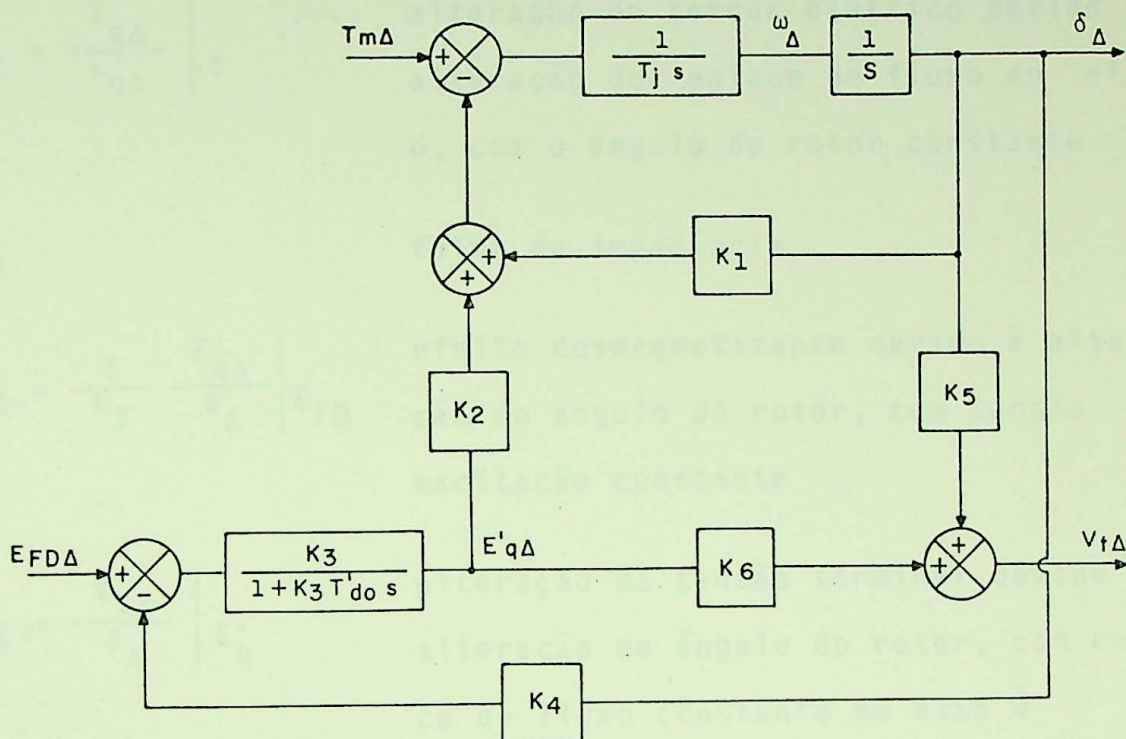


FIGURA (2-2) - MODELO LINEAR SIMPLIFICADO DA MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA À BARRA INFINITA.

No diagrama de blocos da figura (2-2) e no conjunto de equações de (2-1) a (2-4), aparecem os parâmetros T_j e T'_{do} , que estão diretamente relacionados com as características da máquina, já as constantes K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 e K_6 são definidas juntamente com o modelo linear simplificado da máquina conectada à barra infinita e são calculadas em função das reatâncias da máquina, da impedância externa e do ponto de operação. Estas constantes são definidas pelas seguintes relações [5,8]:

$$K_1 = \left. \frac{T_{e\Delta}}{\delta_{\Delta}} \right| E'_q$$

alteração do torque elétrico devido à alteração do ângulo do rotor, mantido constante o enlace de fluxo no eixo d

$$K_2 = \left. \frac{T_{e\Delta}}{E'_q} \right| \delta$$

alteração do torque elétrico devido à alteração do enlace de fluxo no eixo d, com o ângulo do rotor constante

K_3

fator de impedância

$$K_4 = \frac{1}{K_3} \left. \frac{E'_{q\Delta}}{\delta_{\Delta}} \right| E_{FD}$$

efeito desmagnetizante devido à alteração do ângulo do rotor, com tensão de excitação constante

$$K_5 = \left. \frac{V_{t\Delta}}{\delta_{\Delta}} \right| E'_q$$

alteração da tensão terminal devido à alteração do ângulo do rotor, com enlace de fluxo constante no eixo d

$$K_6 = \left. \frac{V_{t\Delta}}{E'_q} \right| \delta$$

alteração da tensão terminal devido à alteração do enlace de fluxo no eixo d, com ângulo do rotor constante

O diagrama vetorial da figura (2-3) representa a máquina síncrona conectada à barra infinita, operando em regime permanente. Através deste diagrama podem ser estabelecidas as equações que definem as condições de operação iniciais da máquina, a partir das grandezas que caracterizam o seu ponto de operação, quais sejam: tensão terminal e potências ativa e reativa geradas, V_t , P e Q respectivamente [5]:

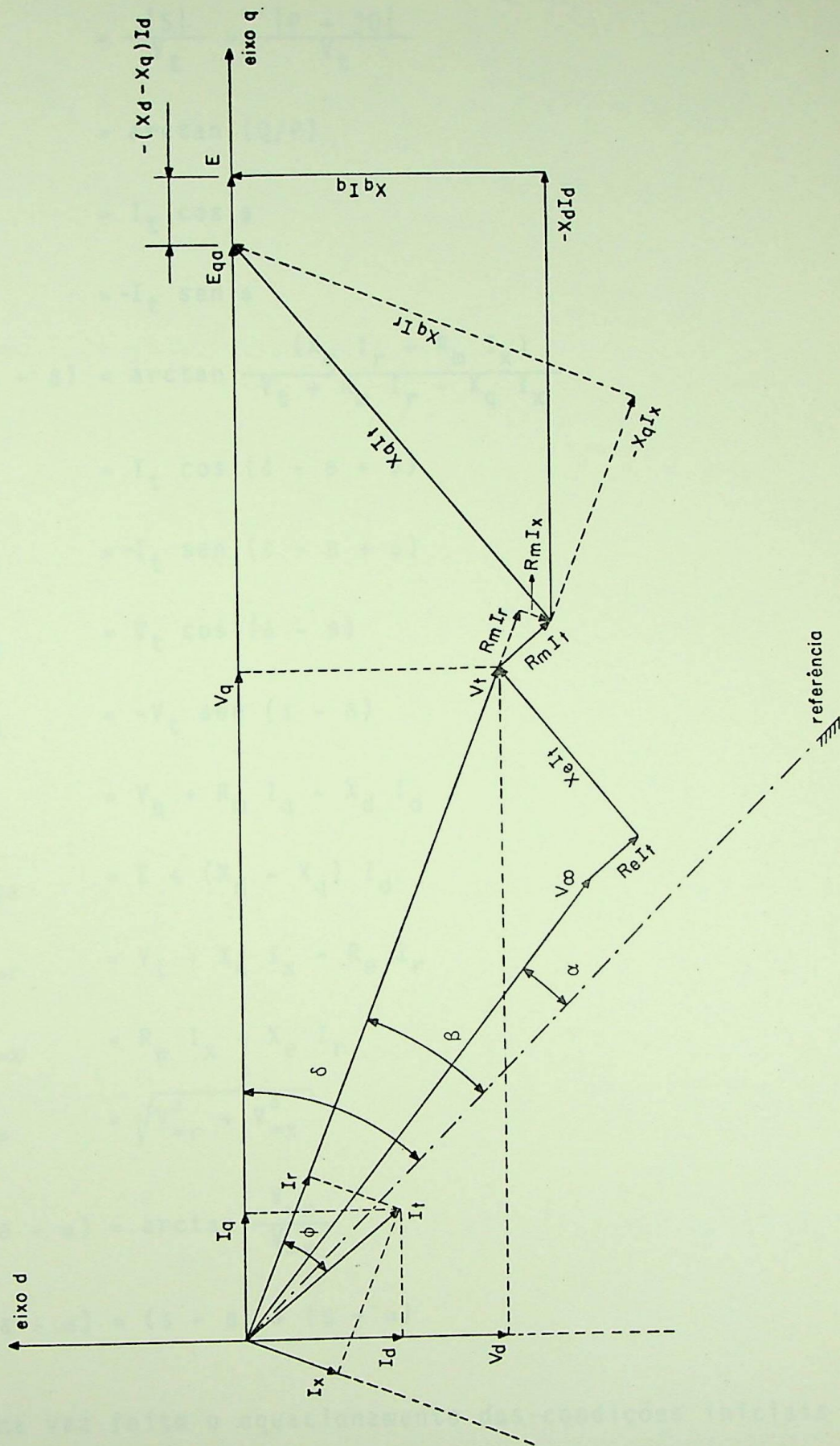


FIGURA (2-3) - MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA À BARRA INFINITA.

$$I_t = \frac{|S|}{V_t} = \frac{|P + jQ|}{V_t}$$

$$\phi = \arctan (Q/P)$$

$$I_r = I_t \cos \phi$$

$$I_x = -I_t \sin \phi$$

$$(\delta - \beta) = \arctan \frac{(X_q I_r + R_m I_x)}{V_t + R_m I_r - X_q I_x}$$

$$I_q = I_t \cos (\delta - \beta + \phi)$$

$$I_d = -I_t \sin (\delta - \beta + \phi)$$

$$V_q = V_t \cos (\delta - \beta)$$

$$V_d = -V_t \sin (\delta - \beta)$$

$$E = V_q + R_m I_q - X_d I_d$$

$$E_{qa} = E + (X_d - X_q) I_d$$

$$V_{\infty r} = V_t + X_e I_x - R_e I_r$$

$$V_{\infty x} = R_e I_x + X_e I_r$$

$$V_{\infty} = \sqrt{V_{\infty r}^2 + V_{\infty x}^2}$$

$$(\beta - \alpha) = \arctan \frac{V_{\infty x}}{V_{\infty r}}$$

$$(\delta - \alpha) = (\delta - \beta) + (\beta - \alpha)$$

Uma vez feito o equacionamento das condições iniciais de operação da máquina e conhecidos os seus parâmetros e a impedância externa, pode-se proceder à determinação das constantes K_1 a K_6 , descritas anteriormente e definidas pelas se-

guintes equações [5]:

$$K_1 = K_I V_\infty \{ E_{qao} [R_e \text{ sen } (\delta_o - \alpha) + (X'_d + X_e) \text{ cos } (\delta_o - \alpha)] + I_{qo} (X_q - X'_d) [(X_e + X_q) \text{ sen } (\delta_o - \alpha) - R_e \text{ cos } (\delta_o - \alpha)] \} \quad (2-6)$$

onde K_I é determinado pela equação:

$$K_I = \frac{1}{R_e^2 + (X_q + X_e) (X'_d + X_e)}$$

$$K_2 = K_I \{ R_e E_{qao} + I_{qo} [R_e^2 + (X_q + X_e)^2] \} \quad (2-7)$$

$$K_3 = \frac{1}{1 + K_I (X_d - X'_d) (X_q + X_e)} \quad (2-8)$$

$$K_4 = V_\infty K_I (X_d - X'_d) [(X_q + X_e) \text{ sen } (\delta_o - \alpha) - R_e \text{ cos } (\delta_o - \alpha)] \quad (2-9)$$

$$K_5 = \left(\frac{K_I V_\infty X'_d V_{qo}}{V_{to}} \right) [R_e \text{ cos } (\delta_o - \alpha) - (X_q + X_e) \text{ sen } (\delta_o - \alpha)] - \left(\frac{K_I V_\infty X_q V_{do}}{V_{to}} \right) [(X'_d + X_e) \text{ cos } (\delta_o - \alpha) + R_e \text{ sen } (\delta_o - \alpha)] \quad (2-10)$$

$$K_6 = \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) [1 - K_I X'_d (X_q + X_e)] - \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) K_I X_q R_e \quad (2-11)$$

Com a determinação destas constantes, a condição de operação da máquina síncrona fica perfeitamente conhecida através das equações de (2-1) a (2-4), que representam o modelo adotado.

2.2- Modelo do regulador de tensão

Para realizar a regulação de tensão da máquina síncrona mostrada na configuração da figura (2-1), será utilizado o sistema de excitação de ação contínua representado pelo modelo tipo 1 do IEEE, conforme consta da figura (2-4).

Como este regulador de tensão estará sendo empregado em um modelo linear, como ficou estabelecido desde o início, é admitido que ele não venha a operar em nenhum dos limites mostrados na figura (2-4), de tal maneira que o bloco limitador

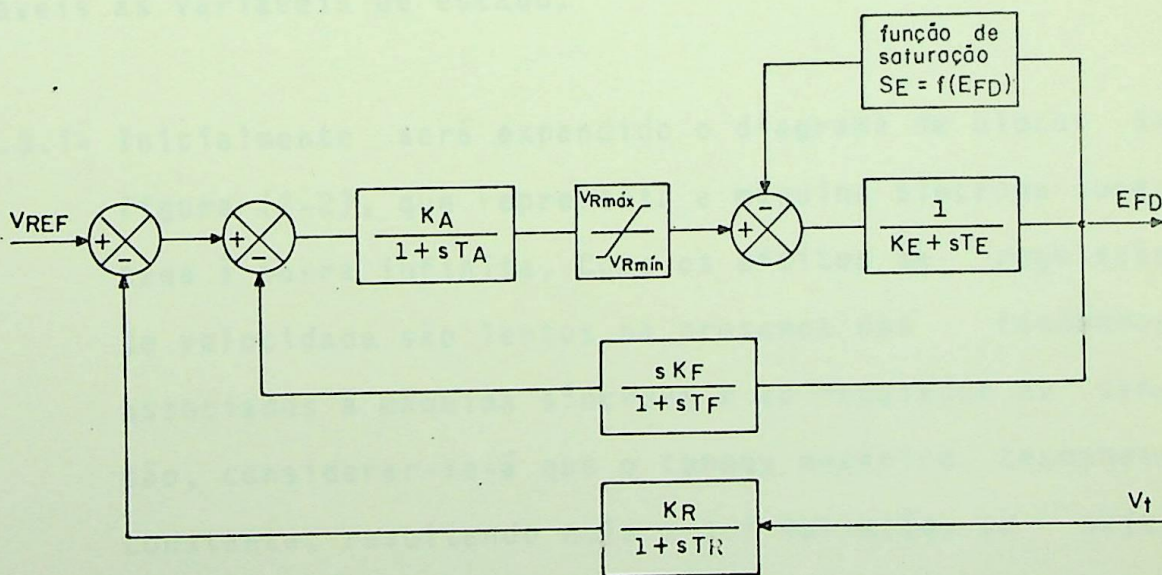


FIGURA (2-4) - SISTEMA DE EXCITAÇÃO - MODELO TIPO 1 DO IEEE.

possa ser ignorado. A função de saturação da excitatriz é linearizada de forma que:

$$S_{E\Delta} = \left. \frac{\partial S_E}{\partial E_{FD}} \right|_0 E_{FD\Delta} = S'_E E_{FD\Delta} \quad (2-12)$$

onde S'_E é uma constante que define a saturação na vizinhança do ponto de operação inicial. Com estas considerações o modelo do regulador de tensão representado na figura (2-4) passa a ser linear.

2.3- Matriz característica do sistema

Para a obtenção da matriz característica serão determinadas as variáveis de estado e escritas as equações que representam o modelo. Os diagramas de bloco serão expandidos, de maneira a apresentar a formulação mais elementar dos modelos. Nestes diagramas elementares ficam facilmente identificáveis as variáveis de estado.

2.3.1- Inicialmente será expandido o diagrama de blocos da figura (2-2), que representa a máquina síncrona conectada à barra infinita. Como os efeitos da regulação de velocidade são lentos na presença dos fenômenos associados à máquina síncrona e ao regulador de tensão, considerar-se-á que o torque mecânico permanece constante, resultando nula a sua variação, ou seja: $T_{m\Delta} = 0$. Na figura (2-5) é representado o diagrama já expandido, onde são mostradas as variáveis de estado: $E'_{q\Delta}$, ω_{Δ} e δ_{Δ} , também é indicada a variável de estado $E_{FD\Delta}$, que faz parte do sistema de excitação.

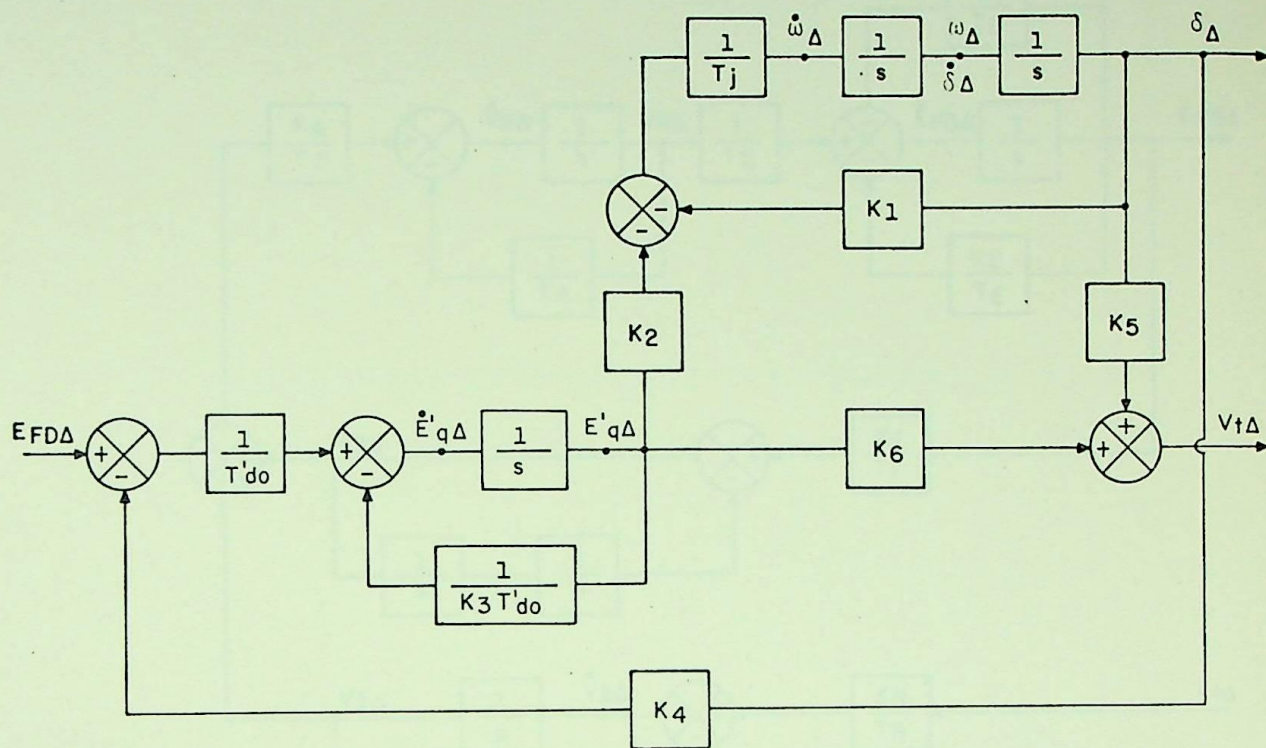


FIGURA (2-5) - DIAGRAMA DE BLOCOS EXPANDIDO DA MÁQUINA SÍNCRONA CO-
NECTADA À BARRA INFINITA.

2.3.2- De maneira análoga como foi feito com o diagrama da máquina, será expandido o diagrama de blocos do sistema de excitação, neste caso considerar-se-á que a variação da tensão de referência é nula, $V_{REF\Delta} = 0$. No diagrama expandido, figura (2-6), estão indicadas as variáveis de estado: V_1 , V_3 , V_R e E_{FD} .

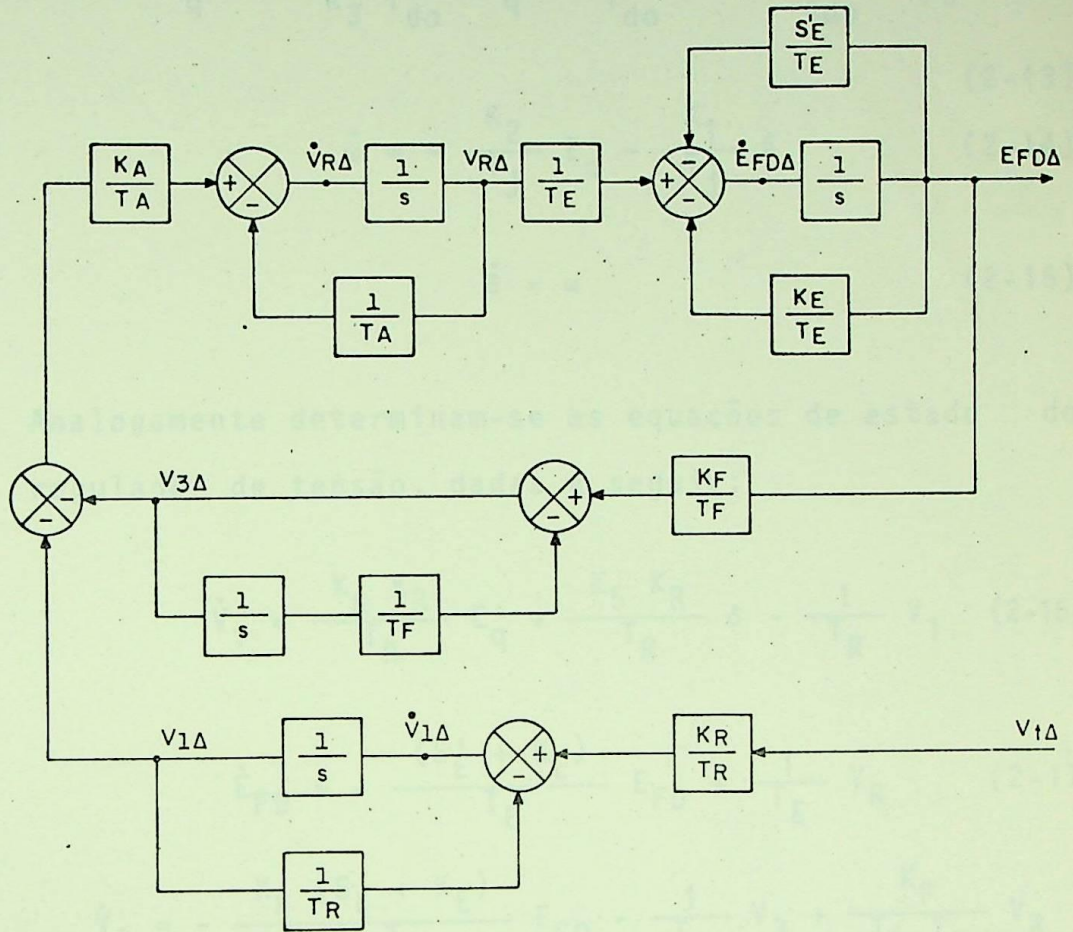


FIGURA (2-6)-DIAGRAMA DE BLOCOS EXPANDIDO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO.

