

TESE

473

AJUSTES DE SINAIS ADICIONAIS
ESTABILIZADORES EM SISTEMAS
MULTIMÁQUINA

AJUSTES DE
SINAIS ADICIONAIS ESTABILIZADORES
EM SISTEMAS
MULTIMÁQUINA

LEO MIKAMI

Orientador: Prof. HÉLIO MOKARZEL

Co-orientador: Dr. NELSON MARTINS

Dissertação de Mestrado apresentada
a comissão de Pós-graduação da EFEI
como parte dos requisitos para a
obtenção do título de "Mestre em
Engenharia Elétrica"

CLASS. 62-752:621.313(043.2)
CUTT. M 618a
TOMBO 473



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "AJUSTES DE SINAIS ADICIONAIS ESTABILIZADORES EM SISTEMAS MULTIMÁQUINA"

Autor: LÊO MIKAMI

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 com distinção

Observações: _____

Itajubá, 05 de dezembro de 1986.

[assinatura]
1º Examinador

DR. NELSON MARTINS - CEPEL

[assinatura]
2º Examinador

PROF. CARLOS ALBERTO DIAS COELHO-EFEI

[assinatura]
3º Examinador

PROF. HÉLIO MOKARZEL - EFEI
ORIENTADOR

DEDICATÓRIA

A minha esposa Maria Lúcia

Aos meus filhos Lucas e Renê

RESUMO

Este trabalho apresenta um método para identificar as unidades geradoras mais adequadas para serem providas de Sinais Adicionais Estabilizadores, bem como para efetuar os ajustes de seus parâmetros. A identificação é feita com base nos resíduos de uma dada Função de Transferência do sistema. Esses resíduos são calculados em função dos autovetores à direita e à esquerda e são os coeficientes de sensibilidade dos autovalores devido à inclusão de realimentação, que no caso é o Sinal Adicional Estabilizador. O trabalho mostra também que, dentro de certas restrições, esses coeficientes podem ser utilizados nos ajustes de parâmetros de Sinal Adicional Estabilizador, através de processo de mínimos quadrados.

ABSTRACT

This work deals with a method for identification of generating units to be equipped with Power System Stabilizers, as well as for determining their parameters setting. The identification is made by using system Transfer Function residues, calculated based on left and right eigenvectors. These residues are equal to eigenvalues sensitivity due to feedback addition, that in this case is the Power System Stabilizer. Considering some constraints, it is shown that these eigenvalues sensitivity can be useful for Power System Stabilizer parameters setting, using least-square method.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Hélio Mokarzel pela orientação deste trabalho.

Ao amigo Dr. Nelson Martins pela dedicação, paciência e boa vontade com que também orientou este trabalho.

Aos engenheiros Atsushi Doi e Massanobu Itoh e Dr. Shigeru Abe, da Mitsubishi Electric Corp., Hyogo, Japan, pela valiosa colaboração, durante meu estágio técnico nessa empresa.

Ao engenheiro Juracy Rezende de Castro Andrade pela indicação e aprovação de meu nome ao curso de Pós-graduação.

Aos meus superiores, engenheiros Niromar Alves de Rezende e Francisco R. B. Piccione, cujo empenho e apoio tornaram possível a realização deste trabalho.

SIMBOLOGIA

Lista dos Principais Símbolos

Os símbolos que não constam desta lista, são explicados no próprio texto.

x	Vetor das variáveis de estado
z	Variável de controle ou entrada
y	Variável de saída
A	Matriz característica do sistema
A'	Matriz característica transposta do sistema
B	Matriz de coeficientes de entrada
C	Matriz de coeficientes de saída
$Y(s)$	Transformada de Laplace da variável de saída
$Z(s)$	Transformada de Laplace da variável de entrada
λ	Autovalor da matriz A . Caso venha acompanhado de um subscrito, o mesmo indica a ordem do autovalor em relação aos demais, dentro do domínio
λ'	Autovalor da matriz A , considerando-se incluído o efeito do Sinal Adicional Estabilizador
u	Autovetor da matriz A . Caso venha acompanhado de um subscrito, o mesmo indica a correspondência do autovetor com o autovalor de igual subscrito
v	Autovetor da matriz A' . Caso venha acompanhado de um subscrito, o mesmo indica a correspondên-

cia do autovetor com o autovalor de igual subscrito

U	Matriz modal da matriz A
V	Matriz modal da matriz A'
I	Matriz Identidade
$T_1(s)$	Função de Transferência do sistema sem Sinal Adicional Estabilizador em análise, correspondente a l-ésima unidade geradora
$T'_1(s)$	Função de Transferência do sistema com Sinal Adicional Estabilizador em análise, correspondente a l-ésima unidade geradora
$V_{ref\ 1}$	Tensão de referência do Regulador Automático de Tensão da l-ésima unidade geradora
$F_1(s)$	Função de Transferência do Sinal Adicional Estabilizador
p_{kl} e q_{kl}	Coeficientes do polinômio do numerador da parcela de $T_1(s)$, correspondente ao modo de oscilação de segunda ordem. O primeiro subscrito "k" indica a ordem de correspondência com autovalor, o segundo subscrito "l" indica ordem da unidade geradora
r_{ml}	Coeficiente do numerador da parcela de $T_1(s)$, correspondente ao modo de primeira ordem. As mesmas explicações da caso anterior se aplicam quanto aos subscritos
ζ_k	Coeficiente de amortecimento do k-ésimo autovalor
w^0_k	Frequência natural não amortecida do k-ésimo

autovalor

w_k	Frequência natural amortecida do k-ésimo autovalor
e_{kl}	Coeficiente de sensibilidade do autovalor "k" em função da adição de Sinal Adicional Estabilizador na l-ésima unidade geradora
I_{jk}	Matriz quadrada nula exceto a posição (j,k) que é igual à unidade
$x_k(s)$	Transformada de Laplace da k-ésima variável de estado
Kp_l	Ganho da Função de Transferência do Sinal Adicional Estabilizador
Tr	Constante de tempo de filtro passa-alta (reset)
Tl	Constante de tempo de filtro passa-baixo
P_l	Potência Ativa da l-ésima unidade geradora
w_l	Variável de estado "Velocidade do rotor" da l-ésima unidade geradora
I_D, I_Q	Componentes da corrente injetada na barra
G_{ij}, B_{ij}	Condutância e susceptância da rede
V_D, V_Q	Componentes da tensão de barra
I_N, V_N	Vetores de correntes injetada e tensão das barras expressas em relação aos eixos (D-Q)
T	Matriz de rotação angular
I_M, V_M	Vetores de corrente injetada e tensão das barras, expressas em relação aos eixos (d-q)
Z_M	Matriz de parâmetros dos geradores
V_I	Vetor de tensão interna dos geradores
$\Delta\delta$	Vetor de deslocamentos angulares dos rotores
$\Delta\delta_l$	Deslocamento angular do rotor da l-ésima unidade

	de geradora
$E'd, E''d, E''q$	Tensões transitória e sub-transitória nos eixos d e q
R_a	Resistência do enrolamento do estator
$x'd, x''d, x''q$	Reatâncias transitória e sub-transitória nos eixos d e q
$T'do, T''do, T''qo$	Constantes de tempo transitória e sub-transitória nos eixos d e q
H	Constante de inércia em Mws/Mva
W_s	Velocidade nominal do rotor
K_a, K_f	Ganhos do Regulador Automático de Tensão
T_a, T_f, T_e	Constantes de tempo do Regulador Automático de Tensão
E_{fd}	Tensão de campo do gerador
V_t	Tensão da barra terminal da unidade geradora

Subscritos

i, j, k, l, m, n	i, j, k, l, m, n -ésimo elemento de um grupo
D, Q	Eixos de referência do sistema
d	Componente do eixo direto
q	Componente do eixo em quadratura
n'	Número de unidade geradora
N	Indica quantidades expressas com relação aos eixos D e Q
M	Indica quantidades expressas com relação aos eixos d e q

Abreviaturas Encontradas no Texto

FT	Função de Transferência
SAE	Sinal Adicional Estabilizador
SEP	Sistema Elétrico de Potência
RAT	Regulador Automático de Tensão
RV	Regulador de Velocidade

Operadores

$[.]'$	Indica transposta de vetor ou matriz
$[.]*$	Indica conjugada-transposta de vetor ou matriz
$[\dot{.}]$	Indica derivada do elemento em relação ao tempo
$d[.]/ds$	Derivada de FT em relação a s
$\text{Real}\{.\}$	Operador que retorna a parte real de um número complexo
$\text{Imag}\{.\}$	Operador que retorna a parte imaginária de um número complexo
$\text{Abs}\{.\}$	Operador que retorna o módulo de um número complexo
s	Operador diferencial ($=d/dt$) ou operador de Laplace
∂	Indica a Derivada parcial
Δ	Variação incremental de uma grandeza

Observações sobre as Notações

Salvo aviso em contrário, um vetor será considerado como coluna. Contudo, segundo uma prática usual e para poupar espaço, poderá ser indicado como transposto de um vetor coluna, ou seja, por fila

$$x' = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

Dado que o domínio das variáveis de estado, de entrada e de saída é sempre o tempo, não haverá confusão alguma se o argumento for suprimido.

O modelo do SEP, no presente trabalho, é linearizado ao redor de um ponto de operação em equilíbrio estático. Assim, as variáveis deveriam, a rigor, serem representadas, por exemplo, por ΔV_t , ΔP , ΔW , etc. Contudo, as variáveis perturbadas, exceto no APÊNDICE A, serão expressas omitindo-se o símbolo Δ por conveniência.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMENTOS	v
SIMBOLOGIA	vi
ÍNDICE	xii
 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	 1
1.1 - Considerações Iniciais	1
1.2 - Objetivo e Escopo	5
1.3 - Alguns Comentários sobre Análise Linear do SEP	6
 CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	 8
2.1 - Introdução	8
2.2 - Considerações sobre coeficientes de sensibilidade de primeira ordem	11
2.3 - Obtenção da Função de Transferência do Sistema de Potência multimáquina	12
2.4 - Obtenção dos coeficientes de sensibilidade dos autovalores devido à adição de realimentação	16
2.4.1 - Formulação ABE & DOI	17
2.4.2 - Formulação Arcidiacono	20
2.4.3 - Relação entre os resíduos e coeficiente de	

sensibilidade	23
2.4.4 - Comparação entre as Formulações ABE & DOI E	
ARCIDIACONO	26
2.5 - Conclusões do Capítulo	26
 CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE E AJUSTES DE SAE	28
3.1 - Identificação do Problema	28
3.2 - Análise da Influência dos SAE's através da Matriz de	
sensibilidade	31
3.3 - Ajustes de SAE	33
3.4 - Algumas Considerações a Respeito da Especificação	
de Polos	35
3.5 - Método de Ajuste de Curva	36
3.5.1 - Método 1: Mínimos Quadrados	36
3.5.2 - Método 2	40
3.6 - Algoritmo para Identificar a Unidade Geradora a ser	
Provida de SAE e seu Ajuste	41
 CAPÍTULO 4 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	46
4.1 - Introdução	46
4.2 - Configuração 1	47
4.2.1 - SAE Derivado da Potência Ativa	54
4.2.2 - SAE Derivado da Velocidade do Rotor	75
4.3 - Configuração 2	82
 CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	97
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

APÊNDICE A

APÊNDICE B

APÊNDICE C

CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações iniciais

Houve uma certa época em que, quando se tratava de problema de estabilidade de Sistema Elétrico de Potência (SEP), dois aspectos de análise eram considerados, primordialmente: a estabilidade em regime transitória e permanente. A análise de estabilidade em regime transitória consiste na verificação das unidades geradoras em manter-se ou não em sincronismo, frente a grandes perturbações, caracterizadas por faltas do tipo curto-circuito. A análise de estabilidade em regime permanente consiste na avaliação dos coeficientes de torque sincronizante [13].

Posteriormente, em decorrência da expansão e interconexão entre áreas do SEP, houve necessidade de que também fosse aumentada a capacidade desse SEP em absorver impactos decorrentes de faltas ainda mais severas, para que a estabilidade fosse preservada. Com esse propósito, diversos equipamentos foram desenvolvidos e utilizados, sendo que talvez o mais importante consistiu na obtenção de um sistema de excitação mais rápido. Por conta principalmente desse detalhe, começou-se a perceber na prática, outras condições de instabilidade devido ao empobrecimento dos amortecimentos das oscilações eletromecânicas.

O problema caracterizado por instabilidade dinâmica, tem merecido muitas pesquisas teóricas e experimentais,

resultando num aumento considerável de conhecimentos de suas causas, nesses últimos 15 anos [12].

Na verdade, os equipamentos que mais contribuem para o empobrecimento dos amortecimentos são os Reguladores Automáticos de Tensão (RAT's) e os Reguladores de Velocidade (RV's). Quando se trata somente da estrutura do SEP, sem considerar os controladores, exceto em alguns casos, é possível encontrar um sistema com problema de amortecimento, principalmente para oscilações inter-área. Tais casos ocorrem especialmente em estrutura de rede particular, como no caso de áreas interligadas através de linhas de transmissão "frágil", sistemas com estruturas longitudinais, geradores interligados ao sistema através de longas linhas de transmissão.

Os amortecimentos devidos ao enrolamento amortecedor e/ou núcleo do rotor, cujos efeitos são pronunciados para faixa de frequência de oscilação local (1.0 a 1.6 Hz), são eliminados em grande parte pelos RAT's cujas excitatrizes possuem baixas constantes de tempo. Em casos das unidades geradoras conectadas através de linhas de transmissão curtas a um sistema malhado, os efeitos negativos dos controladores são praticamente desprezíveis [12]. Para o caso de oscilação inter-área, a respectiva frequência situa-se entre 0.1 a 0.5 Hz. Os efeitos de amortecimento dos enrolamentos amortecedores e/ou do núcleo dos rotores são poucos pronunciados para esta faixa de frequência, comparado com o seu efeito para uma oscilação local. Esse fato, acrescido ao efeito negativo sobre os amortecimentos introduzidos pelos reguladores faz com que as oscilações de baixa frequência mereçam tratamentos especiais, a fim de reduzir os riscos de se ter presente oscilações com amortecimentos insuficientes ou mesmo

negativos. Por outro lado, não há dúvida que o amortecimento pode também ser afetado pela natureza e localização das cargas, níveis e direção de fluxo de potência, etc.

Os amortecimentos inadequados evidentemente impõem sérias restrições à operação com redução de qualidade de fornecimento de energia, além de submeter diversos equipamentos a desgastes prematuros.

Nas pesquisas realizadas [12], concluiu-se que a maneira mais adequada para solucionar o problema de amortecimento do sistema, seria através de inclusão de uma malha de realimentação no sistema de excitação, com sinais derivados da potência ativa, ou potência acelerante, ou combinação de velocidade do rotor com potência ativa, etc. Essa realimentação é o que se denomina Sinal Adicional Estabilizador (SAE).

A função básica desse SAE é aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas, gerando torques elétricos no RAT, em fase com a velocidade do rotor. A sua principal característica é apresentar baixos ganhos, comparado aos controladores convencionais. O seu efeito é limitado para faixa de frequência de oscilação entre 0.2 a 2.0 Hz.

Embora sejam reconhecidas as grandes vantagens dos SAE's no aumento dos amortecimentos, a instalação destes em unidades geradoras já em operação, pode ser muito onerosa se envolver necessidade de substituição das respectivas excitatrizes [03]. Enquanto que o custo incremental da instalação de SAE's em unidades geradoras a serem implantadas com modernas excitatrizes é baixo, o mesmo não acontece para aquelas unidades cujas excitatrizes sejam demasiadamente lentas. A aplicação de SAE neste

caso é ineficaz, e a substituição de excitatrizes envolvem investimentos relativamente elevado.

Por outro lado, sabe-se que os SAE's não são eficazes se aplicados a determinadas unidades geradoras. Reciprocamente, eles podem ser eficazes se aplicados a outras unidades. Por isso, é interessante que os SAES's sejam instalados em pontos estratégicos e tenham os seus parâmetros propriamente ajustados, para que a sua ação seja a mais abrangente e efetiva possível sobre os amortecimentos das oscilações do sistema.

Atualmente no Brasil, existe difundido entre as empresas concessionárias de energia elétrica que compõem o Grupo Coodenador para Operação Interligada - GCOI, um programa de computador denominado AUTOVAL. A sua função é efetuar cálculo de autovalores e correspondentes autovetores de um SEP multimáquina, com modelos matemático dos componentes do sistema em níveis de sofisticação adequados para análise de oscilação eletromecânica [20].

No âmbito das concessionárias brasileiras ainda ressurte-se da necessidade de um recurso que seja operacional para facilitar a síntese de SAE de um SEP onde, de certa maneira, é importante considerar efeitos dos vários modos de oscilação eletromecânica simultaneamente, sem que seja necessário recorrer a inúmeros processos de tentativa-erro para ajustes.

Utilizando-se das características dos autovetores, é possível, em princípio, identificar as unidades geradoras candidatas a serem providas de SAE. Contudo, sendo um recurso de natureza mais qualitativa que quantitativa, torna-se difícil a sua utilização em si para ajustes dos SAE's.

Diante desse panorama, seria interessante implementar rotinas adicionais no programa AUTOVAL para que este possa servir também na síntese de SAE's.

1.3 - Objetivo e Escopo

Através do conhecimento dos resíduos de uma dada Função de Transferência (FT) do sistema dinâmico em análise, pode-se definir uma estrutura de realimentação para se obter um pequeno deslocamento de autovalores no plano complexo e, conseqüentemente, aumentar o amortecimento principalmente dos modos dominantes. Esses resíduos são os coeficientes de sensibilidade de primeira ordem dos autovalores devido à adição de uma realimentação no sistema, e são calculados sem considerar a introdução prévia dessa realimentação nesse sistema.

Assim, sendo essa realimentação um SAE, esses coeficientes de sensibilidade apresentam informações de quais unidades geradoras são as mais adequadas para serem providas de SAE, e das previsões de deslocamento dos autovalores para um SAE pré-definido. Desse procedimento, torna-se evidente o fato de ser possível escolher valores adequados para os parâmetros de uma SAE, levando-se em conta seu efeito sobre os amortecimento de vários modos de oscilação eletromecânica do sistema.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma sistemática, baseado nos coeficientes de sensibilidade e nos moldes daquele da referência [01], para identificar as unidades geradoras do SEP mais adequadas a serem providas de SAE, e ao

mesmo tempo, ajustar os seus parâmetros a fim de aumentar o amortecimento das oscilações.

De maneira geral, o trabalho está composto conforme mostrado a seguir.

O Capítulo 2 apresenta as considerações teóricas para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade. Para tanto, duas formulações são discutidas.

No Capítulo 3, são delineados os detalhes do procedimento alternativo ao do apresentado na referência [01], que se está tomando como base, para o ajuste do SAE, bem como o respectivo algoritmo. O procedimento apresentado fundamenta-se na elaboração de ajuste de curva sobre pontos definidos a partir dos coeficientes de sensibilidade, a fim de atender a uma dada especificação de polos.

Exemplos de aplicação são apresentados no Capítulo 4, discutindo-se as vantagens, assim como as limitações do algoritmo proposto. São estudados dois casos. Os ajustes obtidos para os SAE's são validados através do próprio programa AUTOVAL, bem como também pelo programa TRANSDIR [22], para avaliação dos resultados no domínio do tempo.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões da sistemática proposta.

1.3 - Alguns Comentários sobre Análise Linear do SEP

O SEP, devido a sua característica, deve em princípio, ser representado matematicamente através de equações

algébricas e diferenciais não-lineares. Em razão disso, é evidente que a natureza de amortecimento das oscilações dinâmicas podem ser diferentes quando o SEP é submetido a pequenas e grandes perturbações. Contudo, pode-se constatar que geralmente, muitas das grandes e intoleráveis perturbações são decorrentes de oscilações negativamente amortecidas, a partir de pequenas variações nos modos de oscilação. Em alguns outros casos, eles correspondem a modos com amortecimentos baixos para pequenas perturbações [13].

A análise dos sistemas lineares torna possível desenvolver conclusões gerais de maneira mais simples, comparada ao caso de análise de sistemas não-lineares. Por outro lado, pode-se dizer que é um bom ponto de partida, uma vez que a análise de estabilidade a pequenas perturbações conduz a uma condição necessária, mas não suficiente [03].

O presente trabalho utiliza modelo do SEP linearizado ao redor de um ponto de operação em equilíbrio. Assim, a sistemática de ajustes a ser proposta fica delimitado para condições do SEP, frente às pequenas perturbações.

CAPÍTULO 2 : FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 - Introdução

O desenvolvimento deste trabalho refere-se à síntese de SAE, considerando-se que o modelo matemático do SEP multimáquina, após linearizado ao redor de um ponto de operação em equilíbrio, possa ser representado por sistemas lineares determinísticos, contínuo e de parâmetros invariantes com o tempo. Assim, o sistema linear é considerado de tal modo que o seu comportamento dinâmico (geradores + controladores + cargas) possa ser adequadamente modelado em nível de detalhe suficiente por equação de estado de espaço da forma:

$$\dot{x} = Ax + Bz \quad (2.1)$$

e uma equação de saída, associada, da forma

$$y = Cx \quad (2.2)$$

O desenvolvimento teórico para a formação das matrizes A, B e C está descrito no APÊNDICE A.

O princípio do Controle Modal é baseado no fato de que o vetor de entrada z do sistema pode ser gerado através de um vetor de realimentação de tal maneira que a especificação de autovalores seja associada aos modos dinâmicos da malha fechada |04|.

Para ilustrar, seja considerar um sistema escalar e contínuo no tempo, definido pela equação de estado também escalar e de primeira ordem.

$$\dot{x} = ax + bz \quad (2.3)$$

$$y = cx \quad (2.4)$$

onde a , b , e c são reais e constantes.

Calculando-se a FT, definido pela saída y e entrada z , tem-se:

$$Y(s)/Z(s) = c(s - a)^{-1}b = bc/(s-a) \quad (2.5)$$

apresentando um único autovalor

$$\lambda = a \quad (2.6)$$

A FT (2.5) pode ser representada pelos traços contínuos do diagrama de blocos da figura 2.1.

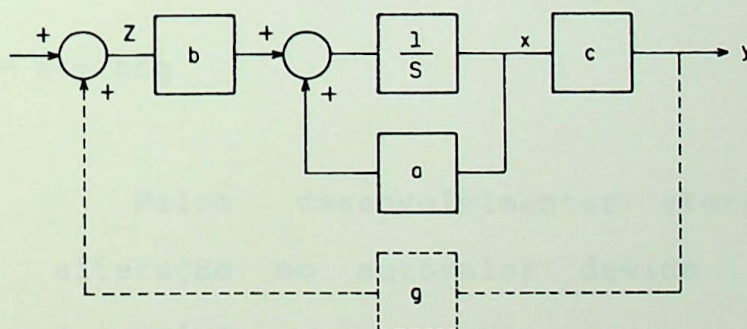


Figura 2.1 - Diagrama de blocos do sistema das equações (2.3) e (2.4)

A resposta y no tempo para uma aplicação de um sinal de impulso na entrada é dada por

$$y = bc.exp(at) \quad (2.7)$$

onde $exp(at)$ define o único modo dinâmico do sistema (2.3) e (2.4). Assim, se a for positivo é óbvio que o sistema será instável; também, embora o sistema seja assintoticamente estável caso a seja negativo, o decaimento de y para zero pode não ser suficientemente rápido. No entanto, se a malha de realimentação for convenientemente definida pela equação

$$z = gy \quad (2.8)$$

onde g é uma constante escalar real e arbitrária, então a seguinte FT pode ser escrita:

$$\frac{Y(s)}{Z(s)} = c[s - (a + bcg)]^{-1}b = \frac{bc}{s - (a + bcg)} \quad (2.9)$$

onde,

$$\lambda' = a + bcg \quad (2.10)$$

Pelos desenvolvimentos efetuados torna-se claro que a alteração no autovalor devido à inclusão da realimentação g é igual a

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = bcg \quad (2.11)$$

É óbvio que para o sistema das equações (2.3) e (2.4), λ' pode ser especificado como qualquer real negativo através da simples escolha de g na equação (2.10), de acordo com a fórmula

$$g = (\lambda' - a)/bc \quad (2.12)$$

Pela expressão (2.11) conclue-se que o coeficiente de sensibilidade de λ pela inclusão de um ganho de realimentação pode ser dado por

$$\Delta\lambda/g = \Delta\lambda/\Delta g = bc \quad (2.13)$$

Pelas equações (2.5), (2.9) e (2.13) pode-se ver que o resíduo ou coeficiente de sensibilidade bc independe da realimentação g .

2.2 - Considerações sobre os Coeficientes de Sensibilidade de Primeira Ordem

Na síntese de SAE em um sistema de dimensão arbitrária, como é o caso de um SEP, a aplicação do Controle Modal para especificar polos seria o mais adequado para o problema, caso não envolvesse complicadas operações matriciais [01, 04].

Por outro lado, o objetivo da estabilização de um sistema por meio de SAE é conseguir deslocamento dos autovalores com amortecimento baixo, relacionados aos modos

eletromecânicos, a fim de se obter aumento nesses amortecimentos. Como o ganho do SAE é limitado a valores não muito elevados, sob pena de tornar oscilatória os modos relacionados ao Sistema de Excitação, principalmente se o seu ganho é elevado [12], o amortecimento resultante é usualmente restrito a valores "pequenos". Contudo, quando se trata de modos eletromecânicos, esse aumento é normalmente satisfatório [07]. Baseado nesse fato, o conhecimento dos coeficientes de sensibilidade dos autovalores, mesmo de primeira ordem apenas, pode ser utilizado na síntese dos SAE's.

Dos coeficientes de sensibilidade, pode-se ter uma visão global do efeito que um dado SAE pode ocasionar sobre os modos de oscilação em geral, inclusive dos efeitos negativos. A contribuição negativa do SAE sobre alguns modos eletromecânicos, embora possa parecer inconsistente, tem sido constatados em SEP's fortemente acoplados (discussões da Referência [03]).

2.3 - Obtenção da Função de Transferência do SEP Multimáquina

As expressões para obtenção de coeficientes de sensibilidade que são de grande importância na síntese modal, tem sido obtido através de diferentes métodos [04].

No presente trabalho, os coeficientes são obtidos dos resíduos de uma dada FT do SEP.

Se o SAE for derivado da Potência Ativa, realimentando na Referência de Tensão do RAT, a FT do SEP deve ser aquela cuja saída seja Potência Ativa e a entrada, Tensão de

Referência do RAT da unidade geradora em análise. O mesmo procedimento se aplica se o SAE for derivado a partir de outras grandezas como Velocidade do Rotor, Frequência Elétrica, etc.