2.3.3- Por inspeção nos diagramas de blocos das figuras (2-5) e (2-6), serão obtidas as equações de estado. Por questão de simplicidade será omitido o subscrito " Δ " das variáveis de estado, no entanto, estas continuarão a representar variações em torno do ponto de operação.

As equações de estado da máquina serão:

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{K_3 T_{do}} E'_q - \frac{K_4}{T_{do}} \delta + \frac{1}{T_{do}} E_{FD} \quad (2-13)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{K_2}{T_j} E'_q - \frac{K_1}{T_j} \delta \quad (2-14)$$

$$\dot{\delta} = \omega \quad (2-15)$$

Analogamente determinam-se as equações de estado do regulador de tensão, dadas a seguir:

$$\dot{V}_1 = \frac{K_6 K_R}{T_R} E'_q + \frac{K_5 K_R}{T_R} \delta - \frac{1}{T_R} V_1 \quad (2-16)$$

$$\dot{E}_{FD} = -\frac{(S'_E + K_E)}{T_E} E_{FD} + \frac{1}{T_E} V_R \quad (2-17)$$

$$\dot{V}_3 = -\frac{K_F (S'_E + K_E)}{T_E T_F} E_{FD} - \frac{1}{T_F} V_3 + \frac{K_F}{T_E T_F} V_R \quad (2-18)$$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{K_A}{T_A} V_3 - \frac{1}{T_A} V_R \quad (2-19)$$

A partir das equações de (2-13) a (2-19) pode-se montar o espaço de estado, representado pela equação característica (2-20); nesta equação estão facilmente identificáveis o vetor das variáveis de estado e a matriz característica do sistema. A análise detalhada desta matriz permite concluir se as condições de operação do sistema são estáveis ou instáveis.

$$\begin{bmatrix} \dot{E}'_q \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \\ \dot{V}_1 \\ \dot{E}_{FD} \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_3 T_{do}} & 0 & \frac{K_4}{T_{do}} & 0 & \frac{1}{T_{do}} & 0 & 0 \\ \frac{K_2}{T_j} & 0 & -\frac{K_1}{T_j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_6 K_R}{T_R} & 0 & \frac{K_5 K_R}{T_R} & -\frac{1}{T_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{(S_E' + K_E)}{T_E} & \frac{1}{T_E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_F (S_E' + K_E)}{T_E T_F} & -\frac{K_F}{T_E T_F} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} & 0 & -\frac{K_A}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_q \\ \omega \\ \delta \\ V_1 \\ E_{FD} \\ V_3 \\ V_R \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

REPRESENTAÇÃO NO ESPAÇO DE ESTADO DE ESTADO DO SISTEMA DA FIGURA (2-1)

2.4- Programa computacional para análise da matriz característica

Nos itens anteriores 2.1, 2.2 e 2.3 foi desenvolvido o modelo linear para representar um sistema formado por uma máquina síncrona conectada à barra infinita, modelo este que resultou na equação (2-20). A verificação da condição de estabilidade do sistema, frente a pequenas perturbações em torno do ponto de operação, consiste em analisar a matriz característica do modelo representativo do sistema, através da determinação dos seus autovalores, conforme já foi exposto no primeiro capítulo. Se houver autovalor com parte real positiva, isto significa que o sistema é instável, caso contrário, se todos os autovalores tiverem parte real negativa, o sistema é considerado estável.

Uma vez determinados os autovalores, o passo seguinte consiste em relacioná-los com as variáveis de estado do sistema, através da matriz dos fatores de participação. Com isto se obtém a indicação de quais as variáveis de estado, que mais influenciam possíveis modos de instabilidade dinâmica.

A matriz característica da equação (2-20) é analisada através de programa computacional desenvolvido em linguagem FORTRAN. O fluxograma da figura (2-7) mostra simplificada a maneira como são processadas as informações a respeito do ponto de operação da máquina, dos seus parâmetros e os da impedância externa. A listagem do programa fonte encontra-se no anexo 1.

A seguir será feita uma descrição sucinta da maneira como foi desenvolvido o programa:

2.4.1- Inicialmente são lidos pelo programa os dados da máqui

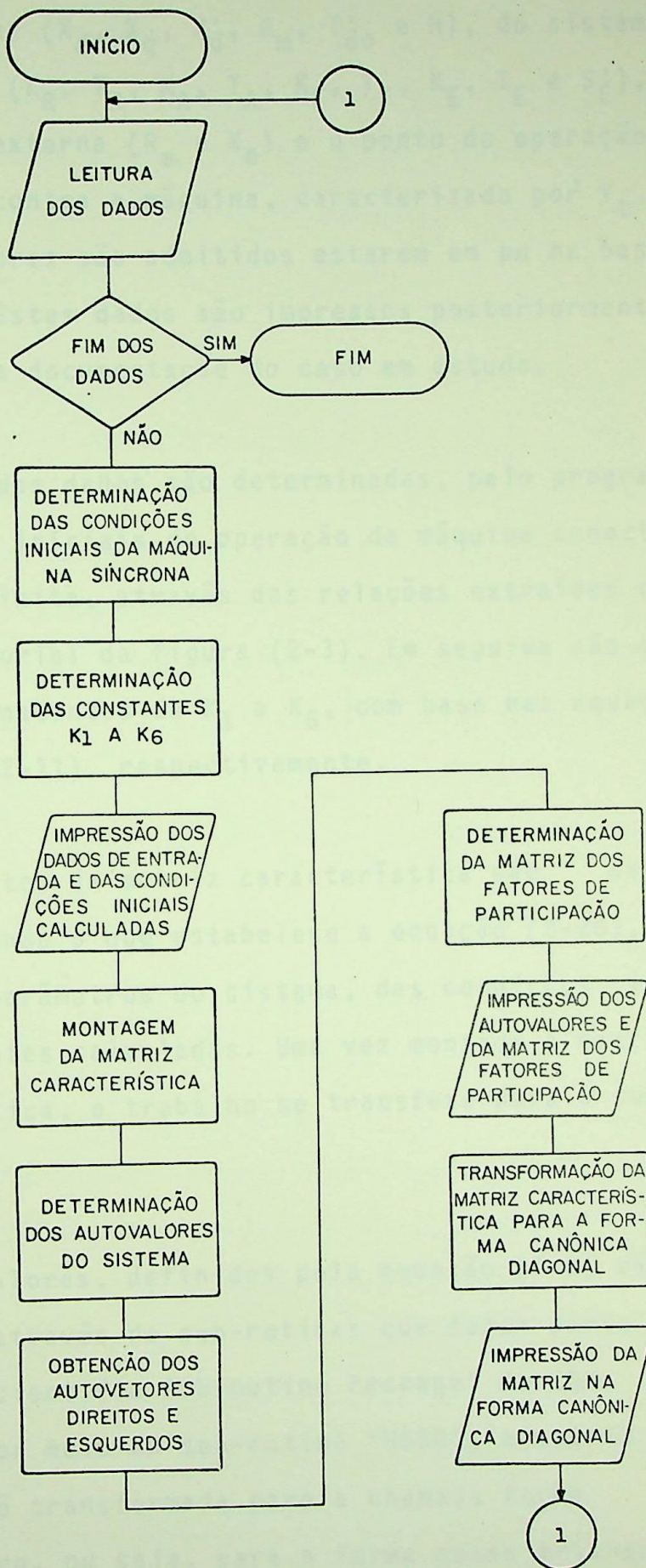


FIGURA (2-7) - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO.

na síncrona (X_d , X_q , X'_d , R_m , T'_{do} e H), do sistema de excitação (K_R , T_R , K_A , T_A , K_F , T_F , K_E , T_E e S'_E), da impedância externa (R_e e X_e) e o ponto de operação em que se encontra a máquina, caracterizado por V_t , P e Q . Os valores são admitidos estarem em pu na base da máquina. Estes dados são impressos posteriormente para auxiliar a documentação do caso em estudo.

- 2.4.2- A partir dos dados são determinadas, pelo programa, as condições iniciais de operação da máquina conectada à barra infinita, através das relações extraídas do diagrama vetorial da figura (2-3). Em seguida são calculadas as constantes de K_1 a K_6 , com base nas equações de (2-6) a (2-11), respectivamente.
- 2.4.3- Os elementos da matriz característica são determinados, segundo o que estabelece a equação (2-20), em função dos parâmetros do sistema, das condições iniciais e constantes calculadas. Uma vez montada a matriz característica, o trabalho se transfere para a sua análise.
- 2.4.4- Os autovalores, definidos pela equação (1-2) são determinados através de sub-rotinas que fazem parte do SSP - "Scientific Subroutine Package" da IBM. Inicialmente, por meio da sub-rotina "HSBG", a matriz característica é transformada para a chamada forma de Hessenberg, ou seja, para a forma quase triangular superior. A transformação é de semelhança, ficando manti

dos os autovalores.

Na sequência é utilizada a sub-rotina "ATEIG", que determina os autovalores de uma matriz que esteja na forma de Hessenberg, através do método QR de dupla iteração.

2.4.5- Os autovetores direitos e esquerdos, definidos originalmente pelas equações (1-2) e (1-5), são determinados pelo método de Danilevski [7], quando se utilizam as matrizes que transformam a matriz característica original para a forma companheira, por meio de sucessivas transformações de semelhança. Antes da obtenção da matriz dos fatores de participação, os dois conjuntos de autovetores, direitos e esquerdos, são normalizados de tal forma a atender o que já foi definido na relação (1-6).

2.4.6- O passo final consiste na determinação da matriz dos fatores de participação, através da aplicação direta do que determinam as equações (1-34) e (1-35), que definiram esta matriz. Com a finalidade de fazer uma verificação final, é procedida a transformação da matriz característica original para a forma canônica diagonal, segundo a relação (1-15). Nesta transformação são utilizadas as matrizes modais esquerda e direita. A matriz transformada deverá ter a diagonal principal formada pelos autovalores determinados anteriormente e os demais elementos nulos. Se isto não ocorrer, é por que houve erro no processo numérico de determinação

dos autovalores e/ou autovetores.

2.5- Casos estudados

Durante o desenvolvimento do trabalho foi estudada uma infinidade de casos, com a variação dos parâmetros referentes à máquina síncrona, ao regulador de tensão e à impedância externa, também foram promovidas alterações na condição de estado da máquina. No entanto, será apresentada, a título de exemplo, apenas uma série de casos, que partem de uma condição de estado da máquina dada por: tensão terminal de 1,0 pu e carregamento de $0,9 + j0,1$ pu.

Os parâmetros que foram considerados para a máquina síncrona, são semelhantes aos das máquinas da Usina de Foz do Areia, que tem uma potência de 465 MVA e $\cos \emptyset$ nominal de 0,9. Para os parâmetros do sistema de excitação foram utilizados valores encontrados na bibliografia [5], a impedância externa foi admitida como tendo o valor de $0,025 + j0,450$ pu, na base da máquina. Todos os parâmetros originalmente empregados encontram-se listados nos dados do Caso Base (incluídos mais adiante - pág. 63).

A seguir, será apresentada uma análise dos casos processados a título de exemplo, os relatórios de saída do computador, referentes a estes casos, encontram-se a partir da página 63.

2.5.1- Caso base

O processamento com os dados do caso base mostrou que o sistema é instável, como pode-se ver pelos autovalores:

$$\lambda_1 = -999,9994$$

$$\lambda_{2,3} = -10,2941 \pm j15,5548$$

$$\lambda_{4,5} = 0,0821 \pm j6,7675$$

$$\lambda_{6,7} = -0,9954 \pm j0,9511$$

O par de autovalores $\lambda_{4,5}$ tem parte real positiva, caracterizando a instabilidade dinâmica. A matriz dos fatores de participação mostra, que o par de autovalores instável é mais influenciado pelas variáveis de estado ω e δ ($p_{24} = p_{34} = p_{25} = p_{35} = 0,4986$), ficando, pois, estas identificadas como as mais responsáveis pelo modo de instabilidade dinâmica. A frequência de oscilação resultante deste par de autovalores, 6,7675 rad/s ou 1,0771 Hz, também comprova serem estes autovalores associados à parte inercial da máquina síncrona, à qual estão relacionadas as variáveis de estado δ e ω .

O primeiro autovalor, $\lambda_1 = -999,9994$, resultou ter um valor real, portanto representa uma resposta não oscilatória, com decaimento exponencial puro e constante de tempo de 0,001s. Pela análise da matriz dos fatores de participação, este autovalor fica exclusivamente relacionado à variável de estado V_1 do regulador de tensão ($p_{14} = 1,0000$). Ao ser analisado o diagrama de blocos da figura (2-6), verifica-se que a malha de controle elementar à qual está associada a variável de estado V_1 , realmente possui uma constante de tempo de 0,001s, que é o valor do parâmetro T_R .

O primeiro par de autovalores da lista, $\lambda_{2,3} = -10,2941 \pm j15,5548$, fica relacionado, através da ma

triz dos fatores de participação, às variáveis de estado do regulador de tensão V_3 e V_R , com $p_{62} = p_{63} = 0,5585$ e $p_{72} = p_{73} = 0,4992$, respectivamente. A frequência de oscilação resultante da composição destes dois autovalores, $15,5548$ rad/s ou $2,4756$ Hz, tem um amortecimento bastante rápido, com constante de tempo de $0,0971$ s.

Os últimos autovalores, $\lambda_{5,7} = -0,9954 \pm j0,9511$, são responsáveis por uma resposta com frequência de $0,9511$ rad/s ou $0,1514$ Hz e amortecimento com constante de tempo de $1,0046$ s. Este par de autovalores é mais influenciado pelas variáveis de estado E'_q ($p_{16} = p_{17} = 0,5526$) e E_{FD} ($p_{56} = p_{57} = 0,5159$), conforme indicação obtida a partir da matriz dos fatores de participação.

A seguir serão comentados os processamentos realizados com alterações de dados feitas a partir do caso base.

2.5.2- Caso 1 - Com o carregamento reduzido para a metade - $0,45 + j0,05$ pu

Sabe-se de antemão, através da matriz dos fatores de participação, que para tornar o sistema estável devem ser alteradas grandezas que estejam relacionadas às variáveis de estado ω e δ , que são as que mais influenciam os autovalores que indicaram a instabilidade. O carregamento da máquina está diretamente ligado a estas duas variáveis de estado, a sua redução deverá levar o sistema a uma condição mais favorável de estabilidade. De fato, é o que se verifica através da análise

se dos autovalores do caso processado com o carregamento reduzido para a metade, conforme pode-se ver na tabela comparativa (2-1).

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 1
λ_1	-999,9994	-999,9994
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-10,2082 \pm j15,4755
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	- 0,0094 \pm j 6,5395
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,9898 \pm j 0,9126

TABELA (2-1)

O par $\lambda_{4,5}$ experimentou alteração relativamente significativa de sua parte real, tornando o sistema estável no sentido estrito. A parte real dos demais autovalores teve uma variação relativa bastante pequena, em especial o autovalor λ_1 , que tem só parte real, manteve-se constante, comprovando a sua independência em relação à redução de carregamento efetuada. A parte imaginária dos autovalores $\lambda_{4,5}$ também sofreu alteração.

Os outros dois pares de autovalores, $\lambda_{2,3}$ e $\lambda_{6,7}$, também recebem alguma influência relativa das variáveis de estado ω e δ , embora em grau bem menor. Por outro lado, a redução do carregamento da máquina, não provoca alterações apenas nas variáveis de estado ω e δ da máquina síncrona, mas também em E'_q , que exerce uma influência relativa apreciável nos autovalores $\lambda_{6,7}$ e

mais moderada em $\lambda_{2,3}$, razão pela qual estes autovalores experimentaram também alguma variação, como pode-se constatar na tabela (2-1).

2.5.3- Caso 2 - Com a impedância externa reduzida para a meta de

Com a redução da impedância externa, parâmetro este que está ligado à capacidade de transferência de potência, da máquina síncrona para a barra infinita e portanto está associada às variáveis de estado δ e ω e, desta maneira, ao desempenho da máquina síncrona, espera-se novamente estabilizar a operação do sistema. Os novos autovalores, que resultaram desta alteração na configuração, estão sumarizados na tabela comparativa (2-2), de sua análise pode-se concluir que o sistema realmente ficou estável.

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 2
λ_1	-999,9994	-999,9996
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-10,5302 \pm j15,6946
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	- 0,0205 \pm j 8,0006
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,6824 \pm j 0,8495

TABELA (2-2)

Pela análise da tabela (2-2) e dos relatórios emitidos pelo programa, referentes ao caso 2, verifica-se que o par de autovalores $\lambda_{4,5}$ experimentou uma alteração

significativa, quando a parte real passou de 0,0821 para -0,0205, tornando o sistema estável, e a parte imaginária que representava uma frequência de 6,7675 rad/s (1,0771 Hz) passou a representar 8,0006 rad/s (1,2742 Hz). Os autovalores $\lambda_{6,7}$, tiveram uma alteração significativa por terem um certo relacionamento com a máquina síncrona, através da variável de estado E'_q , como estabelece a matriz dos fatores de participação. Por outro lado os autovalores que formam o par $\lambda_{2,3}$, que são influenciados quase que exclusivamente pelas variáveis de estado V_3 e V_R do regulador de tensão, sofreram alteração relativa inexpressiva. Por último, o autovalor λ_1 que está associado à variável de estado V_1 , permaneceu praticamente constante.

2.5.4- Caso 3 - Com as reatâncias da máquina reduzidas para a metade

Foi elaborado um processamento para verificar o efeito que teria a alteração das reatâncias da máquina, os autovalores resultantes deste caso estão sumarizados na tabela (2-3).

Através da análise da matriz dos fatores de participação, juntamente com a tabela (2-3), verifica-se que os autovalores que mais experimentam alteração são os pares $\lambda_{4,5}$ e $\lambda_{6,7}$, que são influenciados por variáveis de estado da máquina síncrona, o autovalor λ_1 novamente se manteve constante. A mudança ocorrida no par $\lambda_{4,5}$ não foi suficiente para tornar o sistema estável, embora tenha diminuído a parte real destes autovalores.

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 3
λ_1	-999,9994	-999,9992
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-9,9703 \pm j15,3442
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0403 \pm j 7,6307
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	-1,2557 \pm j 0,9180

TABELA (2-3)

2.5.5- Caso 4 - Com a tensão terminal aumentada para 1,05 pu

A princípio sabe-se que o aumento da tensão terminal é uma medida que deve melhorar a condição de estabilidade da máquina. Ao ser analisado o resultado do processamento, vide tabela (2-4), verifica-se que a alteração ocorrida foi exatamente neste sentido, não sendo suficiente, no entanto, para tornar a máquina estável.

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 4
λ_1	-999,9994	-999,9994
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-10,2765 \pm j15,5389
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0525 \pm j 7,0944
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,9833 \pm j 0,9440

TABELA (2-4)

As maiores alterações ocorreram com os autovalores $\lambda_{4,5}$, tendo os demais permanecido praticamente constantes.

2.5.6- Caso 5 - Com a tensão terminal reduzida para 0,95 pu

Ao contrário do caso anterior, a redução da tensão terminal é uma manobra que causa a degradação da condição de estabilidade da máquina, isto é comprovado pelos resultados do processamento deste caso, que indicam que o par de autovalores $\lambda_{4,5}$ evoluiu de $0,0821 \pm j6,7675$ para $0,1244 \pm j6,4197$, com aumento da parte real e diminuição da frequência. Os demais autovalores não experimentaram alteração significativa.

2.5.7- Caso 6 - Com a constante de tempo T'_{d0} aumentada para 16,0s

Esta alteração de parâmetro e as demais que serão implementadas daqui para a frente, não alteram as condições iniciais da máquina síncrona. Em razão disto, nos relatórios de saída do programa, referentes a estes casos, somente será apresentada a segunda folha, contendo os autovalores e as matrizes dos fatores de participação e característica na forma canônica diagonal. A primeira folha, que se refere aos dados e à condição inicial da máquina, seria idêntica àquela do caso base.

Com a alteração da constante de tempo T'_{d0} para o dobro do valor original, a mudança mais significativa foi experimentada pelo par de autovalores $\lambda_{6,7}$, que a matriz dos fatores de participação indica estar relacionado com as variáveis de estado E'_q e E'_{FD} . Os demais autovalores sofreram pouca alteração, como pode-se ver pela tabela (2-5).

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 6
λ_1	-999,9994	-999,9997
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-10,6943 \pm j15,8045
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0349 \pm j 6,7937
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,4875 \pm j 0,8130

TABELA (2-5)

2.5.8- Caso 7 - Com a constante de inércia aumentada para 8,0s

Com a alteração da constante de inércia da máquina, espera-se alteração nos autovalores que são mais influenciados pelas variáveis de estado δ e ω . O resultado do processamento, que está sumarizado na tabela (2-6), mostra exatamente isto, somente sofreu alteração significativa o par de autovalores $\lambda_{4,5}$, sendo que a diferença maior aconteceu na frequência, como era de se esperar, que passou de 6,7675 rad/s (1,0771 Hz) para 4,7907 rad/s (0,7625 Hz).

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autôvalor	caso base	caso 7
λ_1	-999,9994	-999,9994
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-10,2987 \pm j15,5434
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0889 \pm j 4,7907
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,9976 \pm j 0,9471

TABELA (2-6)

2.5.9 - Caso 8 - Com a constante de inércia diminuída para a metade

Esta redução do parâmetro H para 2,0s, complementa o caso anterior. Pode-se ver no relatório de saída do programa, que apenas o par de autovalores $\lambda_{4,5}$ experimentou alteração significativa, tendo a parte real diminuído de 0,0821 para 0,0666 e a frequência aumentado de 6,7675 rad/s (1,0771 Hz) para 9,5628 rad/s (1,5220 Hz), como realmente era de se esperar.

2.5.10- Caso 9 - Com a redução do ganho K_A para a metade

Este é o primeiro caso que é processado com alteração de parâmetro do regulador de tensão. A redução do ganho K_A do amplificador para a metade do valor do caso base, agiu no sentido de reduzir a instabilidade do sistema, na medida em que a parte real do par de autovalores $\lambda_{4,5}$ diminuiu de 0,0821 para 0,0355, no entanto, o sistema ainda é instável.

Os autovalores que mais experimentaram mudança foram $\lambda_{2,3}$, como pode-se ver pela tabela comparativa (2-7), pois a frequência resultante deles, que era de 15,5548 rad/s (2,4756 Hz) passou para 8,5954 rad/s (1,3680 Hz). Na verdade, era exatamente isto que poderia ser esperado, visto que estes autovalores são bastante influenciados pela variável de estado V_R , como pode-se ver pela matriz dos fatores de participação. No diagrama de blocos da figura (2-6), verifica-se que a variável de estado V_R depende do valor de K_A .

O par de autovalores $\lambda_{6,7}$ teve pequena mudança em relação ao caso base, enquanto que λ_1 permaneceu praticamente constante.