Se A possui n autovalores distintos, então haverá também n autovetores correspondentes linearmente independentes e representados por u_i ($i=1,2,\dots,n$) que são relacionados pela equação:

$$Au_i = \lambda_i u_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2.14)$$

Da mesma maneira, para A' , tem-se n autovetores correspondentes v_j ($j=1,2,\dots,n$), e relacionados pela equação

$$A'v_j = \lambda_j v_j \quad (j=1,2,\dots,n) \quad \text{ou} \quad (2.15)$$

$$v_j' A = \lambda_j v_j' \quad (2.16)$$

O fato dos autovalores de A e A' serem iguais não implica que os correspondentes autovetores sejam iguais. Na verdade, eles são ortogonais [04], logo

$$v_i' u_i = c_i \quad (i=1,2,\dots,n), \text{ e} \quad (2.17)$$

$$v_j' u_i = 0 \quad (i,j=1,2,\dots,n) \text{ e } i \neq j \quad (2.18)$$

onde c_i é constante.

Normalizando-se os autovetores de tal maneira que

$$v_i' u_i = 1.0 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2.19)$$

obtem-se

$$V'U = I \quad e \quad (2.20)$$

$$UV' = I \quad (2.21)$$

onde

$U = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ é a matriz modal de A , e

$V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ é a matriz modal de A' .

As expressões (2.20) e (2.21) implicam que as matrizes U e V' sejam inversas entre si, ou

$$V' = U^{-1} \quad e \quad (V')^{-1} = U \quad (2.22)$$

Desta forma, as seguintes transformações podem ser obtidas:

$$\bar{x} = U^{-1}x = V'x$$

$$\dot{\bar{x}} = U^{-1}AU\bar{x} + U^{-1}Bz$$

$$\dot{\bar{x}} = V'AU\bar{x} + V'Bz = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}z$$

$$y = CU\bar{x} = \bar{C}\bar{x}$$

$$x = U\bar{x} \Rightarrow \bar{x} = U^{-1}x$$

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.23)$$

$$y = Cx \quad (2.24)$$

$$\dot{\bar{x}} = U^{-1}\dot{x} \quad (2.24)$$

$$U\dot{\bar{x}} = A U\bar{x} + Bu \quad (2.25)$$

$$\dot{\bar{x}} = U^{-1}AU\bar{x} + U^{-1}Bu$$

$$y = CU\bar{x}$$

$$\bar{A} = U^{-1}AU$$

$$\bar{B} = U^{-1}B$$

$$\bar{C} = CU$$

$$(2.26)$$

onde:

$\bar{A}$ é a matriz espectral $|01|$, da forma

$$\bar{A} = \text{diag}\{\lambda_i\}_1^n$$

$\bar{B}$ é a matriz de controlabilidade de modo $|04|$, e

$\bar{C}$ é a matriz de observabilidade de modo $|04|$.

A FT de z para y pode ser dada por

$$\begin{aligned}
 T_1(s) &= \frac{Y(s)}{Z(s)} = C(sI - A)^{-1}B = \bar{C}(sI - \bar{A})^{-1}\bar{B} = \\
 &= [\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_n] \cdot \text{diag}\{(s - \lambda_1)^{-1}\}_1^n \cdot [\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_n]' = \\
 &= \sum_i \frac{\bar{b}_i \bar{c}_i}{s - \lambda_i} \quad (2.27)
 \end{aligned}$$

onde $\bar{b}_i \bar{c}_i$ ($i=1,2,\dots,n$) são denominados resíduos [08,14].

Se dois autovalores complexos λ_j e λ_k são conjugados, então

$$\bar{b}_j \bar{c}_j = (\bar{b}_k \bar{c}_k)^* \quad (2.28)$$

A parcela que representa o modo de oscilação de segunda ordem da FT (2.27) pode ser dada por

$$\frac{p_{j1}s + q_{j1}}{s^2 + 2\zeta_j w_{0j}s + w_{0j}^2} = \frac{\bar{b}_{j1} \bar{c}_{j1}}{s - \lambda_j} + \frac{(\bar{b}_{j1} \bar{c}_{j1})^*}{s - \lambda_j^*} \quad (2.29)$$

Definindo-se λ_j e $\bar{b}_{j1} \bar{c}_{j1}$ como,

$$\lambda_j = \sigma_j + jw_j = -\zeta_j w_{0j} + j\sqrt{1 - \zeta_j^2} w_{0j} \quad \text{e} \quad \bar{b}_{j1} \bar{c}_{j1} = \alpha_{j1} + j\beta_{j1} \quad (2.30)$$

e, a partir das expressões (2.28) e (2.30), obtem-se

$$p_{j1} = 2\alpha_j \quad (2.31)$$

$$q_{j1} = -2(\alpha_{j1} \sigma_j + \beta_{j1} w_j) \quad (2.32)$$

Assim, a FT da equação (2.27) assume o seguinte aspecto

$$T_1(s) = \sum_k \frac{p_{kl}s + q_{kl}}{s^2 + 2\zeta_k w_{0k}s + w_{0k}^2} + \sum_m \frac{r_{ml}}{s + d_m} \quad (2.33)$$

onde a primeira parcela representa a somatória de todos os modos oscilatório de segunda ordem e a segunda parcela representa a somatória dos modos monotônicos.

O índice "l", acrescentado a partir da equação (2.29), indica que os coeficientes são elementos relacionados com a l-ésima unidade geradora.

2.4 - Obtenção dos Coeficientes de Sensibilidade dos Autovalores Devido à Adição de Malha de Realimentação

Os coeficientes de sensibilidade dos autovalores a serem determinados serão aqueles devido à adição de malha de realimentação, que no caso é um SAE. O desenvolvimento da formulação é semelhante para qualquer SAE, independentemente do tipo de sinal derivado, e teoricamente deve apresentar resultados semelhantes.

Duas formulações serão aqui analisadas, a proposta por ABE & DOI [01,02] e por ARCIDIACONO [07].

2.4.1 - Formulação ABE & DOI

Considere-se o SAE cujo sinal seja derivado da Potência Ativa. A figura 2.2 mostra as FT's definidas pela entrada Tensão de Referência V_{ref1} do RAT e saída Potência Ativa P do gerador "1" de um SEP multimáquina. Para cada gerador ($l=1,2,\dots,n'$), $T_1(s)$ indica a FT sem considerar o SAE e $T'_1(s)$ indica aquela com SAE. $F_1(s)$ indica a FT do SAE.

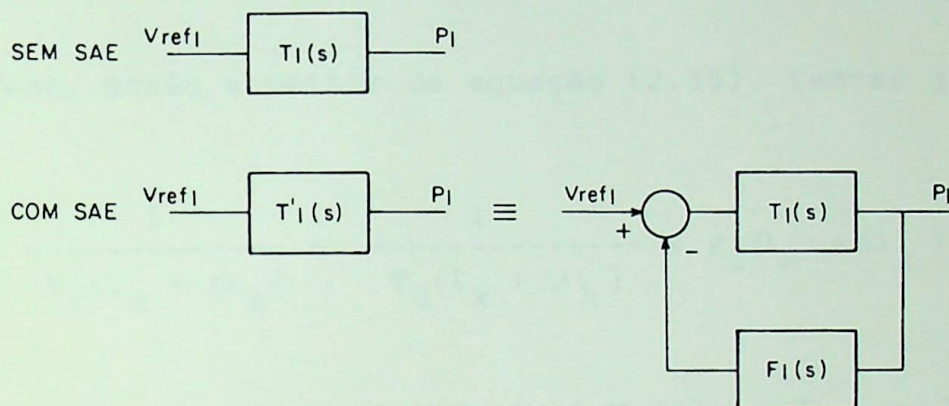


Figura 2.2 - Funções de Transferência do Sistema Elétrico de Potência sem e com SAE

Da FT da figura 2.2

$$T'_1(s) = \frac{T_1(s)}{1 + T_1(s) \cdot F_1(s)} \quad \text{ou} \quad (2.34)$$

$$\frac{1}{T'_1(s)} = \frac{1}{T_1(s)} + F_1(s) \quad (2.35)$$

Sendo λ_k e λ'_k um dos autovalores de $1/T_1(s)$ e $1/T'_1(s)$, respectivamente, e relacionados aos modos eletromecânicos, então

$$\frac{1}{T'_1(\lambda'_k)} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{1}{T_1(\lambda_k)} = 0 \quad (2.36)$$

onde $k=1,2,\dots,n'-1$

Supondo-se que o deslocamento

$$\Delta\lambda_k = \lambda'_k - \lambda_k \quad (2.37)$$

seja pequeno, então a partir da equação (2.35), tem-se que

$$\frac{1}{T'_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k)} = \frac{1}{T_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k)} + F_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k) \quad (2.38)$$

Desenvolvendo-se $1/T_1(s)$, onde $s = \lambda_k + \Delta\lambda_k$ em série de Taylor e desprezando-se termos de ordem igual ou maior que dois, tem-se

$$\frac{1}{T_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k)} = \frac{1}{T_1(\lambda_k)} + \frac{d}{ds} \left[\frac{1}{T_1(s)} \right]_{s=\lambda_k} \cdot \Delta\lambda_k \quad (2.39)$$

ou, como $1/T_1(\lambda_k) = 0$ e $1/T'_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k) = 0$, tem-se respectivamente, a partir das equações (2.38) e (2.39) que

$$0 = \frac{1}{T_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k)} + F_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k) \quad \text{e} \quad (2.40)$$

$$\frac{1}{T_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k)} = \frac{d}{ds} \left[\frac{1}{T(s)} \right]_{s=\lambda_k} \cdot \Delta\lambda_k \quad (2.41)$$

Das equações (2.40) e (2.41), tem-se

$$\Delta\lambda_k = - \frac{F_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k)}{\frac{d}{ds} \left[\frac{1}{T_1(s)} \right]_{s=\lambda_k}} \quad (2.42)$$

Considere-se a FT do sistema, $T_1(s)$, repetida a seguir, por conveniência

$$T_1(s) = \sum_k \frac{p_{k1}s + q_{k1}}{s^2 + 2\zeta_k w_{0k}s + w_{0k}^2} + \sum_m \frac{r_{m1}}{s + d_m} \quad (2.43)$$

Ignorando-se, por simplicidade, o segundo termo da equação (2.43) e derivando-se o recíproco de $T_1(s)$ em relação a s , no ponto $s = \lambda_k$, tem-se:

$$\frac{d}{ds} \left[\frac{1}{T(s)} \right]_{s=\lambda_k} = \frac{2(\lambda_k + \zeta_k w_{0k})}{p_{k1}\lambda_k + q_{k1}} \quad (2.44)$$

Substituindo-se a equação (2.44) na (2.42), tem-se:

$$\Delta\lambda_k = - \frac{1}{2} \cdot \frac{p_{k1}\lambda_k + q_{k1}}{\lambda_k + \zeta_k w_{0k}} \cdot F_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k) \quad (2.45)$$

Efetuando-se as seguintes aproximações

$$\lambda_k \approx j\omega, \quad \zeta_k \ll 1.0 \quad \text{e} \quad \Delta\lambda_k \ll \lambda_k, \quad (2.46)$$

a equação (2.45) pode ser expressa por

$$\Delta\lambda_k = - \frac{1}{2} (p_{kl} - j \frac{q_{kl}}{\omega_k}) F_1(j\omega_k) = e_{kl} F_1(j\omega_k) \quad (2.47)$$

onde e_{kl} é igual ao coeficiente de sensibilidade do autovalor λ_k ao ser incluído uma SAE $F_1(j\omega_k)$ na l -ésima unidade geradora.

A matriz dos coeficientes pode ser definida como:

$$E = \{e_{kl}\} \quad (k=1,2,\dots,n'-1; \quad l=1,2,\dots,n') \quad (2.48)$$

A partir da matriz E , o efeito de SAE em qualquer gerador sobre os autovalores pode ser avaliado.

O aspecto mais importante da equação (2.47) é o fato dos coeficientes de sensibilidade poderem ser obtidos sem que os SAE's sejam representados nas equações de estado de espaço, ou seja, p_{kl} e q_{kl} dependem simplesmente dos resíduos da FT do sistema sem SAE.

2.4.2 - Formulação ARCIDIACONO

Uma outra maneira de se obter os coeficientes de sensibilidade pode se desenvolver baseada na propriedade de

condição de partida do método de "lugar das raízes" [07,12]. Essa formulação se assemelha àquela analisada no item 2.1.

Considere-se novamente que o SAE em análise seja tal que o sinal de entrada seja derivado da Potência Ativa. A figura 2.3 mostra as FT's envolvidas.

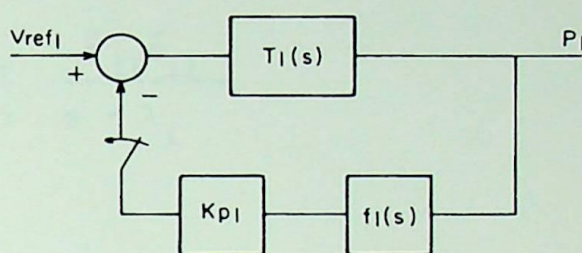


Figura 2.3 - Inclusão de uma realimentação com ganho "pequeno"

A malha de realimentação é um SAE e pode ser escrita como:

$$F_1(s) = K_{p1} f_1(s) \quad (2.49)$$

sendo K_{p1} um escalar e $f_1(s)$ uma FT representando uma determinada estrutura.

Considere-se que $T_1(s)$ e $F_1(s)$ tenham os seus zeros e polos distintos e que um dado autovalor λ_k desloque-se para λ'_k , ao ser fechada a malha de realimentação na 1-ésima unidade geradora. Então

$$\lambda'_k = \lambda_k + \Delta\lambda_k \quad (2.50)$$

deve satisfazer a seguinte equação característica

$$1 + Kp_1 f_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k) \cdot T_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k) = 0 \quad (2.51)$$

Conforme mostrado anteriormente, $T_1(s)$ pode ser escrita como

$$T_1(s) = \sum_i \frac{\bar{b}_{il} \bar{c}_{il}}{s - \lambda_i} \quad (2.52)$$

Logo,

$$T_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k) = \sum_i \frac{\bar{b}_{il} \bar{c}_{il}}{\lambda_k + \Delta\lambda_k - \lambda_i} \quad (2.53)$$

ou, retirando-se a parcela $i = k$ do sinal de somatória

$$T(\lambda_k + \Delta\lambda_k) = \frac{\bar{b}_{kl} \bar{c}_{kl}}{\Delta\lambda_k} + \sum_{i \neq k} \frac{\bar{b}_{il} \bar{c}_{il}}{\lambda_k + \Delta\lambda_k - \lambda_i} \quad (2.54)$$

Substituindo-se a equação (2.54) na (2.51) e isolando-se $\Delta\lambda_k$, tem-se

$$\Delta\lambda_k = - \frac{Kp_1 \bar{b}_{kl} \bar{c}_{kl} f_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k)}{1 + Kp_1 f_1(\lambda_k + \Delta\lambda_k) \cdot \left[\sum_{i \neq k} \frac{\bar{b}_{il} \bar{c}_{il}}{\lambda_k - \lambda_i + \Delta\lambda_k} \right]} \quad (2.55)$$

$$\frac{\Delta \lambda_k}{K_{p1}} = - \bar{b}_{kl} \bar{c}_{kl} \frac{f_1(\lambda_k + \Delta \lambda_k)}{1 + K_{p1} f_1(\lambda_k + \Delta \lambda_k) \left[\sum_{i \neq j} \frac{\bar{b}_{il} \bar{c}_{il}}{\lambda_k - \lambda_i + \Delta \lambda_k} \right]} \quad (2.56)$$

Entao, de (2.56)

$$\lim_{K_p \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \lambda_k}{K_p} \right) = - \bar{b}_{kl} \bar{c}_{kl} f_1(\lambda_k) \quad (2.57)$$

Assim, desde que o ganho do SAE seja "pequeno", o deslocamento de autovalor devido ao fechamento da malha do SAE na l-ésima unidade geradora, pode ser expressa como:

$$\Delta \lambda_k = - \bar{b}_{kl} \bar{c}_{kl} F_1(\lambda_k) \quad (2.58)$$

onde $\bar{b}_{kl} \bar{c}_{kl}$, conforme equação (2.27) é o resíduo correspondente ao autovalor λ_k e igual a um coeficiente de sensibilidade, como será mostrado no item 2.4.3.

A equação (2.58) pode ser escrita ainda como

$$\Delta \lambda_k = - \bar{b}_{kl} \bar{c}_{kl} F_1(j\omega_k) \quad (2.59)$$

para $\zeta_k \ll 1$.

2.4.3 - Relação entre o Resíduo e Coeficiente de Sensibilidade

Caso um elemento genérico da matriz

$$A = [a_{jk}] \quad (2.60)$$

sofra uma pequena variação devido a alteração de algum parâmetro do sistema, os autovalores e autovetores de A sofrerão também alguma variação.

Efetuando-se a derivada parcial da equação (2.14) em relação a a_{jk} , tem-se

$$\frac{\partial A}{\partial a_{jk}} u_i + A \frac{\partial u_i}{\partial a_{jk}} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{jk}} u_i + \lambda_i \frac{\partial u_i}{\partial a_{jk}} \quad (2.61)$$

Pré-multiplicando-se a equação (2.61) por v'_i , tem-se

$$v'_i \frac{\partial A}{\partial a_{jk}} u_i + v'_i A \frac{\partial u_i}{\partial a_{jk}} = v'_i \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{jk}} u_i + v'_i \lambda_i \frac{\partial u_i}{\partial a_{jk}} \quad (2.62)$$

Ou, de acordo com a equação (2.15),

$$v'_i \frac{\partial A}{\partial a_{jk}} u_i + \lambda_i v'_i \frac{\partial u_i}{\partial a_{jk}} = v'_i \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{jk}} u_i + \lambda_i v'_i \frac{\partial u_i}{\partial a_{jk}}$$

$$v'_i \frac{\partial A}{\partial a_{jk}} u_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{jk}} v'_i u_i \quad (2.63)$$

Baseado na equação (2.19) e no fato de que

$$\frac{\partial A}{\partial a_{jk}} = I_{jk} \quad (2.64)$$

onde I_{jk} é uma matriz de mesma dimensão que A , em que todos os elementos são nulos exceto a posição (j,k) que é igual à unidade, a equação (2.63) pode ser escrita como

$$-\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{jk}} = v_{ij} u_{ik} \quad (2.65)$$

Na equação (2.65), v_{ij} e u_{ik} são respectivamente, o j -ésimo elemento do autovetor v_i e k -ésimo elemento do autovetor u_i .

Considerando-se para simplificar o desenvolvimento, que B e C das equações (2.1) e (2.2) sejam tais que todos os elementos são nulos exceto as j -ésima e k -ésima posições, respectivamente, que são iguais à unidade, a equação (2.27) pode ser escrita como

$$\frac{x_k(s)}{z_j(s)} = \sum_i \frac{\bar{b}_i \bar{c}_i}{s - \lambda_i} = \sum_i \frac{v_{ij} u_{ik}}{s - \lambda_i} \quad (2.66)$$

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

$$\frac{x_k(s)}{z_j(s)} = \sum_i \frac{\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{jk}}}{s - \lambda_i} \quad (2.67)$$

Ou seja, o coeficiente de sensibilidade $\partial \lambda_i / \partial a_{jk}$ é igual ao resíduo de $x_k(s)/z_j(s)$ correspondente a parcela de λ_i .

2.4.4 - Comparação entre as Formulações ABE & DOI e ARCIDIACONO

Sob o ponto de vista teórico, poder-se-ia dizer que a equação (2.57) é rigorosamente exata. A diferença dessa com a equação (2.47) reside basicamente no fato desta última supor que o coeficiente de amortecimento é tal que $\zeta_k \ll 1.0$, como mostrado a seguir.

Das equações (2.30), (2.31) e (2.32), o resíduo $b_{j1}c_{j1}$ pode ser escrito como:

$$\bar{b}_{j1} \bar{c}_{j1} = \alpha_{j1} + \beta_{j1} = -\frac{1}{2} (p_{j1} - j \frac{q_{j1}}{w_j} - j \frac{p_{j1}}{w_j} \sigma_j) \quad (2.68)$$

A terceira parcela do último membro da equação (2.68) pode ainda ser escrita como

$$-\frac{p_{j1}}{w_j} \sigma_j = p_{j1} \frac{\zeta_j}{1 - \zeta_j^2} \quad (2.69)$$

2.4 - Conclusões

Para ambas as formulações, em que se utiliza de recursos lineares para tratar de comportamentos não-lineares como é o caso dos deslocamentos dos autovalores, não é possível quantificar a fronteira para os quais as informações de

sensibilidade permanecem válidas. Esses aspectos diferem de sistema para sistema, e sugerem que é imperativo a necessidade de se efetuar sempre validações das sínteses efetuadas. Em geral, como já comentado, é comum obter-se resultados satisfatórios com pequenos deslocamentos dos autovalores devido ao SAE, com ganho baixo. E caso isso não se verifique, o recurso é prover de SAE outras unidades geradoras.

A instalação sucessiva de SAE's pode ser um recurso adequado, contudo os parâmetros ótimos só podem ser obtidos através de ajustes coordenados e simultâneos para os SAE's das diferentes unidades [02].

CAPÍTULO 3 : PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE E AJUSTES DE SAE

3.1 - Identificação do Problema

O primeiro aspecto a ser verificado na análise é o comportamento do SEP relacionado a estabilidade ou ao amortecimento dos modos eletromecânicos. Esta fase é o que se pode chamar de identificação do problema e é comum, na prática, a sua execução durante os estudos para a operação e de planejamento de expansão do SEP. No planejamento de expansão, a natureza da estrutura do sistema pode, por exemplo, dar margem ao aparecimento de algum risco de instabilidade, havendo necessidades de estudos adicionais para controle dos amortecimentos dos modos eletromecânicos. Nada impede também que, devido algum aspecto peculiar ou não, os riscos de instabilidade venham a ser detetados também nos estudos para a operação do sistema.

A avaliação dos coeficientes de amortecimento dos $n'-1$ modos eletromecânicos pode ser feita após o cálculo dos autovalores através de

$$\zeta_k = - \frac{\text{Real}\{\lambda_k\}}{\text{Abs}\{\lambda_k\}} \quad (k=1,2,\dots,n'-1) \quad (3.1)$$

Uma vez que a aplicação de SAE altera basicamente o amortecimento dos modos eletromecânicos (e também dos modos relacionados ao Sistema de Excitação) é interessante que eles sejam identificados dentre os demais, para que os ajustes

desses SAE's sejam feitos de tal maneira a minimizar possíveis deterioramento de alguns modos, na tentativa de aumento de amortecimento de outros.

Na grande maioria dos casos, como os modos dominantes referem-se aos modos eletromecânicos, a busca dos autovalores cujos amortecimentos são baixos são indicativos suficientes para se efetuar a referida identificação [03,07]. Por exemplo, em geral os autovalores que satisfazem a inequação (3.2), que significa estarem situados na parte hachurada do plano complexo (figura 3.1), são relacionados aos modos eletromecânicos.

$$\frac{\text{Real}\{\lambda_k\}}{\text{Abs}\{\lambda_k\}} \geq -0.25 \quad (3.2)$$

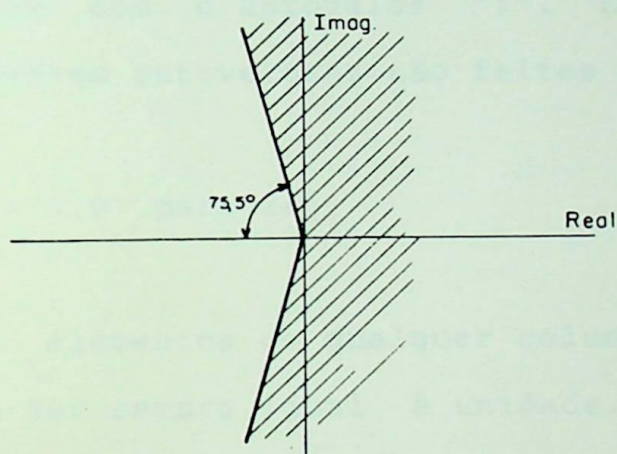


Figura 3.1

Pelo menos um método tem sido apresentado na literatura disponível, relacionado à identificação dos modos de interesse.

O método consiste na identificação através da utilização dos autovetores das matrizes A e A' , também denominados autovetores à direita e à esquerda, respectivamente [15,16]. Considerando-se por simplicidade, que todos os autovetores de A sejam distintos, é possível definir coeficientes que representem associações de variáveis de estado e os autovalores. Tais associações podem ser definidas, por meio da chamada matriz dos "fatores de participação", dada por

$$FP = [Abs\{fp_{ik}\}] = [Abs\{v_{ik} u_{ik}\}] \quad (3.3)$$

onde v_{ik} e u_{ik} são respectivamente, os k -ésimos elementos de v_i e u_i , relacionados com o autovalor " i ". Em função de que, as normalizações desses autovetores são feitas de tal modo que

$$v_i' u_j = 1.0 \quad \text{para } i=j \quad (3.4)$$

a somatória dos elementos de qualquer coluna ou qualquer fila da matriz FP deve ser sempre igual à unidade. Cada elemento de FP , que é adimensional, representa o grau de participação do estado x_k na formação do autovalor λ_i , e reciprocamente, ele representa o grau de participação do autovalor λ_i na formação de x_k . Assim, como é admissível que os modos dominantes sejam aqueles eletromecânicos e relacionados às variáveis de estado ângulo ou velocidade dos rotores, a identificação dos $n'-1$ autovalores pode ser feita pelo exame do maior coeficiente da fila de FP relativo a variável ângulo do rotor, para todas as unidades geradoras ($l=1,2,\dots,n'-1$)

Um aspecto interessante a observar é que os elementos das colunas de FP correspondente a um dado autovalor "i" são iguais aos coeficientes de sensibilidade desse autovalor em relação aos elementos da diagonal da matriz A, ou seja

$$\text{coluna "i" de FP} = \text{diag} \{S_i\} \quad (3.5)$$

onde

$$S_i = \left[-\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{mn}} \right] = v_i u_i' \quad (i, m, n = 1, 2, \dots, n) \quad (3.6)$$

3.2 - Análise da Influência dos SAE's através da Matriz de Sensibilidade

Independente das formulações para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade, a escolha da unidade geradora mais adequada a ser provida de SAE, sob o aspecto de eficácia, no sentido de poder contemplar não só o modo pouco amortecido como também o maior número possível, pode ser feita através do exame da matriz de sensibilidade E. Essa matriz possui a estrutura mostrada na tabela 3.1.

unidade geradora (l) autovvalor (λ_k)	l=1	l=2	...	l=n'
λ_1	e_{11}	e_{12}	...	$e_{1n'}$
λ_2	e_{21}	e_{22}	...	$e_{2n'}$
...	...	...	...	...
$\lambda_{n'-1}$	$e_{n'-1,1}$	$e_{n'-1,2}$	...	$e_{n'-1,n'}$

Tabela 3.1 - Estrutura da matriz $E = \{e_{kl}\}$

$$k = 1, 2, \dots, n'-1$$

$$l = 1, 2, \dots, n'$$

Uma vez obtidas as matrizes modais à direita e à esquerda, o desenvolvimento da l-ésima coluna de E depende das matrizes B e C correspondente a l-ésima unidade geradora, candidata a ser provida de SAE.