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 9
λ_1	-999,9994	-999,9997
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-10,2806 \pm j8,5954
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0355 \pm j6,7340
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,9621 \pm j0,9684

TABELA (2-7)

2.5.11- Caso 10 - Com a constante de tempo T_A diminuída para a metade

Este caso complementa o anterior, visto que a constante de tempo T_A do amplificador do regulador de tensão, também altera a variável de estado V_R , conforme pode ser visto no diagrama de blocos da figura (2-6). Em razão disto, novamente espera-se que haja alteração nos autovalores $\lambda_{2,3}$. Na tabela (2-8) estão sumarizados os autovalores referentes a este caso.

A maior alteração acabou realmente acontecendo com os autovalores $\lambda_{2,3}$, mais especialmente com a parte real. Isto fez com que a constante de tempo da resposta oscilatória formada por este par de autovalores, diminuísse de 0,0971s para 0,0493s. Os demais autovalores permaneceram praticamente constantes.

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 10
λ_1	-999,9994	-999,9989
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-20,2892 \pm j16,8461
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0757 \pm j 6,7752
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,9942 \pm j 0,9508

TABELA (2-8)

2.5.12- Caso 11 - Com o ganho K_F aumentado para 0,1 pu

O aumento do ganho K_F da malha de estabilização do regulador de tensão, deve ter a tendência de levar o sistema a uma condição mais favorável de estabilidade. A tabela (2-9) sumariza os resultados deste caso.

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 11
λ_1	-999,9994	-999,9994
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-10,7668 \pm j27,4983
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0006 \pm j 6,8090
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,4412 \pm j 0,7433

TABELA (2-9)

O par de autovalores $\lambda_{4,5}$ teve a sua parte real bastante diminuída, ficando próxima a zero e trazendo o sistema bem próximo a uma condição estável. Os autovalores que experimentaram as maiores alterações foram $\lambda_{2,3}$ e $\lambda_{6,7}$, enquanto que o autovalor λ_1 continua

inalterado para mais esta mudança de parâmetro.

2.5.13- Caso 12 - Diminuída a constante de tempo T_F para a metade

Este caso complementa o anterior, na medida em que a constante de tempo T_F também é da malha de estabilização do regulador de tensão. Novamente, os autovalores que mais sofreram alteração foram $\lambda_{2,3}$ e $\lambda_{6,7}$. Os resultados estão sumarizados na tabela (2-10).

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 12
λ_1	-999,9994	-999,9994
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-11,1964 \pm j24,3922
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0119 \pm j 6,7926
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,5229 \pm j 1,2427

TABELA (2-10)

2.5.14- Caso 13 - Com a constante de tempo T_R aumentada para 0,005s

Ao ser analisado o diagrama de blocos da figura (2-6), conclui-se que a alteração da constante de tempo T_R do circuito de medição do regulador de tensão, deve introduzir mudança no autovalor λ_1 . Uma vez que este autovalor está associado à variável de estado V_1 do regulador de tensão, como se vê pela matriz dos fatores de participação.

O resultado do processamento deste caso encontra-se sumarizado na tabela (2-11).

TABELA COMPARATIVA DOS AUTOVALORES		
autovalor	caso base	caso 13
λ_1	-999,9994	-199,9849
$\lambda_{2,3}$	-10,2941 \pm j15,5548	-10,2966 \pm j15,4787
$\lambda_{4,5}$	0,0821 \pm j 6,7675	0,0812 \pm j 6,7630
$\lambda_{6,7}$	- 0,9954 \pm j 0,9511	- 0,9993 \pm j 0,9552

TABELA (2-11)

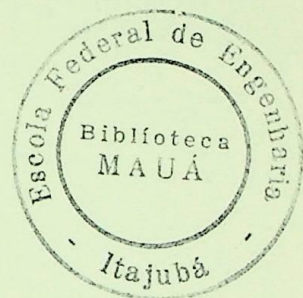
Como se previa, o único autovalor que experimentou alteração significativa foi exatamente λ_1 , que no caso base representava uma resposta monotônica com decaimento exponencial e uma constante de tempo de 0,001s. Neste caso com o valor T_R alterado, o autovalor λ_1 passou de -999,9994 para -199,9849, representando agora uma constante de tempo de 0,005s, que é exatamente o valor da constante de tempo T_R . Pode ser verificado na tabela (2-11), que os demais autovalores permaneceram praticamente inalterados.

2.6- Conclusões sobre os casos estudados

A partir dos processamentos realizados, envolvendo a máquina conectada à barra infinita, e em função da análise destes processamentos, pode-se estabelecer algumas conclusões, que serão apresentadas a seguir:

- 2.6.1- A constatação mais importante dos estudos realizados neste segundo capítulo, é a de que os autovalores responsáveis por frequências na faixa de 1 Hz (aproximadamente 6,3 rad/s), são realmente mais influenciados pelas variáveis de estado ω e δ , como tem sido afirmado em alguns textos sobre o assunto [2,3]. Deve ser ressaltado que estas frequências estão associadas às oscilações de potência inter máquinas, que na prática ocorrem nos sistemas elétricos de potência.
- 2.6.2- Outro aspecto importante, é que foram os autovalores responsáveis exatamente por respostas nesta faixa de frequência, $\lambda_{4,5} = 0,0821 \pm j6,7675$ (no caso base), que tornaram o sistema instável. Ou seja, nos casos estudados houve responsabilidade maior das variáveis de estado ω e δ nos autovalores que levaram o sistema à instabilidade. Desta forma, as alterações do carregamento da máquina síncrona e da impedância externa tornaram-se mais eficazes do que a grande maioria das alterações efetuadas nos parâmetros do regulador de tensão.
- 2.6.3- O tempo de processamento de cada um dos casos estudados, foi da ordem de 1,0 segundo de CPU. Os casos foram executados em um computador IBM-4341.
- 2.6.4- Nos casos estudados neste capítulo 2 a matriz dos fatores de participação resulta ser complexa, já que os autovetores direitos e esquerdos também o são. No

entanto, observou-se que a parte imaginária dos fatores de participação, nos casos estudados, não mostrou ter significado prático mensurável. Em função disto a parte imaginária da matriz dos fatores de participação foi desprezada, pode-se verificar em qualquer um dos casos apresentados, que a parte real da matriz dos fatores de participação, realmente tem a propriedade de possuir a somatória dos elementos de suas linhas e colunas sempre igual à unidade. Por outro lado, a parte imaginária da matriz dos fatores de participação apresenta a somatória dos elementos de suas linhas e colunas sempre nula.



ESTUDO DA MAQUINA SINCRONA CONECTADA AA BARRA INFINITA
 CARREGAMENTO = 0.9 + JO.1 PU - TENSÃO TERMINAL = 1.0 PU
 CASO BASE

DADOS DA LINHA-

RE = 0.0250 PU XE = 0.4500 PU

DADOS DA MAQUINA-

XD = 1.0000 PU RM = 0.0010 PU
 XQ = 0.7500 PU TLD0 = 8.0000 S
 XLD = 0.3000 PU H = 4.0000 S

DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO E DA EXCITACAU-

KR = 1.0000 PU TR = 0.0010 S
 KA = 400.00 PU TA = 0.0500 S
 KF = 0.0400 PU TF = 1.0000 S
 KE = 1.0000 PU TE = 0.9500 S
 SEL = 0.1140

CONDICÕES DE OPERACAO DA MAQUINA-

VT = 1.0000 PU
 P = 0.9000 PU Q = 0.1000 PU

VALORES CALCULADOS-

PHI = 6.3402 GRAUS
 DELTA-BETA = 32.0996 GRAUS
 DELTA-ALFA = 55.4463 GRAUS
 IT = 0.9055 PU
 IR = 0.9000 PU IX = -0.1000 PU
 IQ0 = 0.7093 PU ID0 = -0.5630 PU
 VQ0 = 0.8471 PU VD0 = -0.5314 PU
 E0 = 1.4108 PU
 EQA0 = 1.2701 PU
 VINFIN = 1.0157 PU

 K1 = 0.9894 K4 = 0.7690
 K2 = 1.1698 K5 = -0.0787
 K3 = 0.5174 K6 = 0.5196

LISTA DOS AUTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9974	0.0
LAMBDA2=	-10.2941	15.5548
LAMBDA3=	-10.2941	-15.5548
LAMBDA4=	0.0821	6.7675
LAMBDA5=	0.0821	-6.7675
LAMBDA6=	-0.9954	0.9511
LAMBDA7=	-0.9954	-0.9511

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E _q	0.0000	-0.0469	-0.0469	-0.0057	-0.0057	0.5526	0.5526
w	0.0000	0.0007	0.0007	0.4986	0.4986	0.0007	0.0007
δ	0.0000	0.0007	0.0007	0.4986	0.4986	0.0007	0.0007
V ₁	1.0000	0.0008	0.0008	0.0002	0.0002	-0.0010	-0.0010
E _{FD}	-0.0000	0.0.30	-0.0130	-0.0029	-0.0029	0.5159	0.5159
V ₃	0.0000	0.5585	0.5585	0.0088	0.0088	-0.0673	-0.0673
V _R	-0.0000	0.4992	0.4992	0.0025	0.0025	-0.0017	-0.0017

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	-0.00	-10.29	15.55	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-10.29	-15.55	0.00	-0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-1.00	0.95	0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-1.00	-0.95

ESTUDO DA MAQUINA SINCRONA CONECTADA AA BARRA INFINITA
 CARREGAMENTO = 0.9 + JO.1 PU - TENSÃO TERMINAL = 1.0 PU
 CASO 1 - DIMINUIDO O CARREGAMENTO PARA 0.45 + JO.05 PU

DADOS DA LINHA-

RE = 0.0250 PU XE = 0.4500 PU

DADOS DA MAQUINA-

XD = 1.0000 PU RM = 0.0010 PU
 XQ = 0.7500 PU TLD0 = 8.0000 S
 XLD = 0.3000 PU H = 4.0000 S

DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO E DA EXCITAÇÃO-

KR = 1.0000 PU TR = 0.0010 S
 KA = 400.00 PU TA = 0.0500 S
 KF = 0.0400 PU TF = 1.0000 S
 KE = 1.0000 PU TE = 0.9500 S
 SEL = 0.1140

CONDICÕES DE OPERAÇÃO DA MAQUINA-

VT = 1.0000 PU
 P = 0.4500 PU Q = 0.0500 PU

VALORES CALCULADOS-

PHI = 6.3402 GRAUS
 DELTA-BETA = 18.0100 GRAUS
 DELTA-ALFA = 29.7753 GRAUS
 IT = 0.4528 PU
 IR = 0.4500 PU IX = -0.0500 PU
 IQ0 = 0.4125 PU ID0 = -0.1867 PU
 VQ0 = 0.9510 PU VD0 = -0.3092 PU
 E0 = 1.1381 PU
 EQA0 = 1.0914 PU
 VINFINF = 0.9870 PU

 K1 = 0.9103 K4 = 0.4405
 K2 = 0.6901 K5 = -0.0109
 K3 = 0.5174 K6 = 0.5773

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9994	0.0
LAMBDA2=	-10.2082	15.4755
LAMBDA3=	-10.2092	-15.4755
LAMBDA4=	-0.0094	6.5395
LAMBDA5=	-0.0094	-6.5395
LAMBDA6=	-0.9898	0.9126
LAMBDA7=	-0.9899	-0.9126

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'_q	0.0000	-0.0540	-0.0540	-0.0221	-0.0021	0.5561	0.5561
ω	-0.0000	0.0000	0.0000	0.5007	0.5007	-0.0007	-0.0007
δ	-0.0000	0.0000	0.0000	0.5007	0.5007	-0.0007	-0.0007
V_1	1.0000	0.0009	0.0009	0.0000	0.0000	-0.0010	-0.0010
E_{FD}	-0.0000	-0.0196	-0.0196	-0.0310	-0.0010	0.5205	0.5205
V_3	0.0000	0.5713	0.5713	0.0014	0.0014	-0.0727	-0.0727
V_R	-0.0000	0.5013	0.5013	0.0003	0.0003	-0.0016	-0.0016

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00
-0.00	-0.00	-10.21	15.48	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-10.21	-15.48	0.00	-0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.01	6.54	-0.00	-0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.01	-6.54	0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.99	0.91	0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.99	-0.99	0.00	-0.99

ESTUDO DA MAQUINA SINCRONA CONECTADA AA BARRA INFINITA
 CARREGAMENTO = 0.9 + J0.1 PU - TENSÃO TERMINAL = 1.0 PU
 CASO 2 - DIMINUIDA A IMPEDANCIA EXTERNA P/ 0.012 + J0.22 PU

DADOS DA LINHA-

RE = 0.0120 PU XE = 0.2200 PU

DADOS DA MAQUINA-

XD = 1.0000 PU RM = 0.0010 PU
 XQ = 0.7500 PU TLD0 = 8.0000 S
 XLD = 0.3000 PU H = 4.0000 S

DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO E DA EXCITAÇÃO-

KR = 1.0000 PU TR = 0.0010 S
 KA = 400.00 PU TA = 0.0500 S
 KF = 0.0400 PU TF = 1.0000 S
 KE = 1.0000 PU TE = 0.9500 S
 SEL = 0.1140

CONDICÕES DE OPERAÇÃO DA MAQUINA-

VT = 1.0000 PU
 P = 0.9000 PU Q = 0.1000 PU

VALORES CALCULADOS-

PHI = 6.3402 GRAUS
 DELTA-BETA = 32.0996 GRAUS
 DELTA-ALFA = 43.6008 GRAUS
 IT = 0.9055 PU
 IR = 0.9000 PU IX = -0.1000 PU
 IQ0 = 0.7093 PU ID0 = -0.5630 PU
 VQ0 = 0.8471 PU VD0 = -0.5314 PU
 E0 = 1.4108 PU
 EQA0 = 1.2701 PU
 VINFIN = 0.9870 PU

 K1 = 1.3684 K4 = 0.9041
 K2 = 1.3531 K5 = -0.0282
 K3 = 0.4263 K6 = 0.3680

LISTA DOS AUTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9996	0.0
LAMBDA2=	-10.5302	15.6946
LAMBDA3=	-10.5302	-15.6946
LAMBDA4=	-0.0205	8.0006
LAMBDA5=	-0.0205	-8.0006
LAMBDA6=	-0.6824	0.8495
LAMBDA7=	-0.6824	-0.8495

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'_q	-0.0000	-0.0326	-0.0326	-0.0044	-0.0044	0.5369	0.5369
ω	-0.0000	0.0002	0.0002	0.5008	0.5008	-0.0010	-0.0010
δ	0.0000	0.0002	0.0002	0.5008	0.5008	-0.0010	-0.0010
V_1	1.0000	0.0006	0.0006	0.0000	0.0000	-0.0006	-0.0006
E_{FD}	-0.0000	0.0004	0.0004	-0.0029	-0.0029	0.5024	0.5024
V_3	0.0000	0.5309	0.5309	0.0045	0.0045	-0.0354	-0.0354
V_R	-0.0000	0.5003	0.5003	0.0011	0.0011	-0.0014	-0.0014

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00
0.00	0.00	-10.53	15.69	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	-10.53	-15.69	0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.02	8.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	-8.00	-0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.85	-0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.68	-0.85

ESTUDO DA MAQUINA SINCRONA CONECTADA AA BARRA INFINITA
 CARREGAMENTO = 0.9 + J0.1 PU - TENSÃO TERMINAL = 1.0 PJ
 CASO 3 - DIMINUIDAS AS REATANCIAS DA MAQUINA P/ A METADE

DADOS DA LINHA-

RE = 0.0250 PU XE = 0.4500 PU

DADOS DA MAQUINA-

XD = 0.5000 PU RM = 0.0010 PU
 XQ = 0.3750 PU TLD0 = 8.0000 S
 XLD = 0.1500 PU H = 4.0000 S

DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO E DA EXCITAÇÃO-

KR = 1.0000 PU TR = 0.0010 S
 KA = 400.00 PU TA = 0.0500 S
 KF = 0.0400 PU TF = 1.0000 S
 KE = 1.0000 PU TE = 0.9500 S
 SEL = 0.1140

CONDICÕES DE OPERAÇÃO DA MAQUINA-

VT = 1.0000 PU
 P = 0.9000 PU Q = 0.1000 PU

VALORES CALCULADOS-

PHI = 6.3402 GRAUS
 DELTA-BETA = 18.0002 GRAUS
 DELTA-ALFA = 41.3469 GRAUS
 IT = 0.9055 PU
 IR = 0.9000 PU IX = -0.1000 PU
 IQ0 = 0.8250 PU ID0 = -0.3732 PU
 VQ0 = 0.0511 PU VD0 = -0.3090 PU
 E0 = 1.1385 PU
 EQA0 = 1.0918 PU
 VINFIN = 1.0157 PU
 K1 = 1.2450 K4 = 0.3774
 K2 = 1.1891 K5 = -0.0430
 K3 = 0.6319 K6 = 0.7194

LISTA DOS AUTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9992	0.0
LAMBDA2=	-9.9703	15.3442
LAMBDA3=	-9.9703	-15.3442
LAMBDA4=	0.0403	7.6307
LAMBDA5=	0.0403	-7.6307
LAMBDA6=	-1.2557	0.9180
LAMBDA7=	-1.2557	-0.9180

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'_q	-0.0000	-0.0687	-0.0687	-0.0023	-0.0023	0.5710	0.5710
ω	-0.0000	0.0004	0.0004	0.4988	0.4988	0.0008	0.0008
δ	-0.0000	0.0004	0.0004	0.4988	0.4988	0.0008	0.0008
V_1	1.0000	0.0012	0.0012	0.0001	0.0001	-0.0013	-0.0013
E_{FD}	-0.0000	-0.0333	-0.0333	-0.0012	-0.0012	0.5345	0.5345
V_3	0.0000	0.6005	0.6005	0.0044	0.0044	-0.1048	-0.1048
V_R	-0.0000	0.4995	0.4995	0.0013	0.0013	-0.0008	-0.0008

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00
0.00	0.00	-9.97	15.34	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	-0.00	0.00	-9.97	-15.34	0.00	0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	7.63	-0.00	-0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-7.63	0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.92	-1.26	-0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-1.26

ESTUDO DA MAQUINA SINCRONA CONECTADA AA BARRA INFINITA
 CARREGAMENTO = 0.9 + J0.1 PU - TENSÃO TERMINAL = 1.0 PU
 CASO 4 - AUMENTADA A TENSÃO TERMINAL PARA 1.05 PU

DADOS DA LINHA-

RE = 0.0250 PU XE = 0.4500 PU

DADOS DA MAQUINA-

XD = 1.0000 PU RM = 0.0010 PU
 XQ = 0.7500 PU TLD0 = 8.0000 S
 XLD = 0.3000 PU H = 4.0000 S

DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO E DA EXCITAÇÃO-

KR = 1.0000 PU TR = 0.0010 S
 KA = 400.00 PU TA = 0.0500 S
 KF = 0.0400 PU TF = 1.0000 S
 KE = 1.0000 PU TE = 0.9500 S
 SEL = 0.1140

CONDICÕES DE OPERAÇÃO DA MAQUINA-

VT = 1.0500 PU
 P = 0.9000 PU Q = 0.1000 PU

VALORES CALCULADOS-

PHI = 6.3402 GRAUS
 DELTA-BETA = 29.8009 GRAUS
 DELTA-ALFA = 51.0514 GRAUS
 IT = 0.8624 PU
 IR = 0.8571 PU IX = -0.0952 PU
 IQ0 = 0.6965 PU ID0 = -0.5086 PU
 VQ0 = 0.9111 PU VD0 = -0.5218 PU
 E0 = 1.4205 PU
 EQA0 = 1.2933 PU
 VINFI = 1.0576 PU

K1 = 1.0833 K4 = 0.7542
 K2 = 1.1499 K5 = -0.0656
 K3 = 0.5174 K6 = 0.5312

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMUDA1=	-999.9994	0.0
LAMUDA2=	-10.2765	15.5389
LAMUDA3=	-10.2765	-15.5389
LAMUDA4=	0.0525	7.0944
LAMUDA5=	0.0525	-7.0944
LAMBDA3=	-0.9833	0.9440
LAMBDA7=	-0.9833	-0.9440

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'_q	0.0000	-0.0483	-0.0483	-0.0055	-0.0055	0.5538	0.5538
ω	0.0000	0.0005	0.0005	0.4993	0.4993	0.0001	0.0001
δ	0.0000	0.0005	0.0005	0.4993	0.4993	0.0001	0.0001
V_1	1.0000	0.0009	0.0009	0.0001	0.0001	-0.0010	-0.0010
E_{FD}	-0.0000	-0.0143	-0.0143	-0.0032	-0.0032	0.5175	0.5175
V_3	0.0000	0.5611	0.5611	0.0078	0.0078	-0.0688	-0.0688
V_R	-0.0000	0.4996	0.4996	0.0020	0.0020	-0.0017	-0.0017

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	-0.00	-10.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	-10.28	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.03	-7.09	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	-0.98	0.94	0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00	-0.98	-0.00	-0.94

ESTUDO DA MAQUINA SINCRONA CONECTADA AA BARRA INFINITA
 CARREGAMENTO = 0.9 + JO.1 PU - TENSÃO TERMINAL = 1.0 PU
 CASO 5 - DIMINUIDA A TENSÃO TERMINAL PARA 0.95 PU

DADOS DA LINHA-

RE = 0.0250 PU XE = 0.4500 PU

DADOS DA MAQUINA-

XD = 1.0000 PU RM = 0.0010 PU
 XG = 0.7500 PU TLD0 = 8.0000 S
 XLD = 0.3000 PU H = 4.0000 S

DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO E DA EXCITAÇÃO-

KR = 1.0000 PU TR = 0.0010 S
 KA = 400.00 PU TA = 0.0500 S
 KF = 0.0400 PU TF = 1.0000 S
 KE = 1.0000 PU TE = 0.9500 S
 SEL = 0.1140

CONDICÕES DE OPERAÇÃO DA MAQUINA-

VT = 0.9500 PU
 P = 0.9000 PU Q = 0.1000 PU

VALORES CALCULADOS-

PHI = 6.3402 GRAUS
 DELTA-BETA = 34.5979 GRAUS
 DELTA-ALFA = 60.3336 GRAUS
 IT = 0.9532 PU
 IR = 0.9474 PU IX = -0.1053 PU
 IQ0 = 0.7201 PU ID0 = -0.6246 PU
 VQ0 = 0.7820 PU VD0 = -0.5394 PU
 E0 = 1.4073 PU
 EGA0 = 1.2512 PU
 VINFIN = 0.9757 PU

 K1 = 0.8943 K4 = 0.7814
 K2 = 1.1865 K5 = -0.0944
 K3 = 0.5174 K6 = 0.5059

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9995	0.0
LAMBDA2=	-10.3145	15.5735
LAMBDA3=	-10.3145	-15.5735
LAMBDA4=	0.1244	6.4197
LAMBDA5=	0.1244	-6.4197
LAMBDA6=	-1.0173	0.9588
LAMBDA7=	-1.0173	-0.9588