A escolha da unidade geradora mais adequada pode ser feita verificando-se a coluna que possua os maiores $\text{Abs}\{e_{kl}\}$ relacionados aos autovalores com menores amortecimentos.

Na prática, o fato do SAE ser ou não realizável está relacionado com o valor do coeficiente de sensibilidade. Valores elevados de $\text{Abs}\{e_{kl}\}$ implicam em ganhos baixos do SAE, e vice-versa.

3.3 - Ajustes de SAE

Em termos práticos o que se deseja é efetuar deslocamentos dos autovalores de tal maneira que

$$\text{Real}\{\lambda'_k\} \leq -\sigma_{\text{esp}}, \quad (k=1,2,\dots,n'-1) \quad (3.7)$$

Conforme visto anteriormente, a expressão

$$\Delta\lambda_k = -e_{k1}F_1(jw_k) \quad (3.8)$$

permite prever os pequenos deslocamentos de λ_k , para inclusão de SAE na 1-ésima unidade geradora. Reciprocamente, supondo-se definidos os $\Delta\lambda_k$, $k=1,2,\dots,n'-1$, pode-se estabelecer que,

$$F_1(jw_k) = -\frac{\Delta\lambda_k}{e_{k1}} \quad (\text{p/ cada } e_{k1}, \text{ tal que } \text{Abs}\{e_{k1}\} > \epsilon) \quad (3.9)$$

onde ϵ define o módulo de e_{k1} em que fica assegurado que um dado autovalor é passível de deslocamento ao ser inserido o SAE.

A idéia básica do método de ajuste é obter-se uma FT que se ajuste aos pontos da equação (3.9).

Como a inclusão de SAE em uma dada unidade geradora não implica na movimentação de todos os modos eletromecânicos, podem haver casos em que os módulos dos coeficientes de sensibilidade referentes a alguns modos sejam demasiadamente "pequenos", exigindo que $\text{Abs}\{F_1(jw_k)\}$ seja demasiadamente "elevado". Assim, uma vez que os ganhos do SAE, para cada

frequência, na faixa de interesse é normalmente baixo, é conveniente que durante ajustes, os pontos com $\text{Abs}\{e_{kl}\}$ "pequenos" sejam desprezados. Essa simplificação, contudo, não implica em que a FT teórica ajustados aos pontos remanescentes não apresente ordem elevada.

A prática, contudo, tem mostrado que a FT de SAE com a estrutura da equação (3.10) tem sido suficiente [19].

$$F(s) = K_p \frac{sT_r}{1 + sT_r} \cdot \frac{(1 + sT_{N1})(1 + sT_{N2})}{(1 + sT_{D1})(1 + sT_{D2})} \cdot \text{FILT}(s) \quad (3.10)$$

onde $\text{FILT}(s)$ representa os filtros de oscilações torsionais e transdutores para o sinal de entrada do SAE.

No presente trabalho, por simplicidade, assumir-se-á que

$$\text{FILT}(s) = \frac{1}{1 + sT_l} \quad (3.11)$$

Uma vez que T_r e T_l são previamente conhecidos, o ajuste do SAE recai na obtenção de K_p , T_{N1} , T_{D1} , T_{N2} e T_{D2} , de tal maneira que FT se aproxime dos pontos definidos em (3.10). Uma das maneiras de se resolver esse problema seria efetuar ajustes através das técnicas dos mínimos quadrados, assunto que será tratado no item 3.5.

3.4 - Algumas Considerações à Respeito da Especificação de Polos

A menos que todas as unidades geradoras sejam provida de SAE, a especificação de polos é restrita a certos autovalores. Por outro lado, algumas vezes é suficiente mover poucos autovalores. Normalmente, escolhe-se aquela unidade cujo SAE atue mais nos modos menos amortecidos. Em geral, é difícil propor um critério para se definir deslocamentos para todos os autovalores relacionados aos modo eletromecânicos. No entanto, ao ser efetuado o ajuste de curva, dois casos podem ocorrer, como ilustrado no exemplo mostrado na figura 3.4, para o caso com três autovalores.

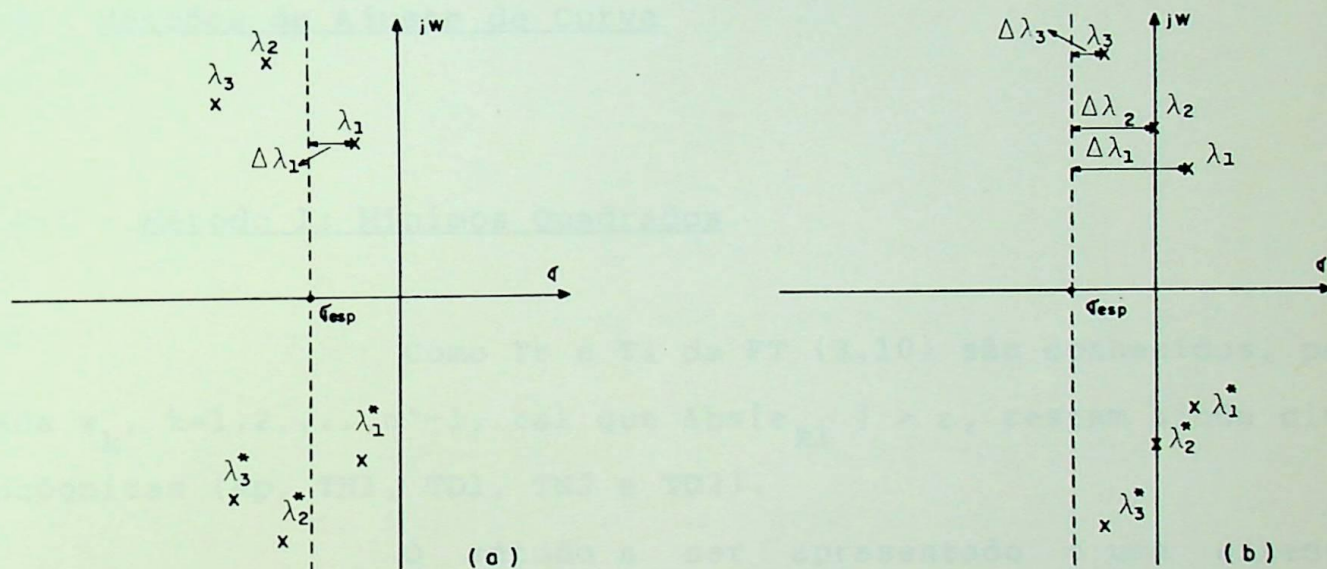


Figura 3.4

Para o caso em questão o objetivo do SAE é mover λ_k ($k=1,2,3$) para a esquerda tal que

$$\text{Real}\{\lambda'_k\} \leq \sigma_{\text{esp}} \quad (3.12)$$

Na situação (a), deseja-se obter um SAE com ganho tal que mova λ_1 de $\Delta\lambda_1$ e restrinja o movimento de λ_2 e λ_3 para a direita o máximo possível, podendo mover-se para a esquerda sem restrições. Na situação (b), deseja-se obter, também um SAE, com o menor ganho possível, para que λ_1 desloque-se no máximo de $\Delta\lambda_1$ e λ_2 e λ_3 desloquem-se, no mínimo de $\Delta\lambda_2$ e $\Delta\lambda_3$, respectivamente.

A solução para esses casos pode ser dada, obtendo-se inicialmente um SAE, ajustando-se a fase apenas, considerando-se os ganhos constantes e iguais à unidade. Após isso, acrescenta-se um ganho tal que (3.12) seja cumprida.

3.5 - Métodos de Ajuste de Curva

3.5.1 - Método 1: Mínimos Quadrados

Como Tr e Tl da FT (3.10) são conhecidos, para cada w_k , $k=1,2,\dots,n'-1$, tal que $Abs\{e_{k1}\} > \epsilon$, restam ainda cinco incógnitas (Kp , $TN1$, $TD1$, $TN2$ e $TD2$).

O método a ser apresentado é uma extensão daquele proposto em [02], para a FT com a estrutura da equação (3.10).

A FT (3.10) pode também ser escrita da seguinte forma:

$$F(s) = \frac{sTr}{1 + sTr} \cdot \frac{\alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}{(s + \beta_1)(s + \beta_2)} \cdot \frac{1}{1 + sTl} \quad (3.13)$$

Os parâmetros α_0 , α_1 , α_2 , β_1 e β_2 podem ser obtidos da seguinte maneira:

a) Atribui-se a β_1 e β_2 os valores entre 0.5 e 30.0 rad/s. Uma vez que a faixa de frequência de atuação do SAE é entre 0.2 a 2.0 Hz, este procedimento visa simplificar o cálculo de α .

b) Para cada valor atribuído a β_1 e β_2 determina-se α_0 , α_1 e α_2 através do método dos mínimos quadrados, de tal modo que

$$H(jw_k) = \alpha_2(jw_k)^2 + \alpha_1(jw_k) + \alpha_0 \quad (3.14)$$

aproxime-se de

$$H'(jw_k) = F(jw_k) \cdot (jw_k + \beta_1)(jw_k + \beta_2) \cdot \frac{1 + jw_k T_r}{jw_k T_r} \cdot (1 + jw_k T_l) \quad (3.15)$$

(p/ cada w_k cujo $Abs\{e_{kl}\} > \epsilon$)

c) Das diversas soluções obtidas em a) e b), seleciona-se aqueles α_0 , α_1 , α_2 , β_1 e β_2 cuja FT mais se aproxime dos pontos desejados (equação 3.9).

A aplicação do método dos mínimos quadrados foi desenvolvido conforme mostrado a seguir.

Uma vez conhecido $H'(jw_k)$, a seguinte equação pode ser escrita, a partir de (3.14) e (3.15).

$$\text{Real}\{H'(jw_k)\} + j\text{Imag}\{H'(w_k)\} = (\alpha_0 - \alpha_2 w_k^2) + jw_k \alpha_1 \quad (3.16)$$

Igualando-se as partes real e imaginária, e formatando-se matricialmente, vem

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -w_k^2 \\ 0 & w_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Real}\{H'(jw_k)\} \\ \text{Imag}\{H'(jw_k)\} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

ou, estruturando-se para todos os w_k , cujos $\text{Abs}\{e_{k1}\} > \varepsilon$,

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -w_1^2 \\ 0 & w_1 & 0 \\ 1 & 0 & -w_2^2 \\ 0 & w_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -w_{n'-1}^2 \\ 0 & w_{n'-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Real}\{H'(jw_1)\} \\ \text{Imag}\{H'(jw_1)\} \\ \text{Real}\{H'(jw_2)\} \\ \text{Imag}\{H'(jw_2)\} \\ \vdots \\ \text{Real}\{H'(jw_{n'-1})\} \\ \text{Imag}\{H'(jw_{n'-1})\} \end{bmatrix}$$

$G[2(n'-1) \times 3] \quad \alpha[3 \times 1] \quad R[2(n'-1) \times 1]$

(3.18)

ou, na forma compacta

$$G \alpha = R \quad (3.19)$$

Sendo (3.18) um sistema linear, α_0 , α_1 e α_2 podem ser obtidas através da aplicação do método dos mínimos quadrados linear [21].

No caso, o número máximo de linhas de G e R é $2x(n'-1)$. Contudo, esse número pode ser menor, uma vez que é conveniente não computar as linhas referentes aos modos, cujos módulos dos coeficientes de sensibilidade sejam desprezíveis.

Caso se queira introduzir ponderações nas equações para obtenção dos mínimos, basta que se multiplique os pares de filas correspondentes às frequências, pelos valores de ponderação. Contudo, é interessante para uma análise inicial utilizar como ponderação valores proporcionais aos módulos dos coeficiente de sensibilidade correspondente a w_k em questão. Por exemplo:

$$POND = 100.Abs\{\bar{b}_{kl}\bar{c}_{kl}\} \quad (3.20)$$

Se $G'G$ não for singular, a solução de (3.19) pode ser dada por $|21|$

$$\alpha = [G'G]^{-1}G'R \quad (3.21)$$

Uma vez que α é um vetor de três elementos, os seus valores não podem ser determinados para número de pontos w_k menor que dois, que corresponde a quatro equações e três incógnitas.

Então, para o caso SEP com número de unidade geradora menor que três, ou se por outros motivos o número de equações for insuficiente, esse processo é inadequado.

Nessas situações, sugere-se um alternativa, conforme mostrados no item 3.5.2.

3.5.2 - Método 2

A resposta em frequência no diagrama polar da FT da equação (3.22), apresenta a característica mostrada na figura 3.5

$$\frac{1 + sD.TD}{1 + sTD} \quad (3.22)$$

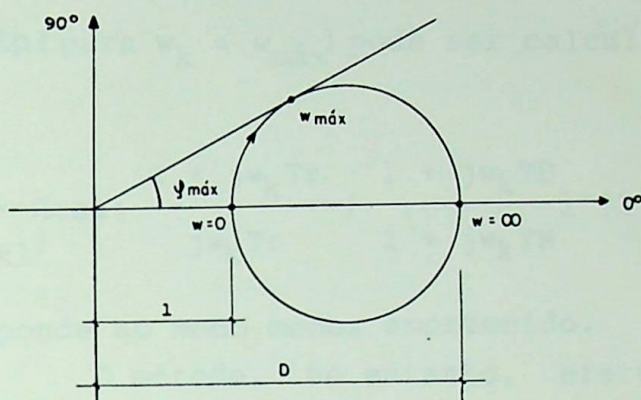


Figura 3.5

Baseado nessa característica, deduz-se que

$$\phi'_{\text{máx}} = \text{tg}^{-1} \frac{D - 1}{2 \sqrt{D}} \quad \text{e} \quad (3.23)$$

$$w_{\text{máx}} = \frac{1}{TD \sqrt{D}} \text{ rad/s} \quad (3.24)$$

Uma vez assumido a simplificação de que $TN1 = TN2 = D.TD = TN$ e $TD1 = TD2 = TD$ as fórmulas acima podem ser aplicadas para ajuste do SAE (3.10).

Através da matriz de sensibilidade define-se qual o ângulo máximo $\phi_{\text{máx}}$ necessário a ser dado pelo SAE, a menos

dos defasamento impostos pelos filtros, na respectiva frequência. Neste caso

$$\phi'_{\text{máx}} = \frac{\phi_{\text{máx}}}{2} \quad (3.30)$$

pelo fato de serem considerados dois blocos iguais a FT (3.27).

Então a partir de (3.23) e (3.24) estima-se TN e TD . O ganho K_p (para $w_k = w_{\text{máx}}$) pode ser calculado a partir de

$$K_p = \frac{\Delta\lambda_k}{\text{Abs}\{e_{k1}\}} \text{Real}\left\{ \frac{1 + jw_k Tr}{jw_k Tr} \left(\frac{1 + jw_k TD}{1 + jw_k TN} \right)^2 (1 + jw_k Tl) \right\} \quad (3.31)$$

onde $\Delta\lambda_k$ corresponde ao modo menos amortecido.

O método, no entanto, efetua ajuste preciso sobre um ponto de $F(jw_k)$ apenas.

3.6 - Algoritmo para Identificar Unidade Geradora a ser Provida de SAE e seu Ajuste

Denominou-se como SINTSAE (SÍNTese de Sinais Adicionais Estabilizadores) o programa de cálculo dos coeficientes de sensibilidade e ajuste de SAE.

Na verdade, este programa visa adicionar mais um recurso de ajuste de SAE a qualquer programa de cálculo de autovalores do SEP, no que se refere a síntese de SAE.

Sendo que o enfoque teórico é rigoroso, a aplicação dessa sistemática é abrangente e pode ser estendido a

ajustes de outros tipos de controladores, como por exemplo os RV's.

O algoritmo neste trabalho foi dividido em três partes.

-A primeira parte, que corresponde a análise modal, visa efetuar a construção da matriz A bem como cálculos dos autovalores e autovetores e a identificação dos modos eletromecânicos. Esta fase é efetuada com a utilização do programa AUTOVAL [20].

-A segunda parte, que corresponde à síntese de SAE, visa a obtenção das matrizes de observabilidade de modo e controlabilidade de modo e dos resíduos ou coeficientes de sensibilidade. A escolha das unidades geradoras a serem providas de SAE, bem como a especificação de polos e os ajustes são efetuados através de processos interativos com o usuário, pelo programa SINTSAE.

-A terceira parte compreende a fase da validação de SAE obtido. Essa parte é realizada com a utilização do programa AUTOVAL e de um programa de simulação no domínio do tempo denominado TRANSDIR [22]. O objetivo da simulação no domínio do tempo é avaliar alguns efeitos não-lineares.

O fluxograma do sistema computacional bem como do algoritmo podem ser visualizados nas figuras 3.6 e 3.7, respectivamente.

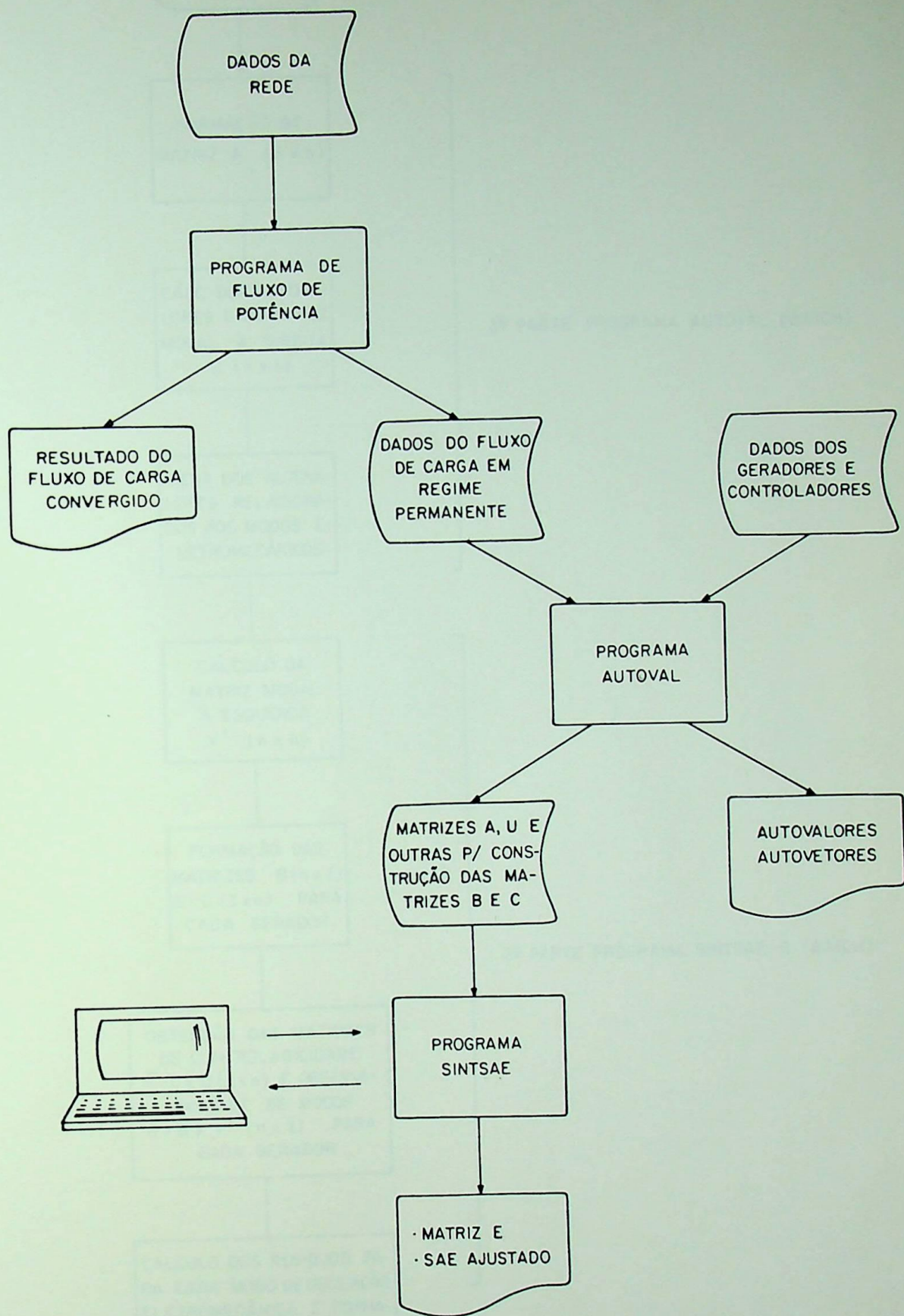


FIGURA 3.6 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA COMPUTACIONAL.

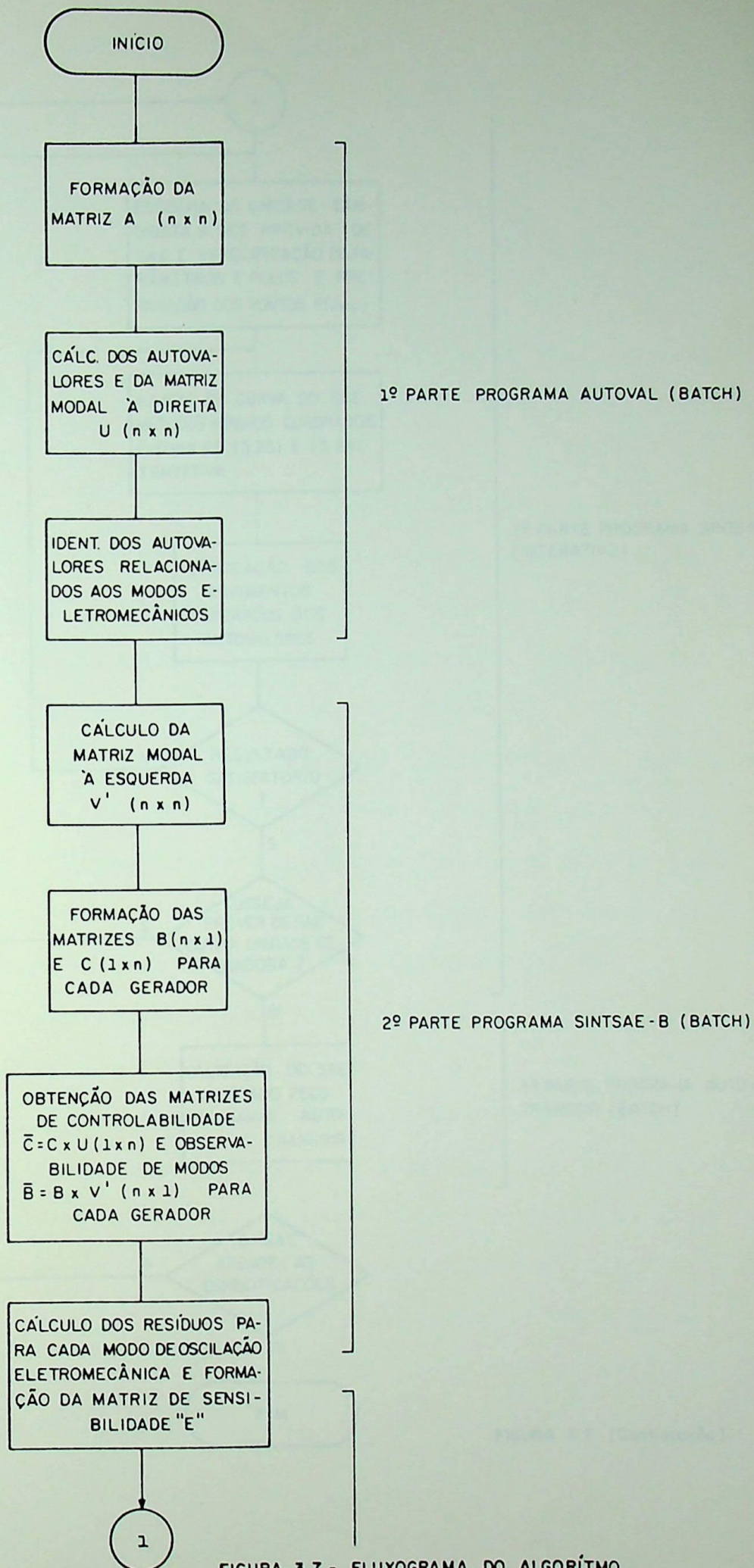
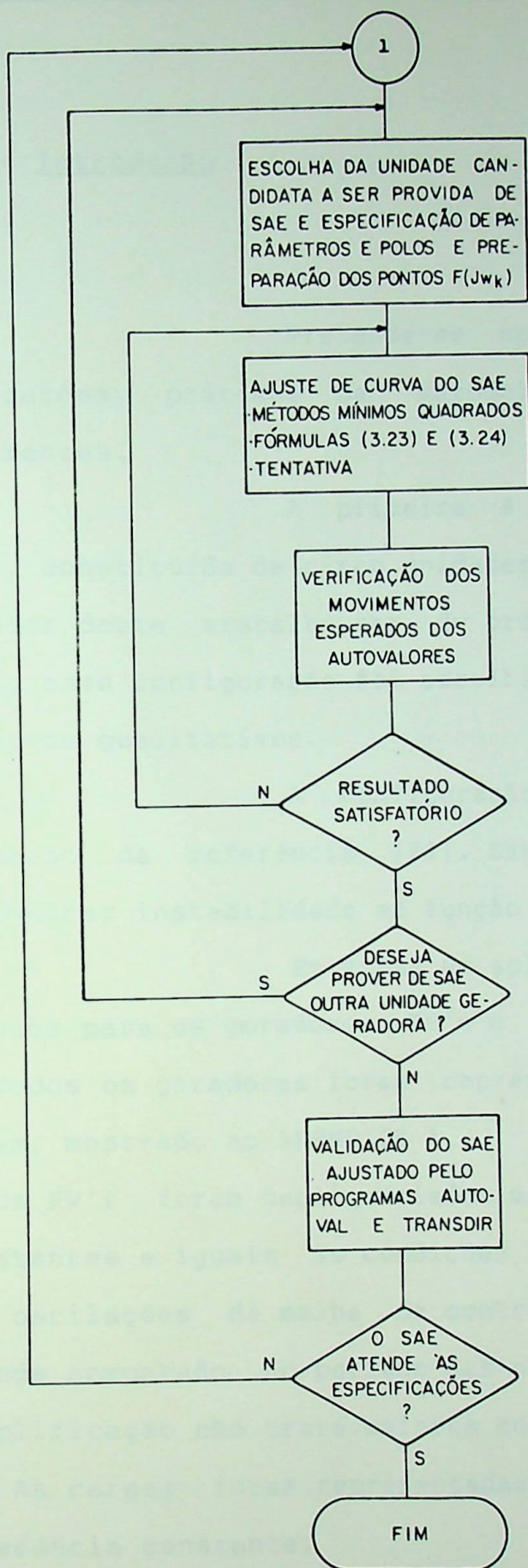


FIGURA 3.7 - FLUXOGRAMA DO ALGORÍTMO



2ª PARTE PROGRAMA SINTSAE-I
(INTERATIVO)

3ª PARTE PROGRAMA AUTOVAL E
TRANSDIR (BATCH)

FIGURA 3.7 (Continuação)

CAPÍTULO 4 : EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 - Introdução

Pretende-se neste Capítulo, apresentar duas aplicações práticas da metodologia em duas configurações diferentes.