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'_q	-0.0000	-0.0452	-0.0452	-0.0052	-0.0052	0.5504	0.5504
ω	-0.0000	0.0009	0.0009	0.4973	0.4973	0.0019	0.0019
δ	-0.0000	0.0009	0.0009	0.4973	0.4973	0.0019	0.0019
V_1	1.0000	0.0008	0.0008	0.0002	0.0002	-0.0010	-0.0010
E_{FD}	-0.0000	-0.0115	-0.0115	-0.0017	-0.0017	0.5132	0.5132
V_3	0.0000	0.5554	0.5554	0.0092	0.0092	-0.0646	-0.0646
V_R	-0.0000	0.4987	0.4987	0.0029	0.0029	-0.0017	-0.0017

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00
0.00	0.00	-10.31	15.57	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	-10.31	-15.57	0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.12	6.42	0.00	-0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	-6.42	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.96	-1.02	0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-1.02	-0.96

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9997	0.0
LAMBDA2=	-10.6943	15.8045
LAMBDA3=	-10.6943	-15.8045
LAMBDA4=	0.0349	6.7937
LAMBDA5=	0.0349	-6.7937
LAMBDA6=	-0.4875	0.8130
LAMBDA7=	-0.4875	-0.8130

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E_1^i	0.0000	-0.0221	-0.0221	-0.0346	-0.0046	0.5267	0.5267
ω	-0.0000	0.0003	0.0003	0.5004	0.5004	-0.0007	-0.0007
δ	0.0000	0.0003	0.0003	0.5004	0.5004	-0.0007	-0.0007
V_1	1.0000	0.0004	0.0004	0.0201	0.0001	-0.0004	-0.0004
E_{FD}	-0.0000	0.0101	0.0101	-0.0036	-0.0036	0.4936	0.4936
V_3	0.0000	0.5113	0.5113	0.0061	0.0061	-0.0174	-0.0174
V_R	-0.0000	0.4998	0.4998	0.0013	0.0013	-0.0011	-0.0011

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00
0.00	0.00	-10.69	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	-10.69	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	-6.79	-0.00	-0.00	-0.00
0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.81	0.00	0.00	-0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.49	0.81	0.00	-0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.49	0.00	-0.00

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDAL1=	-999.9994	0.0
LAMBDAL2=	-10.2987	15.5434
LAMBDAL3=	-10.2997	-15.5424
LAMBDAL4=	0.0899	4.7907
LAMBDAL5=	0.0899	-4.7907
LAMBDAL6=	-0.9976	0.9471
LAMBDAL7=	-0.9976	-0.9471

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E _q	-0.0001	-0.0475	-0.0475	0.0003	0.0003	0.5471	0.5471
w	-0.0000	0.0004	0.0004	0.4976	0.4976	0.0020	0.0020
δ	-0.0000	0.0004	0.0004	0.4976	0.4976	0.0020	0.0020
V ₁	1.0001	0.0008	0.0008	0.0002	0.0002	-0.0010	-0.0010
E _{FD}	-0.0000	-0.0135	-0.0135	0.0051	0.0051	0.5084	0.5084
V ₃	0.0000	0.5589	0.5589	-0.0321	-0.0321	-0.0568	-0.0568
V _R	-0.0000	0.5004	0.5004	0.0013	0.0013	-0.0016	-0.0016

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00
0.00	0.00	-10.30	15.54	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	-10.30	-15.54	0.00	-0.00	-0.00	-0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	4.79	-0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-4.79	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-1.00	0.95	0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9994	0.0
LAMBDA2=	-10.2798	15.5764
LAMBDA3=	-10.2798	-15.5764
LAMBDA4=	0.0666	9.5628
LAMBDA5=	0.0666	-9.5628
LAMBDA6=	-0.9942	0.9531
LAMBDA7=	-0.9942	-0.9531

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'_q	0.0000	-0.0460	-0.0450	-0.0093	-0.0093	0.5553	0.5553
w	0.0000	0.0008	0.0008	0.4990	0.4990	0.0003	0.0003
δ	0.0000	0.0008	0.0008	0.4990	0.4990	0.0003	0.0003
V_1	1.0000	0.0008	0.0008	0.0002	0.0002	-0.0010	-0.0010
E'_{FD}	-0.0000	-0.0123	-0.0123	-0.0073	-0.0073	0.5196	0.5196
V_3	0.0000	0.5587	0.5587	0.0140	0.0140	-0.0727	-0.0727
V_R	-0.0000	0.4972	0.4972	0.0045	0.0045	-0.0017	-0.0017

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	-0.00	-10.28	15.58	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-10.28	-15.58	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.95	0.95	0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.99	-0.95

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9997	0.0
LAMBDA2=	-10.2806	8.5954
LAMBDA3=	-10.2806	-8.5954
LAMBDA4=	0.0355	6.7340
LAMBDA5=	0.0355	-6.7340
LAMBDA6=	-0.9621	0.9684
LAMBDA7=	-0.9621	-0.9684

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'q	-0.0000	-0.0969	-0.0969	-0.0146	-0.0146	0.6115	0.6115
w	-0.0000	-0.0027	-0.0027	0.5024	0.5024	0.0003	0.0003
6	-0.0000	-0.0027	-0.0027	0.5024	0.5024	0.0003	0.0003
V ₁	1.0000	0.0009	0.0009	0.0001	0.0001	-0.0010	-0.0010
E _{FD}	-0.0000	-0.0273	-0.0273	-0.0105	-0.0105	0.5378	0.5378
V ₃	0.0000	0.6256	0.6256	0.0155	0.0155	-0.1451	-0.1451
V _R	-0.0000	0.4991	0.4991	0.0047	0.0047	-0.0038	-0.0038

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00
0.00	-0.00	-10.28	8.60	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00
0.00	0.00	0.00	-0.00	-10.28	-8.60	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	3.04	6.73	-0.00	0.00	-0.00	0.00
0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.04	-6.73	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00

LISTA DOS AUTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9989	0.0
LAMBDA2=	-20.2892	16.8461
LAMBDA3=	-20.2892	-16.8461
LAMBDA4=	0.0757	6.7752
LAMBDA5=	0.0757	-6.7752
LAMBDA6=	-0.9942	0.9508
LAMBDA7=	-0.9942	-0.9508

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E_1^i	-0.0001	-0.0487	-0.0487	-0.0049	-0.0049	0.5536	0.5536
w	-0.0000	-0.0003	-0.0003	0.4996	0.4996	0.0007	0.0007
δ	-0.0000	-0.0003	-0.0003	0.4996	0.4996	0.0007	0.0007
V_1	1.0002	0.0008	0.0008	0.0002	0.0002	-0.0010	-0.0010
EFD	-0.0000	-0.0139	-0.0139	-0.0021	-0.0021	0.5160	0.5160
V_3	0.0000	0.5624	0.5624	0.0067	0.0067	-0.0691	-0.0691
V_R	-0.0000	0.4998	0.4998	0.0010	0.0010	-0.0008	-0.0008

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00
0.00	-0.00	-20.29	16.85	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00
0.00	0.00	0.00	-0.00	-20.29	-16.85	0.00	-0.00	-0.00	-0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.03	6.78	0.00	-0.00
0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-6.78	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.99	0.95
0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.99

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9994	0.0
LAMBDA2=	-10.7668	27.4983
LAMBDA3=	-10.7668	-27.4983
LAMBDA4=	0.0006	6.8090
LAMBDA5=	0.0006	-6.8090
LAMBDA6=	-0.4412	0.7433
LAMBDA7=	-0.4412	-0.7433

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'_q	-0.0001	-0.0079	-0.0079	-0.0029	-0.0029	0.5108	0.5108
ω	0.0000	0.0001	0.0001	0.5011	0.5011	-0.0012	-0.0012
δ	-0.0000	0.0001	0.0001	0.5011	0.5011	-0.0012	-0.0012
V_1	1.0001	0.0003	0.0003	0.0001	0.0001	-0.0004	-0.0004
E_{FD}	-0.0000	0.0056	0.0056	-0.0017	-0.0017	0.4961	0.4961
V_3	0.0000	0.5018	0.5018	0.0020	0.0020	-0.0037	-0.0037
V_R	-0.0000	0.5000	0.5000	0.0003	0.0003	-0.0003	-0.0003

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	-10.77	27.50	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	-10.77	-27.50	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-6.81	-0.00	-0.00
-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	-0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00

LISTA DOS AJTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-999.9994	0.0
LAMBDA2=	-11.1964	24.3922
LAMBDA3=	-11.1964	-24.3922
LAMBDA4=	0.0119	6.7926
LAMBDA5=	0.0119	-6.7926
LAMBDA6=	-0.5229	1.2427
LAMBDA7=	-0.5229	-1.2427

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'q	-0.0000	-0.0122	-0.0122	-0.0052	-0.0052	0.5174	0.5174
w	-0.0000	0.0002	0.0002	0.5027	0.5027	-0.0028	-0.0028
δ	-0.0000	0.0002	0.0002	0.5027	0.5027	-0.0028	-0.0028
V ₁	1.0000	0.0004	0.0004	0.0001	0.0001	-0.0004	-0.0004
E _{FD}	-0.0000	0.0045	0.0045	-0.0037	-0.0037	0.4992	0.4992
V ₃	0.0000	0.5066	0.5066	0.0028	0.0028	-0.0095	-0.0095
V _R	-0.0000	0.5003	0.5003	0.0007	0.0007	-0.0010	-0.0010

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-1000.00	0.0	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	-0.00	-11.20	24.39	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-11.20	-24.39	0.00	-0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.01	6.79	0.00	-0.00
-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.01	-6.79
-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	1.24
-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00
-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00

LISTA DOS AUTOVALORES

	REAL	IMAGINARIO
LAMBDA1=	-199.9849	0.0
LAMBDA2=	-10.2966	15.4787
LAMBDA3=	-10.2966	-15.4787
LAMBDA4=	0.0912	6.7630
LAMBDA5=	0.0912	-6.7630
LAMBDA6=	-0.9993	0.9552
LAMBDA7=	-0.9993	-0.9552

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
E'_q	-0.0001	-0.0510	-0.0510	-0.0065	-0.0065	0.5575	0.5575
w	-0.0000	0.0006	0.0006	0.4986	0.4986	0.0007	0.0007
δ	-0.0000	0.0006	0.0006	0.4986	0.4986	0.0007	0.0007
V_1	1.0002	0.0041	0.0041	0.0003	0.0003	-0.0051	-0.0051
E'_{FD}	-0.0001	-0.0162	-0.0162	-0.0036	-0.0036	0.5205	0.5205
V_3	0.0000	0.5631	0.5631	0.0096	0.0096	-0.0727	-0.0727
V_R	-0.0001	0.4992	0.4992	0.0025	0.0025	-0.0017	-0.0017

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

-199.98	0.0	-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00
0.00	0.00	-10.30	15.48	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	-10.30	-15.48	0.00	0.00	-0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	6.76	-0.00	-0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-6.76	0.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-1.00	0.00
0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-1.00

CAPÍTULO 3

ESTUDO DE UM SISTEMA MULTIVARIÁVEL

Nos capítulos anteriores desenvolvemos a metodologia para a análise de sistemas de controle multivariáveis, para relacionar as variáveis de estado com os modos do sistema. Posteriormente, através do estudo de máquinas elétricas conectadas à rede elétrica, foi demonstrada a importância da influência relativa das variáveis de estado e da importância das relações de transferência, que são de particular interesse nos estudos de estabilidade dos sistemas. Nesta terceira parte, se desenvolverá o estudo de um sistema com múltiplas máquinas elétricas, visando inicialmente a representação de todos eles com um modelo como o que foi apresentado no capítulo anterior.

CAPÍTULO 3

O estudo de um sistema com múltiplas máquinas elétricas, tanto seria de ordem elevada, como consequentemente, o esforço computacional para resolver este sistema seria muito grande. Desta forma, as máquinas do sistema serão representadas pelo modelo clássico, com tensão constante e ângulo de potência transitória.

O sistema vai novamente ser considerado, desta vez, em termos de ponto de operação, para ser verificada a estabilidade dinâmica do sistema frente a pequenas perturbações.

3.1. Representação de máquinas elétricas

Neste estudo de sistema com múltiplas máquinas elétricas, estas serão representadas pelo modelo clássico, onde o ângulo de potência é considerado constante e a tensão é considerada transitória. O modelo de uma máquina elétrica é apresentado na Figura 3-1.

CAPÍTULO 3

ESTUDO DE UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS

Nos capítulos anteriores desenvolveu-se primeiramente a matriz dos fatores de participação, para relacionar as variáveis de estado com os modos do sistema. Posteriormente, através do estudo da máquina síncrona conectada à barra infinita, ficou comprovada a importância da influência relativa das variáveis de estado ω e δ , nos modos associados a oscilações de potência, que são de particular interesse nos estudos de estabilidade dinâmica. Neste terceiro capítulo, ao ser desenvolvido o estudo de um sistema com múltiplas máquinas, ficaria inviável, a princípio, a representação de todas elas com um modelo como o que foi empregado no capítulo anterior, onde cada máquina seria representada através de sete variáveis de estado. A matriz característica resultante seria de ordem elevada, como consequência, o esforço computacional para resolver este sistema seria muito grande. Desta forma, as máquinas do sistema serão representadas pelo modelo clássico, com tensão constante atrás da reatância transitória.

O sistema vai novamente ser considerado linearizado em torno do ponto de operação, pois será verificada a estabilidade dinâmica do sistema frente a pequenas perturbações.

3.1- Representação da máquina síncrona

Neste estudo do sistema com múltiplas máquinas, estas serão representadas pelo modelo mais simples possível, qual seja, de uma tensão constante atrás da reatância transitória, conforme o diagrama simplificado da figura (3-1).

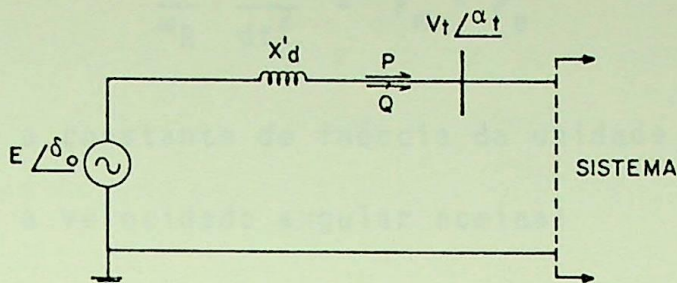


FIGURA (3-1) - MODELO SIMPLIFICADO DA MÁQUINA SÍNCRONA.

A tensão interna da máquina nas condições iniciais é calculada a partir da sua tensão terminal, pela seguinte equação [5]:

$$E \angle \delta' = (V_t + \frac{QX'_d}{V_t}) + j \left(\frac{PX'_d}{V_t} \right) \quad (3-1)$$

O ângulo δ' representa o defasamento entre a tensão interna da máquina e sua tensão terminal. Portanto, o ângulo interno da máquina, em relação à referência do sistema, será dado pela expressão:

$$\delta_0 = \delta' + \alpha_t \quad (3-2)$$

onde α_t é o ângulo da tensão terminal em relação à referência do sistema.

Com a representação da máquina por este modelo simples, onde inclusive não estão sendo representados os efeitos dos reguladores de tensão e velocidade, nem qualquer outro que possa causar amortecimento, toda a sua dinâmica fica sendo descrita por uma equação diferencial de segunda ordem, dada por [5]:

$$\frac{2H}{\omega_R} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (3-3)$$

onde: H - é a constante de inércia da unidade geradora

ω_R - é a velocidade angular nominal

δ - é o ângulo interno da máquina síncrona

P_m - é a potência mecânica fornecida à máquina

P_e - é a potência elétrica entregue ao sistema

3.2- Representação da rede

O sistema de transmissão será representado pelas linhas de transmissão e transformadores, que conectam as barras e pelas reatâncias em derivação, capacitores e reatores. As cargas são admitidas serem do tipo impedância constante, sendo posteriormente adicionadas às matrizes G e B , respectivamente, partes real e imaginária da matriz admitância nodal.

As cargas são transformadas para admitância, para posterior adição à matriz admitância nodal, pela seguinte expressão [5]:

$$Y_L = \frac{P_L}{V^2} - j \frac{Q_L}{V^2} \quad (3-4)$$

onde: P_L - é a potência ativa da carga

Q_L - é a potência reativa da carga

V - é a tensão na barra da carga

Posteriormente, a matriz admitância nodal é reduzida aos eixos correspondentes às barras internas das máquinas, através da eliminação das demais barras pelo processo de KRON.

3.3- Matriz característica do sistema

O sistema elétrico de potência, no ponto de operação em que se encontra, será testado frente a pequenas perturbações, com o objetivo de verificar a sua condição de estabilidade dinâmica.

3.3.1- A potência elétrica transmitida, a partir dos terminais da i -ésima máquina síncrona, é dada pela seguinte expressão [6]:

$$P_{ei} = V_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_i V_j (B_{ij} \operatorname{sen} \delta_{ij} + G_{ij} \operatorname{cos} \delta_{ij}) \quad (3-5)$$

onde: V_i, V_j - é a tensão nas barras i e j , respectivamente

G_{ij} - é o elemento ij da parte real da matriz admitância nodal

B_{ij} - é o elemento ij da parte imaginária da matriz admitância nodal

δ_{ij} - é a diferença angular entre as tensões V_i e V_j

Para cada uma das máquinas do sistema pode ser escrita uma equação para a potência elétrica transmitida. Substituindo a equação (3-5) em (3-3), resultará a nova relação que vai descrever o comportamento da máquina, deve ser lembrado que a tensão V_i será neste caso a tensão interna da máquina i e V_j a tensão i_n

terna da máquina \underline{j} , uma vez que o sistema \bar{j} foi considerado reduzido às barras internas das máquinas.

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j (B_{ij} \text{sen} \delta_{ij} + G_{ij} \text{cos} \delta_{ij}) \quad (3-6)$$

3.3.2- Atendendo à premissa de que o sistema \bar{e} é verificado frente a pequenas perturbações, será admitido um pequeno desvio angular, em relação ao estado inicial, que redundará nas seguintes expressões:

$$\delta_i = \delta_{i0} + \delta_{i\Delta} \quad (3-7)$$

$$\delta_{ij} = \delta_{ij0} + \delta_{ij\Delta} \quad (3-8)$$

$$P_e = P_{e0} + P_{e\Delta} \quad (3-9)$$

$$P_m = P_{m0} \quad (3-10)$$

O desvio angular δ_{Δ} é admitido pequeno o suficiente para tornar válidas as seguintes expressões:

$$\text{cos} \delta_{ij\Delta} \cong 1,0 \quad (3-11)$$

$$\text{sen} \delta_{ij\Delta} \cong \delta_{ij\Delta} \quad (3-12)$$

Levando-se em conta as relações (3-8), (3-11) e (3-12), pode-se determinar os elementos $\text{sen}\delta_{ij}$ e $\text{cos}\delta_{ij}$ da equação (3-6), em função dos deslocamentos angulares existentes na condição de estado inicial e do incremento destes ângulos:

$$\text{cos}\delta_{ij} \cong \text{cos}\delta_{ijo} - \delta_{ij\Delta} \text{sen}\delta_{ijo} \quad (3-13)$$

$$\text{sen}\delta_{ij} \cong \text{sen}\delta_{ijo} + \delta_{ij\Delta} \text{cos}\delta_{ijo} \quad (3-14)$$

Aplicando-se as relações (3-7), (3-10), (3-13) e (3-14) na equação (3-6), resulta:

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \frac{d^2\delta_{i\Delta}}{dt^2} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j (B_{ij} \text{cos}\delta_{ijo} - G_{ij} \text{sen}\delta_{ijo}) \delta_{ij\Delta} \quad (3-15)$$

O segundo membro de (3-15) é o negativo do incremento de potência transferida a partir da máquina i, ou seja:

$$P_{ei\Delta} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j (B_{ij} \text{cos}\delta_{ijo} - G_{ij} \text{sen}\delta_{ijo}) \delta_{ij\Delta} \quad (3-16)$$

Na equação (3-16) pode-se definir o fator que está multiplicando o incremento angular $\delta_{ij\Delta}$, como sendo o

coeficiente de potência sincronizante entre as máquinas i e j , dado pela expressão [5]:

$$P_{sij}^{\Delta} = E_i E_j (B_{ij} \cos \delta_{ijo} - G_{ij} \sin \delta_{ijo}) \quad (3-17)$$

Este coeficiente mede a variação da potência elétrica da máquina i devido à variação do ângulo entre as máquinas i e j , com todos os outros ângulos sendo mantidos constantes. As equações (3-16) e (3-15) podem ser escritas em função do coeficiente de potência sincronizante, ficando da seguinte forma:

$$P_{ei\Delta} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{sij} \delta_{ij\Delta} \quad (3-18)$$

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \frac{d^2 \delta_{i\Delta}}{dt^2} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{sij} \delta_{ij\Delta} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3-19)$$

A equação (3-19) representa o comportamento dinâmico da máquina síncrona frente a pequenas perturbações. Ao ser variado o índice i de 1 até n , terão sido escritas as equações para as n máquinas do sistema.

3.3.3- O conjunto de equações representado por (3-19), ao possuir $\sum \delta_{ij} = 0$, resulta por ser linearmente dependente, ou seja, em (3-19) apenas $(n-1)$ equações são independentes. Assim, subtraindo-se a n -ésima equação da i -ésima equação, com ambas escritas numa forma

mais conveniente que (3-19), obter-se-á:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \delta_{in\Delta}}{dt^2} + \frac{\omega_R}{2H_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{sij} \delta_{ij\Delta} - \\ - \frac{\omega_R}{2H_n} \sum_{j=1}^{n-1} P_{snj} \delta_{nj\Delta} = 0 \end{aligned} \quad (3-20)$$

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

A diferença angular entre as máquinas i e j , pode ser expressa em função da diferença angular destas máquinas em relação à n -ésima máquina, pela seguinte relação:

$$\delta_{ij\Delta} = \delta_{in\Delta} - \delta_{jn\Delta} \quad (3-21)$$

Em função de (3-21), a equação (3-20) pode ser modificada para:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \delta_{in\Delta}}{dt^2} + \frac{\omega_R}{2H_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{sij} \delta_{in\Delta} - \frac{\omega_R}{2H_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{sij} \delta_{jn\Delta} - \\ - \frac{\omega_R}{2H_n} \sum_{j=1}^{n-1} P_{snj} \delta_{nj\Delta} = 0 \end{aligned} \quad (3-22)$$

As parcelas referentes a $j=i$ no primeiro e segundo somatórios da equação (3-22) tem sinais contrários, isto permite fazer com que em ambos os somatórios se

considere matematicamente válidas as parcelas em que $j=i$. No segundo somatório a parcela referente a $j=n$ pode ser omitida visto que $\delta_{nn\Delta} = 0$, ficando este somatório válido para j variando de 1 até $(n-1)$. Considerando ainda que $\delta_{nj\Delta} = -\delta_{jn\Delta}$, a equação (3-22) passa a ter a seguinte forma:

$$\frac{d^2 \delta_{in\Delta}}{dt^2} + \frac{\omega_R}{2H_i} \left(\sum_{j=1}^n P_{sij} \right) \delta_{in\Delta} + \frac{\omega_R}{2} \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{P_{snj}}{H_n} - \frac{P_{sij}}{H_i} \right) \delta_{jn\Delta} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (3-23)$$

Deve ser ressaltado que as parcelas que teriam os elementos P_{sij} (quando $j=i$ no primeiro e segundo somatórios) nem chegam a ser determinadas, visto anularem-se mutuamente. Estes elementos P_{sij} também não teriam significado físico.