A primeira é aquela adotada na referência |01|, constituída de cinco unidades geradoras. Apesar do modelo de gerador deste trabalho ser de ordem menor que o da referência |01|, essa configuração foi escolhida para fins comparativos, sob aspectos qualitativos.

A configuração da segunda aplicação foi extraído da referência |24|. Esse sistema caracteriza-se por apresentar instabilidade em função de carregamento elevado.

Em ambas as aplicações, adotou-se os seguintes modelos para os geradores, RV's e carga do Sistema:

- a) Todos os geradores foram representados pelo modelo de quinta ordem, mostrado no APÊNDICE A.
- b) Os RV's foram negligenciados mantendo-se os torques mecânicos constantes e iguais às condições iniciais. Uma vez que o período das oscilações da malha de controle envolvendo os RV's é muito grande comparado ao período das oscilações eletromecânicas, essa simplificação não trará maiores consequências na análise.
- c) As cargas foram representadas pelo modelo estático do tipo impedância constante.

A matriz de estado do sistema de potência sem a "barra infinita" contém um ou dois autovalores nulos. Um deles aparece como resultado de redundância na variável de estado ângulo do rotor, visto que o estado do sistema é definido através de posições angulares absoluta dos rotores dos geradores ao invés de seus valores relativos [17].

O outro autovalor nulo aparece se todas as potências mecânicas são consideradas independentes da velocidade do rotor.

A redundância das variáveis de estado posição angular do rotor pode ser eliminada escolhendo-se posição angular relativa como novas variáveis.

O outro autovalor nulo desaparece se um termo de amortecimento for incluído na equação de movimento do rotor, ou for representado RV, ou for representado SAE sensível a velocidade do rotor pelo menos em um gerador do sistema.

4.2 - CONFIGURAÇÃO 1

O diagrama unifilar pode ser visualizado na figura 4.1. Os parâmetros das linha de transmissão, transformadores, cargas das barras e os dados do fluxo de potência, cujo ponto de operação foi adotado, estão listados na tabela 4.1. Os parâmetros dos geradores e Sistema de Excitação estão listados na tabela 4.2. Os RAT's foram representados conforme o modelo da figura 4.2. Na configuração base não foram representados SAE's em nenhum gerador.

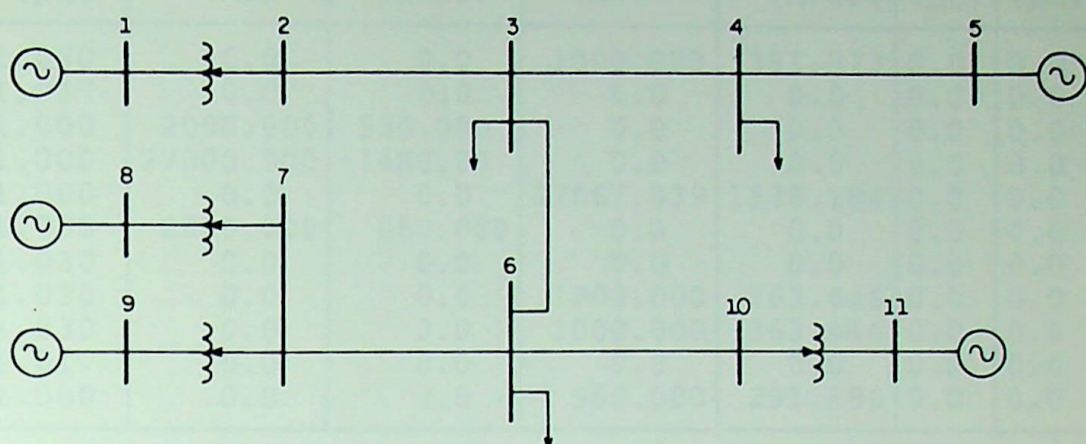


Figura 4.1 - Diagrama unifilar da Configuração 1

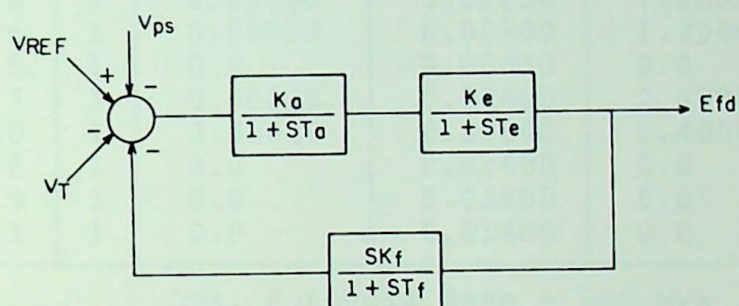


Figura 4.2 - Modelo do Sistema de Excitação

DADOS DE BARRA

Bar.	Tensão	Carga		Geração		Sh-G	Sh-B
n.	(pu)	(Mw)	(Mvar)	(Mw)	(Mvar)	(pu)	(pu)
1	1.030	0.0	0.0	1000.000	381.873	0.0	0.0
2	1.027	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.000	2000.000	530.000	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1.000	27000.000	-1480.00	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.000	0.0	0.0	27067.039	1838.184	0.0	0.0
6	1.000	2000.000	850.000	0.0	0.0	0.0	0.0
7	1.030	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1.030	0.0	0.0	1000.000	363.446	0.0	0.0
9	1.030	0.0	0.0	1000.000	363.446	0.0	0.0
10	1.017	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	1.000	0.0	0.0	950.000	291.896	0.0	0.0

DADOS DE LINHAS E TRANSFORMADORES

Barra a barra		n.	Resist.	Reat.	Suscept.	TAP
no.	no.	ct	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)
2	1	1	0.0	0.01400	0.0	1.040
2	3	1	0.00060	0.01100	0.36000	0.0
3	4	1	0.00060	0.01800	7.20000	0.0
3	6	1	0.00010	0.00300	1.20000	0.0
4	5	1	0.0	0.00050	0.0	0.0
6	7	1	0.00020	0.00600	2.40000	0.0
6	10	1	0.00020	0.00600	2.40000	0.0
7	8	1	0.0	0.01400	0.0	1.040
7	9	1	0.0	0.01400	0.0	1.040
10	11	1	0.0	0.01400	0.0	1.050

Obs. Potência Base = 100 Mva

Tabela 4.1 - Dados da rede elétrica da configuração 1

DADOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Bar. no.	Mva (base)	H (s)	x'd (pu)	xd (pu)	xq (pu)	x''d (pu)	x''q (pu)	T'do (s)	T''do (s)	T''go (s)
11	1000.	5.00	0.28	1.40	0.80	0.22	0.22	10.0	0.02	0.02
09	1100.	4.00	0.33	1.70	1.65	0.26	0.26	6.0	0.03	0.03
08	1100.	4.00	0.33	1.70	1.65	0.26	0.26	6.0	0.03	0.03
01	1100.	4.00	0.33	1.70	1.65	0.26	0.26	6.0	0.03	0.03
05	30000.	4.00	0.33	1.70	1.65	0.26	0.26	6.0	0.03	0.03

DADOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Bar. no.	Ka (pu)	Ta (s)	Kf (pu)	Tf (s)	Ke (pu)	Te (s)
11	300.0	0.15	0.004	0.20	1.00	0.01
09	100.0	0.10	0.070	0.50	1.00	0.64
08	100.0	0.10	0.070	0.50	1.00	0.64
01	100.0	0.10	0.070	0.50	1.00	0.64
05	100.0	0.10	0.070	0.50	1.00	0.64

Tabela 4.2 - Dados dos geradores e Sistemas de Excitação

A unidade geradora da barra 5 foi considerada como unidade geradora-equivalente.

As matrizes A, B e C correspondentes ao caso em análise estão listadas no APÊNDICE C1.

Os autovalores do sistema, para condição de operação adotada, estão listados na tabela 4.3.

Através da inequação (3.2) identificou-se os autovalores de número 21-22, 23-24, 25-26 e 27-28 como aqueles relacionados aos modos eletromecânicos. Esse aspecto pode ser também constatado observando-se a matriz dos "fatores de participação" (FP), cuja listagem para o presente caso, encontra-se no APÊNDICE C2.

Por conveniência, os autovalores acima referidos serão redefinidos como λ_1 , λ_2 , λ_3 e λ_4 , respectivamente, considerando-se apenas aqueles com a parte imaginária positiva.

Pelas características dos autovetores (figura 4.3 e tabela 4.4) pode-se dizer que:

- a) O λ_1 refere-se a oscilação entre a unidade geradora da barra 11 em relação as das barras 1, 9 e 8;
- b) O λ_2 refere-se a oscilação entre a unidade geradora da barra 1 em relação as das barras 9 e 8;
- c) O λ_3 refere-se a oscilação entre as unidades geradoras das barras 8 e 9; e
- d) O λ_4 refere-se a oscilação entre as unidades geradoras das barras 11, 1, 9 e 8 contra a da barra 5.

Aqui, o λ_4 caracteriza uma oscilação inter-área, sendo o de pior amortecimento.

Os autovalores números 35 e 36 referem-se respectivamente à redundância na variável de estado ângulo dos rotores dos geradores e ao fato das potências mecânicas serem independentes da velocidade dos rotores. Para o caso, nota-se que as partes imaginárias não são desprezíveis. Tal fato decorre desse erro ser muito sensível à imprecisão da convergência do fluxo de carga utilizado como condição inicial.

AUTOVALORES			
NO.	PARTE REAL	PARTE IMAGINÁRIA	DAMP
1	-145.0148		1.00
2	-119.0658		1.00
3	-117.5861		1.00
4	-77.68202		1.00
5	-56.95636	44.44888	.788
6	-56.95636	-44.44888	.788
7	-51.53607		1.00
8	-39.70853	4.878570	.993
9	-39.70853	-4.878570	.993
10	-35.53643		1.00
11	-36.97997		1.00
12	-38.21211		1.00
13	-6.368785	13.84549	.418
14	-6.368785	-13.84549	.418
15	-6.523254	14.22934	.417
16	-6.523254	-14.22934	.417
17	-6.593206	14.34150	.418
18	-6.593206	-14.34150	.418
19	-6.634999	14.39707	.419
20	-6.634999	-14.39707	.419
21	-.2193683	7.617810	.288D-01
22	-.2193683	-7.617810	.288D-01
23	-.3040079	7.896917	.385D-01
24	-.3040079	-7.896917	.385D-01
25	-.4190723	8.831072	.474D-01
26	-.4190723	-8.831072	.474D-01
27	-.1580053D-01	5.122763	.308D-02
28	-.1580053D-01	-5.122763	.308D-02
29	-1.420816	3.106221	.416
30	-1.420816	-3.106221	.416
31	-.7652733	1.405390	.478
32	-.7652733	-1.405390	.478
33	-.3949275	1.041797	.354
34	-.3949275	-1.041797	.354
35	-.7310606D-05	.3562325D-02	.205D-02
36	-.7310606D-05	-.3562325D-02	.205D-02
37	-.3426287	.8284136	.382
38	-.3426287	-.8284136	.382
39	-.3063350	.6424820	.430
40	-.3063350	-.6424820	.430

Tabela 4.3 - Autovalores do sistema da configuração 1,
sem SAE

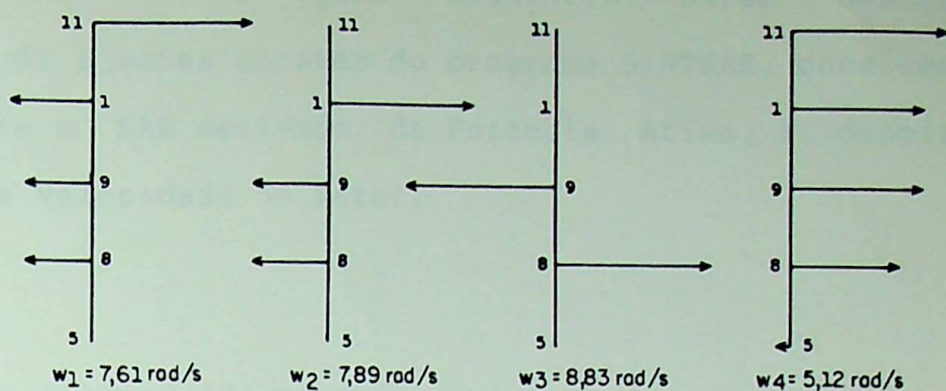


Figura 4.3 - Componentes dos autovetores correspondentes às variáveis de estado W's

AUTOVALOR	BARRA				
	11	01	09	08	05
-0.21 +j7.61	1.00/0.0°	0.49/180.0°	0.41/-176.0°	0.41/-176.0°	0.00/0.0°
-0.30 +j7.89	0.09/3.5°	1.00/0.0°	0.47/180.0°	0.47/180.0°	0.00/0.0°
-0.41 +j8.83	0.00/0.0°	0.00/0.0°	1.00/180.0°	1.00/0.0°	0.00/0.0°
-0.015+j5.12	1.00/0.0°	0.72/-8.8°	0.85/-8.3°	0.85/-8.3°	0.17/-176.0°

Tabela 4.4 - Componentes normalizados dos autovetores correspondentes às variáveis de estado W's

Também, pelas características dos autovetores, pode-se definir qual a unidade geradora é a que mais influência tem na formação do modo de oscilação |07|.

Baseado nesse princípio, vê-se que a unidade geradora mais adequada é aquela da barra 11, uma vez que o módulo do componente correspondente situa-se no anti-nó para o modo com pior amortecimento |03| (APÊNDICE B).

Contudo, é interessante saber qual o nível de influência que o SAE na unidade geradora escolhida poderia ocasionar sobre os modos eletromecânicos |03|. Isso pode ser conseguido através do coeficiente de sensibilidade.

Vale comentar que somente como conhecimento do autovetor é difícil definir ajustes dos SAE's.

Nos itens seguintes, serão mostrados os resultados de ajustes através do programa SINTSAE, considerando-se inicialmente o SAE derivado da Potência Ativa, e depois o SAE derivado da Velocidade do Rotor.

4.2.1 - SAE derivado da Potência Ativa

Para efeito de comparação, estão listadas nas tabelas 4.5.a e b as matrizes de sensibilidade calculadas segundo as formulações ABE & DOI e ARCIDIACONO, respectivamente. Os coeficientes dessas duas formulações são aproximadamente iguais uma vez que ζ 's dos autovalores em questão são pequenos.

Antes de prosseguir nos ajustes, é conveniente comparar os resultados obtidos até aqui, com os apresentados na Referência [01].

Por conveniência, reproduziu-se neste trabalho a característica dos autovetores na figura 4.4 e os coeficientes de sensibilidade, na tabela 4.6, a partir dos da Referência [01].

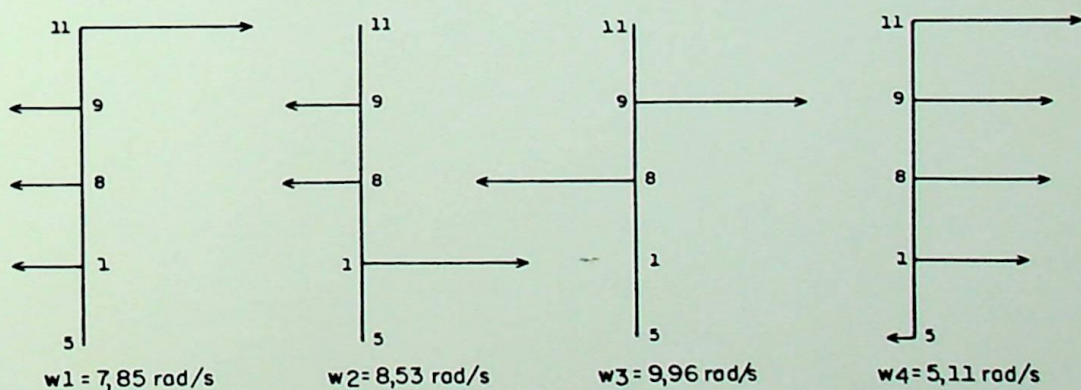


Figura 4.4 - Componentes dos autovetores normalizados correspondentes às variáveis de estado W 's da referência [01]

MATRIZ DE SENSIBILIDADE (SAE SENSIVEL A P)
SAE NA BARRA NUMERO - 11

NO.	AUTOVALOR		.5*(p-jq/w)			FASE
	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	
1	-0.2194	7.6178	21.2981	-13.6409	25.2920	-32.6385
2	-0.3040	7.8969	0.1744	-0.1465	0.2278	-40.0411
3	-0.4191	8.8311	0.0000	-0.0000	0.0000	-39.0287
4	-0.0158	5.1228	15.5830	-1.9298	15.7021	-7.0595

SAE NA BARRA NUMERO - 9

NO.	AUTOVALOR		.5*(p-jq/w)			FASE
	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	
1	-0.2194	7.6178	0.6266	-0.6766	0.9221	-47.1987
2	-0.3040	7.8969	0.9916	-1.1619	1.5276	-49.5209
3	-0.4191	8.8311	3.5504	-4.7988	5.9694	-53.5041
4	-0.0158	5.1228	1.4026	-0.8349	1.6323	-30.7640

SAE NA BARRA NUMERO - 8

NO.	AUTOVALOR		.5*(p-jq/w)			FASE
	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	
1	-0.2194	7.6178	0.6266	-0.6766	0.9221	-47.1987
2	-0.3040	7.8969	0.9916	-1.1619	1.5276	-49.5209
3	-0.4191	8.8311	3.5504	-4.7988	5.9694	-53.5041
4	-0.0158	5.1228	1.4026	-0.8349	1.6323	-30.7640

SAE NA BARRA NUMERO - 1

NO.	AUTOVALOR		.5*(p-jq/w)			FASE
	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	
1	-0.2194	7.6178	0.8602	-0.9921	1.3131	-49.0715
2	-0.3040	7.8969	4.4197	-4.9726	6.6528	-48.3694
3	-0.4191	8.8311	0.0000	-0.0000	0.0000	-61.1425
4	-0.0158	5.1228	0.9967	-0.6230	1.1754	-32.0089

SAE NA BARRA NUMERO - 5

NO.	AUTOVALOR		.5*(p-jq/w)			FASE
	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	
1	-0.2194	7.6178	0.3662	0.0059	0.3662	0.9243
2	-0.3040	7.8969	0.0588	-0.0772	0.0971	-52.7285
3	-0.4191	8.8311	-0.0000	0.0000	0.0000	153.1649
4	-0.0158	5.1228	43.4644	-22.9734	49.1623	-27.8589

Tabela 4.5.a - Matriz de sensibilidade da configuração 1, conforme a formulação ABE & DOI

MATRIZ DE SENSIBILIDADE (SAE SENSIVEL A P)						
SAE NA BARRA NUMERO - 11						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	21.2981	-13.0276	24.9665	-31.4531
2	-0.3040	7.8969	0.1744	-0.1398	0.2235	-38.7236
3	-0.4191	8.8311	0.0000	-0.0000	0.0000	-37.3494
4	-0.0158	5.1228	15.5830	-1.8817	15.6962	-6.8854
SAE NA BARRA NUMERO - 9						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	0.6266	-0.6586	0.9090	-46.4260
2	-0.3040	7.8969	0.9916	-1.1237	1.4987	-48.5735
3	-0.4191	8.8311	3.5504	-4.6303	5.8348	-52.5201
4	-0.0158	5.1228	1.4026	-0.8306	1.6301	-30.6333
SAE NA BARRA NUMERO - 8						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	0.6266	-0.6585	0.9090	-46.4260
2	-0.3040	7.8969	0.9916	-1.1237	1.4987	-48.5735
3	-0.4191	8.8311	3.5504	-4.6303	5.8348	-52.5201
4	-0.0158	5.1228	1.4026	-0.8306	1.6301	-30.6333
SAE NA BARRA NUMERO - 1						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	0.8602	-0.9673	1.2945	-48.3532
2	-0.3040	7.8969	4.4197	-4.8025	6.5267	-47.3770
3	-0.4191	8.8311	0.0000	-0.0000	0.0000	-60.4963
4	-0.0158	5.1228	0.9967	-0.6199	1.1738	-31.8817
SAE NA BARRA NUMERO - 5						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	0.3662	0.0165	0.3666	2.5726
2	-0.3040	7.8969	0.0588	-0.0750	0.0953	-51.9044
3	-0.4191	8.8311	-0.0000	0.0000	0.0000	155.3708
4	-0.0158	5.1228	43.4644	-22.8393	49.0998	-27.7206

Tabela 4.5.b - Matriz de sensibilidade da configuração 1 conforme a formulação ARCIACONO

Apesar dos autovalores calculados pelo AUTOVAL e da Referência |01| serem diferentes, nota-se que os autovetores são semelhantes. Esta constatação, no entanto, torna-se importante, a medida que é possível efetuar análise comparativa das fases do coeficiente de sensibilidade, uma vez que estes são calculados a partir dos autovetores.

n.	AUTOVALORES		COEF. $0.5*(p - jq/w)$	
	AUTOVAL	REF. 01	SINTSAE	REF. 01
1	$-0.72+j7.62$	$-0.48+j7.85$	$21.30-j13.64$	$21.25-j12.86$
2	$-0.30+j7.90$	$-0.47+j8.54$	$0.17-j 0.15$	$0.05-j 0.00$
3	$-0.42+j9.83$	$-0.78+j9.96$	$0.00+j 0.00$	$0.00+j 0.00$
4	$-0.02+j5.12$	$+0.05+j5.11$	$15.88-j 1.93$	$14.72-j 2.45$

Tabela 4.6 - Comparação entre os coeficientes de sensibilidade obtidos pelo SINTSAE e os da Referência |01| para inclusão de SAE na unidade geradora da barra 11.

Para o presente caso, nota-se pouca diferença entre os coeficientes de sensibilidade.

Da tabela 4.5.a e b pode-se notar que a unidade geradora da barra 11 é a que melhor responde para movimentação dos autovalores, por duas razões:

1. Os módulos dos coeficiente de sensibilidade são os maiores, comparados àqueles referentes às demais unidades geradoras. Isto se verifica principalmente nos dois modos menos amortecidos.
2. A compensação necessária de fase pelo SAE é menor, comparada àqueles referentes às demais unidades.

Utilizando-se os coeficientes de sensibilidade obtido segundo a formulação ARCIDIACONO, e assumindo-se que

$$T_r = 5.00 \text{ s} \quad (4.1)$$

$$T_l = 0.03 \text{ s} \quad (4.2)$$

obteve-se uma FT ajustada para $|F(j\omega_k)| = 1.0 \text{ pu/pu}$ e fases iguais a dos coeficientes de sensibilidade, com sinal trocado. Após, a fim de que os autovalores fossem deslocados à esquerda tal que

$$\text{Real}\{\lambda_k\} \leq -0.3 \text{ l/s},$$

calculou-se o ganho e obteve-se a FT (4.4). Essa sequência está ilustrada na listagem da figura 4.5.

Efetuando-se a validação da FT (4.4) através do AUTOVAL, incluindo-a na unidade geradora da barra 11, obteve-se os autovalores listados na tabela 4.7.

A tabela 4.8 ilustra a comparação entre os movimentos esperados e os verificados, em que mostra um erro de 5.5 % na parte real do autovalor de menor amortecimento.

SINTETIZACAO DE SAE NA BARRA NUMERO - 11
 ESPECIFIQUE TR E TL
 5.00000000 .300000012E-01
 FUNCAO AJUSTADO PARA $|F(W)|=1.0$

$$F(S) = (4.896) \frac{(5.00)S \quad 1.0 + (0.251)S \quad 1.0 + (0.251)S \quad 1.0}{1.0 + (5.00)S \quad 1.0 + (2.000)S \quad 1.0 + (0.033)S \quad 1.0 + (0.030)S}$$

(4.3)

FREQ.	IDEAL	AJUSTADO		PONDERACAO
	FASE	GANHO	FASE	
7.62	31.45311	1.40772	12.86525	2496.65430
7.90	38.72356	1.43186	13.40194	22.35147
8.83	37.34933	1.51436	14.68243	0.00000
5.12	6.88540	1.22684	3.57291	1569.62354

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA PROSSEGUIR
- 3 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 4 -PARA ENCERRAR

2

ESPECIFIQUE O VALOR CUJA PARTE REAL DOS AUTOVALORES
 DEVEM SITUAR-SE AA ESQUERDA OU NO MAXIMO IGUAIS A
 ESTE VALOR

-.300000012

FUNCAO DE TRANSFERENCIA DO SAE

$$F(S) = (0.072) \frac{(5.00)S \quad 1.0 + (0.251)S \quad 1.0 + (0.251)S \quad 1.0}{1.0 + (5.00)S \quad 1.0 + (2.000)S \quad 1.0 + (0.033)S \quad 1.0 + (0.030)S}$$

(4.4)

***** MOVIMENTO ESPERADOS DOS AUTOVALORES *****

-0.2194+J	7.6178-->	-0.7118+J	7.7834
-0.3040+J	7.8969-->	-0.3083+J	7.8989
-0.4191+J	8.8311-->	-0.4191+J	8.8311
-0.0158+J	5.1228-->	-0.3000+J	5.1392

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA ALTERAR COEF. SENS. SOMENTE PARA AJUSTE
- 3 -PARA VERIFICAR SAE FORNECIDO PELO USUARIO
- 4 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 5 -PARA ENCERRAR O CASO

5

Figura 4.5 - Síntese de SAE na unidade geradora da barra 11

AUTOVALORES			
NO.	PARTE REAL	PARTE IMAGINÁRIA	DAMP
1	-145.0148		1.00
2	-119.0423		1.00
3	-117.5843		1.00
4	-57.72559	46.93316	.776
5	-57.72559	-46.93316	.776
6	-77.91379		1.00
7	-64.43816		1.00
8	-40.23594	4.366882	.994
9	-40.23594	-4.366882	.994
10	-23.26639	14.09703	.855
11	-23.26639	-14.09703	.855
12	-35.60872		1.00
13	-36.97976		1.00
14	-38.21211		1.00
15	-6.366927	13.84547	.418
16	-6.366927	-13.84547	.418
17	-6.524997	14.23097	.417
18	-6.524997	-14.23097	.417
19	-6.593225	14.34151	.418
20	-6.593225	-14.34151	.418
21	-6.634999	14.39707	.419
22	-6.634999	-14.39707	.419
23	-.7571484	7.703959	.978D-01
24	-.7571484	-7.703959	.978D-01
25	-.3050952	7.894217	.386D-01
26	-.3050952	-7.894217	.386D-01
27	-.4190723	8.831072	.474D-01
28	-.4190723	-8.831072	.474D-01
29	-.2825628	5.183657	.544D-01
30	-.2825628	-5.183657	.544D-01
31	-1.269462	3.120970	.377
32	-1.269462	-3.120970	.377
33	-.7555416	1.372271	.482
34	-.7555416	-1.372271	.482
35	-.3987366	1.040898	.358
36	-.3987366	-1.040898	.358
37	-.3426161	.8284108	.382
38	-.3426161	-.8284108	.382
39	-.5484697		1.00
40	-.1474849D-05	.3562208D-02	.414D-03
41	-.1474849D-05	-.3562208D-02	.414D-03
42	-.1846917		1.00
43	-.3063350	.6424820	.430
44	-.3063350	-.6424820	.430

Tabela 4.7 - Autovalores do sistema da configuração 1, com SAE (04) na unidade geradora da barra 11

n.	SEM SAE	MOV. ESPERADO	MOV. VERIFICADO
01	-0.2194+j7.6178	-0.7118+j7.7834	-0.7571+j7.7041
02	-0.3040+j7.8969	-0.3083+j7.8989	-0.3051+j7.8942
03	-0.4191+j8.8311	-0.4191+j8.8311	-0.4191+j8.8311
04	-0.0158+j5.1228	-0.3000+j5.1392	-0.2826+j5.1837

Tabela 4.8 - Movimentação verificada dos autovalores ao ser inserido SAE na unidade geradora da barra 11

Em |01|, foi obtida uma FT para proporcionar um deslocamento de $\Delta\lambda_4 = -0.3$ l/s, do modo menos amortecido. A característica dessa FT transcrita aqui como expressão (4.5), pode ser visualizada na figura 4.6, juntamente com a FT (4.4), obtida através do programa SINTSAE. Nota-se que as características das duas FT's são semelhantes na faixa de frequência entre 5.12 a 8.83 rad/s.

$$F(s) = 0.0183 \frac{s5.0}{1 + s5.0} \left(\frac{1 + s0.083}{1 + s0.033} \right)^2 \frac{1}{1 + s0.03} \quad (4.5)$$

Deve-se observar no diagrama de Bode da figura 4.6 que o único ponto que se ajusta a FT (4.4) é aquele referente a $w_4 = 5.12$ rad/s. Para aquele referente a $w_1 = 7.62$ rad/s, apesar de haver um erro de ajuste de fase de aproximadamente 18°, a FT (4.4) ocasiona um deslocamento de $\Delta\sigma_1 = -0.46$ l/s além do necessário. Isto assim ocorre porque o ajuste do ganho da FT é feito considerando-se o maior ganho dentre aqueles correspondentes a cada frequência de oscilação.