3.3.4- Agora a expressão (3-23) representa um conjunto de $(n-1)$ equações diferenciais de 2.^a ordem, linearmente independentes. Para estas equações serem passadas para o espaço de estado, considerar-se-ã as duas variáveis de estado da máquina síncrona, de acordo com o modelo empregado, de tal forma que:

$$\frac{d\delta_{in\Delta}}{dt} = \dot{\delta}_{in\Delta} = \omega_{in\Delta} \quad (3-24)$$

$$\frac{d^2 \delta_{in\Delta}}{dt^2} = \ddot{\delta}_{in\Delta} = \dot{\omega}_{in\Delta} \quad (3-25)$$

A equação de estado do sistema, conforme ficou definido por (1-1), no caso do problema que está sendo abordado neste capítulo, toma o seguinte aspecto particular (a partir daqui, por questão de simplicidade será omitido o subscrito " Δ ", porém as variáveis de estado continuarão a representar variações em torno de ponto de operação) [5]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_{1n} \\ \dot{\delta}_{2n} \\ \vdots \\ \dot{\delta}_{n-1,n} \\ \hline \dot{\omega}_{1n} \\ \dot{\omega}_{2n} \\ \vdots \\ \dot{\omega}_{n-1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & | & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \hline a'_{11} & a'_{12} & \dots & a'_{1,n-1} & | & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a'_{21} & a'_{22} & \dots & a'_{2,n-1} & | & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & | & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a'_{n-1,1} & a'_{n-1,2} & \dots & a'_{n-1,n-1} & | & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{1n} \\ \delta_{2n} \\ \vdots \\ \delta_{n-1,n} \\ \hline \omega_{1n} \\ \omega_{2n} \\ \vdots \\ \omega_{n-1,n} \end{bmatrix}$$

(3-26)

Nesta equação de estado (3-26), estão facilmente iden

tificáveis, a matriz característica do sistema e o vetor de variáveis de estado. Os elementos a'_{ij} , que aparecem na matriz característica, são os coeficientes das variáveis de estado nas equações do conjunto representado por (3-23).

3.3.5- A matriz característica do sistema pode ser escrita na forma particionada, através dos blocos que a compõe, resultando o seguinte:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A' & 0 \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

onde: 0 - é uma matriz de zeros

I - é a matriz identidade

A' - é a matriz com os coeficientes das equações diferenciais do conjunto (3-23)

A resposta livre do sistema é obtida através da determinação dos autovalores de sua matriz característica A, que neste caso particular são obtidos a partir da expressão:

$$\det(\lambda^2 I - A') = 0 \quad (3-28)$$

A equação (3-28) mostra que os autovalores serão obtidos aos pares, que terão mesmo valor absoluto e sinais contrários, podendo ser imaginários puros ou

reais. No caso de aparecer autovalor real, quando necessariamente pelo menos um será positivo, o sistema é considerado instável. Caso todos os autovalores venham a ser imaginários puros o sistema será considerado estável, visto que não está sendo representado o amortecimento, a resposta do sistema será oscilatória.

Desta forma, na prática se determinam os quadrados dos autovalores finais, que são na realidade os autovalores da matriz A' dos coeficientes das equações diferenciais do sistema. Assim, se todos estes autovalores (da matriz A') forem negativos, o sistema é estável e as frequências correspondentes serão dadas pela raiz quadrada dos respectivos autovalores. Por outro lado, se existir algum destes autovalores que seja positivo, o sistema é considerado instável.

3.4- Programação desenvolvida para a análise da estabilidade dinâmica do sistema

Com o objetivo de aplicar os conceitos desenvolvidos com a definição da matriz dos fatores de participação, no estudo das condições de estabilidade dinâmica de um sistema multi máquinas, foi elaborada uma programação computacional baseada no que foi desenvolvido até aqui, no presente capítulo, e na definição da matriz dos fatores de participação, no primeiro capítulo.

Toda a programação foi desenvolvida em linguagem APL (A Programming Language), na qual é bastante facilitada a operação com conjuntos (vetores e matrizes). A listagem dos progra

mas, ou funções como são chamadas na linguagem APL, encontra-se no anexo 2.

A seguir será explicado, de maneira suscinta, como é procedida a determinação das condições de estabilidade dinâmica do sistema elétrico de potência, através da programação desenvolvida.

3.4.1- A partir dos dados do sistema, configuração, parâmetros dos elementos que compõem a rede, cargas e despachos de geração, é procedida a determinação das condições iniciais através do processamento de um caso de fluxo de potência. Disto resulta um vetor com o perfil de tensões do sistema, em módulo e ângulo, a geração de reativo nas barras com tensão controlada e a geração de ativo e reativo na barra "swing". Também são obtidas nesta fase as matrizes G e B que compõem a matriz de admitância nodal.

3.4.2- Em função da tensão existente na barra terminal das máquinas, é determinada a respectiva tensão interna, ou a chamada tensão atrás da reatância transitória. Para tanto é utilizada a função APL "EIDELTI", que foi definida com base nas equações (3-1) e (3-2).

3.4.3- As cargas são transformadas para impedância constante e conseqüentemente para admitância, conforme está definido pela equação (3-4). As parcelas da admitância são adicionadas às respectivas matrizes G e B. Estas operações são realizadas pela função APL "YLOAD".

Para evitar a expansão dos eixos das matrizes G e B, com a adição de barras internas às máquinas, a matriz B é corrigida com a inclusão da reatância transitória das máquinas, com isso, as antigas barras terminais passam a ser as barras internas. Isto é feito pela função APL "CORB".

3.4.4- Com as matrizes G e B já corrigidas, é procedida a redução destas aos eixos referentes às barras internas das máquinas, através do processo de KRON. A função APL "REDUZ" realiza esta operação.

3.4.5- A obtenção da matriz característica do sistema é iniciada pela determinação da matriz dos coeficientes de potência sincronizante, referentes às n máquinas do sistema. A função APL "MPSIJ", através do que define a equação (3-17), faz a montagem desta matriz. Com base na equação (3-23) foram elaboradas as funções APL "HCORPS" e "MATCAR", que finalizam a determinação da matriz característica do sistema, deve ser ressaltado que está sendo obtida a matriz A' referenciada no item 3.3.5.

3.4.6- A equação característica do sistema é obtida a partir da matriz característica, por meio das funções APL "EQCAR" e "DNLVSK", que utilizam o processo desenvolvido por Danilevski. As matrizes de transformação são mantidas, para serem posteriormente utilizadas na mudança de base dos autovetores, obtidos também atra

vês do processo de Danilevski [7].

3.4.7- A determinação das raízes da equação característica, que são os autovalores do sistema, é feita através do processo iterativo de Newton-Raphson, combinado com deflações sucessivas do polinômio característico. Este método está implementado nas funções APL "SOLCAR" e "NRSON".

Na obtenção de cada raiz, a convergência é testada em função de dois critérios distintos: no primeiro considera-se válida a aproximação da raiz que apresente o correspondente resíduo (resultado do cálculo do polinômio característico, no ponto dado pela aproximação atual da raiz) inferior a uma determinada tolerância estipulada pelo usuário; no segundo critério uma raiz é considerada válida, quando entre duas aproximações sucessivas a diferença entre elas seja inferior à precisão de cálculo do computador, ou seja, dentro do processo numérico estas duas aproximações serão idênticas. Este segundo critério de convergência é necessário, em razão dos coeficientes da equação característica tornarem-se numericamente elevados, à medida em que a ordem do sistema vai aumentando.

3.4.8- Uma vez obtidos os autovalores do sistema, os correspondentes autovetores direitos e esquerdos são obtidos através do processo de Danilevski, para tanto é utilizada a função APL "AVTLR". Convém lembrar que os autovetores esquerdos de uma dada matriz A, são

iguais aos correspondentes autovetores direitos da matriz transposta A^T . Todos os autovalores e autovetores são verificados através da função APL "MATDIAG", que realiza a passagem da matriz característica original, para a forma canônica diagonal, com os autovalores explicitados na diagonal.

3.4.9 - Finalmente, através da função APL "MATPKI", é determinada a matriz dos fatores de participação, pela aplicação das equações (1-34) e (1-35).

3.4.10- Foi desenvolvida a função APL "STAB", que faz o gerenciamento da execução das demais funções, que são empregadas na análise da condição de estabilidade dinâmica do sistema elétrico de potência.

3.5- Casos estudados

Na análise do sistema multimáquinas foi realizada, também, uma infinidade de processamentos, porém, a título de exemplo, será apresentada apenas uma série de casos. O sistema estudado foi baseado no Sistema Interligado Sul-Sudeste Brasileiro, dele constam 60 barras e 13 máquinas. Ao serem utilizados parâmetros semelhantes aos do sistema real, porém com configuração ligeiramente alterada, os resultados não necessariamente deverão condizer com o desempenho do sistema real.

Na figura (3-2) é representado o diagrama unifilar do sistema, que é analisado no presente capítulo, os parâmetros das

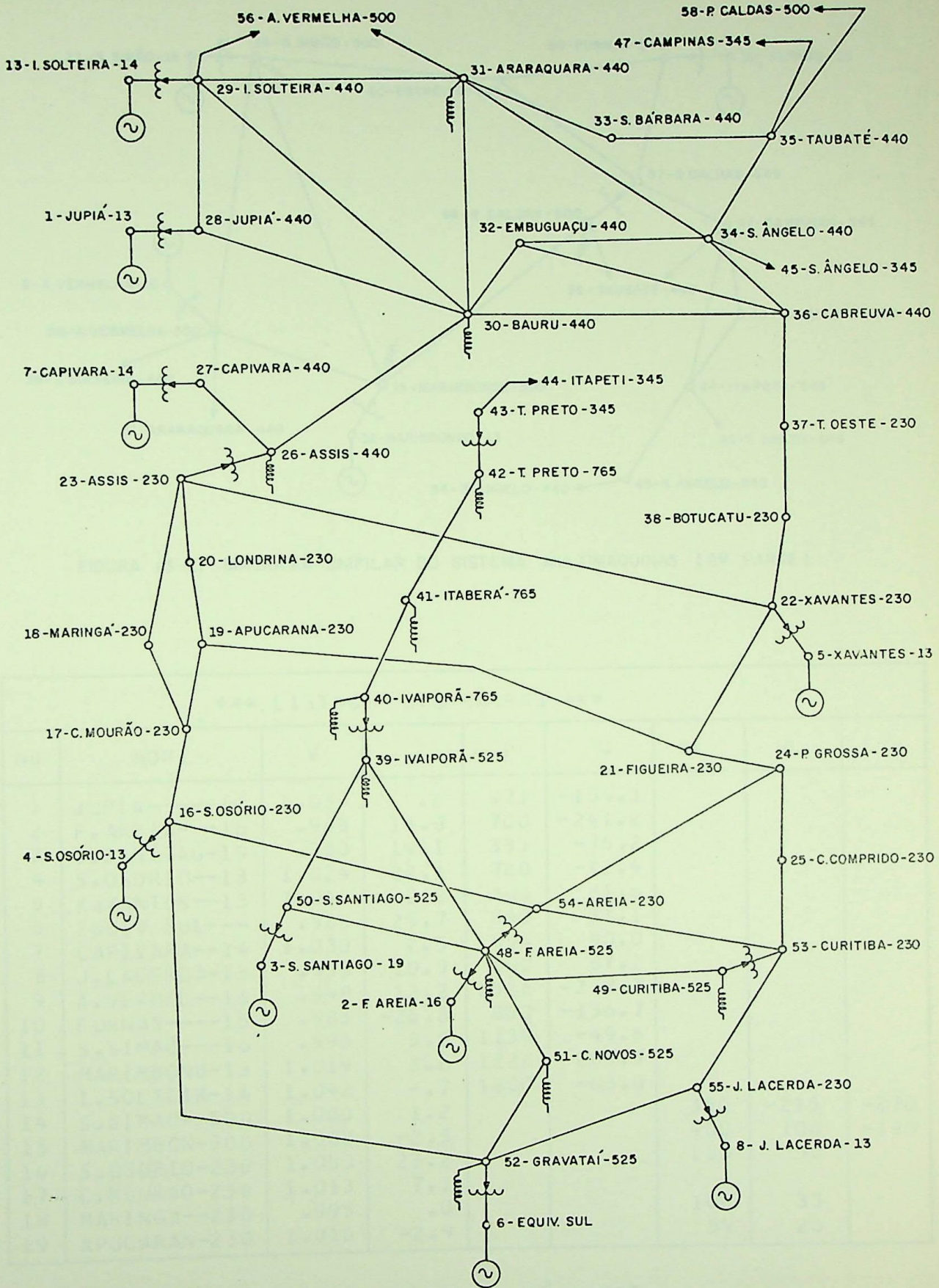


FIGURA (3-2) - DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA MULTIMÁQUINAS (1ª PARTE).

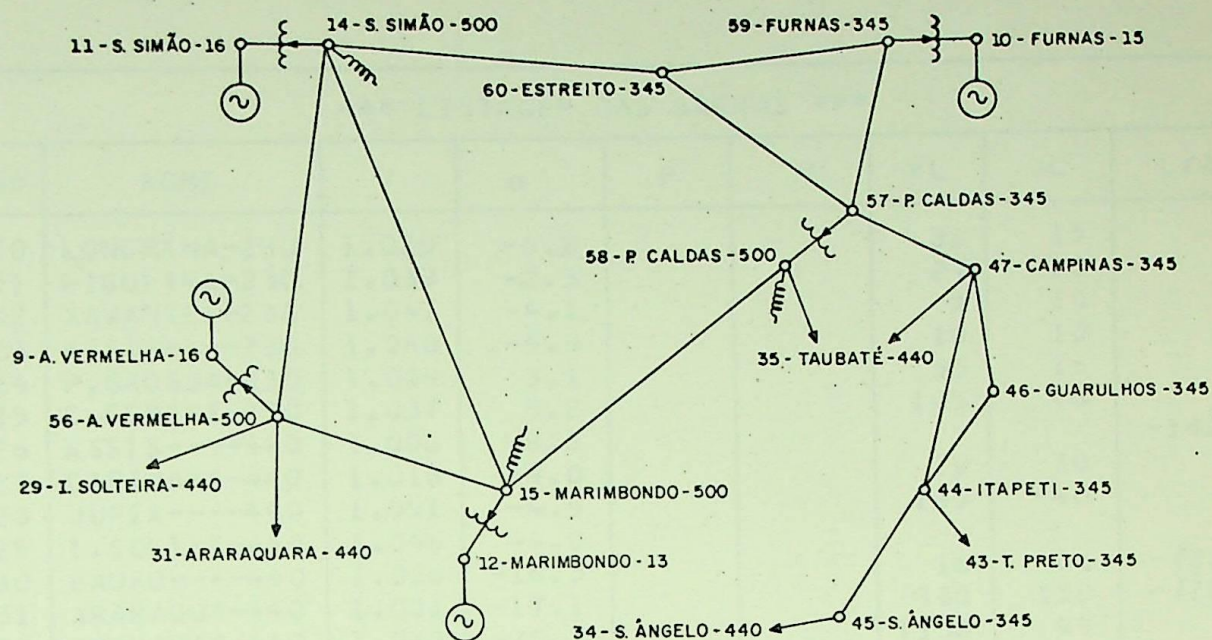


FIGURA (3-2) - DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA MULTIMAQUINAS (2ª PARTE).

*** LISTAGEM DAS BARRAS ***								
Nº	NOME	V	α	P	Q	PL	QL	C/R
1	JUPIA-----13	1.035	.0	971	-154.3			
2	F.AREIA---16	.988	14.8	700	-241.2			
3	S.SANTIAG-19	.980	19.1	333	-76.2			
4	S.OSORIO--13	1.024	28.1	780	-12.4			
5	XAVANTES--13	1.040	2.2	303	81.0			
6	EQUIV SUL---	.988	29.7	850	-31.1			
7	CAPIVARA--14	1.030	2.5	555	90.0			
8	J.LACERDA-13	.993	10.9	190	87.2			
9	A.VERMEL--16	.949	12.2	1326	-257.3			
10	FURNAS-----15	.983	-26.8	850	-136.7			
11	S.SIMAO---16	.993	5.8	1139	-49.6			
12	MARIMBOND-13	1.019	3.6	1226	285.7			
13	I.SOLTEIR-14	1.042	-.7	1800	-63.0			
14	S.SIMAO--500	1.000	1.2			350	-215	-270
15	MARIMBON-500	1.000	-2.5			400	100	-190
16	S.OSORIO-230	1.050	23.2			180	50	
17	C.MOURAO-230	1.013	7.1					
18	MARINGA--230	.995	.0			106	33	
19	APUCARAN-230	1.016	-2.9			59	28	

TABELA (3-1) - 1ª PARTE

*** LISTAGEM DAS BARRAS ***								
NB	NOME	V	α	P	Q	PL	QL	C/R
20	LONDRINA-230	1.020	-4.8			81	15	
21	FIGUEIRA-230	1.039	-2.3			27	10	
22	XAVANTES-230	1.047	-4.1			3	10	
23	ASSIS----230	1.040	-5.9			10	10	
24	P.GROSSA-230	1.039	3.1			55	15	
25	C.COMPRI-230	1.037	5.2			105	46	
26	ASSIS----440	1.000	-8.8					-180
27	CAPIVARA-440	1.018	-4.0			79	30	
28	JUPIA----440	1.051	-4.5			135	-40	
29	I.SOLTER-440	1.045	-4.0					
30	BAURU----440	1.026	-16.5			16	80	-720
31	ARARAQUA-440	1.001	-17.1			330	150	-720
32	EMBUGUAC-440	1.030	-30.7			1350	99	
33	S.BARBAR-440	1.002	-23.4			122	232	
34	S.ANGELO-440	1.029	-30.3			193	107	
35	TAUBATE--440	1.036	-31.5			310	80	
36	CABREUVA-440	1.025	-28.9			636	160	
37	T.OESTE--230	.983	-27.2			216	43	
38	BOTUCATU-230	.991	-12.6			-4	71	
39	IVAIPORA-525	1.017	4.2					-210
40	IVAIPORA-765	1.001	-1.1					-210
41	ITABERA--765	1.003	-11.3					-440
42	T.PRETO--765	.933	-24.0					-210
43	T.PRETO--345	.936	-31.2			380	200	
44	ITAPETI--345	.942	-32.3			455	30	
45	S.ANGELO-345	.945	-31.3					
46	GUARULHO-345	.937	-37.9			600	150	
47	CAMPINAS-345	.974	-36.4			322	246	
48	F.AREIA--525	1.030	11.5					-150
49	CURITIBA-525	1.023	7.7					-150
50	S.SANTIA-525	1.030	10.0					
51	C.NOVS--525	1.034	15.8					-150
52	GRAVATAI-525	1.000	22.8			350	180	-150
53	CURITIBA-230	1.045	6.8			168	35	
54	AREIA----230	1.042	11.9			67	12	
55	J.LACERD-230	1.000	8.5			283	160	
56	A.VERMEL-500	1.000	1.3					
57	POCOS ---345	.974	-34.4			700	100	
58	POCOS----500	.970	-31.0			950	300	-240
59	FURNAS---345	1.000	-31.5			940	-168	
60	ESTREITO-345	1.011	-27.4					

TABELA (3-1) - 2ª PARTE

*** LISTAGEM DOS DADOS DE LINHAS ***							
BI	BF	R-	X-	B	LC	TAP	CIR
1	28	.000	.870	.0000	0	1.000	1
2	48	.000	.820	.0000	0	1.000	1
3	50	.000	4.800	.0000	0	1.000	1
4	16	.000	1.150	.0000	0	1.000	1
5	22	.000	3.800	.0000	0	1.000	1
6	52	.000	1.400	.0000	0	1.000	1
7	27	.000	2.160	.0000	0	1.000	1
8	55	.000	2.100	.0000	0	1.000	1
9	56	.000	1.350	.0000	0	1.000	1
10	59	.000	.960	.0000	0	1.000	1
11	14	.000	.690	.0000	0	1.000	1
12	15	.000	.880	.0000	0	1.000	1
13	29	.000	.350	.0000	0	1.000	1
14	60	.350	6.500	400.0000	0	.000	1
14	56	.080	1.360	112.8000	0	.000	1
14	15	1.000	14.830	140.0000	0	.000	1
15	58	.250	3.890	350.0000	0	.000	1
15	56	.130	1.960	164.7000	0	.000	1
16	17	1.800	9.100	81.0000	0	.000	1
16	54	1.500	8.000	53.0000	0	.000	1
16	52	5.800	29.000	170.0000	0	.000	1
17	19	2.200	11.500	20.0000	0	.000	1
17	18	1.600	8.000	13.5000	0	.000	1
18	23	3.800	20.000	33.1000	0	.000	1
19	21	2.200	11.400	19.0000	0	.000	1
19	20	.800	3.200	10.4000	0	.000	1
20	23	1.400	7.600	24.6000	0	.000	1
21	24	2.600	13.500	22.6000	0	.000	1
21	22	2.000	10.300	17.8000	0	.000	1
22	23	1.100	6.300	19.2000	0	.000	1
22	38	1.040	5.900	55.0000	0	.000	1
23	26	.000	4.340	.0000	0	1.000	1
24	25	1.900	9.800	17.0000	0	.000	1
24	54	3.500	17.800	30.7000	0	.000	1
25	53	.400	2.200	30.0000	0	.000	1
26	27	.140	1.800	183.4000	0	.000	1
26	30	.180	2.330	134.0000	0	.000	1
28	30	.200	2.490	635.5000	0	.000	1
28	29	.070	.960	57.4000	0	.000	1
29	30	.210	2.590	681.2000	0	.000	1
29	31	.200	2.000	440.0000	0	.000	1
29	56	.180	2.410	130.0000	0	.000	1

TABELA (3-2) - 1.^a PARTE

*** LISTAGEM DOS DADOS DE LINHAS ***							
BI	BF	R-	X-	B	LC	TAP	CIR
30	31	.130	1.720	102.7000	0	.000	1
30	36	.150	1.880	482.0000	0	.000	1
30	32	.200	2.430	622.0000	0	.000	1
31	34	.190	2.340	597.0000	0	.000	1
31	33	.150	2.200	190.0000	0	.000	1
31	56	.400	5.380	290.0000	0	.000	1
32	36	.090	1.210	72.2000	0	.000	1
32	34	.100	1.240	74.2000	0	.000	1
33	35	.290	3.880	220.0000	0	.000	1
34	36	.140	1.550	110.3000	0	.000	1
34	35	.120	1.600	92.0000	0	.000	1
35	47	.050	4.110	567.0000	0	.000	1
35	58	.240	3.680	300.0000	0	.000	1
36	37	.370	5.700	46.0000	0	.000	1
37	38	1.540	9.100	27.7000	0	.000	1
39	48	.160	2.010	245.5000	0	.000	1
39	50	.150	1.940	237.0000	0	.000	1
40	41	.060	1.560	745.3000	0	.000	1
40	39	.000	.790	.0000	0	.930	1
41	42	.070	1.830	577.0000	0	.000	1
43	42	.000	.930	.0000	0	.960	1
43	44	.000	.510	67.0000	0	.000	1
44	46	.160	1.520	28.7000	0	.000	1
44	47	.510	6.100	100.0000	0	.000	1
44	45	.020	.210	14.4000	0	.000	1
45	34	.000	.240	.0000	0	.920	1
46	47	.200	2.000	50.0000	0	.000	1
47	57	.200	2.500	30.0000	0	.000	1
48	51	.160	2.050	250.0000	0	.000	1
48	50	.100	1.300	160.0000	0	.000	1
48	54	.000	1.260	.0000	0	.989	1
48	49	.210	2.700	325.0000	0	.000	1
49	53	.000	.620	.0000	0	.978	1
51	52	.250	3.090	377.0000	0	.000	1
52	55	4.400	22.000	99.0000	0	.000	1
53	55	3.600	18.000	81.0000	0	.000	1
53	54	4.500	23.400	39.1000	0	.000	1
57	58	.000	2.930	.0000	0	.943	1
57	60	.280	3.060	209.5000	0	.000	1
57	59	.230	2.100	135.4000	0	.000	1
59	60	.210	2.130	142.5000	0	.000	1

TABELA (3-2) - 2ª PARTE

linhas de transmissão e transformadores encontram-se na tabela (3-2), os dados estão em por cento na base de 100 MVA. Os valores das gerações, cargas e reatores encontram-se na tabela (3-1), que contém os dados das barras. A barra considerada como "swing" é a de Jupiã-13, enquanto que a máquina considerada como referência, para atender ao que está estabelecido no item 3.3.3, é aquela correspondente à usina de Ilha Solteira. Portanto os deslocamentos angulares das máquinas das demais usinas serão referenciados à Ilha Solteira.