De qualquer maneira, o mais importante é que os deslocamentos foram tais que

$$\text{Real}\{\lambda'_k\} \leq -0.3 \text{ l/s} \quad (k=1,2,3,4) \quad (4.6)$$

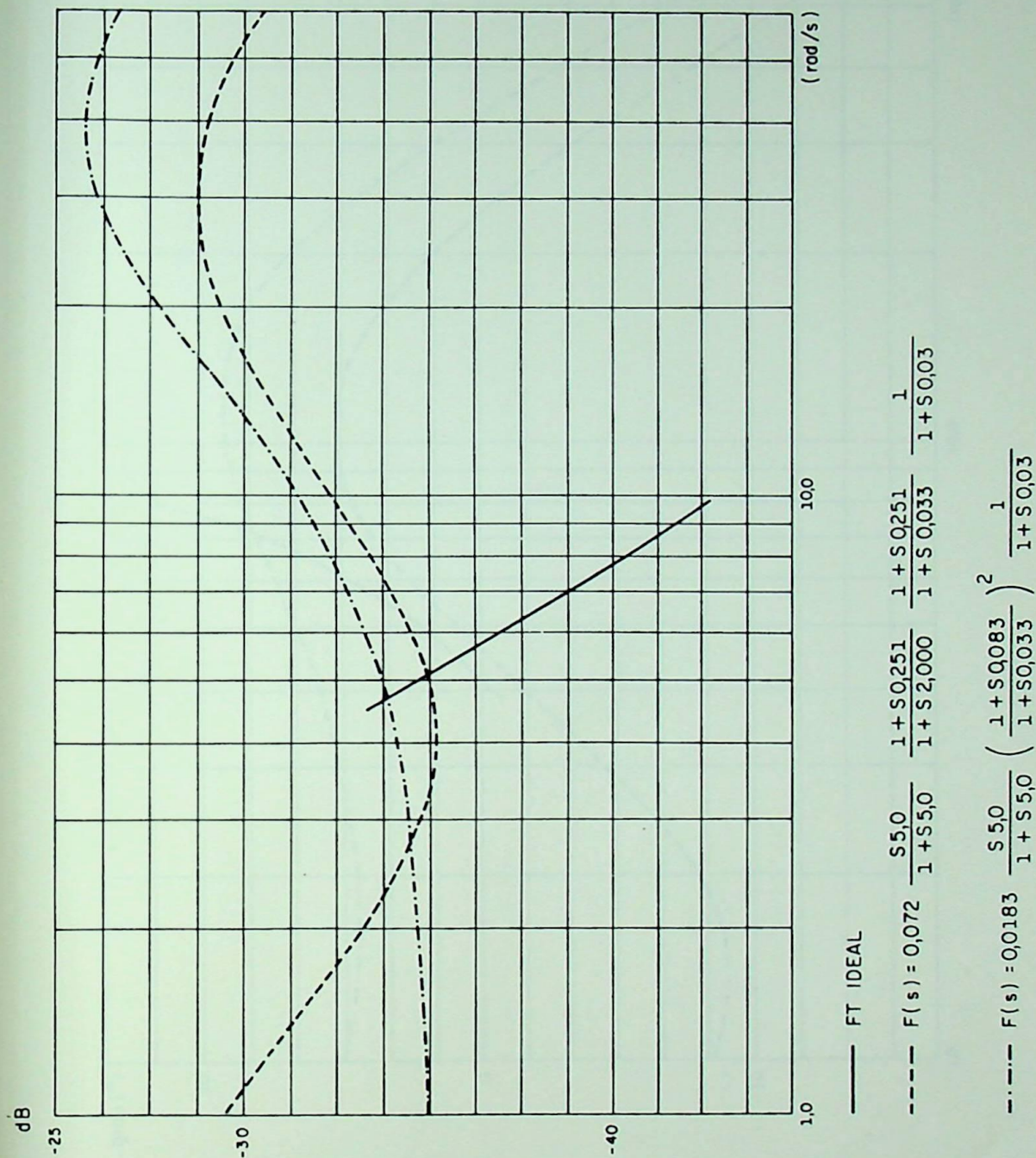


Figura 4.6.a.- Diagrama de Bode das FT's das equações (4.4) e (4.5) - GANHO

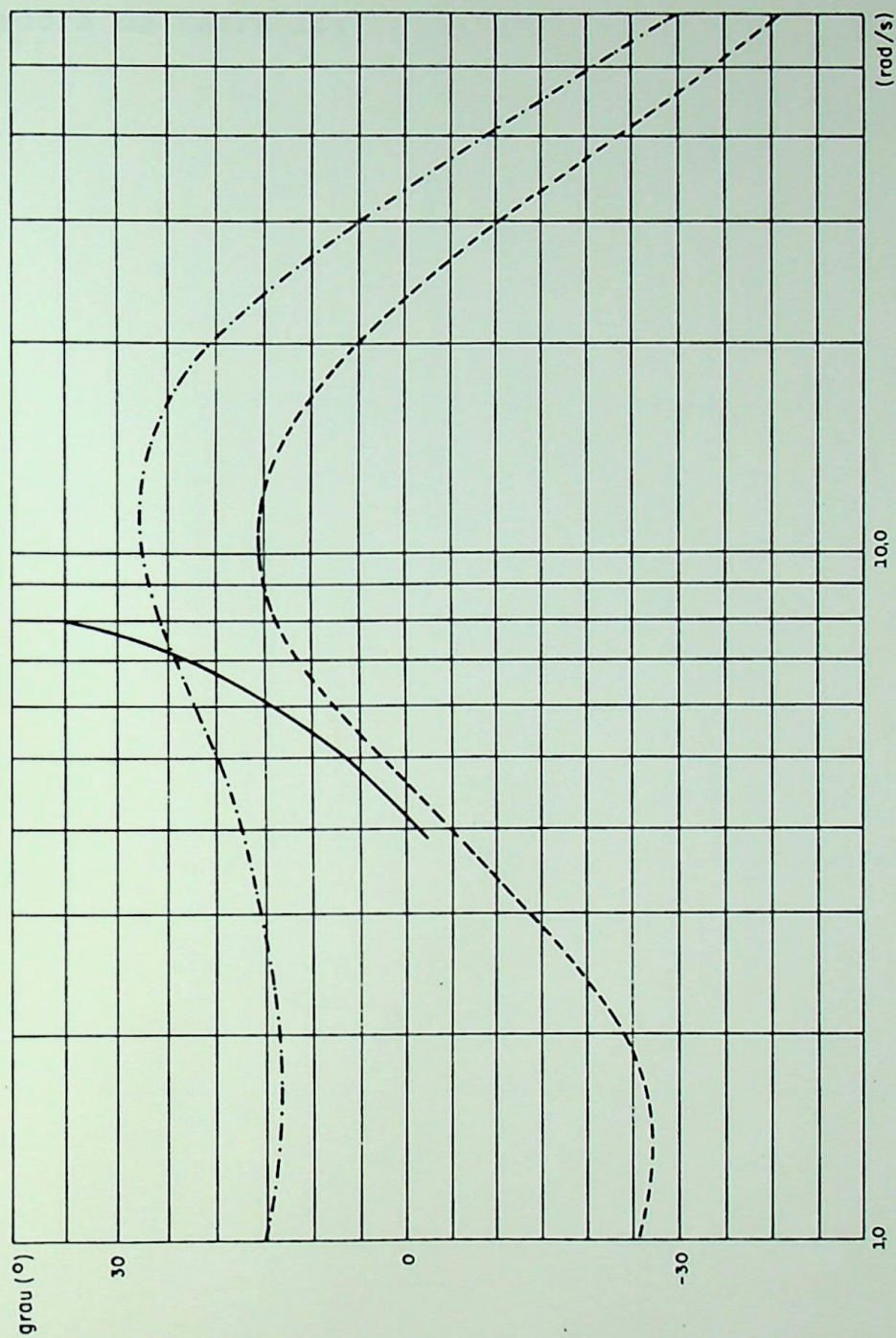


Figura 4.6.b.- Diagrama de Bode das FT's das equações (4.4) 4 (4.5) - FASE

A validação no domínio do tempo comprova também o efeito do SAE (4.4), conforme pode-se constatar nas figuras 7a, b, a' e b'. A perturbação aplicada neste caso, foi um degrau de +5.0 % na Referência de Tensão do RAT da unidade geradora da barra 11.

C V TENSÃO
VT-----11

W CASO BASE W CONF. 01 W SEM SAE W DEGRAU NA REF. DO RAT DO GERADOR DA BARRA 11

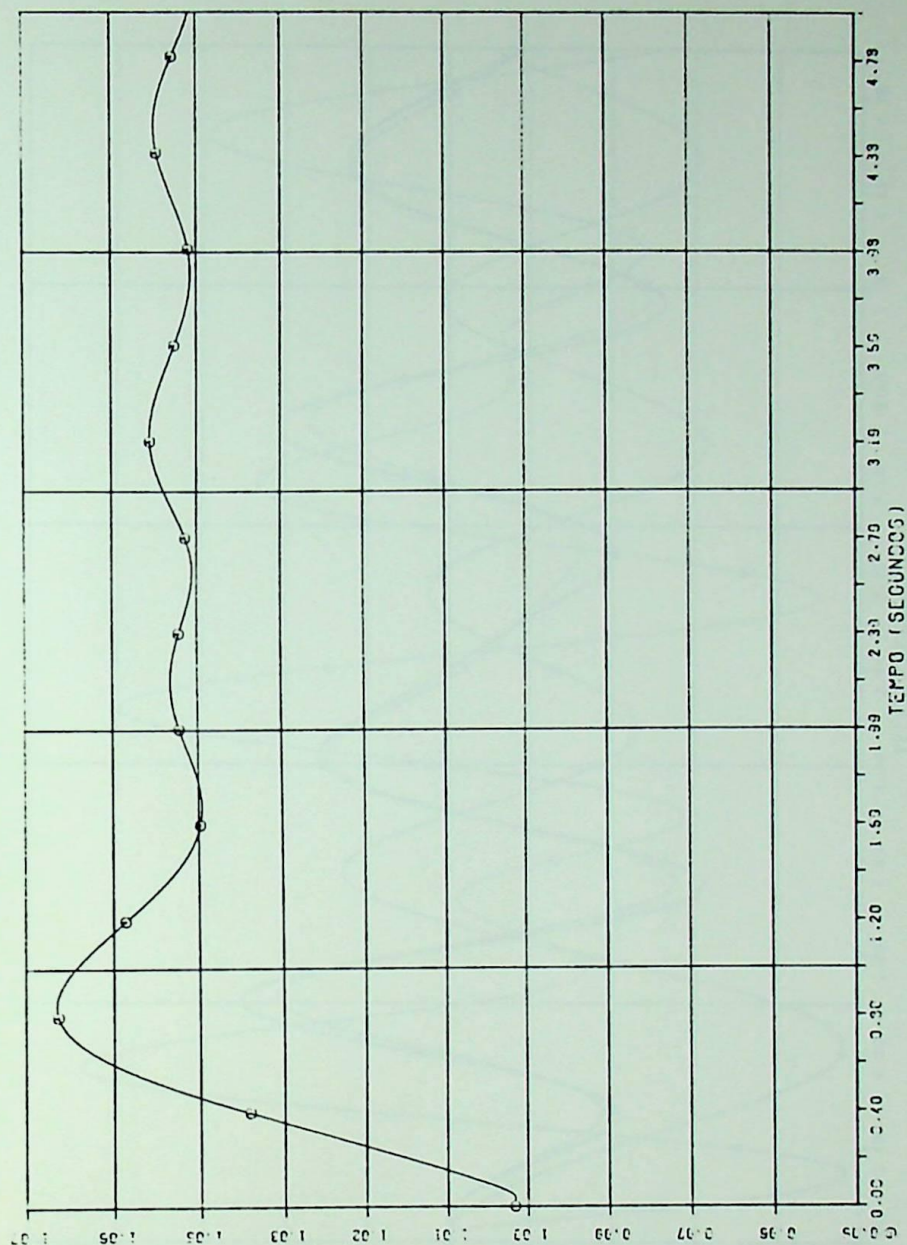


Figura 4.7.a - Tensão terminal de gerador (Caso base, sem SAE)

—CASO BASE—CONF.01—SCM SAE— DEGRAU NA REF. DO RAT DO GERADOR DA BARRA 11

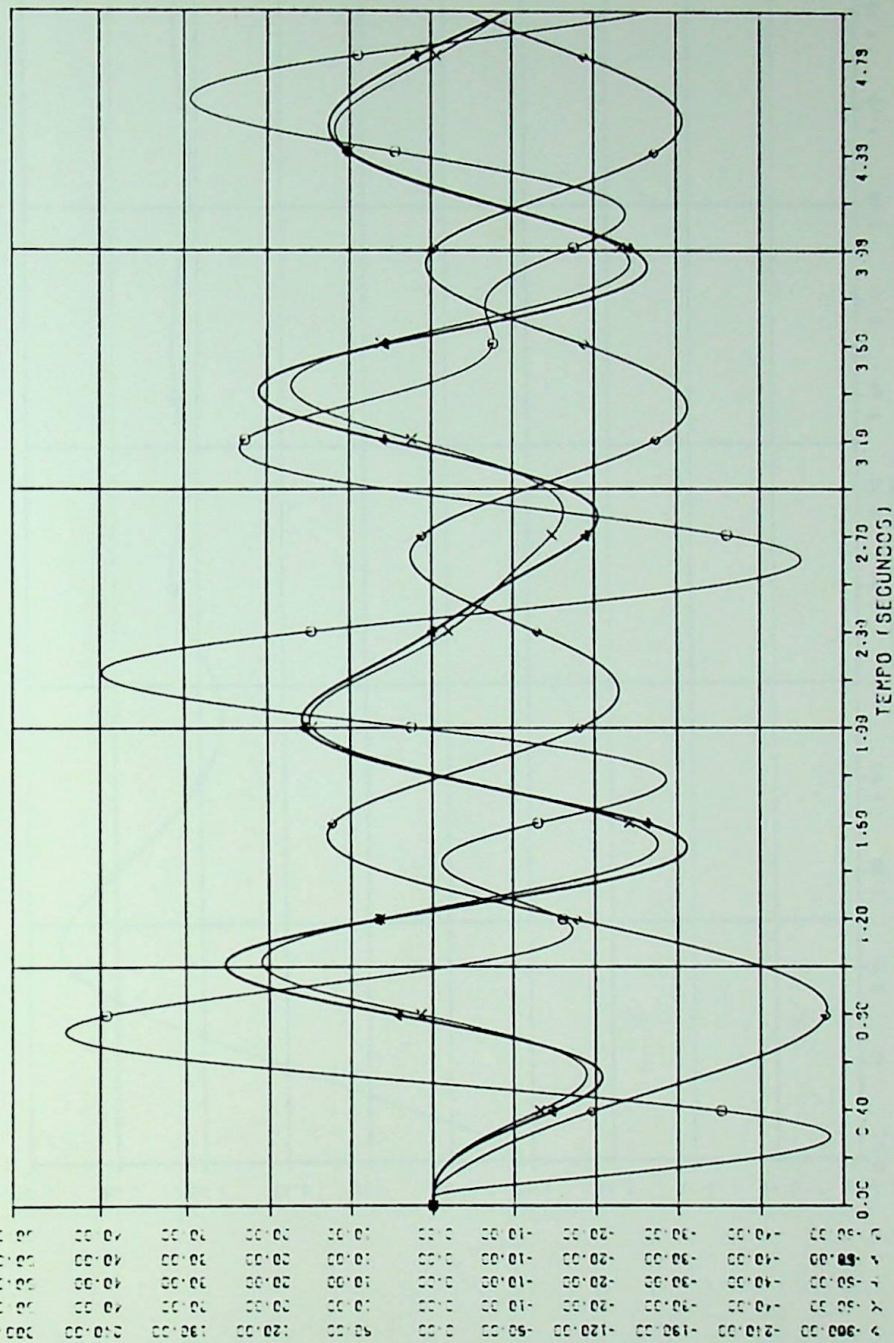


Figura 4.7.b - Potência acelerante (Pm - P) (Caso base, sem SAE)

Q Y TENSÃO
VT-----11

*CASO 01*CONF.01*COM SAE * DEGRAU NA REF. DO RAT DO GERADOR DA BARRA 1 1

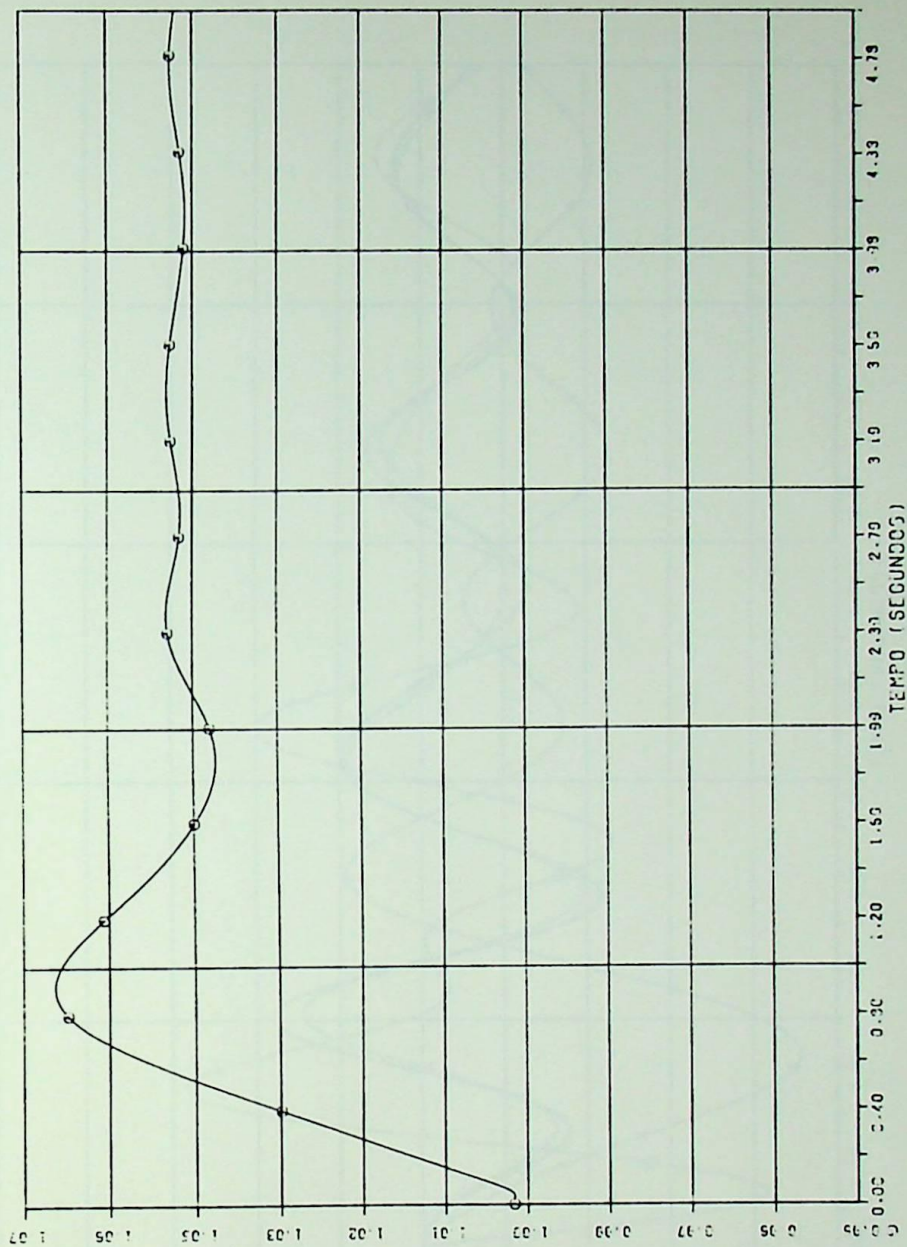


Figura 4.7.a' - Tensão terminal de gerador (Caso 01, com SAE)

1. X P. ACCL. 2. X P. ACCL. 3. X P. ACCL. 4. X P. ACCL.
PACCL-----9 PACCL-----8 PACCL-----7 PACCL-----6

CASO 01CONF.01***COM SAE *** DEGRAU NA REF. DO RAT DO GERADOR DA BARRA 1 1

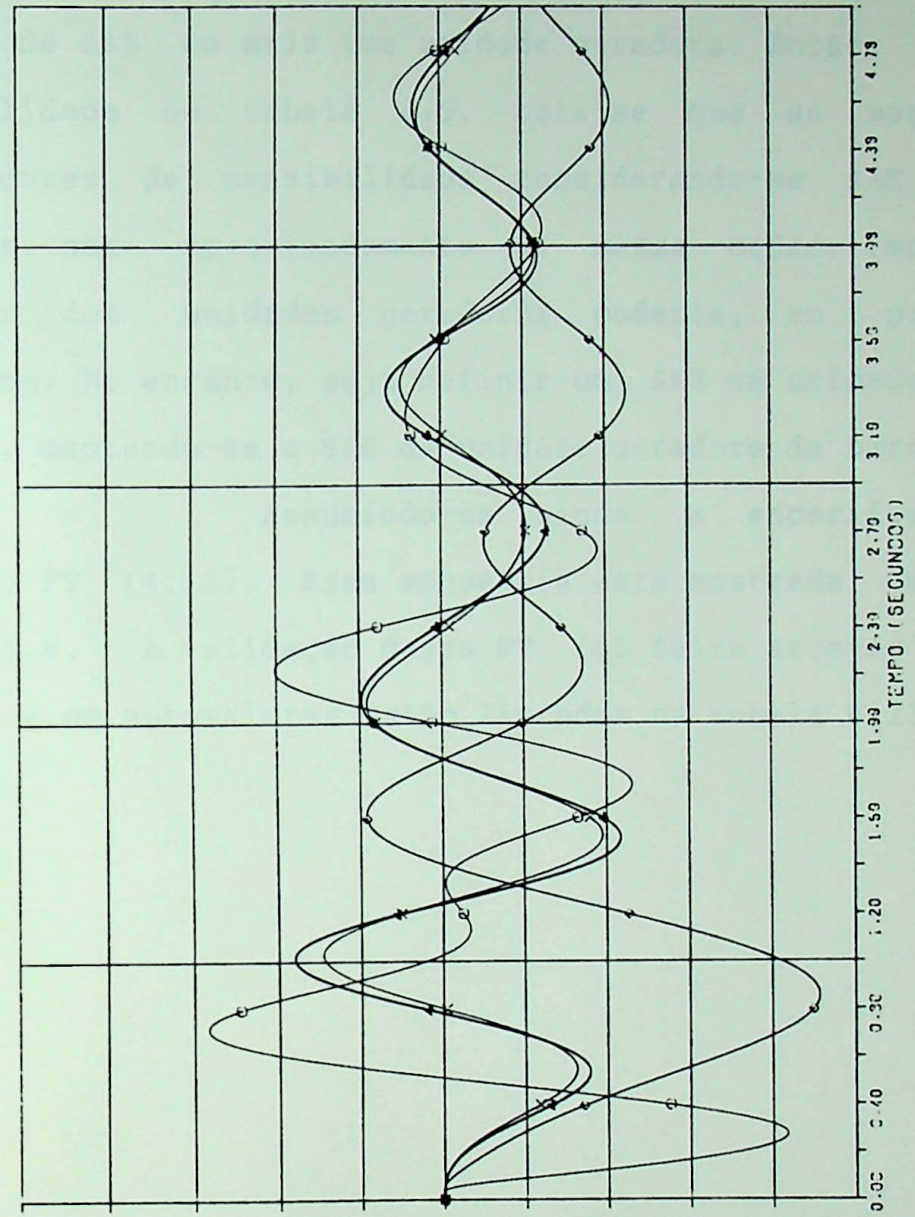


Figura 4.7.b' - Potência acelerante (Pm - P) (Caso 01, com SAE)

A especificação (4.6) pode ser atendida se for efetuado um pequeno aumento, de 0.072 para 0.078 pu/pu, no ganho da FT (4.4), fato este comprovado na tabela 4.10.

Contudo, para exemplificar, considere-se ajustes de SAE em mais uma unidade geradora. Então, da matriz de sensibilidade da tabela 4.9, nota-se que as magnitudes dos coeficientes de sensibilidade considerando-se SAE nas demais unidades são aproximadamente de mesma ordem, mostrando que qualquer das unidades geradoras poderia, em princípio ser escolhida. No entanto, seja definir um SAE na unidade geradora da barra 9, mantendo-se o SAE da unidade geradora da barra 11.

Assumindo-se ainda a especificação (4.6) obteve a FT (4.10). Essa sequência está mostrada na listagem da figura 4.8. A validação dessa FT foi feita através do programa AUTOVAL e os autovalores estão listados na tabela 4.11.