PARÂMETROS DAS MÁQUINAS			
Barra	Usina	X_d' pu	H MWs/MVA
1	JUP-Jupiã	0,0542	70,60
2	FOA-F.Areia	0,0550	74,40
3	SSA-S.Santiago	0,2480	14,30
4	SOS-S.Osório	0,1040	39,40
5	XAV-Xavantes	0,2280	16,20
6	SUL-Equiv.Sul	0,1000	37,00
7	CPV-Capivara	0,1200	40,00
8	JLA-J.Lacerda	0,4420	13,42
9	AVE-A.Vermelha	0,0607	66,30
10	FNS-Furnas	0,0655	65,44
11	SSI-S.Simão	0,0670	88,12
12	MBO-Marimbondo	0,0697	76,76
13	ILS-I.Solteira	0,0256	130,80

TABELA (3-3)

As usinas são representadas por uma máquina equivalente às que se considerou que estavam em operação. Os parâmetros referentes a estas máquinas equivalentes, que foram utilizados nos estudos, encontram-se listados na tabela (3-3), na base de 100 MVA.

Convém ressaltar que na análise dos casos serão determinados os autovalores da matriz A' , conforme ficou estabelecido nas equações (3-27) e (3-28), desta forma, as frequências de oscilação do sistema em rad/s, serão dadas pela raiz quadrada dos autovalores, que constarão das listagens de saída do programa (caso estes sejam negativos).

Os relatórios emitidos pelo programa, referentes aos casos apresentados a seguir, encontram-se mais adiante, a partir da página 116, onde estão listados os autovalores, a matriz dos fatores de participação e a matriz característica na forma canônica diagonal.

3.5.1- Caso base

O perfil de tensões do sistema, referente ao caso base, encontra-se na tabela (3-1). A transferência de potência do Sistema Sul para o Sistema Sudeste é de 1300 MW, sendo que destes, 1200 MW são transmitidos pela interligação em 765 kV e o restante pelas interligações em 230 kV.

A determinação dos autovalores, nesta condição de estado, mostrou que o sistema é instável, por possuir autovalor positivo. Na tabela (3-4) encontram-se sumariados os autovalores, as frequências corresponden

tes e as usinas cujas variáveis de estado mais influenciam os respectivos autovalores, conforme são associados através da matriz dos fatores de participação (vide página 116).

ordem	autovalor	frequência Hz	máquinas que mais influenciam
1	3,0093	-	SUL, SOS, FOA
2	-17,8206	0,6719	AVE, SSI, CPV
3	-19,5431	0,7036	FNS, AVE
4	-21,4870	0,7377	SSI
5	-22,0184	0,7468	SOS, SUL
6	-24,2030	0,7830	MBO, AVE
7	-24,6993	0,7910	SSA, SUL, FOA
8	-26,4961	0,8192	CPV, MBO
9	-29,9999	0,8717	SSA, JLA, FOA
10	-32,2858	0,9043	JLA, FOA
11	-39,3199	0,9980	XAV
12	-41,2630	1,0224	JUP

TABELA (3-4) CASO BASE

Na lista das máquinas que mais influenciam os autovalores, está sendo adotado o critério de colocar as três máquinas que possuam os maiores fatores de participação, desde que superiores a 0,15. Assim, no caso do autovalor $\lambda_{11} = -39,3199$, verifica-se através da matriz dos fatores de participação, que ele é muito influenciado pela máquina de Xavantes,

$p_{5,11} = 0,8557$, das demais máquinas a influência é bastante reduzida.

Quanto ao autovalor $\lambda_1 = 3,0093$, que mostrou ser o sistema instável, pode-se ver pela matriz dos fatores de participação, que ele recebe influência relativa maior das variáveis de estado referentes às máquinas: Equiv.Sul com $p_{61} = 0,3432$, S.Osório com $p_{41} = 0,2223$ e F.Areia com $p_{21} = 0,1767$. Estas informações indicam os locais onde devem ser promovidas as alterações, para tornar o sistema estável. Os casos que serão apresentados a seguir, foram elaborados com alterações a partir deste caso base.

3.5.2- Caso 1 - Com alteração da reatância transitória da máquina Equiv.Sul para a metade

Ao ser analisado este caso, verifica-se que a alteração não foi suficiente para tornar o sistema estável, apesar do autovalor λ_1 sofrer uma alteração significativa, de 3,0093 para 0,6919. Os resultados deste caso encontram-se sumarizados na tabela (3-5), que foi montada a partir do relatório da página 117. Comparando-se este caso com o base, verifica-se que o autovalor que sofreu a maior alteração foi $\lambda_7 = -24,6993$ no caso base, que passou para $\lambda_{12} = -41,7349$ no caso atual. No caso base este autovalor era mais influenciado pelas máquinas: SSA, SUL e FOA, sendo que agora, após a alteração da reatância da máquina SUL, ficou sendo relativamente mais influenciado por esta máquina. Os autovalores que estão mais relacionados

ordem	autovalor	frequência Hz	máquinas que mais influenciam
1	0,6919	-	SOS, FOA, SUL
2	-18,2795	0,6805	AVE, CPV, SSI
3	-19,6346	0,7052	FNS, SSI
4	-21,6152	0,7399	SSI, FNS, AVE
5	-23,0527	0,7642	SOS
6	-24,2471	0,7837	MBO, AVE
7	-26,5084	0,8194	CPV, MBO
8	-29,0279	0,8575	SSA, JLA
9	-32,0789	0,9014	FOA, JLA
10	-39,3126	0,9979	XAV
11	-41,2942	1,0227	JUP
12	-41,7349	1,0282	SUL

TABELA (3-5) CASO 1

com máquinas do sistema Sudeste, que estão mais longe daquela em que se procedeu a alteração, experimentaram apenas pequenas mudanças, como é o caso dos autovalores λ_3 , λ_4 , λ_6 , λ_8 , λ_{11} e λ_{12} do caso base original.

Deve ser ressaltado que a ligação entre os autovalores antigos e novos, torna-se possível através das informações contidas na matriz dos fatores de participação.

3.5.3- Caso 2 - Com alteração da reatância transitória da máquina de S.Osório para a metade

ordem	autovalor	frequência Hz	máquinas que mais influenciam
1	1,3015	-	SUL, FOA
2	-17,8312	0,6721	AVE, SSI, CPV
3	-19,5868	0,7044	FNS, AVE
4	-21,6049	0,7398	SSI, FNS, AVE
5	-24,1599	0,7823	MBO, SUL
6	-24,2609	0,7839	MBO, SUL
7	-26,4104	0,8179	CPV, MBO
8	-29,6386	0,8665	SSA, FOA, JLA
9	-31,9091	0,8990	JLA
10	-36,1864	0,9574	SOS, XAV, FOA
11	-40,7997	1,0166	SOS, JUP, XAV
12	-41,3987	1,0240	JUP, XAV

TABELA (3-6) CASO 2

Após ser reduzida a reatância de S.Osório para a metade, o sistema continua a possuir autovalor positivo, indicando instabilidade. Neste caso a alteração de parâmetro, fez com que os autovalores $\lambda_1 = 3,0093$ e $\lambda_5 = -22,0184$ do caso base, experimentassem a maior variação, passando para $\lambda_1 = 1,3015$ e $\lambda_{10} = -36,1864$, respectivamente, conforme pode-se ver ao serem comparadas as tabelas (3-4) e (3-6).

3.5.4- Caso 3 - Com redução da reatância transitória de F.Areia para a metade

Novamente, a redução da reatância transitória de ape

nas uma das três máquinas relacionadas ao autovalor instável, neste caso agora F.Areia, não foi suficiente para tornar o sistema estável, como pode-se ver pelo relatório de saída do programa, na página 119, o primeiro autovalor é positivo, $\lambda_1 = 0,3341$. Com a mudança de parâmetro efetuada o autovalor que sofreu maior alteração foi $\lambda_{10} = -32,2858$, no caso base, para $\lambda_{12} = -43,6056$, no caso atual, que passa a ser bastante influenciado pela máquina de F.Areia, com $p_{2,12} = 0,7505$.

3.5.5- Caso 4 - Com as reatâncias transitórias de Equiv.Sul, S.Osório e F.Areia reduzidas para 75%

ordem	autovalor	frequência Hz	máquinas que mais influenciam
1	- 0,0455	0,0339	SUL, SOS, FOA
2	-18,2286	0,6795	AVE, SSI, CPV
3	-19,6413	0,7054	FNS, SSI
4	-21,6383	0,7403	SSI, FNS, AVE
5	-24,2386	0,7836	MBO, AVE
6	-26,3871	0,8176	CPV, MBO
7	-27,8259	0,8395	SSA
8	-29,1435	0,8592	SOS, JLA, SUL
9	-33,2084	0,9172	JLA, SUL
10	-37,1985	0,9707	FOA
11	-39,5861	1,0014	XAV
12	-41,2865	1,0226	JUP

TABELA (3-7) CASO 4

Como era de se esperar, ao ser alterada a reatância transitória das três máquinas envolvidas com o autovalor positivo, o sistema passou a ser estável, mesmo com esta alteração no valor da reatância de cada máquina sendo inferior ao dos casos anteriores. Isto confirma a exatidão das informações contidas na matriz dos fatores de participação. Ao serem comparadas as tabelas (3-4) e (3-7), verifica-se que os autovalores relacionados a máquinas do sistema Sudeste, experimentaram apenas pequenas mudanças, enquanto que com os demais ocorreram alterações significativas.

3.5.6- Caso 5 - Com redução de 300 MW na geração Equiv.Sul

A pesquisa neste caso será orientada no sentido de alterar a condição de estado do sistema, com o objetivo de levá-lo a um ponto de operação estável, através da redução da geração do Equiv.Sul de 850 para 550 MW, em razão de ser esta a máquina que mais influencia o autovalor positivo. Com esta redução de geração, o intercâmbio do Sistema Sul para o Sistema Sudeste passou a ser de aproximadamente 1020 MW, em sua quase totalidade sendo transmitido pela interligação em 765 kV.

Como poder-se-ia esperar, o sistema passou a ter comportamento estável, conforme pode-se verificar na tabela (3-8), o autovalor que era positivo passou a ser $\lambda_1 = -0,5543$. As máquinas mais responsáveis por este autovalor continuam sendo as mesmas, porém com ordem de importância diferente. Os autovalores rela

cionados com máquinas do Sistema Sudeste, mais distantes da região onde se promoveu a alteração, não sofreram mudanças muito significativas.

ordem	autovalor	frequência Hz	máquinas que mais influenciam
1	- 0,5543	0,1185	SOS, FOA, SUL
2	-17,9895	0,6750	AVE, CPV, SSI
3	-18,9680	0,6932	FNS
4	-21,2689	0,7340	SOS, SSI
5	-21,5573	0,7390	SOS, SSI, FNS
6	-24,0583	0,7806	MBO, AVE
7	-25,5506	0,8045	CPV, MBO
8	-26,2246	0,8150	SSA, SUL
9	-28,0451	0,8428	FOA, SSA, SUL
10	-31,7561	0,8969	JLA, SUL
11	-37,8083	0,9786	XAV
12	-40,5883	1,0140	JUP

TABELA (3-8) CASO 5

3.5.7- Caso 6 - Com redução de 300 MW na geração de F.Areia

A redução de geração em F.Areia do mesmo montante efetuado no caso anterior no Equiv.Sul, causa redução semelhante no intercâmbio do Sistema Sul para o Sistema Sudeste, que fica agora com um valor da ordem de 1010 MW. Porém, como a máquina de F.Areia possuía uma influência relativa, no autovalor positivo, bem menor (cerca da metade) que a da máquina Equiv.Sul, vide ma

triz dos fatores de participação do caso base, o sistema continua sendo instável mesmo com a redução de geração em F.Areia. O relatório de saída do programa, à página 122, mostra o autovalor $\lambda_1 = 1,1431$, que caracteriza a condição instável do sistema.

3.5.8- Caso 7 - Com redução de 100 MW na geração de Equiv. Sul, S.Osório e F.Areia

ordem	autovalor	frequência Hz	máquinas que mais influenciam
1	- 0,0642	0,0403	SUL, SOS, FOA
2	-17,7472	0,6705	AVE, SSI, CPV
3	-19,0425	0,6945	FNS
4	-21,4321	0,7368	SSI, AVE, FNS
5	-23,3630	0,7693	SOS
6	-24,1280	0,7818	MBO
7	-24,4955	0,7877	SUL, SSA, FOA
8	-25,5800	0,8050	CPV, MBO
9	-27,4468	0,8338	SSA, FOA
10	-31,3075	0,8905	JLA
11	-37,7082	0,9773	XAV
12	-40,5489	1,0135	JUP

TABELA (3-9) CASO 7

Finalmente, é estudado o caso em que a geração é reduzida de 100 MW, em cada uma das três usinas apontadas pela matriz dos fatores de participação, como mais responsáveis pelo autovalor positivo. Desta forma

ma o intercâmbio do Sistema Sul para o Sistema Sudeste é reduzido para um valor semelhante ao dos dois casos anteriores.

O relatório de saída do programa, à página 123, para este caso, que está sumarizado na tabela (3-9), indica que o sistema passou a ter um comportamento estável, como era de se esperar. Ao serem comparadas as tabelas (3-4) e (3-9) verifica-se que os autovalores mantiveram a sequência relativa, mesmo experimentalmente do variações em relação ao caso base.

3.6- Conclusões sobre os casos estudados

Pela análise dos casos processados com o sistema multimáquinas, podem ser estabelecidas algumas conclusões:

- 3.6.1- A matriz dos fatores de participação realmente fornece a indicação, a respeito das variáveis de estado e conseqüentemente das máquinas, que mais influenciam autovalores responsáveis por possível instabilidade dinâmica do sistema.
- 3.6.2- Como o relacionamento existe entre todos os autovalores e todas as variáveis de estado do sistema, torna-se possível fazer um acompanhamento da variação dos autovalores, em função de alterações de parâmetros ou da condição de estado do sistema.
- 3.6.3- A matriz dos fatores de participação mostrou possuir

elementos com sinal negativo, no entanto pelas análises realizadas verificou-se que deve ser considerado o valor absoluto destes elementos.

3.6.4- O tempo de execução de um caso com o sistema de 60 barras e 13 máquinas, considerando já solucionado o fluxo de potência, foi em média da ordem de 20,0 segundos de CPU do computador IBM-4341, este tempo pode variar bastante, em função do número de iterações necessárias, para determinar os autovalores pelo processo de Newton-Raphson. Convém salientar que a linguagem APL é do tipo interpretativa, não havendo compilação prévia, ou seja, os comandos são interpretados em tempo de execução.

CASO 1 - ALTERADA A REATANCIA TRANSITORIA DA MAQUINA EQUIV. SUL PARA A METADE

NUM	AUTOVALOR	RESIDUO	N. ITERACOES
1	.6919	.00000	31
2	-18.2795	.00000	103
3	-19.6346	.00000	26
4	-21.6152	.00000	35
5	-23.0527	.00000	53
6	-24.2471	.00000	22
7	-26.5084	.00000	17
8	-29.0279	.00000	15
9	-32.0789	.00000	13
10	-39.3126	.00000	13
11	-41.2942	.00000	0
12	-41.7349	.00000	0

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
JUP	.0003	.0351	.0065	.0012	.0020	.0005	.1283	.0001	.0013	.0573	.7853	-.0181
FUA	.2257	-.0248	.0087	.0033	.1146	.0039	.0134	.0210	.4518	.0134	.0133	.1066
SSA	.1069	.0219	.0020	.0029	.1248	.0026	.0136	.5910	.1224	.0001	.0033	.0000
SUS	.2764	.0330	-.0011	.0010	.6564	.0093	-.0161	.0378	.0018	.0139	-.0029	.0204
XAV	.0056	.0002	.0035	.0019	.0025	.0014	.0072	.0004	.0010	.8642	.1104	.0010
SJL	.1905	.0236	.0031	.0010	.0127	.0007	.0056	.0434	.0021	-.0004	-.0389	.7567
CPV	-.0025	.2067	.0639	.0489	.0098	.0644	.5563	-.0001	.0000	.0477	.0061	-.0000
JLA	.0524	.0081	.0027	.0009	.0409	.0015	.0072	.3360	.4193	.0009	.0223	.1277
AVE	.0579	.3377	.1215	.2181	.0140	.1898	.0270	.0003	.0001	.0018	.0232	-.0011
FNS	.0032	.0720	.5753	.2378	.0241	.0490	.0264	.0001	.0000	.0014	.0132	.0004
SSI	.0507	.2060	.2110	.4509	.0000	.0438	.0086	.0000	.0000	.0010	.0288	-.0000
MBU	.0328	.0309	.0029	.0320	-.0009	.6330	.2227	.0001	.0000	.0014	.0460	-.0010

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
JUP	.69	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
FUA	.00	-18.28	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
SSA	.00	.00	-19.63	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
SUS	.00	.00	.00	-21.62	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
XAV	.00	.00	.00	.00	-23.05	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
SJL	.00	.00	.00	.00	.00	-24.25	.00	.00	.00	.00	.00	.00
CPV	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-26.51	.00	.00	.00	.00	.00
JLA	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-29.03	.00	.00	.00	.00
AVE	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-32.08	.00	.00	.00
FNS	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-39.31	.00	.00
SSI	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-41.25	.00
MBU	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-41.73

ANALISE DO SISTEMA MULTIMAQUINAS
CASO 2 - ALTERADA A REATANCIA TRANSITORIA DE S.O.SORIO PARA A METADE

NUM	AUTOVALOR	RESIDUO	N. ITERACOES
1	1.3015	-2.00000	20
2	-17.8312	.00000	34
3	-19.5868	.00000	153
4	-21.6049	.00000	30
5	-24.1599	.00000	39
6	-24.2609	.00000	135
7	-26.4104	.00000	17
8	-29.6386	.00000	16
9	-31.9091	.00000	13
10	-36.1864	.00000	12
11	-40.7597	.00000	0
12	-41.3987	.00000	0

	MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO											
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
JUP	.0004	.0332	.0031	.0007	.0038	.0000	.1335	.0020	.0005	.0044	.3243	.4925
FUA	.2070	.0012	.0001	.0000	.1442	.1025	.0072	.1891	.1320	.2055	-.0324	.0616
SSA	.1025	.0064	-.0002	-.0001	.1484	.1387	.0062	.5512	.0619	-.0003	-.0037	.0052
SOS	.1306	-.0051	.0001	.0003	.0162	.0042	.0126	.0339	.0243	.4344	.3759	-.0247
XAV	.0038	.0055	.0035	.0020	.0038	.0001	.0103	.0085	.0034	.3099	.2764	.3730
SUL	.3755	.1242	.0072	.0032	.2425	.2267	-.0135	.0335	.0077	.0113	-.0142	.0247
CPV	-.0028	.2227	.0399	.0384	.0020	.1002	.5279	.0059	.0014	.0336	.0356	-.0080
JLA	.0517	.0050	.0005	-.0001	-.0003	-.0021	.0048	.1750	.7689	.0014	-.0051	-.0042
AVE	.0527	.3029	.1600	.2093	.1251	.0759	.0262	.0007	.0000	-.0002	.0124	.0216
FNS	.0028	.0285	.6349	.2320	.0320	.0249	.0286	-.0002	.0000	.0000	.0038	.0090
SSI	.0459	.2338	.1495	.4839	.0307	.0164	.0075	.0001	.0000	.0000	.0102	.0195
MBO	.0299	.0417	.0015	.0303	.2516	.3126	.2486	.0003	.0000	.0000	.0167	.0300

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

1.30	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	-17.83	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	-19.59	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	-21.60	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	-24.16	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	-26.41	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	-29.64	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-31.91	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-.36.19	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-.40.80	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-.41.40	.00	.00

NUM	AUTOVALOR	RESIDUO	N.ITERACOES
1	-.0455	.00000	15
2	-18.2286	.00000	49
3	-19.6413	.00000	101
4	-21.6393	.00000	22
5	-24.2386	.00000	67
6	-26.3871	.00000	114
7	-27.8259	.00000	18
8	-29.1435	.00000	15
9	-33.2084	.00000	14
10	-37.1985	.00000	13
11	-39.5861	.00000	0
12	-41.2865	.00000	0

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
JUP	.0002	.0347	.0055	.0011	.0015	.1284	.0014	.0000	.0007	.0155	.0436	.7671
FOA	.2021	.0187	.0027	.0003	-.0003	-.0006	.0119	-.0014	.0033	.6719	.0065	.0137
SSA	.1072	.0232	.0010	.0009	-.0001	-.0115	.7839	.0033	.0011	.0870	.0028	.0009
SOS	.2021	.0088	-.0005	-.0001	.0035	.0523	.0923	.5109	.0385	.0847	.0228	-.0158
XAV	.0061	.0015	.0035	.0018	.0027	.0114	.0005	.0109	.0090	.0439	.0788	.1102
SUL	.2787	.0592	.0056	.0012	-.0004	.0049	.0594	.1574	.3764	.0519	.0052	.0015
CPV	-.0021	.2147	.0569	.0454	.0754	.5131	.0186	.0280	.0021	.0039	.0386	.0065
JLA	.0578	.0117	.0021	.0002	.0000	-.0003	.0306	.2908	.5698	.0406	-.0003	-.0026
AVE	.0598	.3220	.1316	.2195	.2089	.0246	-.0001	.0000	.0000	.0000	.0016	.0322
FNS	.0029	.0578	.6007	.2374	.0600	.0278	.0009	.0001	.0000	.0005	-.0014	.0133
SSI	.0519	.2150	.1983	.4604	.0489	.0065	.0000	.0000	.0000	.0001	.0008	.0281
HJO	.0333	.0328	.0026	.0319	.6003	.2523	.0007	.0000	.0000	.0002	.0010	.0445

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

	-.05	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	-18.23	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	-19.64	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	-21.64	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	-24.24	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	-26.39	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-27.83	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-29.14	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-33.21	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-37.20	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-39.59	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-41.25

ANALISE DO SISTEMA MULTIMAQUINAS

CASO 5 - REDUZIDA EM 300 MW A GERACAO DO EQUIV. SUL

NUM	AUTOVALOR	RESIDUO	N. ITERACOES
1	-.5543	.06250	23
2	-17.9895	.00000	902
3	-18.9680	.00000	86
4	-21.2699	.00000	175
5	-21.5573	.00000	23
6	-24.0583	.00000	34
7	-25.5506	.00000	20
8	-26.2246	.00000	16
9	-28.0451	.00000	13
10	-31.7561	.00000	10
11	-37.8083	.00000	0
12	-40.5883	.00000	0

MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
JUP	.0015	.0516	.0102	.0008	.0034	.0032	.1472	-.0033	.0003	.0000	.0442	.7292
FOA	.2410	.0377	.0115	.0982	.0454	.0206	-.0125	-.0056	.5531	.0007	.0089	.0220
SSA	.1072	.0289	-.0035	.0541	.0204	-.0006	-.0239	.6107	.2128	.0001	.0003	.0001
SOS	.2855	.0044	.0211	.4360	.2470	.0021	-.0125	.0076	.0023	.0021	.0175	-.0056
XAV	.0072	.0008	.0035	.0041	-.0001	.0029	.0095	-.0001	.0003	.0009	.8736	.0972
SUL	.1740	.0410	.0029	.0255	.0072	-.0015	.0415	.2926	.1914	.2366	.0007	-.0025
CPV	-.0014	.2423	-.0003	.0180	.0109	.1039	.5625	-.0077	.0006	.0003	.0495	.0147
JLA	.0438	.0107	.0015	.0168	.0068	-.0002	.0156	.1072	.0388	.7594	.0029	-.0011
AVE	.0597	.2886	.1403	.0736	.1857	.1983	.0162	-.0018	.0001	.0000	.0013	.0340
FNS	.0020	.0053	.7059	.0015	.2176	.0406	.0005	.0027	.0004	.0000	-.0008	.0219
SSI	.0479	.2398	.1086	.2689	.2379	.0559	-.0017	-.0008	-.0001	.0000	.0008	.0335
MUU	.0315	.0488	-.0016	.0026	.0177	.5748	.2577	-.0015	.0000	.0000	.0013	.0570

MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL

	-.55	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	-17.99	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	-18.97	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	-21.27	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-.01	.00
	.00	.00	.00	.00	-21.56	.00	.00	.00	.00	.00	.01	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	-24.06	.00	.00	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-25.55	.00	.00	.00	.01	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-26.23	.00	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-28.05	.00	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-31.76	.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-.00	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-.37.81	.00
	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-40.58

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

Través de estudos de simulação de sistemas de controle de processos industriais e de sistemas de controle de plantas de energia elétrica, foram obtidas as seguintes conclusões:

4.1 - A utilização de técnicas de controle de processos industriais e de sistemas de controle de plantas de energia elétrica, através de métodos de controle de processos industriais e de sistemas de controle de plantas de energia elétrica, permite a obtenção de resultados satisfatórios em termos de desempenho dos sistemas de controle.

CAPÍTULO 4

4.2 - A utilização de técnicas de controle de processos industriais e de sistemas de controle de plantas de energia elétrica, através de métodos de controle de processos industriais e de sistemas de controle de plantas de energia elétrica, permite a obtenção de resultados satisfatórios em termos de desempenho dos sistemas de controle.

4.3 - A programação dos sistemas de controle de processos industriais e de sistemas de controle de plantas de energia elétrica, através de métodos de controle de processos industriais e de sistemas de controle de plantas de energia elétrica, permite a obtenção de resultados satisfatórios em termos de desempenho dos sistemas de controle.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

Através do estudo das condições de estabilidade dinâmica do sistema multimáquinas e da máquina conectada à barra infinita, foi possível extrair muitas conclusões, entre as quais é importante destacar aquelas que serão apresentadas a seguir:

- 4.1- A utilização das informações contidas na matriz dos fatores de participação, mostrou-se de grande importância na definição e adoção de medidas corretivas eficazes, no sentido de alterar o estado do sistema e levá-lo a uma condição estável de operação. Mostrou-se também de utilidade no acompanhamento da variação que experimentam os autovalores, em função da alteração de parâmetros ou da condição de estado do sistema.
- 4.2- A metodologia desenvolvida para a determinação da matriz dos fatores de participação, independe do modelo do sistema que seja adotado. Portanto no estudo do sistema multimáquinas, cada uma das máquinas síncronas, poderá ser representada com o nível de detalhe compatível com a sua localização e com a finalidade do estudo.
- 4.3- A programação desenvolvida para o processamento dos casos do presente trabalho, não foi computacionalmente otimizada. Portanto, com a utilização de técnicas computacionais mais apuradas, provavelmente, será possível diminuir o tempo de

execução informado nos ítems 2.6.3 e 3.6.4.

- 4.4- Para a obtenção das informações necessárias para melhorar a condição de estado do sistema, quando este se mostrar dinamicamente instável, não é necessária a determinação global da matriz dos fatores de participação, bastando para tanto a determinação da parte desta matriz referente aos autovalores responsáveis pela instabilidade.
- 4.5- A utilização da matriz dos fatores de participação, pode tornar-se bastante conveniente, em estudos de planejamento da expansão do sistema elétrico de potência, como na pesquisa de alternativas. Uma vez que, não se pode lançar mão do histórico operacional do sistema, para auxiliar na análise de configurações, que podem vir a ser bastante diferentes do sistema conhecido.
- 4.6- Sem dúvida, a virtude principal das informações contidas na matriz dos fatores de participação, é complementar os estudos que vem sendo desenvolvidos com base na análise modal.
- 4.7- Durante o desenvolvimento do trabalho surgiram algumas questões e idéias, a seguir relacionadas, que podem vir a ser utilizadas como ponto de partida para a pesquisa de novos temas:
- 4.7.1- Aprofundar a pesquisa sobre a matriz dos fatores de participação, com o intuito de melhor explicar o significado de seus elementos com sinal negativo e ave-

riguar com maior profundidade, se existe significado físico para a parte imaginária dos fatores de participação complexos.

4.7.2- Dentro dos estudos de controle verificar a validade da associação do método do lugar das raízes, com as informações contidas na matriz dos fatores de participação.

4.7.3- Verificar a possibilidade de utilizar as informações contidas na matriz dos fatores de participação na elaboração de equivalentes dinâmicos do modelo matemático do sistema, através do agrupamento de máquinas que formem grupos coerentes.

REFERÊNCIAS

- 1 - ARRILAGA, J. J. F., Selective Model Analysis With Applications to Electric Power Systems, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1961.
- 2 - ARRILAGA, J. J. F., VERGHESE, G. C. e SCHNEPPPE, F. C., "Selective Model Analysis With Applications to Electric Power Systems, Part I: Generalized Introduction", IEEE Trans. Vol. PAS-101, pp. 9, September 1982, pp. 3117-3125.
- 3 - ARRILAGA, J. J. F., VERGHESE, G. C. e SCHNEPPPE, F. C., "Selective Model Analysis With Applications to Electric Power Systems, Part II: The Dynamic Stability Analysis", IEEE Trans. Vol. PAS-101, pp. 9, September 1982, pp. 3126-3134.
- 4 - FEINSTEIN, J., Teoria dos Sistemas de Controle - Infuência por Variáveis de Estado, Editora Campus Ltda, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1979.
- 5 - ANDERSON, P. M. e FERDINAND A. J., Power System Control and Stability, Vol. 1, The Iowa State University Press, 1977.
- 6 - TIBREKIO, G. C., Análise de Sistemas Dinâmicos, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1979.

REFERÊNCIAS

- 1 - ARRIAGA, J.I.P., Selective Modal Analysis With Applications to Electric Power Systems, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1981.
- 2 - ARRIAGA, J.I.P., VERGHESE, G.C. e SCHWEPPE, F.C., "Selective Modal Analysis With Applications to Electric Power Systems, Part I: Heuristic Introduction", IEEE Trans. Vol. PAS-101, nº 9, September 1982, pg 3117-3125.
- 3 - ARRIAGA, J.I.P., VERGHESE, G.C. e SCHWEPPE, F.C., "Selective Modal Analysis With Applications to Electric Power Systems, Part II: The Dynamic Stability Problem", IEEE Trans. Vol. PAS-101, nº 9, September 1982, pg 3126-3134.
- 4 - FEINSTEIN, J., Teoria dos Sistemas de Controle - Enfoque por Variáveis de Estado, Editora Campus Ltda, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1979.
- 5 - ANDERSON, P.M. e FOUAD A.A., Power System Control and Stability, Vol. I, The Iowa State University Press, 1977.
- 6 - TIBÚRCIO, J.C., Análise de Sistemas Elétricos, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1979.

- 7 - DOS SANTOS, J.A.R., Métodos Numéricos da Álgebra Linear, Itajubá, 1978.
- 8 - DE MELLO, F.P. e CONCORDIA, C., "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. Vol. PAS-88, nº 4, April 1969, pg 316-329.
- 9 - VAN NESS, J.E., BRASCH, F.M. Jr., LANDGREN, G.L. e NAUMANN, S.T., "Analytical Investigation of Dynamic Instability Occurring at Powerton Station", IEEE Trans. Vol. PAS-99, nº 4, July/August 1980, pg 1386-1395.
- 10 - DE REZENDE, N.A., Medidas de Estabilidade de Regime Permanente em Grandes Sistemas Elétricos de Potência, Programa de Informes Técnicos da COPEL, 1979.
- 11 - REZA, F., Linear Spaces in Engineering, Ginn and Company, 1971.
- 12 - DE MELLO, F.P., Generation Dynamics & Control, Power Technologies, Inc, 1973.
- 13 - DE MELLO, F.P., Electrical Machine Dynamics-II, Power Technologies, Inc, 1974.
- 14 - BROWN, H.E., Grandes Sistemas Elétricos - Métodos Matriciais, Livros Técnicos e Científicos Editora, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1977.

ANEXOS

ANEXO 1

Listagem do programa para análise da máquina
síncrona conectada à barra infinita

REQUESTED OPTIONS- NODECK,XREF,OPT(0),NOLIST,MAP,LC(80)

OPTIONS IN EFFECT- NAME(MAIN) NOOPTIMIZE LINECOUNT(80) SIZE(MAX) AUTODIAG(NONE) SOURCE EBCDIC NOLIST NODECK OBJECT MAP NOFORMAT GOSTMT XREF NOALC NOANSI

```

C*****
C
C   MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO
C
C   MODELO UTILIZADO- MAQUINA SINCRONA CONECTADA AA BARRA INFINITA
C                       COM SISTEMA DE EXCITACAO
C*****
C
ISN 0002   REAL KA,KE,KF,KR,IT,IR,IX,IDO,IQO,KI,K1,K2,K3,K4,K5,K6
C
ISN 0003   REAL*8 M(6,7,7),MI(6,7,7),MH(6,7,7),MT(7,7),MTO(7,7),MCAR(7,7),
1          WORK(7,7),WORKT(7,7),PKIRE(7,7),A(7,7),RR(7),RI(7)
C
ISN 0004   COMPLEX*16 AVTR(7,7),AVTL(7,7),LBD(7),WORK1(7,7),WORK2(7,7),
1          SOMA(7),PKI(7,7)
C
ISN 0005   DIMENSION IANA(7),ISTAT(7),TITUL(3,19)
C
ISN 0006   DO 10 I= 1,7
ISN 0007   DO 10 J= 1,7
ISN 0008   MCAR(I,J) = 0.0
ISN 0009   10 CONTINUE
C
C   LEITURA DO TITULO DO CASO
C
ISN 0010   50 DO 30 I=1,3
ISN 0011   READ(5,20) ICOD,(TITUL(I,J),J=1,19)
ISN 0012   20 FORMAT(12, 19A4 )
ISN 0013   IF(ICOD - 99) 30,3600,3600
ISN 0014   30 CONTINUE
C
C   LEITURA DOS DADOS DA MAQUINA SINCRONA
C
ISN 0015   READ(5,60) XD,XO,XLD,RM,TLDO,H
ISN 0016   60 FORMAT(2X, 6F8.5)
C
C   LEITURA DOS DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO
C
ISN 0017   READ(5,80) KR,TR,KA,TA,KF,TF
ISN 0018   80 FORMAT(2X, 6F8.5)
C
C   LEITURA DOS DADOS DO SISTEMA DE EXCITACAO
C
ISN 0019   READ(5,90) KE,TE,SEL
ISN 0020   90 FORMAT(2X, 3F8.5)
C
C   LEITURA DOS DADOS DA LINHA E ESTADO DA MAQUINA SINCRONA
C
ISN 0021   READ(5,100) RE,XE,VT,P,Q
ISN 0022   100 FORMAT(2X, 5F8.5)
C
C   DETERMINACAO DAS CONDICÕES INICIAIS DA MAQUINA SINCRONA
C
ISN 0023   150 PHI = ATAN(O/P)
ISN 0024   IT = SORT(P*P + Q*Q)/VT
ISN 0025   IR = IT*COS(PHI)
ISN 0026   IX = -IT*SIN(PHI)
ISN 0027   DELBE = ATAN((XO*IR + RM*IX)/(VT + RM*IR - XO*IX))
C
ISN 0028   IDO = -IT*SIN(DELBE + PHI)
ISN 0029   IQO = IT*COS(DELBE + PHI)
C
ISN 0030   VDO = -VT*SIN(DELBE)
ISN 0031   VQO = VT*COS(DELBE)
C
ISN 0032   EO = VQO + RM*IQO - XD*IDO
ISN 0033   VINFR = VT + XE*IX - R2*IR
ISN 0034   VINF = RE*IX + XE*IR
ISN 0035   VINF = SORT(VINFR*VINFR + VINF*VINF)
C
ISN 0036   BEALFA = ATAN(VINF/VINFR)
ISN 0037   DELAL = DELBE + BEALFA

```

```

C
ISN 0039      EQA0 = E0 + (XD - XQ)*100
ISN 0039      K1 = 1./(RE*RE + (XD + XL)*(XLD + XE))
C
C          CALCULO DAS CONSTANTES K1 K2 K3 K4 K5 K6
C
ISN 0040      K1 = KI*VINP*(EQA0*(RE*SIN(DELAL) + (XLD + XE)*COS(DELAL)) + 100*
1             (XQ - XLD)*((XL + XQ)*SIN(DELAL) - RE*COS(DELAL)))
C
ISN 0041      K2 = KI*(RE*EQA0 + 100*(RE*RE + (XQ + XE)**2))
C
ISN 0042      K3 = 1./(1. + KI*(XD - XLD)*(XQ + XE))
C
ISN 0043      K4 = VINP*KI*(XD - XLD)*((XQ + XE)*SIN(DELAL) - RE*COS(DELAL))
C
ISN 0044      K5 = [(KI*VINP*XLD*V00)/VT]*(RE*COS(DELAL) - (XQ + XE)*SIN(DELAL))
1             -[(KI*VINP*XQ*V00)/VT]*((XLD + XE)*COS(DELAL) + RE*SIN(DELAL))
C
ISN 0045      K6 = (V00/VT)*(1. - KI*XLD*(XQ + XE)) - (V00/VT)*KI*XQ*RE
C
ISN 0046      PHIG = (180.*PHI)/3.141593
ISN 0047      DELBEG = (180.*DELBE)/3.141593
ISN 0048      DELALG = (180.*DELAL)/3.141593
ISN 0049      TJ= H/(3.141592654*60.)
C
C          IMPRESSAO DO TITULO E DOS DADOS DO CASO
C
ISN 0050      WRITE(6,160) ((TITUL(I,J),J=1,19),I=1,3)
ISN 0051      160 FORMAT( 1H1. ///. 11X, 19A4. /, 11X, 19A4. /, 11X, 19A4)
C
ISN 0052      WRITE(6,200) RE,XE,XD,RM,XQ,TLDO,XLD,H
ISN 0053      200 FORMAT( //, 11X, 'DADOS DA LINHA-',
1             //, 11X, 'RE =', F7.4, ' PU',           XE =', F7.4, ' PU',
2             ///, 11X, 'DADOS DA MAQUINA-',
3             //, 11X, 'XD =', F7.4, ' PU',           RM =', F7.4, ' PU',
4             /, 11X, 'XQ =', F7.4, ' PU',           TLDO =', F7.4, ' S',
5             /, 11X, 'XLD =', F7.4, ' PU',          H =', F7.4, ' S')
C
ISN 0054      WRITE(6,250) KR,TR,KA,TA,KF,TF,KE,TE,SEL
ISN 0055      250 FORMAT( //,
1             11X, 'DADOS DO REGULADOR DE TENSAO E DA EXCITACAC-',
2             //, 11X, 'KR =', F7.4, ' PU',           TR =', F7.4, ' S',
3             /, 11X, 'KA =', F7.2, ' PU',           TA =', F7.4, ' S',
4             /, 11X, 'KF =', F7.4, ' PU',           TF =', F7.4, ' S',
5             /, 11X, 'KE =', F7.4, ' PU',           TE =', F7.4, ' S',
6             /, 11X, 'SEL =', F7.4 )
C
ISN 0056      WRITE(6,300) VT,P,Q
ISN 0057      300 FORMAT( //,
1             11X, 'CONDICIONES DE OPERACAO DA MAQUINA-',
2             //, 11X, 'VT =', F7.4, ' PU',
3             /, 11X, 'P =', F7.4, ' PU',           Q =', F8.4, ' PU' )
C
ISN 0058      WRITE(6,350) PHIG,DELBEG,DELALG,IT,IR,IX,IQ0,IDO,V00,V00,
ISN 0059      350 FORMAT( //, 11X, 'VALORES CALCULADOS-',
1             //, 11X, 'E0,EQA0,VINF',
2             //, 11X, 'PHI =', F9.4, ' GRAUS',
3             /, 11X, 'DELTA-BETA =', F9.4, ' GRAUS',
4             /, 11X, 'DELTA-ALFA =', F9.4, ' GRAUS',
5             /, 11X, 'IT =', F7.4, ' PU',
6             /, 11X, 'IR =', F7.4, ' PU',           IX =', F8.4, ' PU',
7             /, 11X, 'IQ0 =', F7.4, ' PU',          IDO =', F8.4, ' PU',
8             /, 11X, 'V00 =', F7.4, ' PU',          VDO =', F8.4, ' PU',
9             /, 11X, 'E0 =', F7.4, ' PU',
           /, 11X, 'EQA0 =', F7.4, ' PU', /, 11X, 'VINP =', F7.4, ' PU' )
C
ISN 0060      WRITE(6,400) K1,K4,K2,K5,K3,K6
ISN 0061      400 FORMAT( /,
1             11X, 'K1 =', F8.4, 12X, 'K4 =', F8.4,
2             /, 11X, 'K2 =', F8.4, 12X, 'K5 =', F8.4,
3             /, 11X, 'K3 =', F8.4, 12X, 'K6 =', F8.4 )
C
C          FORMACAO DA MATRIZ CARACTERISTICA
C
ISN 0062      MCAR(1,1) = -1./(K3*TLDO)
ISN 0063      MCAR(1,3) = -K4/TLDO
ISN 0064      MCAR(1,5) = 1./TLDO

```

```

ISN 0065      MCAR(2.1) = -K2/TJ
ISN 0066      MCAR(2.3) = -K1/TJ
ISN 0067      MCAR(3.2) = 1.0
ISN 0068      MCAR(4.1) = (K6*KR)/TH
ISN 0069      MCAR(4.3) = (K5*KR)/TH
ISN 0070      MCAR(4.4) = -1.0/TH
ISN 0071      MCAR(6.6) = -1.0/TF
ISN 0072      MCAR(6.7) = KF/(TF*TE)
ISN 0073      MCAR(6.5) = -(KF*(SEL + KE))/(TF*TE)
ISN 0074      MCAR(7.4) = -KA/TA
ISN 0075      MCAR(7.6) = -KA/TA
ISN 0076      MCAR(7.7) = -1.0/TA
ISN 0077      MCAR(5.7) = 1.0/TE
ISN 0078      MCAR(5.5) = -(SEL + KE)/TE

C
C
C      **EIGENANALYSIS** DA MATRIZ CARACTERISTICA
C
C      DETERMINACAO DOS AUTOVALORES
C
ISN 0079      DO 700 I=1,7
ISN 0080      DO 700 J=1,7
ISN 0081      A(I,J) = MCAR(I,J)
ISN 0082      700 CCNTINUE

C
C      TRANSFORMACAO DA MATRIZ CARACTERISTICA NUMA OUTRA SEMELHANTE
C      NA FORMA QUASE TRIANGULAR SUPERIOR
C
ISN 0083      CALL HSBG(7,A,7)

C
C      OBTENCAO DOS AUTOVALORES DA MATRIZ TRANSFORMADA
C
ISN 0084      CALL ATEIG(7,A,RR,RI,IANA,7)

C
C      DC 800 I=1,7
ISN 0085      800 LBD(I) = DCPLX(RR(I), RI(I))
ISN 0086

C
C      ISTAT(1) = 4
ISN 0087      DO 850 I=2,7
ISN 0088      J = I-1
ISN 0089      IF (IANA(I)) 840,840,810
ISN 0090      810 IF (DABS(A(I,J)) - (1E-7*(DABS(RR(I))+DABS(RI(I)))) 820,820,830
ISN 0091      820 ISTAT(I) = 1
ISN 0092      GO TO 850
ISN 0093      830 ISTAT(I) = 0
ISN 0094      GO TO 850
ISN 0095      840 ISTAT(I) = 3
ISN 0096      850 CONTINUE
ISN 0097

C
C      DETERMINACAO DAS MATRIZES DE TRANSFORMACAO PARA OS AUTOVETORES
C
C
C      ICHAV = 1
ISN 0098      900 DO 1300 I=1,6
ISN 0099      DO 1300 J=1,7
ISN 0100      DO 1300 K=1,7
ISN 0101      IF (J-K) 1100,1200,1100
ISN 0102      1100 M(I,J,K) = 0.0
ISN 0103      MI(I,J,K) = 0.0
ISN 0104      GO TO 1300
ISN 0105      1200 M(I,J,K) = 1.0
ISN 0106      MI(I,J,K) = 1.0
ISN 0107      1300 CCNTINUE
ISN 0108

C
C      DO 1400 I=1,7
ISN 0109      DO 1400 J=1,7
ISN 0110      MT(I,J) = MCAR(I,J)
ISN 0111      1400 CCNTINUE
ISN 0112

C
C      DO 1500 I=1,6
ISN 0113      DO 1500 II=1,7
ISN 0114      DO 1500 JJ=1,7
ISN 0115      MTO(II,JJ) = MT(II,JJ)
ISN 0116      1500 CCNTINUE
ISN 0117      J = 7-I
ISN 0118      L = 8-I
ISN 0119      DO 1600 K=1,7
ISN 0120      1600 M(I,J,K) = -MTO(L,K)/MTO(L,J)
ISN 0121