MATRIZ DE SENSIBILIDADE (SAE SENSIVEL A P)						
SAE NA BARRA NUMERO - 9						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.7571	7.7040	0.2351	-1.0821	1.1074	-77.7414
2	-0.3051	7.8942	0.9751	-0.8998	1.3268	-42.7001
3	-0.4191	8.8311	3.5504	-4.6303	5.8348	-52.5201
4	-0.2826	5.1837	1.8597	-0.6138	1.9583	-18.2648
SAE NA BARRA NUMERO - 8						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.7571	7.7040	0.2351	-1.0821	1.1074	-77.7415
2	-0.3051	7.8942	0.9751	-0.8998	1.3268	-42.7001
3	-0.4191	8.8311	3.5504	-4.6303	5.8348	-52.5201
4	-0.2826	5.1837	1.8597	-0.6138	1.9583	-18.2648
SAE NA BARRA NUMERO - 1						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.7571	7.7040	0.4688	-0.6162	0.7743	-52.7389
2	-0.3051	7.8942	4.4998	-5.3063	6.9574	-49.7013
3	-0.4191	8.8311	0.0000	-0.0000	0.0000	-48.4536
4	-0.2826	5.1837	1.3418	-0.4457	1.4139	-18.3761
SAE NA BARRA NUMERO - 5						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.7571	7.7040	0.1730	-0.0028	0.1730	-0.9225
2	-0.3051	7.8942	0.0776	-0.1061	0.1315	-53.8028
3	-0.4191	8.8311	-0.0000	-0.0000	0.0000	-107.2653
4	-0.2826	5.1837	33.9962	-34.3763	48.3474	-45.3185

Tabela 4.9 - Matriz de sensibilidade da configuração 1, segundo formulação ARCIDIACONO, com SAE na unidade geradora da barra 11

AUTOVALORES			
NO.	PARTE REAL	PARTE IMAGINÁRIA	DAMP
1	-145.0148		1.00
2	-119.0403		1.00
3	-117.5842		1.00
4	-57.78034	47.10785	.775
5	-57.78034	-47.10785	.775
6	-77.93882		1.00
7	-64.99717		1.00
8	-40.24060	4.365128	.994
9	-40.24060	-4.365128	.994
10	-22.85882	14.42430	.846
11	-22.85882	-14.42430	.846
12	-35.60882		1.00
13	-36.97976		1.00
14	-38.21211		1.00
15	-6.366746	13.84550	.418
16	-6.366746	-13.84550	.418
17	-6.525193	14.23110	.417
18	-6.525193	-14.23110	.417
19	-6.593228	14.34151	.418
20	-6.593228	-14.34151	.418
21	-6.634999	14.39707	.419
22	-6.634999	-14.39707	.419
23	-.8061130	7.703938	.104
24	-.8061130	-7.703938	.104
25	-.3049625	7.894177	.386D-01
26	-.3049625	-7.894177	.386D-01
27	-.4190723	8.831072	.474D-01
28	-.4190723	-8.831072	.474D-01
29	-.3028409	5.192939	.582D-01
30	-.3028409	-5.192939	.582D-01
31	-1.256638	3.120225	.374
32	-1.256638	-3.120225	.374
33	-.7546359	1.369511	.483
34	-.7546359	-1.369511	.483
35	-.3990720	1.040823	.358
36	-.3990720	-1.040823	.358
37	-.3426150	.8284105	.382
38	-.3426150	-.8284105	.382
39	-.5524436		1.00
40	-.9885973D-06	.3562197D-02	.278D-03
41	-.9885973D-06	-.3562197D-02	.278D-03
42	-.1835751		1.00
43	-.3063350	.6424820	.430
44	-.3063350	-.6424820	.430

Tabela 4.10 - Autovalores do sistema da configuração 1 com alteração do ganho do SAE (4.4) de 0.072 para 0.078 pu/pu.

SINTETIZACAO DE SAE NA BARRA NUMERO - 9
 ESPECIFIQUE TR E TL
 5.00000000 .300000012E-01
 FUNCAO AJUSTADO PARA $|F(W)|=1.0$

$$F(S) = (1.421) \frac{(5.00)S + 1.0 + (0.427)S + 1.0 + (0.427)S + 1.0}{1.0 + (5.00)S + 1.0 + (2.000)S + 1.0 + (0.033)S + 1.0 + (0.030)S}$$

(4.7)

FREQ.	IDEAL FASE	GANHO	AJUSTADO FASE	PONDERACAO
7.70	77.74132	1.02777	33.98976	110.73798
7.89	42.70009	1.04609	33.98389	132.68008
8.83	52.52008	1.13496	33.61169	583.48047
5.18	18.26477	0.78408	30.48111	195.83186

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA PROSSEGUIR
- 3 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 4 -PARA ENCERRAR

2
 ESPECIFIQUE O VALOR CUJA PARTE REAL DOS AUTOVALORES
 DEVEM SITUAR-SE AA ESQUERDA OU NO MAXIMO IGUAIS A
 ESTE VALOR
 -.300000012
 FUNCAO DE TRANSFERENCIA DO SAE

$$F(S) = (0.017) \frac{(5.00)S + 1.0 + (0.427)S + 1.0 + (0.427)S + 1.0}{1.0 + (5.00)S + 1.0 + (2.000)S + 1.0 + (0.033)S + 1.0 + (0.030)S}$$

(4.8)

***** MOVIMENTO ESPERADOS DOS AUTOVALORES *****

-0.7571+J 7.7040--> -0.7667+J 7.7131
 -0.3051+J 7.8942--> -0.3210+J 7.8967
 -0.4191+J 8.8311--> -0.4919+J 8.8560
 -0.2826+J 5.1837--> -0.3000+J 5.1799

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA ALTERAR COEF. SENS. SOMENTE PARA AJUSTE
- 3 -PARA VERIFICAR SAE FORNECIDO PELO USUARIO
- 4 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 5 -PARA ENCERRAR O CASO

1
 FREQUENCIA E PONDERACAO USADA

NO. 1 7.7040 RAD/S (110.7380)
 NO. 2 7.8942 RAD/S (132.6801)
 NO. 3 8.8311 RAD/S (583.4805)
 NO. 4 5.1837 RAD/S (195.8319)

ENTRE COM NUM. E PONDERACAO

NO FIM DIGITE 0 0

3 1.00000000
 4 1000.00000
 0 .0

FUNCAO AJUSTADO PARA $|F(W)|=1.0$

$$F(S) = (1.552) \frac{(5.00)S + 1.0 + (0.383)S + 1.0 + (0.234)S + 1.0}{1.0 + (5.00)S + 1.0 + (1.000)S + 1.0 + (0.033)S + 1.0 + (0.030)S}$$

(4.9)

FREQ.	IDEAL FASE	GANHO	AJUSTADO FASE	PONDERACAO
7.70	77.74132	1.21103	23.73888	0.00001
7.89	42.70009	1.22799	23.88594	0.00001
8.83	52.52008	1.31150	24.23318	1.00000
5.18	18.26477	1.00000	18.26477	1000.00000

Figura 4.8 - Síntese de SAE na unidade geradora da barra 9, considerando-se o SAE (4.4) na unidade da barra 11

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA PROSSEGUIR
- 3 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 4 -PARA ENCERRAR

2

ESPECIFIQUE O VALOR CUJA PARTE REAL DOS AUTOVALORES
DEVEM SITUAR-SE AA ESQUERDA OU NO MAXIMO IGUAIS A
ESTE VALOR

-.300000012

FUNCAO DE TRANSFERENCIA DO SAE

$$F(S) = \frac{(0.014) * (5.00)S + 1.0 + (0.383)S + 1.0 + (0.234)S + 1.0}{1.0 + (5.00)S + 1.0 + (1.000)S + 1.0 + (0.033)S + 1.0 + (0.030)S} \quad (4.10)$$

***** MOVIMENTO ESPERADOS DOS AUTOVALORES *****

-0.7571+J	7.7040-->	-0.7642+J	7.7136
-0.3051+J	7.8942-->	-0.3188+J	7.8989
-0.4191+J	8.8311-->	-0.4791+J	8.8634
-0.2826+J	5.1837-->	-0.3000+J	5.1837

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA ALTERAR COEF. SENS. SOMENTE PARA AJUSTE
- 3 -PARA VERIFICAR SAE FORNECIDO PELO USUARIO
- 4 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 5 -PARA ENCERRAR O CASO

5

Figura 4.8 - Cont.

AUTOVALORES			
NO.	PARTE REAL	PARTE IMAGINÁRIA	DAMP
1	-145.0148		1.00
2	-119.0423		1.00
3	-117.5843		1.00
4	-57.72559	46.93316	.776
5	-57.72559	-46.93316	.776
6	-77.91374		1.00
7	-64.43824		1.00
8	-40.31842	4.374045	.994
9	-40.31842	-4.374045	.994
10	-23.26593	14.09723	.855
11	-23.26593	-14.09723	.855
12	-39.64180		1.00
13	-37.18697		1.00
14	-36.11227		1.00
15	-30.78160	4.566812	.989
16	-30.78160	-4.566812	.989
17	-6.604793	14.35922	.418
18	-6.604793	-14.35922	.418
19	-6.556206	14.29890	.417
20	-6.556206	-14.29890	.417
21	-6.381230	14.18513	.410
22	-6.381230	-14.18513	.410
23	-6.358631	13.84612	.417
24	-6.358631	-13.84612	.417
25	-.4841718	8.860283	.546D-01
26	-.4841718	-8.860283	.546D-01
27	-.7644586	7.713907	.986D-01
28	-.7644586	-7.713907	.986D-01
29	-.3185903	7.898699	.403D-01
30	-.3185903	-7.898699	.403D-01
31	-.2997933	5.183417	.577D-01
32	-.2997933	-5.183417	.577D-01
33	-1.269948	3.122227	.377
34	-1.269948	-3.122227	.377
35	-.7572720	1.374666	.483
36	-.7572720	-1.374666	.483
37	-.3966288	1.040917	.356
38	-.3966288	-1.040917	.356
39	-1.005704		1.00
40	-.3423060	.8281556	.382
41	-.3423060	-.8281556	.382
42	-.3052241	.6419580	.429
43	-.3052241	-.6419580	.429
44	-.2472793D-05	.3562227D-02	.694D-03
45	-.2472793D-05	-.3562227D-02	.694D-03
46	-.5477919		1.00
47	-.1833705		1.00
48	-.1998535		1.00

Tabela 4.11 - Autovalores do sistema da configuração 1 com SAE's (4.4) e (4.10) nas unidades geradoras das barras 11 e 9, respectivamente.

4.2.2 - SAE derivado da Velocidade do Rotor

Na tabela 4.12, está listada a matriz dos coeficientes de sensibilidade da variação dos autovalores em função da inclusão de SAE derivado da Velocidade do Rotor. Esses coeficientes foram calculados segundo a formulação ARCIDIACONO.

Definindo-se a unidade geradora da barra 11 como a candidata a ser provida de SAE para que a especificação (4.6) seja verificada, obteve-se a FT (4.11), conforme listada na figura 4.9. A validação desta FT (4.12) (tabela 4.13) mostra contudo, que os autovalores relacionados aos modos eletromecânico são deslocados como previsto, porém às custas de instabilização do sistema caracterizado pelo polo real positivo correspondente aos parâmetros do SAE. Essa constatação é obtida aplicando-se a expressão (2.59) em todos os autovalores (tabela 4.14).

É interessante notar que a FT (4.11), desconsiderando-se o sinal algébrico do ganho, apresenta característica de atraso de fase. Isso acontece dessa maneira porque o método dos mínimos quadrados tende sempre a coeficientes tais que as fases são mínimas. No caso, o avanço de fase acima de 90° , foi conseguido tornando-se o sinal algébrico do ganho negativo, que implica em defasamento de 180° , acrescido do atraso proporcionados pelas constantes de tempo.

Através do método dos mínimos quadrados não se consegue FT com ganho positivo e avanço além dos 90° .

Nestes casos é conveniente lançar mão do Método 2 (item 3.5.2) de ajustes.

Considerando-se então $w_{\text{máx}} = 7.6178 \text{ rad/s} = w_1$ e o correspondente coeficiente de sensibilidade

$$e = 32.7603 \times 10^{-3} / \underline{56.8974^\circ}$$

e assumindo-se $T_r = 3.0 \text{ s}$ e $T_l = 0.03 \text{ s}$, na frequência $w_{\text{máx}}$, os filtros correspondentes impõem um atraso de 10.3675° . Assim, para que o deslocamento do autovalor seja para esquerda,

$$\phi_{\text{máx}} = 180^\circ - 56.8974^\circ + 10.3675^\circ = 133.4701^\circ$$

Através das expressões (3.28) e (3.29),
obtem-se

$$TD = 0.0270 \text{ s} \quad \text{e} \quad D = 23.6178$$

Para que o modo menos amortecido atenda a especificação é necessário que

$$K_p = 0.9305 \text{ pu/pu}$$

O movimento esperado dos autovalores pode ser visualizado na listagem da figura 4.9. Na tabela 4.15, estão listados os autovalores ao ser incluído o SAE (4.12) acima ajustado, derivado a velocidade do rotor, na unidade geradora da barra 11.

MATRIZ DE SENSIBILIDADE (SAE SENSIVEL A W)						
SAE NA UNIDADE GERADORA DA BARRA NUMERO - 11						
AUTOVALOR (B*C)*1000.						
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	17.8917	27.4431	32.7603	56.8974
2	-0.3040	7.8969	0.1853	0.2137	0.2828	49.0718
3	-0.4191	8.8311	0.0000	0.0000	0.0000	48.4718
4	-0.0158	5.1228	3.7670	30.4075	30.6400	82.9379
SAE NA UNIDADE GERADORA DA BARRA NUMERO - 9						
AUTOVALOR (B*C)*1000.						
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	1.0085	0.9056	1.3554	41.9245
2	-0.3040	7.8969	1.6695	1.3627	2.1551	39.2219
3	-0.4191	8.8311	6.1611	4.2762	7.4997	34.7630
4	-0.0158	5.1228	1.8521	3.1056	3.6160	59.1899
SAE NA UNIDADE GERADORA DA BARRA NUMERO - 8						
AUTOVALOR (B*C)*1000.						
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	1.0084	0.9056	1.3554	41.9245
2	-0.3040	7.8969	1.6695	1.3627	2.1551	39.2219
3	-0.4191	8.8311	6.1611	4.2762	7.4997	34.7630
4	-0.0158	5.1228	1.8521	3.1056	3.6160	59.1899
SAE NA UNIDADE GERADORA DA BARRA NUMERO - 1						
AUTOVALOR (B*C)*1000.						
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	1.4787	1.2407	1.9302	39.9973
2	-0.3040	7.8969	7.1450	6.0848	9.3849	40.4183
3	-0.4191	8.8311	0.0000	0.0000	0.0000	27.3863
4	-0.0158	5.1228	1.3820	2.2066	2.6037	57.9416
SAE NA UNIDADE GERADORA DA BARRA NUMERO - 5						
AUTOVALOR (B*C)*1000.						
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-0.2194	7.6178	-0.0003	0.0200	0.0200	90.9231
2	-0.3040	7.8969	0.0041	0.0029	0.0050	35.8910
3	-0.4191	8.8311	-0.0000	-0.0000	0.0000	-115.3819
4	-0.0158	5.1228	1.8686	3.5295	3.9936	62.1026

Tabela 4.12 - Matriz de sensibilidade da configuração 1, sem SAE, segundo formulação ARCIADIACONO

AUTOVALORES			
NO.	PARTE REAL	PARTE IMAGINÁRIA	DAMP
1	-145.0148		1.00
2	-119.0657		1.00
3	-117.5861		1.00
4	-56.96768	44.46575	.788
5	-56.96768	-44.46575	.788
6	-77.68297		1.00
7	-51.70889		1.00
8	-39.72631	4.847831	.993
9	-39.72631	-4.847831	.993
10	-35.54686		1.00
11	-36.97995		1.00
12	-32.96459		1.00
13	-38.21211		1.00
14	-20.05903		1.00
15	-6.368682	13.84541	.418
16	-6.368682	-13.84541	.418
17	-6.523286	14.22949	.417
18	-6.523286	-14.22949	.417
19	-6.593207	14.34150	.418
20	-6.593207	-14.34150	.418
21	-6.634999	14.39707	.419
22	-6.634999	-14.39707	.419
23	-.4526899	7.641411	.591D-01
24	-.4526899	-7.641411	.591D-01
25	-.3056258	7.895848	.387D-01
26	-.3056258	-7.895848	.387D-01
27	-.4190723	8.831072	.474D-01
28	-.4190723	-8.831072	.474D-01
29	-.3271338	5.120699	.638D-01
30	-.3271338	-5.120699	.638D-01
31	-.9518423	3.054773	.297
32	-.9518423	-3.054773	.297
33	-1.511040		1.00
34	-.4990199	1.303222	.358
35	-.4990199	-1.303222	.358
36	-.3832714	.9771997	.365
37	-.3832714	-.9771997	.365
38	-.3425293	.8286467	.382
39	-.3425293	-.8286467	.382
40	.2085888		-1.00
41	.3409386D-02		-1.00
42	-.3293322D-02		1.00
43	-.3063350	.6424820	.430
44	-.3063350	-.6424820	.430

Tabela 4.13 - Autovalores do sistema da configuração 1, com SAE (4.11) na unidade geradora da barra 11

SINTETIZACAO DE SAE NA BARRA NUMERO - 11
 ESPECIFIQUE TR E TL
 3.00000000 .300000012E-01
 FUNCAO AJUSTADO PARA $|F(W)|=1.0$

$$F(S) = (-11.573) \frac{(3.00)S \quad 1.0 + (0.070)S \quad 1.0 + (0.070)S \quad 1.0}{1.0 + (3.00)S \quad 1.0 + (2.000)S \quad 1.0 + (0.050)S \quad 1.0 + (0.030)S}$$

FREQ.	IDEAL FASE	GANHO	AJUSTADO FASE	PONDERACAO
7.62	123.10263	0.88826	118.94707	3.27603
7.90	130.92824	0.86564	119.31055	0.02828
8.83	131.52818	0.80151	120.48059	0.00000
5.12	97.06218	1.21382	115.85814	3.06400

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA PROSSEGUIR
- 3 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 4 -PARA ENCERRAR

2

ESPECIFIQUE O VALOR CUJA PARTE REAL DOS AUTOVALORES
 DEVEM SITUAR-SE AA ESQUERDA OU NO MAXIMO IGUAIS A
 ESTE VALOR
 -.300000012
 FUNCAO DE TRANSFERENCIA DO SAE

$$F(S) = (-93.413) \frac{(3.00)S \quad 1.0 + (0.070)S \quad 1.0 + (0.070)S \quad 1.0}{1.0 + (3.00)S \quad 1.0 + (2.000)S \quad 1.0 + (0.050)S \quad 1.0 + (0.030)S}$$

(4.11)

***** MOVIMENTO ESPERADOS DOS AUTOVALORES *****

-0.2194+J 7.6178--> -0.4536+J 7.6348
 -0.3040+J 7.8969--> -0.3059+J 7.8973
 -0.4191+J 8.8311--> -0.4191+J 8.8311
 -0.0158+J 5.1228--> -0.3000+J 5.0260

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA ALTERAR COEF. SENS. SOMENTE PARA AJUSTE
- 3 -PARA VERIFICAR SAE FORNECIDO PELO USUARIO
- 4 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 5 -PARA ENCERRAR O CASO

3

ENTRE COM GANHO, TR, TN1, TD1, TN2, TD2, TL
 .930499971 3.00000000 .638000011 .269999988E-01
 .638000011 .269999988E-01 .300000012E-01
 VERIFICACAO DO SAE FORNECIDO PELO USUARIO
 FUNCAO DE TRANSFERENCIA DO SAE

$$F(S) = (0.930) \frac{(3.00)S \quad 1.0 + (0.638)S \quad 1.0 + (0.638)S \quad 1.0}{1.0 + (3.00)S \quad 1.0 + (0.027)S \quad 1.0 + (0.027)S \quad 1.0 + (0.030)S}$$

(4.12)

***** MOVIMENTO ESPERADOS DOS AUTOVALORES *****

-0.2194+J 7.6178--> -0.9207+J 7.6174
 -0.3040+J 7.8969--> -0.3104+J 7.8979
 -0.4191+J 8.8311--> -0.4191+J 8.8311
 -0.0158+J 5.1228--> -0.3000+J 4.9707

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA ALTERAR COEF. SENS. SOMENTE PARA AJUSTE
- 3 -PARA VERIFICAR SAE FORNECIDO PELO USUARIO
- 4 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 5 -PARA ENCERRAR O CASO

5

Figura 4.9 - Síntese de SAE na unidade geradora da barra 11

AUTOVALOR			COEFICIENTE DE SENSIBILIDADE				AUTOV. ESPERADOS	
NO.	REAL	IMAG.	REAL	IMAG.	ABS	FASE	REAL	IMAG.
1	-145.0148	0.0	0.6074D-16	-.1506D-23	0.6074D-13	-.1421D-05	-145.0148	-0.0000
2	-119.0658	0.0	0.5798D-04	-.1770D-16	0.5798D-01	-.1749D-10	-119.0657	-0.0000
3	-117.5861	0.0	0.4239D-05	0.6340D-17	0.4239D-02	0.8568D-11	-117.5861	0.0000
4	-77.6820	0.0	-.3040D-03	-.1866D-17	0.3040D+00	-.1800D+03	-77.6830	-0.0000
5	-56.9564	44.4489	0.3027D-02	0.6664D-02	0.7320D+01	0.6557D+02	-56.9677	44.4658
6	-56.9564	-44.4489	0.3027D-02	-.6664D-02	0.7320D+01	-.6557D+02	-56.9677	-44.4658
7	-51.5361	0.0	-.2407D-01	-.9655D-17	0.2407D+02	-.1800D+03	-51.7111	-0.0000
8	-39.7085	4.8786	-.2107D-02	-.9488D-03	0.2311D+01	-.1558D+03	-39.7265	4.8462
9	-39.7085	-4.8786	-.2107D-02	0.9488D-03	0.2311D+01	0.1558D+03	-39.7265	-4.8462
10	-35.5364	0.0	-.2105D-03	-.1564D-18	0.2105D+00	-.1800D+03	-35.5486	-0.0000
11	-36.9800	0.0	0.5911D-06	-.4946D-19	0.5911D-03	-.4794D-11	-36.9799	-0.0000
12	-38.2121	0.0	0.1681D-16	-.9497D-25	0.1681D-13	-.3236D-06	-38.2121	-0.0000
13	-6.3688	13.8455	-.2602D-04	-.1284D-04	0.2901D-01	-.1537D+03	-6.3687	13.8454
14	-6.3688	-13.8455	-.2602D-04	0.1284D-04	0.2901D-01	0.1537D+03	-6.3687	-13.8454
15	-6.5233	14.2293	0.3397D-04	-.9137D-05	0.3517D-01	-.1506D+02	-6.5233	14.2295
16	-6.5233	-14.2293	0.3397D-04	0.9137D-05	0.3517D-01	0.1506D+02	-6.5233	-14.2295
17	-6.5932	14.3415	0.2969D-06	0.2741D-07	0.2982D-03	0.5275D+01	-6.5932	14.3415
18	-6.5932	-14.3415	0.2969D-06	-.2741D-07	0.2982D-03	-.5275D+01	-6.5932	-14.3415
19	-6.6350	14.3971	0.2528D-16	-.8868D-17	0.2679D-13	-.1933D+02	-6.6350	14.3971
20	-6.6350	-14.3971	0.2528D-16	0.8868D-17	0.2679D-13	0.1933D+02	-6.6350	-14.3971
21	-0.2194	7.6178	0.1789D-01	0.2744D-01	0.3276D+02	0.5690D+02	-0.4513	7.6407
22	-0.2194	-7.6178	0.1789D-01	-.2744D-01	0.3276D+02	-.5690D+02	-0.4513	-7.6407
23	-0.3040	7.8969	0.1853D-03	0.2137D-03	0.2828D+00	0.4907D+02	-0.3059	7.8974
24	-0.3040	-7.8969	0.1853D-03	-.2137D-03	0.2828D+00	-.4907D+02	-0.3059	-7.8974
25	-0.4191	8.8311	0.2078D-14	0.2346D-14	0.3134D-11	0.4847D+02	-0.4191	8.8311
26	-0.4191	-8.8311	0.2078D-14	-.2346D-14	0.3134D-11	-.4847D+02	-0.4191	-8.8311
27	-0.0158	5.1228	0.3767D-02	0.3041D-01	0.3064D+02	0.8294D+02	-0.3002	5.0280
28	-0.0158	-5.1228	0.3767D-02	-.3041D-01	0.3064D+02	-.8294D+02	-0.3002	-5.0280
29	-1.4208	3.1062	0.1683D-02	-.3448D-01	0.3452D+02	-.8721D+02	-0.9324	3.1375
30	-1.4208	-3.1062	0.1683D-02	0.3448D-01	0.3452D+02	0.8721D+02	-0.9324	-3.1375
31	-0.7653	1.4054	-.7753D-02	0.6107D-02	0.9870D+01	-.1418D+03	-0.5303	1.1641
32	-0.7653	-1.4054	-.7753D-02	-.6107D-02	0.9870D+01	0.1418D+03	-0.5303	-1.1641
33	-0.3949	1.0418	-.6420D-03	0.8032D-03	0.1028D+01	0.1286D+03	-0.4148	0.9981
34	-0.3949	-1.0418	-.6420D-03	-.8032D-03	0.1028D+01	-.1286D+03	-0.4148	-0.9981
35	-0.0000	0.0036	-.3802D-02	-.8712D-05	0.3802D+01	-.1799D+03	0.0000	0.0074
36	-0.0000	-0.0036	-.3802D-02	0.8712D-05	0.3802D+01	0.1799D+03	0.0000	-0.0074
37	-0.3426	0.8284	0.5234D-06	-.3404D-05	0.3444D-02	-.8126D+02	-0.3425	0.8286
38	-0.3426	-0.8284	0.5234D-06	0.3404D-05	0.3444D-02	0.8126D+02	-0.3425	-0.8286
39	-0.3063	0.6425	0.6283D-15	0.3525D-15	0.7205D-12	0.2929D+02	-0.3063	0.6425
40	-0.3063	-0.6425	0.6283D-15	-.3525D-15	0.7205D-12	-.2929D+02	-0.3063	-0.6425

Tabela 4.14 - Verificação dos autovalores esperados caso seja incluído SAE (4.11) na unidade geradora da barra 11 através da itilização da expressão (2.59)

AUTOVALORES			
NO.	PARTE REAL	PARTE IMAGINÁRIA	DAMP
1	-145.0148		1.00
2	-119.0896		1.00
3	-117.5879		1.00
4	-52.57564	46.69269	.748
5	-52.57564	-46.69269	.748
6	-77.40614		1.00
7	-66.54307	22.86240	.946
8	-66.54307	-22.86240	.946
9	-40.30328	4.346118	.994
10	-40.30328	-4.346118	.994
11	-15.83746	16.05582	.702
12	-15.83746	-16.05582	.702
13	-35.61003		1.00
14	-36.97975		1.00
15	-38.21211		1.00
16	-6.364539	13.84619	.418
17	-6.364539	-13.84619	.418
18	-6.527874	14.23256	.417
19	-6.527874	-14.23256	.417
20	-6.593255	14.34152	.418
21	-6.593255	-14.34152	.418
22	-6.634999	14.39707	.419
23	-6.634999	-14.39707	.419
24	-.9108766	7.377564	.123
25	-.9108766	-7.377564	.123
26	-.3045376	7.894495	.385D-01
27	-.3045376	-7.894495	.385D-01
28	-.4190723	8.831072	.474D-01
29	-.4190723	-8.831072	.474D-01
30	-.3504569	4.993525	.700D-01
31	-.3504569	-4.993525	.700D-01
32	-1.366774	3.272970	.385
33	-1.366774	-3.272970	.385
34	-.7544934	1.402133	.474
35	-.7544934	-1.402133	.474
36	-.3956906	1.041049	.355
37	-.3956906	-1.041049	.355
38	-.3426255	.8284139	.382
39	-.3426255	-.8284139	.382
40	-.7383478D-05	.3525108D-02	.209D-02
41	-.7383478D-05	-.3525108D-02	.209D-02
42	-.3385178		1.00
43	-.3063350	.6424820	.430
44	-.3063350	-.6424820	.430

Tabela 4.15 - Autovalores do sistema da configuração 1 com SAE (4.12), derivado da Velocidade do Rotor, na unidade geradora da barra 11

4.3 - CONFIGURAÇÃO 2

O diagrama unifilar dessa configuração pode ser visualizado na figura 4.10. Os valores de impedância das linhas de transmissão, transformadores, cargas das barras e os dados do fluxo de potência, cujo ponto de operação foi adotado estão listados na tabela 4.16.

Os parâmetros dos geradores, Sistema de Excitação e SAE's estão listados na tabela 4.17.

Os RAT's e SAE's foram representados conforme os modelos das figuras 4.11 e 4.12, respectivamente.

Neste sistema todas as unidades geradoras exceto as das barras 699 e 717 possuem SAE. A unidade geradora da barra 699 é aquela cujo SAE deve ser ajustado. A da barra 717 é a unidade geradora-equivalente. Na tabela 4.18, estão listados todos os autovalores do sistema.

Os autovalores relacionados aos modos eletromecânicos são aqueles mostrados na tabela 4.19. De acordo com a característica dos autovetores, o modo instável refere-se a oscilação entre a unidade da barra 699, a ser provida de SAE e o sistema equivalente, representado pela unidade geradora da barra 717.

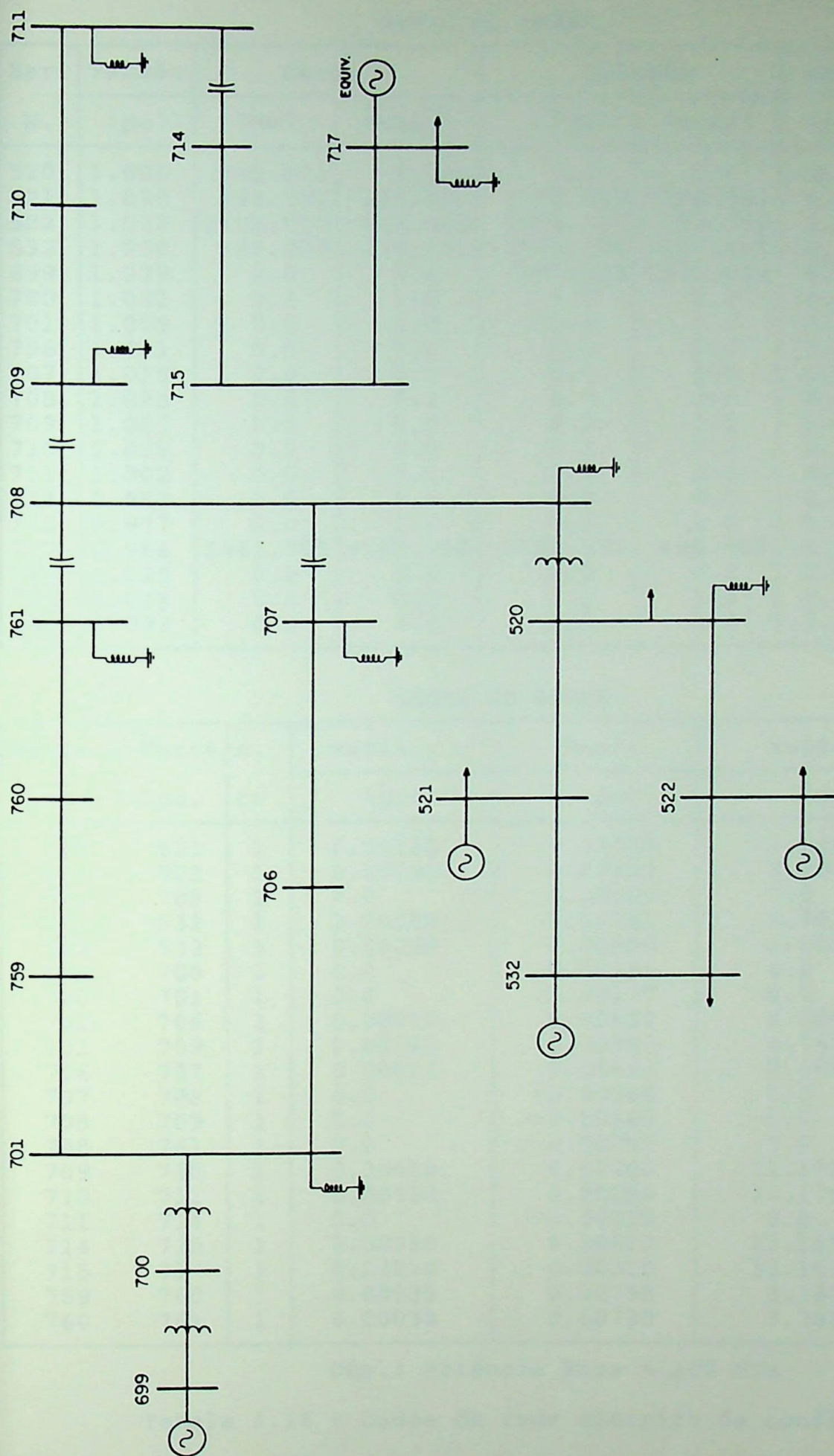


Figura 4.10 - Diagrama unifilar da Configuração 2

DADOS DE BARRA

Bar.	Tensão	Carga		Geração		Sh-G	Sh-B
N.	(pu)	(Mw)	(Mvar)	(Mw)	(Mvar)	(pu)	(pu)
520	1.008	845.800	-9.220	0.0	0.0	0.0	-1.81
521	1.030	692.300	-185.000	1332.000	-246.891	0.0	0.0
522	1.030	2405.000	-468.000	1658.000	-455.379	0.0	0.0
532	1.030	688.200	-236.000	1540.000	-447.697	0.0	0.0
699	1.039	0.0	0.0	5997.000	1535.034	0.0	0.0
700	1.021	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
701	1.009	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-9.90
706	1.011	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
707	1.015	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.00
708	1.003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-6.60
709	1.007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-9.90
710	1.008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
711	1.002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-13.20
714	0.982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
715	0.977	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
717	0.966	2942.999	-185.000	-2709.332	496.968	0.0	-9.90
759	1.025	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
760	1.018	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
761	0.992	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.30

DADOS DE LINHA

Barra a Barra		n.	Resist.	Reat.	Suscept.	TAP
no.	no.	ct	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)
520	521	1	0.00150	0.02250	2.22000	0.0
520	522	1	0.00190	0.02450	2.06090	0.0
520	708	1	0.0	0.00390	0.0	0.0
521	532	1	0.00050	0.00760	0.76120	0.0
522	532	1	0.00030	0.00380	1.52230	0.0
699	700	1	0.0	0.00150	0.0	0.0
700	701	1	0.0	0.00170	0.0	0.0
701	706	1	0.00020	0.00450	8.68600	0.0
701	759	1	0.00040	0.00990	4.76310	0.0
706	707	1	0.00020	0.00450	8.68600	0.0
707	708	1	0.0	-0.00360	0.0	0.0
708	709	1	0.0	-0.00260	0.0	0.0
708	761	1	0.0	-0.00790	0.0	0.0
709	710	1	0.00010	0.00260	11.17900	0.0
710	711	1	0.00010	0.00260	11.17900	0.0
711	714	1	0.0	-0.00310	0.0	0.0
714	715	1	0.00010	0.00310	13.15500	0.0
715	717	1	0.00010	0.00310	13.15500	0.0
759	760	1	0.00030	0.00790	3.78260	0.0
760	761	1	0.00030	0.00790	3.78260	0.0

Obs.: Potência Base = 100 Mva

Tabela 4.16 - Dados da rede elétrica da configuração 2

DADOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Bar. no.	Mva (base)	H (s)	$x'd$ (pu)	x_d (pu)	x_q (pu)	$x''d$ (pu)	$x''q$ (pu)	$T'do$ (s)	$T''do$ (s)	$T''qo$ (s)
699 *	6633.	5.07	0.30	0.90	0.68	0.24	0.27	7.6	.090	.019
521	1400.	4.50	0.30	0.85	0.70	0.20	0.20	5.0	.053	.123
522	1900.	4.50	0.30	0.85	0.70	0.20	0.20	5.0	.053	.123
532	1944.	4.50	0.30	0.88	0.69	0.20	0.20	5.0	.060	.090
717	6000.	5.00	0.30	1.00	0.70	0.25	0.25	8.0	.090	.200

* Gerador adotado como referência

DADOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Bar. no.	Ka (pu)	Ta (s)
699	30.0	0.05
521	30.0	0.05
522	30.0	0.05
532	30.0	0.05
717	30.0	0.05

DADOS DOS SAE's

Bar. no.	Sinal	Ganho (pu)	TN1 (s)	TD1 (s)	TN2 (s)	TD2 (s)	TL (s)	TR (s)
521	W	10.00	0.300	0.075	0.300	0.075	0.000	3.000
522	W	10.00	0.300	0.075	0.300	0.075	0.000	3.000
532	W	10.00	0.300	0.075	0.300	0.075	0.000	3.000

Tabela 4.17 - Dados dos geradores e Sistemas de Excitação e SAE's

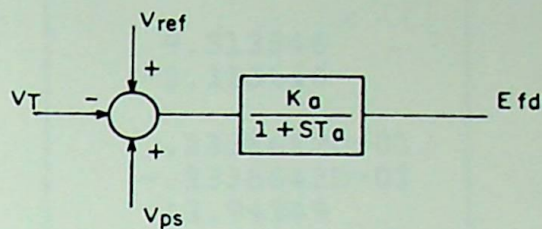


Figura 4.11 - Modelo do RAT das unidades geradores da configuração 2

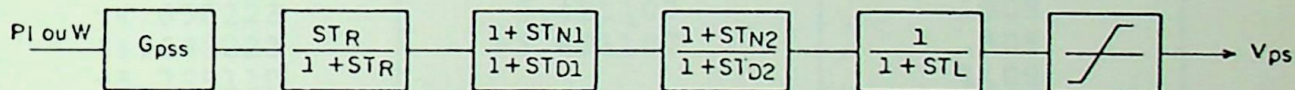


Figura 4.12 - Modelo da SAE das unidades geradoras da configuração 2

AUTOVALORES			
NO.	PARTE REAL	PARTE IMAGINÁRIA	DAMP
1	-29.34969	12.19639	.923
2	-29.34969	-12.19639	.923
3	-29.46923	11.53708	.931
4	-29.46923	-11.53708	.931
5	-30.75593		1.00
6	-26.94997	9.313546	.945
7	-26.94997	-9.313546	.945
8	-22.63482		1.00
9	-22.39905	.2338642D-01	1.00
10	-22.39905	-.2338642D-01	1.00
11	-1.742928	13.94349	.124
12	-1.742928	-13.94349	.124
13	-1.852126	13.87109	.132
14	-1.852126	-13.87109	.132
15	-1.765379	11.37055	.153
16	-1.765379	-11.37055	.153
17	-11.91077		1.00
18	.3849576	5.659643	-.679D-01
19	.3849576	-5.659643	-.679D-01
20	-1.253150	4.474387	.270
21	-1.253150	-4.474387	.270
22	-5.003460	4.396380	.751
23	-5.003460	-4.396380	.751
24	-7.132267		1.00
25	-5.979101	2.315862	.932
26	-5.979101	-2.315862	.932
27	-4.983864	3.520663	.817
28	-4.983864	-3.520663	.817
29	-4.698223	3.421107	.808
30	-4.698223	-3.421107	.808
31	-5.729110		1.00
32	-3.921978		1.00
33	-1.280153		1.00
34	-.2116347D-05		1.00
35	-.6811579	.3896934D-01	.998
36	-.6811579	-.3896934D-01	.998
37	-.3773857		1.00
38	-.3512124		1.00

Tabela 4.18 - Autovalores do sistema da configuração 2, sem SAE na unidade geradora da barra 699

Considerando-se que o SAE a ser ajustado seja derivado da Potência Elétrica e baseado nos coeficientes da matriz de sensibilidade (tabela 4.20) ajustou-se um SAE para a unidade geradora da barra 699 para que a seguinte especificação fosse atendida

$$\text{Real}\{\lambda'_k\} \leq -0.2 \text{ 1/s}$$

O SAE (4.15) ajustado com esse objetivo bem como os movimentos esperados dos autovalores podem ser visualizados na listagem da figura 4.14.

Os autovalores do sistema após inclusão do SAE (4.15) na unidade geradora da barra 699 podem ser visualizados na tabela 4.21.

As figuras 4.15 a, b, a' e b' mostram o efeito desse SAE no domínio do tempo. A perturbação aplicada foi um degrau de -5.0 % na Referência do RAT da unidade geradora da barra 699.

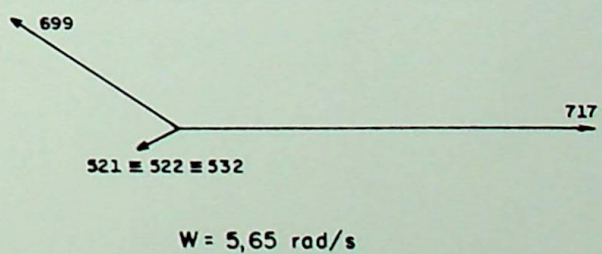
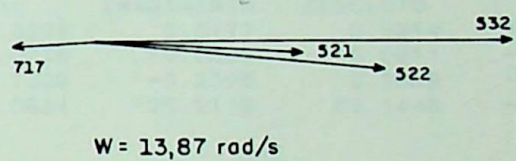
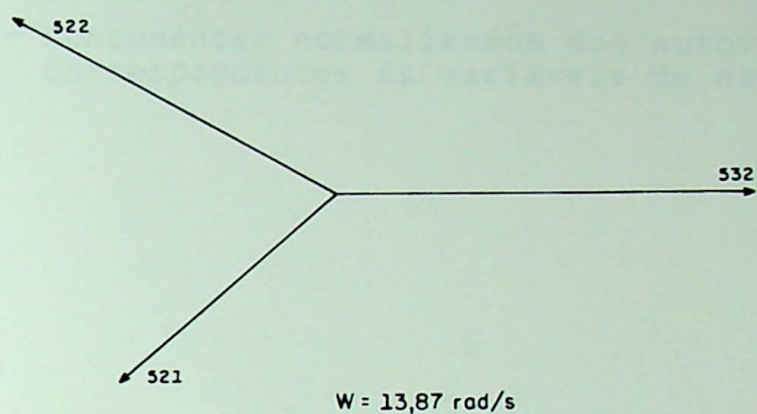
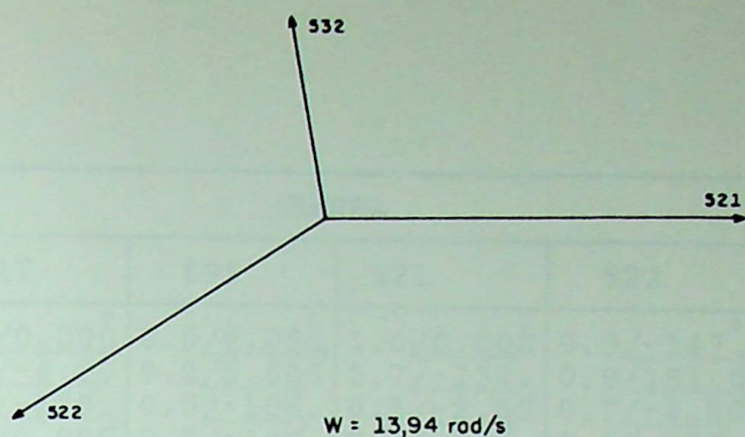


FIGURA 4.13 - AUTOVETORES NORMALIZADOS CORRESPONDENTES ÀS VARIÁVEIS DE ESTADO W 's DA CONFIGURAÇÃO 2.

AUTOVALOR	BARRA				
	717	699	521	522	532
-1.74+j13.94	0.0/0.000 ⁰	0.0/0.000 ⁰	1.0/0.000 ⁰	0.9/-147. ⁰	0.5/-261. ⁰
-1.85+j13.87	0.0/-4.00 ⁰	0.0/0.000 ⁰	0.7/-139. ⁰	0.9/151.0 ⁰	1.0/0.000 ⁰
-1.76+j11.34	0.2/-178. ⁰	0.0/-108. ⁰	0.5/-2.50 ⁰	0.7/-4.80 ⁰	1.0/0.000 ⁰
0.38+j 5.65	1.0/0.000 ⁰	0.5/+146. ⁰	0.1/-150. ⁰	0.1/-153. ⁰	0.1/-160. ⁰

Tabela 4.19 - Componentes normalizados dos autovetores correspondentes às variáveis de estado W's

MATRIZ DE SENSIBILIDADE (SAE SENSIVEL A P)						
SAE NA BARRA NUMERO - 699						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-1.7429	13.9435	-0.0259	0.0177	0.0314	145.5883
2	-1.8521	13.8711	-0.0039	-0.0609	0.0611	-93.6341
3	-1.7654	11.3706	0.1328	-0.2315	0.2669	-60.1576
4	0.3850	5.6596	60.0684	-25.2116	65.1448	-22.7685
SAE NA BARRA NUMERO - 717						
AUTOVALOR			B*C			
NO.	REAL	IMAGINARIO	REAL	IMAGINARIO	ABSOLUTO	FASE
1	-1.7429	13.9435	0.0262	-0.0592	0.0647	-66.1187
2	-1.8521	13.8711	0.1343	0.3106	0.3384	66.6104
3	-1.7654	11.3706	4.4167	7.1387	8.3946	58.2552
4	0.3850	5.6596	-55.1856	-7.1589	55.6480	-172.6086

Tabela 4.20 - Matriz de sensibilidade da configuração 2 sem SAE na unidade geradora da barra 699

SINTETIZACAO DE SAE NA BARRA NUMERO - 699

ESPECIFIQUE TR E TL

5.00000000 .300000012E-01

FUNCAO AJUSTADO PARA $|F(W)|=1.0$

$$F(S) = \frac{(-126.811) * (5.00)S + 1.0 + (0.025)S + 1.0 + (0.039)S + 1.0}{1.0 + (5.00)S + 1.0 + (2.000)S + 1.0 + (2.000)S + 1.0 + (0.030)S}$$

(4.13)

IDEAL		AJUSTADO		PONDERACAO
FREQ.	FASE	GANHO	FASE	
13.94	-145.58830	0.18043	29.54979	3.13651
13.87	93.63417	0.18214	29.46541	6.10721
11.37	60.15750	0.26269	26.61266	26.68658
5.66	22.76849	1.00004	22.77478	6514.47656

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA PROSSEGUIR
- 3 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 4 -PARA ENCERRAR

1
FREQUENCIA E PONDERACAO USADA

NO. 1	13.9435 RAD/S	(3.1365)
NO. 2	13.8711 RAD/S	(6.1072)
NO. 3	11.3706 RAD/S	(26.6866)
NO. 4	5.6596 RAD/S	(6514.4766)

ENTRE COM NUM. E PONDERACAO

NO FIM DIGITE 0 0

3 1.00000000

4 1000.00000

0 .0

FUNCAO AJUSTADO PARA $|F(W)|=1.0$

$$F(S) = \frac{(0.169) * (5.00)S + 1.0 + (5.188)S + 1.0 + (0.115)S + 1.0}{1.0 + (5.00)S + 1.0 + (1.000)S + 1.0 + (0.033)S + 1.0 + (0.030)S}$$

(4.14)

IDEAL		AJUSTADO		PONDERACAO
FREQ.	FASE	GANHO	FASE	
13.94	-145.58830	1.38396	14.49248	0.00001
13.87	93.63417	1.38109	14.59957	0.00001
11.37	60.15750	1.27396	17.99557	1.00000
5.66	22.76849	1.00000	22.76852	1000.00000

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA PROSSEGUIR
- 3 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 4 -PARA ENCERRAR

2
ESPECIFIQUE O VALOR CUJA PARTE REAL DOS AUTOVALORES
DEVEM SITUAR-SE AA ESQUERDA OU NO MAXIMO IGUAIS A
ESTE VALOR

-.199999988

FUNCAO DE TRANSFERENCIA DO SAE

$$F(S) = \frac{(0.002) * (5.00)S + 1.0 + (5.188)S + 1.0 + (0.115)S + 1.0}{1.0 + (5.00)S + 1.0 + (1.000)S + 1.0 + (0.033)S + 1.0 + (0.030)S}$$

(4.15)

***** MOVIMENTO ESPERADOS DOS AUTOVALORES *****

-1.7429+J 13.9435--> -1.7426+J 13.9434
-1.8521+J 13.8711--> -1.8523+J 13.8718
-1.7654+J 11.3706--> -1.7676+J 11.3726
0.3850+J 5.6596--> -0.2000+J 5.6596

DIGITE:

- 1 -PARA EFETUAR NOVO AJUSTE C/ OUTRAS PONDERACOES
- 2 -PARA ALTERAR COEF. SENS. SOMENTE PARA AJUSTE
- 3 -PARA VERIFICAR SAE FORNECIDO PELO USUARIO
- 4 -PARA RECOMECAR OU ESCOLHER OUTRA UNIDADE GERADORA
- 5 -PARA ENCERRAR O CASO

5

Figura 4.14 - Síntese de SAE na unidade geradora da barra 699

AUTOVALORES			
NO.	PARTE REAL	PARTE IMAGINÁRIA	DAMP
1	-36.25175	9.520128	.967
2	-36.25175	-9.520128	.967
3	-29.35052	12.19731	.923
4	-29.35052	-12.19731	.923
5	-29.46963	11.53650	.931
6	-29.46963	-11.53650	.931
7	-30.75504		1.00
8	-26.94920	9.315990	.945
9	-26.94920	-9.315990	.945
10	-22.35815	.5588797D-01	1.00
11	-22.35815	-.5588797D-01	1.00
12	-1.852529	13.87240	.132
13	-1.852529	-13.87240	.132
14	-1.742243	13.94332	.124
15	-1.742243	-13.94332	.124
16	-1.770900	11.37331	.154
17	-1.770900	-11.37331	.154
18	-13.40550		1.00
19	-4.733611	7.885840	.515
20	-4.733611	-7.885840	.515
21	-11.70856		1.00
22	-.2109052	5.512180	.382D-01
23	-.2109052	-5.512180	.382D-01
24	-1.370862	3.789179	.340
25	-1.370862	-3.789179	.340
26	-7.152324		1.00
27	-6.132069	2.337003	.934
28	-6.132069	-2.337003	.934
29	-4.982202	3.517034	.817
30	-4.982202	-3.517034	.817
31	-4.693483	3.415553	.809
32	-4.693483	-3.415553	.809
33	-5.728352		1.00
34	-3.324119		1.00
35	-1.295388		1.00
36	-1.016355		1.00
37	-.2116347D-05		1.00
38	-.6821636	.2597113D-01	.999
39	-.6821636	-.2597113D-01	.999
40	-.3773980		1.00
41	-.3512118		1.00
42	-.2000127		1.00

Tabela 4.21 - Autovalores do sistema da configuração 2, com SAE (4.15) na unidade geradora da barra 699.