```

```

ISN 0122          M(I,J,J)= 1./MTO(L,J)
ISN 0123          DO 1700 K=1,7
ISN 0124          1700 M(I,J,K)= MTO(L,K)
ISN 0125          DO 1800 J=1,7
ISN 0126          DO 1800 K=1,7
ISN 0127          WORK(J,K)= 0.0
ISN 0128          DO 1800 JK=1,7
ISN 0129          WORK(J,K)= WORK(J,K) + MTO(J,JK)*M(I,JK,K)
ISN 0130          1800 CONTINUE
ISN 0131          DO 1900 J=1,7
ISN 0132          DO 1900 K=1,7
ISN 0133          MT(J,K)= 0.0
ISN 0134          DO 1900 JK=1,7
ISN 0135          MT(J,K)= MT(J,K) + M(I,J,JK)*WORK(JK,K)
ISN 0136          1900 CONTINUE
C
C   MATRIZES DE TRANSFORMACAO ESQUERDAS
C
ISN 0137          IF (ICHAV-1) 2400,2000,2400
ISN 0138          2000 DO 2100 I=1,6
ISN 0139          DO 2100 J=1,7
ISN 0140          DO 2100 K=1,7
ISN 0141          MR(I,J,K)= M(I,J,K)
ISN 0142          2100 CONTINUE
ISN 0143          DO 2200 I=1,7
ISN 0144          DO 2200 J=1,7
ISN 0145          WORKT(I,J)= MCAR(J,I)
ISN 0146          2200 CONTINUE
ISN 0147          DO 2300 I=1,7
ISN 0148          DO 2300 J=1,7
ISN 0149          MCAR(I,J)= WORKT(I,J)
ISN 0150          2300 CONTINUE
ISN 0151          ICHAV= 2
ISN 0152          GO TO 900
C
ISN 0153          2400 DO 2500 I=1,7
ISN 0154          DO 2500 J=1,7
ISN 0155          MCAR(I,J)= WORKT(J,I)
ISN 0156          2500 CONTINUE
C
C   OBTENCAO DOS AUTOVETORES DA MATRIZ TRANSFORMADA
C
ISN 0157          DO 2600 J=1,7
ISN 0158          DO 2600 I=1,7
ISN 0159          AVTP(I,J)= LBD(J)**(7-I)
ISN 0160          AVTL(I,J)= AVTR(I,J)
ISN 0161          2600 CONTINUE
C
C   TRANSFORMACAO DOS AUTOVETORES DIREITOS E ESQUERDOS
C
ISN 0162          I= 7
ISN 0163          2700 I= I-1
ISN 0164          DO 2800 J=1,7
ISN 0165          DO 2800 K=1,7
ISN 0166          WORK1(J,K)= 0.0
ISN 0167          WORK2(J,K)= 0.0
ISN 0168          DO 2800 JK=1,7
ISN 0169          WORK1(J,K)= WORK1(J,K) + MR(I,J,JK)*AVTR(JK,K)
ISN 0170          WORK2(J,K)= WORK2(J,K) + M(I,J,JK)*AVTL(JK,K)
ISN 0171          2800 CONTINUE
ISN 0172          DO 2900 J=1,7
ISN 0173          DO 2900 K=1,7
ISN 0174          AVTR(J,K)= WORK1(J,K)
ISN 0175          AVTL(J,K)= WORK2(J,K)
ISN 0176          2900 CONTINUE
C
ISN 0177          IF (I-1) 3000,3000,2700
C
C   OBTENCAO DA MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO
C
ISN 0178          3000 DO 3100 J=1,7
ISN 0179          DO 3100 I=1,7
ISN 0180          WORK1(I,J)= AVTR(I,J)*AVTL(I,J)
ISN 0181          3100 CONTINUE
C
ISN 0182          DO 3200 J=1,7
ISN 0183          SOMA(J)= 0.0
ISN 0184          DO 3200 I=1,7

```

LEVEL 2.3.0 (JUN 78)

MAIN

05/360 FORTRAN H EXTENDED

DATE 83.3

```

ISN 0185          SOMA(J)= SOMA(J) + WORK1(I,J)
ISN 0186          3200 CONTINUE
C
ISN 0187          DO 3300 I=1,7
ISN 0188          DO 3300 J=1,7
ISN 0189          PKI(I,J)= WORK1(I,J)/SOMA(J)
ISN 0190          PKIRE(I,J)= DREAL(PKI(I,J))
ISN 0191          3300 CONTINUE
C
C               IMPRESSAO DO CABECALHO
C
ISN 0192          WRITE(6,3350) (TITUL(J,J),J=1,19)
ISN 0193          3350 FORMAT( 1H1, ///, 39X, 19A4)
C
C               IMPRESSAO DOS AUTOVALORES
C
ISN 0194          WRITE(6,3400) (LBD(I),I=1,7)
ISN 0195          3400 FORMAT( ///, 56X, 'LISTA DOS AUTOVALORES',
1 //, 63X, 'REAL      IMAGINARIO',
2 //, 51X, 'LAMBDA1=', F10.4, 3X, F10.4,
3 /, 51X, 'LAMBDA2=', F10.4, 3X, F10.4,
4 /, 51X, 'LAMBDA3=', F10.4, 3X, F10.4,
5 /, 51X, 'LAMBDA4=', F10.4, 3X, F10.4,
6 /, 51X, 'LAMBDA5=', F10.4, 3X, F10.4,
7 /, 51X, 'LAMBDA6=', F10.4, 3X, F10.4,
8 /, 51X, 'LAMBDA7=', F10.4, 3X, F10.4 )
C
C               IMPRESSAO DA MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO
C
ISN 0196          WRITE(6,3450)
ISN 0197          3450 FORMAT( ///, 50X, 'MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO', //)
ISN 0198          WRITE(6,3500) ((PKIRE(I,J),J=1,7),I=1,7)
ISN 0199          3500 FORMAT( /, 1X, 4X, 1X, F7.4, 4X, 7X, 1X, F7.4, 4X,
1              7X, 1X, F7.4, 4X, 7X, 1X, F7.4, 4X,
2              7X, 1X, F7.4, 4X, 7X, 1X, F7.4, 4X,
3              7X, 1X, F7.4)
C
C               DETERMINACAO DA MATRIZ DIAGONAL
C
ISN 0200          DO 5100 J=1,7
ISN 0201          DO 5100 I=1,7
ISN 0202          WORK2(I,J)= AVTR(I,J)/SOMA(J)
ISN 0203          5100 CONTINUE
C
ISN 0204          DO 5200 I=1,7
ISN 0205          DO 5200 J=1,7
ISN 0206          AVTR(I,J)= WORK2(I,J)
ISN 0207          5200 CONTINUE
C
ISN 0208          DO 5300 I=1,7
ISN 0209          DO 5300 J=1,7
ISN 0210          WORK2(I,J)= 0.0
ISN 0211          DO 5300 K=1,7
ISN 0212          WORK2(I,J)= WORK2(I,J) + MCAR(I,K)*AVTR(K,J)
ISN 0213          5300 CONTINUE
C
ISN 0214          DO 5400 I=1,7
ISN 0215          DO 5400 J=1,7
ISN 0216          WORK1(I,J)= 0.0
ISN 0217          DO 5400 K=1,7
ISN 0218          WORK1(I,J)= WORK1(I,J) + AVTL(K,I)*WORK2(K,J)
ISN 0219          5400 CONTINUE
C
C               IMPRESSAO DA MATRIZ DIAGONAL
C
ISN 0220          WRITE(6,5500)
ISN 0221          5500 FORMAT( ///, 43X, 'MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONA
1L', /)
ISN 0222          WRITE(6,5600) ((WORK1(I,J),J=1,7),I=1,7)
ISN 0223          5600 FORMAT( /, 1X, F7.2, 1X, F7.2, 4X, F7.2, 1X, F7.2, 4X,
1              F7.2, 1X, F7.2, 4X, F7.2, 1X, F7.2, 4X,
2              F7.2, 1X, F7.2, 4X, F7.2, 1X, F7.2, 4X,
3              F7.2, 1X, F7.2)
C
ISN 0224          GO TO 50
C
ISN 0225          3600 STOP
ISN 0226          END

```

ANEXO 2

Listagem da programação desenvolvida para a
análise do sistema multimáquinas

▽STAB[0]▽

▽ TOL STAB NITER
 [1] a PROGRAMA PARA CONTROLAR A EXECUCAO DOS DEMAIS PROGRAMAS
 [2] a APL, PARA ANALISE DAS CONDICÕES DE ESTABILIDADE DO SIS-
 [3] a TEMA ELETRICO DE POTENCIA.
 [4] G←GOLD
 [5] B←BOLD
 [6] MIL←MI←ML←M←10
 [7] DPW←132
 [8] EIDELTI
 [9] 'EI ', 8 3 VE
 [10] 'DELTA ', 8 3 VDELTX(180÷01)
 [11] YLOAD
 [12] CORB
 [13] REDUZ
 [14] MPSIJ
 [15] HCORPS
 [16] MATCAR
 [17] EQCAR
 [18] IMPRIMIR←1
 [19] →((TOL SOLCAR NITER)=1)/CONTI
 [20] →0
 [21] CONTI:AVTLR
 [22] MATPKI
 [23] MATDIAG
 ▽

▽EIDELTI[0]▽

▽ EIDELTI;ER;EIM;VT
 [1] a DETERMINACAO DA TENSÃO INTERNA DAS MAQUINAS, EM MODULO
 [2] a E ANGULO.
 [3] ER←VT+Q×X÷VT←V[IVT]
 [4] EIM←P×X÷VT
 [5] E←((ER*2)+(EIM*2))*0.5
 [6] DELT←ALFAT+³0EIM÷ER
 ▽

▽YLOAD[0]▽

▽ YLOAD;I;GII;BII
 [1] a ADICAO DAS CARGAS AA MATRIZ YBUS. AS CARGAS SAO TRANS-
 [2] a FORMADAS EM IMPEDANCIA CONSTANTE.
 [3] GII←PL÷V*2
 [4] BII←-QL÷V*2
 [5] I←0
 [6] TOP:I←I+1
 [7] G[I;I]←G[I;I]+GII[I]
 [8] B[I;I]←B[I;I]+BII[I]
 [9] →(I<ρPL)/TOP
 ▽

▽CORR[0]▽

```

  ▽ CORR;BIJ;I;XT1
[1]  A CORRECAO DA MATRIZ YBUS (G-B), INCLUINDO AS REATANCIAS
[2]  A DAS MAQUINAS.
[3]  XT1←XT+X
[4]  BIJ←1÷XT1
[5]  I←0
[6]  TOP:I←I+1
[7]  B[IBAC[I];IBAC[I]]←B[IBAC[I];IBAC[I]]+B[IVT[I];IBAC[I]]-BIJ[
  I]
[8]  B[IVT[I];IVT[I]]←-BIJ[I]
[9]  B[IVT[I];IBAC[I]]←BIJ[I]
[10] B[IBAC[I];IVT[I]]←BIJ[I]
[11] →(I<ρXT)/TOP
  ▽

```

▽REDUZ[0]▽

```

  ▽ REDUZ;NREDUZ;MAT;B1;C;D;A1;N
[1]  A REDUCAO DA MATRIZ Y NODAL PELO PROCESSO DE KRON.
[2]  NREDUZ←ρH
[3]  MAT←(2,(ρG))ρ0
[4]  LF:DTCE2],('REDUCAO DA MATRIZ YBUS PARA ORDEM: ',(YNREDU
  Z)),',')
[5]  →((N←(ρG)[2])>NREDUZ)/L0
[6]  '*** ORDEM DA MATRIZ REDUZIDA NAO PODE SER MAIOR OU IGUA
  L A ORDEM DA'
[7]  →0,0ρB←' MATRIZ ORIGINAL'
[8]  L0:MATE[1,;]←G
[9]  MATE[2,;]←B
[10] L1:→(N<NREDUZ)/LF
[11] B1←MATE[1N-1,;N]
[12] C←MATE[;,N;1N-1]
[13] D←MATE[;N;N]
[14] D←1 1 xD←(+/D*2)
[15] B1←(+/B1x(ρB1)ρB((ρB1)[2],2)ρ 1 1 xD),[0.5]←/B1x(ρB1)ρB
  ((ρB1)[2],2)ρφD
[16] A1←(1,(N-1),N-1)ρ(B1E[1,;1]←.xCE[2,1,;]+B1E[2,;1]←.xCE[1,1,;]
[17] A1←((1,(N-1),N-1)ρ(B1E[;,1]←.xCE[1,1,;]-B1E[2,;1]←.xCE[2,1,;]
  ),[1] A1
[18] MAT←MATE[1N-1,1N-1]-A1
[19] →L1,0ρN←N-1
[20] LF:(2ρDTCE2]),'CONCLUIDA A REDUCAO'
[21] G←MATE[1,;]
[22] B←MATE[2,;]
  ▽

```

▽MPSIJ[0]▽

▽ MPSIJ;IND;I;J;DF

- [1] a MATRIZ DOS COEFICIENTES DE POTENCIA SINCRONIZANTE, COM
 [2] a OS ELEMENTOS $PS[I;I] = 0.0$
 [3] IND←pE
 [4] J←0
 [5] PS←(IND,IND)ρ0
 [6] TOP1: J←J+1
 [7] I←0
 [8] TOP2: I←I+1
 [9] →(I=J)/BOT
 [10] $PS[I;J]←E[I]×E[J]×((B[I;J]×2ρDF)-G[I;J]×1ρDF+DELT[I]-DEL$
 $T[J])$
 [11] BOT: →(I<IND)/TOP2
 [12] →(J<IND)/TOP1
 ▽

▽HCORPS[0]▽

▽ HCORPS;WR;I

- [1] a CORRECAO DA MATRIZ DE POTENCIA SINCRONIZANTE PELAS
 [2] a INERCIAS.
 [3] WR←60×2×01
 [4] I←0
 [5] TOP: I←I+1
 [6] $PS[I;J]←PSE[I;J]×(WR+(2×H[I]))$
 [7] →(I<ρH)/TOP
 ▽

▽MATCAR[0]▽

▽ MATCAR;IND;I

- [1] a MONTAGEM DA MATRIZ CARACTERISTICA DO SISTEMA, JA REDU-
 [2] a ZIDA PARA ORDEM (N-1).
 [3] IND←-1+(ρPS)[1]
 [4] $MCAR←-(IND,IND)↑PS$
 [5] I←0
 [6] TOP1: I←I+1
 [7] $MCAR[I;I]←+/PS[I;I]$
 [8] →(I<IND)/TOP1
 [9] I←0
 [10] TOP2: I←I+1
 [11] $MCAR[I;I]←MCAR[I;I]+PS[(IND+1);I]$
 [12] →(I<IND)/TOP2
 [13] $MCAR←-MCAR$
 ▽

▽EQCAR[0]▽

▽ EQCAR

- [1] a DETERMINACAO DA EQUACAO CARACTERISTICA E MATRIZES DE
- [2] a TRANSFORMACAO.
- [3] MCAR←QMCAR
- [4] DNLVSK
- [5] ML←M
- [6] MIL←MI
- [7] MCAR←QMCAR
- [8] DNLVSK

▽

▽DNLVSK[0]▽

▽ DNLVSK; IND; QQ; VV

- [1] a DETERMINACAO DA EQUACAO CARACTERISTICA PELO METODO DE
- [2] a DANILEVSKY.
- [3] a SAO MANTIDAS AS MATRIZES PARA POSTERIOR TRANSFORMACAO
- [4] a DOS AUTOVETORES.
- [5] IND←(QMCAR)[1]
- [6] QQ←(IND, IND)ρ(1, 0×(IND))
- [7] M←((IND-1), IND, IND)ρQQ
- [8] MI←M
- [9] MT←MCAR
- [10] I←0
- [11] TOP: I←I+1
- [12] MTO←MT
- [13] MEI; (IND-1); J←-MTOE(IND+1-1); J÷VV←MTOE(IND+1-1); (IND-1)]
- [14] MEI; (IND-1); (IND-1)]←1÷VV←MTOE(IND+1-1); (IND-1)]
- [15] MIEI; (IND-1); J←MTOE(IND+1-1); J
- [16] MT←MIEI; ;]+ .xMTO+ .xMEI; ;]
- [17] →(1<(IND-1))/TOP

▽

▽SOLCAR[0]▽

▽ Z←TOL SOLCAR NITER;IND;J;I;PO;K;RAD;LBDD

```

[1]  a SOLUCAO DA EQUACAO CARACTERISTICA POR NEWTON RAPHSON.
[2]  DCT←1E-20
[3]  PC←-MTE[1;]
[4]  IND←ρPC
[5]  J←IND
[6]  LBD←Jρ0
[7]  ITERA←LBD
[8]  RESID←LBD
[9]  I←0
[10] →CONTJ
[11] TOP1:I←I+1
[12] LBD[I]←LBDI
[13] RESID[I]←POL
[14] ITERA[I]←CONT
[15] PO←PC
[16] J←J-1
[17] PC[1]←PO[1]+LBDI
[18] K←1
[19] TOP2:K←K+1
[20] PC[K]←PO[K]+LBDI×PC[K-1]
[21] →(K(J)/TOP2
[22] PC←J↑PC
[23] CONTI:→(J≤2)/FIM
[24] LBDI←PC[1]÷(2×(ρPC))
[25] →((TOL NRSON NITER)=1)/TOP1
[26] Z←0
[27] DCT←1E-13
[28] →0
[29] FIM:RAD←(PC[1]*2)-4×PC[2]
[30] →(RAD<0)/CANCEL
[31] LBD[I+1]←((RAD*0.5)-PC[1])÷2
[32] LBD[I+2]←(-(RAD*0.5)+PC[1])÷2
[33] Z←1
[34] DCT←1E-13
[35] →(IMPRIMIR≠1)/0
[36] LBDD←(IND,1)ρLBD
[37] RESID←(IND,1)ρRESID
[38] ITERA←(IND,1)ρITERA
[39] ' '
[40] '*** COEFICIENTES DA EQUACAO CARACTERISTICA: '
[41] 1, (-MTE[1;])
[42] ' '
[43] (2 59 ρ(' NUM AUTOVALOR RESIDUO
      N. ITERACOES'),59ρ' '),[1]((9 0 ↑(IND,1)ρ(IND),(17 4 ↑
      LBDD),(17 5 ↑RESID),(12 0 ↑ITERA),(IND,4)ρ' '))
[44] ' '
[45] →0
[46] CANCEL:'A EQUACAO POSSUI RAIZES COMPLEXAS.'
[47] Z←0
    ▽
  
```

▽NRSON[0]▽

▽ Z←TOL NRSON NITER;PD;JND;I;DER
 [1] a DETERMINACAO DE UMA RAIZ DO POLINOMIO, PELO ALGORITMO
 [2] a DE NEWTON-RAPHSON.
 [3] IND←pPC
 [4] PD←(IND-1)^(IND-1)IND)×PC
 [5] CONT←0
 [6] TOP1: I←0
 [7] POL←1
 [8] TOP2: I←I+1
 [9] POL←POL×LBDI
 [10] POL←POL+PC[I]
 [11] →(I<IND)/TOP2
 [12] →(((POL)×TOL)▽(LBDIANT=LBDI))/ADIANTE
 [13] I←0
 [14] DER←IND
 [15] TOP3: I←I+1
 [16] DER←DER×LBDI
 [17] DER←DER+PD[I]
 [18] →(I<(IND-1))/TOP3
 [19] LBDIANT←LBDI
 [20] LBDI←LBDI-POL÷DER
 [21] CONT←CONT+1
 [22] →((CONT<NITER÷2)^(KONSI<|LBDIANT-LBDI))/AHEAD
 [23] LBDI←LBDIANT+((LBDI-LBDIANT)÷2)
 [24] AHEAD:→(CONT<NITER)/TOP1
 [25] 'ROTINA NEWTON RAPHSON ATINGIU O NUMERO MAXIMO DE ITERAC
 DES = ',NITER
 [26] Z←0
 [27] →0
 [28] ADIANTE: Z←1
 ▽



▽AVTLR[D]▽

▽ AVTLR; IND; I
 [1] a DETERMINACAO DOS AUTOVETORES ESQUERDOS E DIREITOS
 [2] IND←pLBD
 [3] AVTR←(IND, IND)p1
 [4] I←0
 [5] TOP1: I←I+1
 [6] AVTR[, I]←(IND, 1)p((LBD[I]*(φ1(IND-1))), 1)
 [7] ←(I<IND)/TOP1
 [8] AVTL←AVTR
 [9] I←IND
 [10] TOP2: I←I-1
 [11] AVTR←(IND, IND)pM[I, ;]+.xAVTR
 [12] AVTL←(IND, IND)pML[I, ;]+.xAVTL
 [13] ←(I>1)/TOP2
 ▽

▽MATPKI[D]▽

▽ MATPKI
 [1] a DETERMINACAO DA MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO
 [2] PKI←AVTRxAVTL
 [3] PKIN←PKI÷((pPKI)p+/[1] PKI)
 [4] ' '
 [5] 'MATRIZ DOS FATORES DE PARTICIPACAO:'
 [6] 10 6 7PKIN
 [7] ' '
 ▽

▽MATDIAG[D]▽

▽ MATDIAG
 [1] a TRANSFORMACAO DA MATRIZ CARACTERISTICA PARA A FORMA
 [2] a CANONICA DIAGONAL.
 [3] AVTLNOR←AVTL÷((pPKI)p+/[1] PKI)
 [4] MCD←AVTLNOR+.xMCD+.xAVTR
 [5] ' '
 [6] 'MATRIZ CARACTERISTICA NA FORMA CANONICA DIAGONAL:'
 [7] 10 3 7MCD
 ▽