2. V TENSÃO
VT-----593

■ CASO BASE ■ CONF. 02 ■ SEM SAE ■ DEG. REF. DO RAT DO GER. DA BARRA 593 1

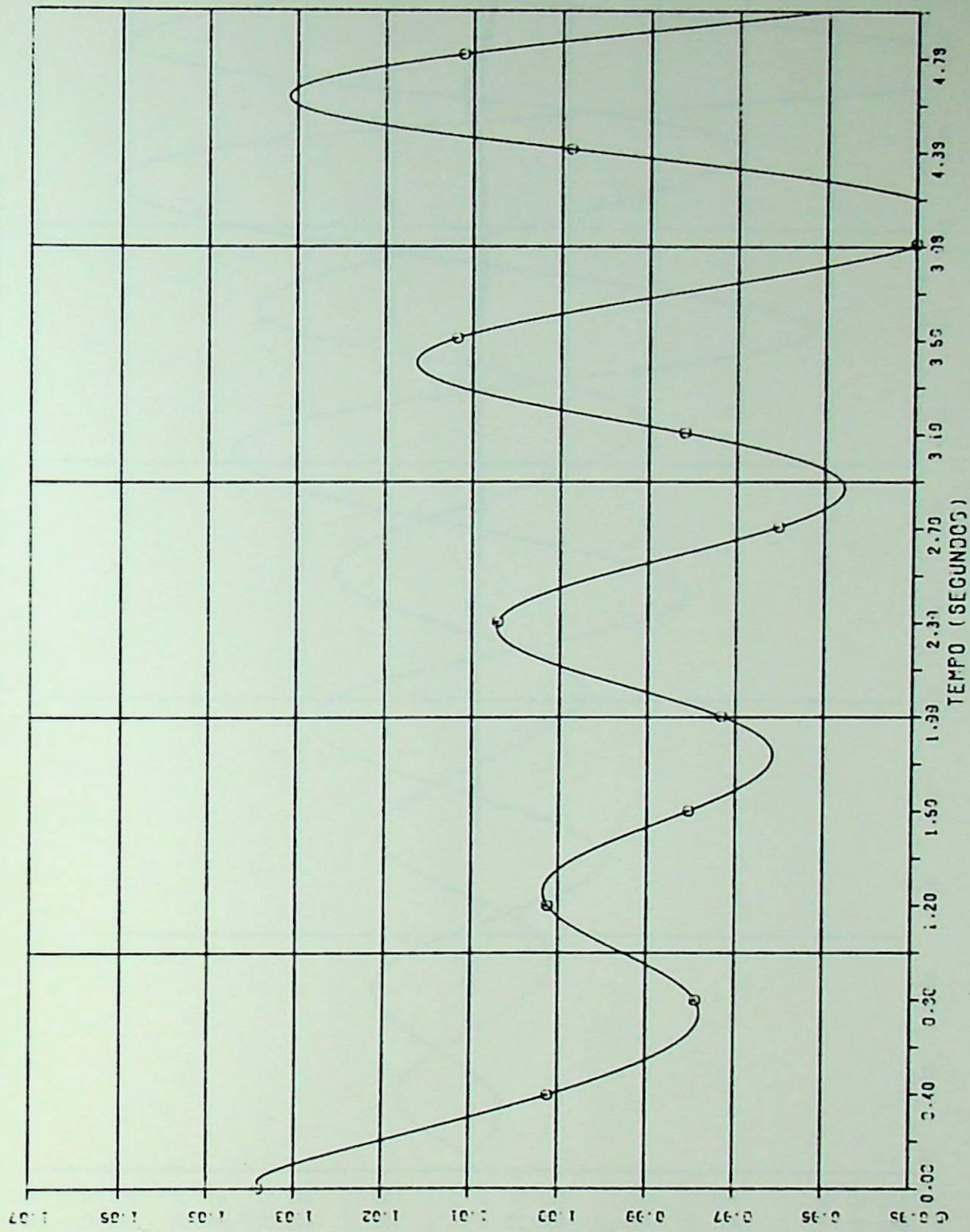


Figura 4.15.a - Tensão terminal de gerador (Caso base, sem SAE)

Y P. ACCL X P. ACCL X P. ACCL X P. ACCL X P. ACCL
PACEL---599 PACEL---521 PACEL---522 PACEL---532 PACEL---717

■ CASO BASE ■ CONF. 02 ■ SEM SAE ■ DEG. REF. DO RAT DO GER. DA BARRA 699 1

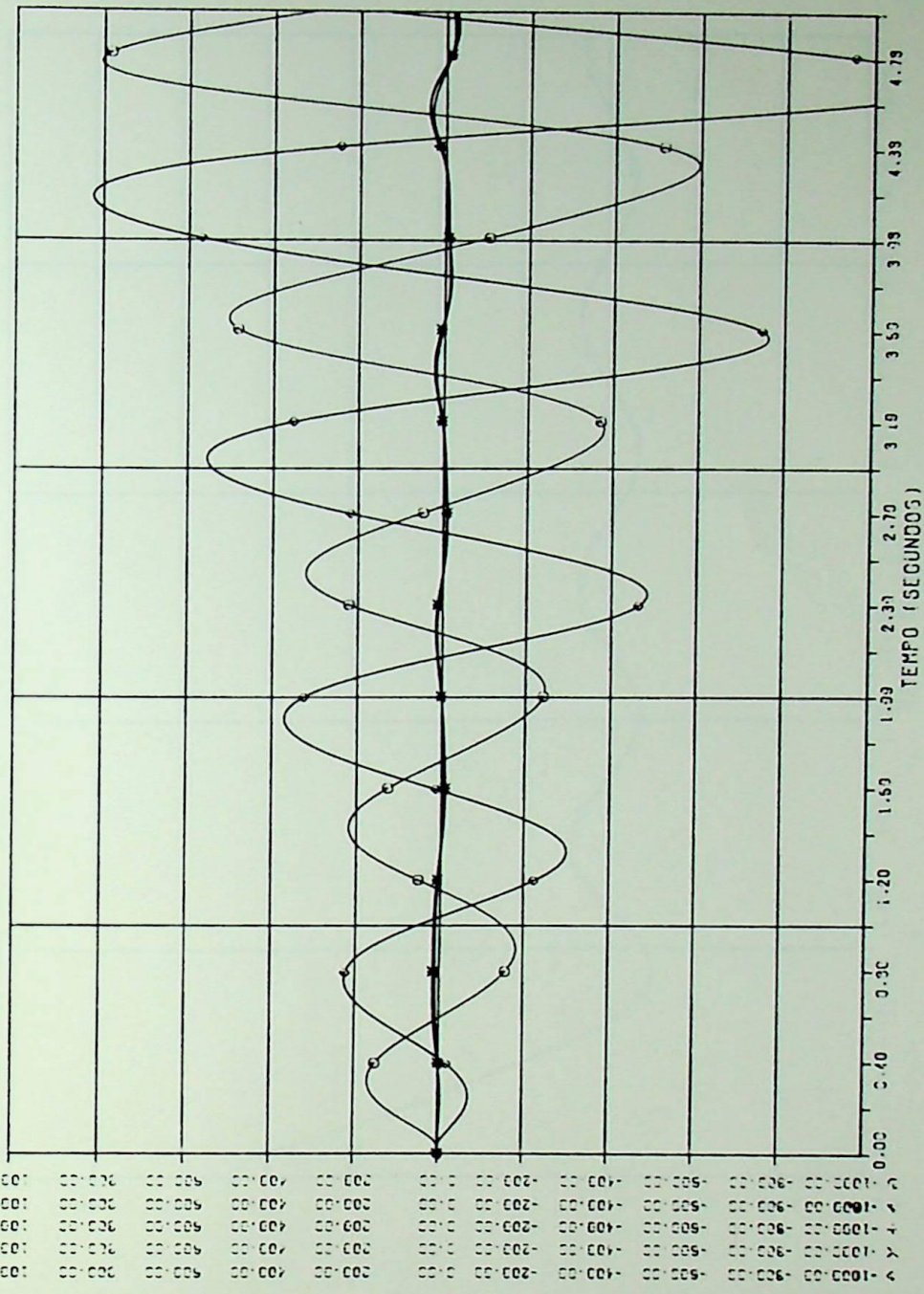


Figura 4.15.b - Potência acelerante (Pm - P) (Caso base, sem SAE)

○ V TENSÃO
VT-----599

*CASO 01*CONF.02*COM SAE * DEG. REF. DO RAT DO GER. DA BARRA 599 1

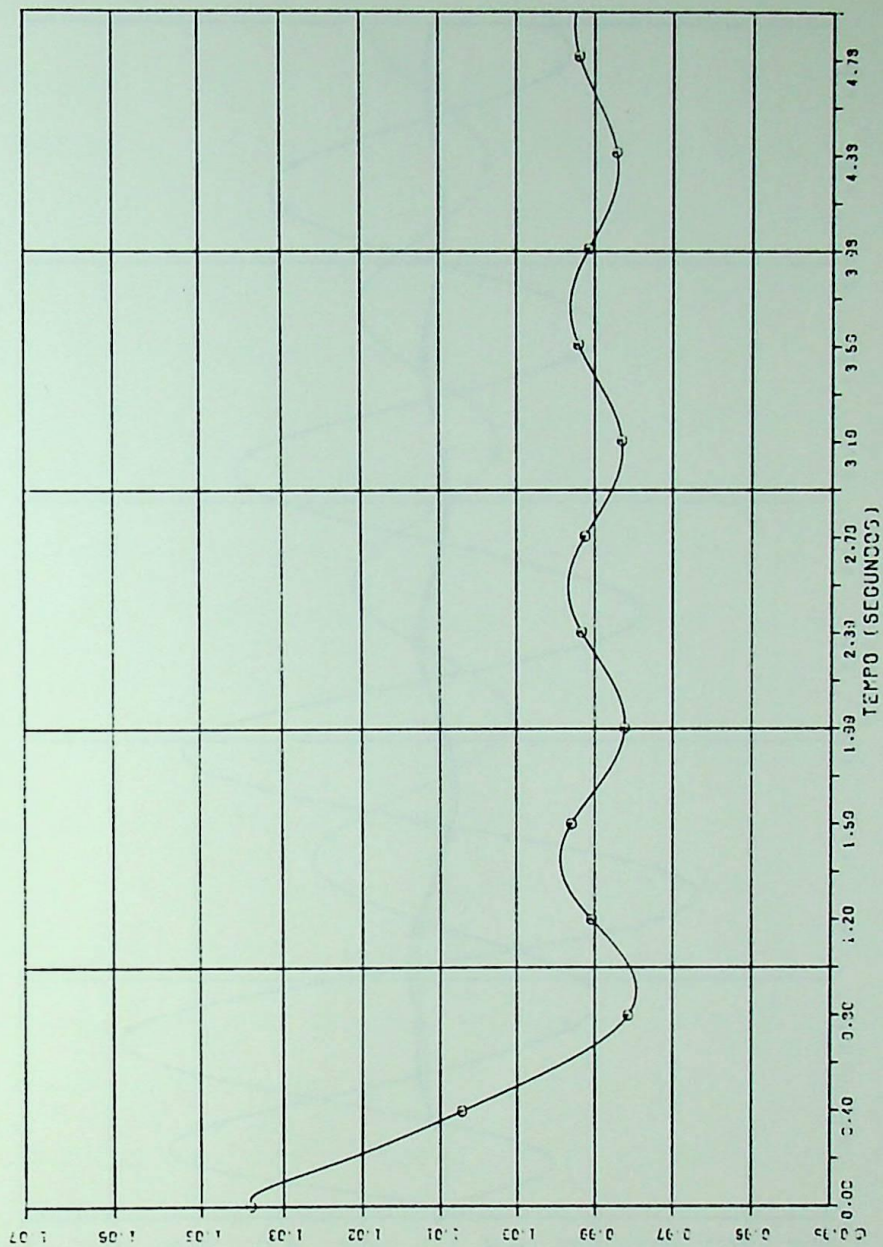


Figura 4.15.a' - Tensão terminal de gerador (Caso 01, com SAE)

1. X P. ACCL 2. X P. ACCL 3. X P. ACCL
PACEL-----521 PACEL-----522 PACEL-----717

1
CASO 01=CONF.02=COM SAE = DEG. REF. DO RAT DO GER. DA BARRA 699

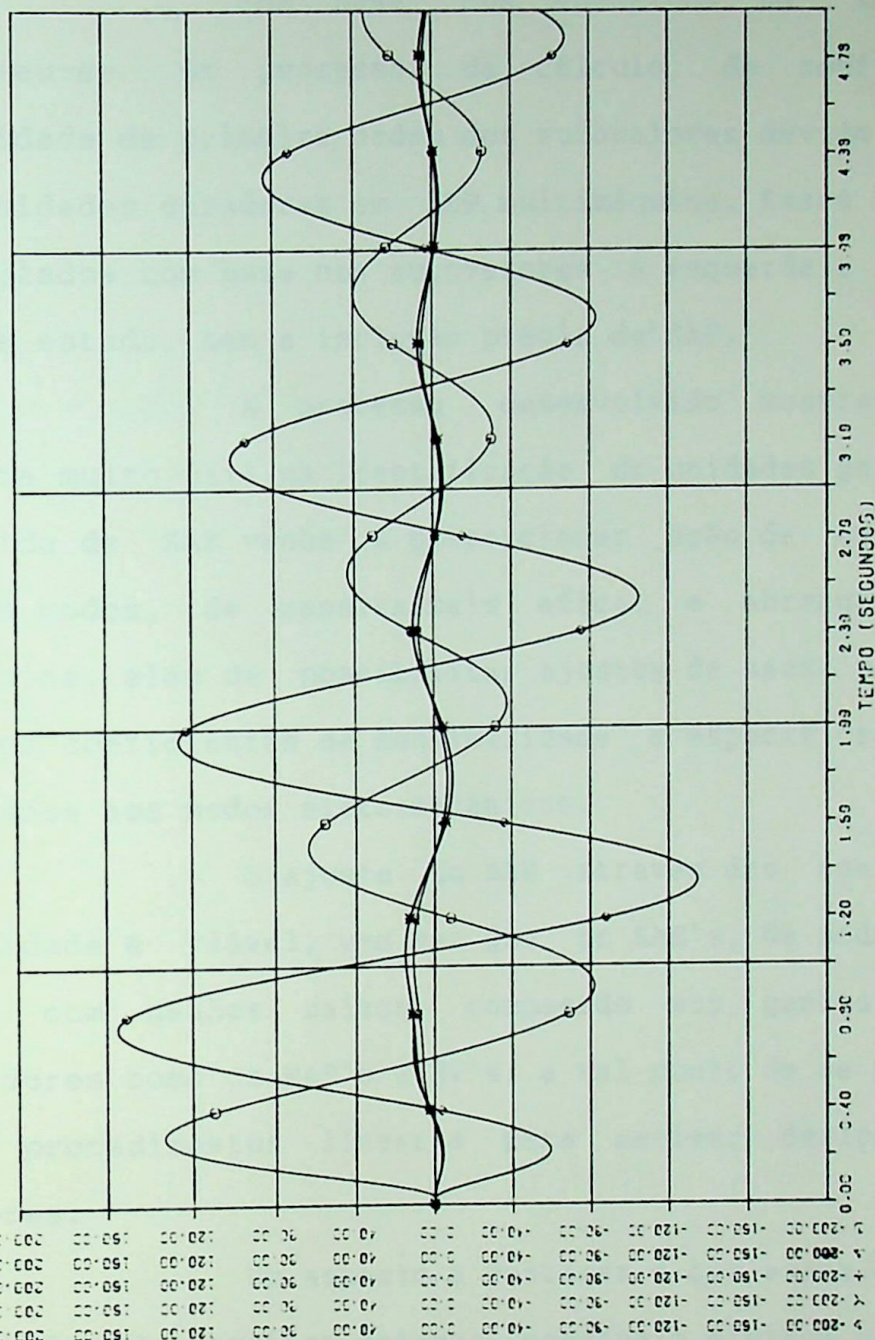


Figura 4.15.b' - Potencia acelerante (Pm - P) (Caso 01, com SAE)

CAPÍTULO 5 : CONCLUSÕES

Com base nos conceitos da Teoria Modal desenvolveu-se um processo de cálculo de coeficiente de sensibilidade de primeira ordem dos autovalores devido à adição de SAE em unidades geradoras em SEP multimáquina. Esses coeficientes são calculados com base nos autovetores à esquerda e à direita da matriz de estado, sem a inclusão prévia de SAE.

A processo desenvolvido mostrou ser uma ferramenta muito útil na identificação de unidades geradoras, que se provida de SAE venha a proporcionar ação de amortecimentos sobre os modos, de maneira mais eficaz e abrangente num SEP multimáquina, além de possibilitar ajustes de seus parâmetros em função dos coeficientes de sensibilidade e especificação de polos relacionados aos modos eletromecânicos.

O ajuste do SAE através dos coeficientes de sensibilidade é viável, uma vez que os SAE's, de modo geral são eficazes com ganhos baixos, comparado aos ganhos de outros controladores como os RAT's e RV's, a tal ponto de se poder lançar mão de procedimentos lineares para estimar deslocamentos de autovalores.

Um aspecto a destacar é que esses coeficientes de sensibilidade permitem antever possíveis efeitos negativos dos SAE's sobre alguns modos, principalmente os eletromecânicos, durante ajustes dos seus parâmetros.

O modelo do SEP é linearizado e o enfoque do cálculo de desvio de autovalores em função da adição de SAE, como comentado é linear. Em razão disso, a especificação pode vir

acompanhada de erros que varia dependendo do sistema, sendo difícil estabelecer, contudo, uma regra de para quantificar a máxima especificação sem antes efetuar análises preliminares.

Em razão desses detalhes, torna-se imperativo que a síntese de SAE da maneira desenvolvida neste trabalho, venha acompanhado de processo de validação rigorosa.

A implementação do SINTSAE como subrotina em programas de cálculo de autovalores é muito simples. Uma vez obtido os autovetores de A e A' , as operações computacionais envolvidas resumem-se em alguns produtos matriciais.

7.- REFERÊNCIAS

- |01| - S. Abe, A. Doi, "A New Power System Stabilizer Synthesis in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. on PAS, vol. 102, n.12, December 1983.
- |02| - A. Doi, S. Abe, "Coordinated Synthesis Stabilizer in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. on PAS, vol. 103, n.06, December 1983.
- |03| - F. P. de Mello, et al., "Coordinated Applications of Stabilizers in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. on PAS, vol. 99, May/Jun 1980.
- |04| - B. Porter and R. Crossley, "Modal Control - Theory and Applications", Taylor and Francis Ltd., London 1972.
- |05| - M. K. Pal, "State Space Representation of Multi-Machine Power Systems", IEEE PES Summer Meeting & Energy Resources Conf., Anaheim, Cal., July 14-19, 1974 (C 74 396-8).
- |06| - I. J. Peres-Arriaga, et al., "Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems, Part I: Heuristic Introduction", IEEE Trans. on PAS, vol. 101, n. 09, September 1982.

- |07| - V. Arcidiacono, et al., "Evaluation and Improvement of Electromechanical Oscillation Damping by Means of Eigenvalue-Eigenvector Analysis. Practical Results in Central Peru Power System", IEEE Trans. PAS., Vol. 99, March/April 1980.
- |08| - F. Saccomanno, " Sensitivity Analysis of the Characteristic Root of a Linear Time-Invariant Dynamic System: Application to the Synthesis of Damping Actions in Electric Power Systems, ENEL Studi e Ricerche - analisi dinamica delle reti elettriche, vol. 5, marzo, 1976.
- |09| - C. D. Vournas, R. J. Fleming, "Generalization of the Heffron-Phillip Model of a Synchronous Generator", A 78 534-0, IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, CA, July 16-21, 1978.
- |10| - C. D. Vournas, R. J. Fleming, "A Multivariable Stabilizer for a Multimachine Generating Plant", A 79 009-2, IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, February 4-9, 1979.
- |11| - J. J. D'Azzo, C. H. Houppis, "Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares", Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro - RJ, 1978.
- |12| - V. Arcidiacono, et al., "Problems Posed in Power System Planning by Electromechanical Oscillation Damping and Means for Solution", CIGRÉ, Session 1-9, September 1982.

- [13] - V. Arcidiacono, et al., "Analysis of Factors Affecting the Damping of Low-Frequency Oscillations in Multimachine Systems", CIGRÉ, August, 25 - September, 2 1976.
- [14] - J. Feinstein, "Teoria dos Sistemas de Controle - Enfoque por Variáveis de Estado", Editora Campus Ltda, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1979.
- [15] - N. Grebogi, "Identificação de Variáveis de Estado do Sistema Elétrico de Potência Responsáveis por Modos de Instabilidade Dinâmica", Dissertação de Mestrado, Itajubá, Dezembro 1983.
- [16] - J. C. Castro, et al., "Identification of the Generating Units to be Equipped with Stabilizers in a Multimachine Power System", IFAC Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, Brazil, 1985.
- [17] - N. Martins, "Eigenvalue Analysis of Multimachine Power System", a Thesis submitted to the Victoria University of Manchester for the Degree of Doctor of Philosophy Institute of Science & Technology, September, 1978.
- [18] - W. G. Heffron, R. A. Phillips, "Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators", AIEE Trans. on PAS, vol. 71, August 1952.

- |19| - E. V. Larsen, D. A. Swann, "Applying Power System Stabilizers", Part I, II and III, IEEE Trans. on PAS, vol. 100, n.06, June 1981.
- |20| - N. Martins, R. Baitelli, "Programa AUTOVAL - Manual do Usuário", Relatório Técnico CEPEL Ref. 1175/83, 1984.
- |21| - G. C. Goodwin, R. L. Payne, "Dynamic System Identification - Experiment Design and Data Analysis", Academic Press, Inc. (London) Ltd., 1977.
- |22| - GCOI-SCEL, "Manual do Usuário do SISTEMA TRANSDIR", versão H.3.2, volume I, 1985.
- |23| - IBM SYSTEM/360, "Scientific Subroutine Package" - Version 3 - Programmer's Manual, 1970.
- |24| - N. Martins, R. Baitelli, "Determinação da Localização e Ajustes de Parâmetros para Sinais Adicionais Estabilizadores em Sistemas de Potência Multimáquina", VII SNPTEE, GRUPO IV, BSB/GSP/05, Brasília, DF, 1984.

APÊNDICE A

A.1 - MODELAGEM DAS COMPONENTES DO SISTEMA

A.1.1 - Gerador

As unidades geradoras podem ser modeladas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 \dot{E}'_q &= (E_{fd} - (x_d - x'_d)I_d - E'_q)/T'_{do} \\
 \dot{E}''_q &= (E'_q - (x'_d - x''_d)I_d - E''_d)/T''_{do} \\
 \dot{E}''_d &= ((x_q - x''_q)I_d - E''_d)/T''_{qo} \\
 \dot{W} &= (P_m - P - D\omega)/(2H) \\
 \dot{\delta} &= W(\omega - 1.0) \\
 E''_d - V_d &= R_a I_d - x''_d I_q \\
 E''_q - V_q &= x''_d I_d + R_a I_q \\
 V_t^2 &= V_d^2 + V_q^2 \\
 P &= V_d I_d + V_q I_q
 \end{aligned}
 \tag{A.1-1}$$

A.1.2 - Regulador Automático de Tensão (RAT)

Considere-se o modelo do RAT da figura A.1

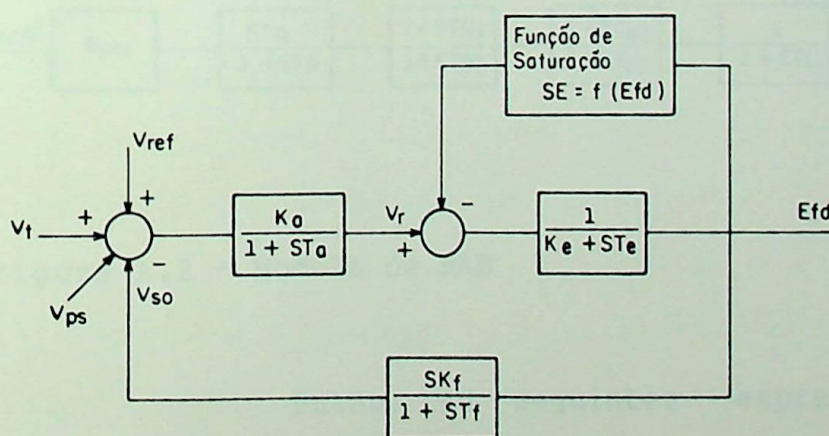


Figura A.1 - Modelo de RAT

A partir do modelo acima, as seguintes equações podem ser escritas:

$$\begin{aligned}\dot{V}_r &= (K_a(V_{ref} - V_t - V_{so} + V_{ps}) - V_r)/T_a \\ \dot{E}_{fd} &= (V_r - K_e E_{fd} - SE) \\ \dot{V}_{so} &= (K_f(V_r - K_e E_{fd})/T_e - V_{so})\end{aligned}\tag{A.1-2}$$

Os modelos adotados no presente trabalho podem ser obtidos a partir do modelo da figura acima.

O modelo da figura 4.2 pode ser obtido fazendo-se

$$K_e = 1.0$$

$$SE = 0.0$$

O modelo da figura 4.11 pode ser obtido fazendo-se

$$K_e = 1.0$$

$$SE = 0.0$$

$$K_f = 0.0$$

A.1.3 - Sinal Adicional Estabilizador (SAE)

Considere-se o modelo do SAE da figura A.2.

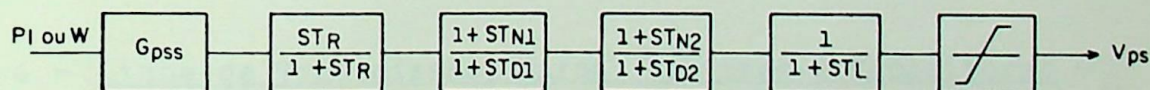


Figura A.2 - Modelo de SAE

Então, as seguintes expressões podem ser escritas.

$$\begin{aligned}
\dot{Y}_1 &= -Y_1/TD_1 + V_{in}(TD_1 - TN_1)/TD_1^2 \\
\dot{Y}_2 &= -Y_2/TD_2 + Y_1(TD_2 - TN_2)/TD_2^2 + \\
&\quad + V_{in}(TN_1/TD_1)(TD_2 - TN_2)/TD_2^2 \\
\dot{Y}_3 &= -Y_3/TD_3 + Y_2(GN_3.TD_3 - TN_3)/TD_3^2 + \\
&\quad + Y_1(TN_2/TD_2)(GN_3.TD_3 - TN_3)/TD_3^2 \quad (A.1-3) \\
&\quad + V_{in}(TN_2/TD_2)(TN_1/TD_1)(GN_3.TD_3 - TN_3)/TD_3^2 \\
\dot{Y}_4 &= -Y_4/TW - Y_3/TW - (1/TW)(TN_3/TD_3)/Y_2 - \\
&\quad - Y_1(1/TW)(TN_3/TD_3)(TN_2/TD_2) - \\
&\quad - V_{in}(1/TW)(TN_3/TD_3)(TN_2/TD_2)(TN_1/TD_1) \\
V_{ps} &= G_{ps}\{Y_4 + Y_3 + Y_2(TN_3/TD_3) + Y_1(TN_3/TD_3)(TN_2/TD_2) \\
&\quad + V_{in}(TN_3/TD_3)(TN_2/TD_2)(TN_1/TD_1)\}
\end{aligned}$$

O modelo do SAE utilizados no Capítulo 4 pode ser obtido a partir da figura A.2, desde que se faça

$$GN_3 = 1.0$$

$$TN_3 = 0.0$$

$$TD_3 = T_1$$

$$TW = T_r$$

$$G_{ps} = K_p$$

W para SAE derivado da Velocidade do Rotor

$$V_{in} = \{$$

P para SAE derivado da Potência Ativa

A.1.4 - Linha de Transmissão, Carga, Reatores e Capacitores

As linhas de transmissão são representadas pelo modelo Pi, com parâmetros concentrados.

As cargas, reatores e capacitores são representados por elementos concentrados do tipo impedância constante.

A.1 - Formação da Matriz de Estado

O método de formação da matriz de estado não requer inversão ou eliminação de matrizes de elevada ordem. Este aspecto reduz consideravelmente o tempo e a memória de computador.

A.2.1 - Rede Elétrica

Obtidas as condições iniciais através de cálculo de fluxo de potência, a rede elétrica é reduzida aos nós das unidades geradoras. A rede elétrica reduzida pode ser expressa em relação aos eixos (D-Q) de referência da rede (os eixos D-Q giram a velocidade de referência ω_s):

$$\begin{bmatrix} I_{D1} \\ I_{Q1} \\ \vdots \\ I_{Dn'} \\ I_{Qn'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} & \dots & G_{1,n'} & -B_{1,n'} \\ B_{11} & G_{11} & \dots & B_{1,n'} & G_{1,n'} \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n',1} & -B_{n',1} & \dots & G_{n',n'} & -B_{n',n'} \\ B_{n',1} & G_{n',1} & \dots & B_{n',n'} & G_{n',n'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{D1} \\ V_{Q1} \\ \vdots \\ V_{Dn'} \\ V_{Qn'} \end{bmatrix} \quad (A.2-1)$$

$$I_N = Y_N V_N \quad (A.2-2)$$

onde o índice "N" indica quantidades expressas com relação aos eixos (D-Q) da rede. Na equação (A.2-1) os termos G_{ij} e B_{ij} são as partes real e imaginária dos elementos complexos da matriz de admitâncias reduzida e n' é o número de geradores.

Tendo em vista a figura (A.2-1), uma variável L expressa com relação aos eixos de referência (D-Q) da rede pode ser representada com relação aos eixos de referência (d-q) de uma máquina "i", ou vice-versa, através das equações:

$$\begin{bmatrix} L_D \\ L_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & -\sin \delta_i \\ \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.2-3})$$

$$\begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & \sin \delta_i \\ -\sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_D \\ L_Q \end{bmatrix} \quad (\text{A.2-4})$$

ou, sob uma forma compacta,

$$L_{DQ} = T_i L_{dq} \quad (\text{A.2-5})$$

$$L_{dq} = T_i' L_{DQ} \quad (\text{A.2-6})$$

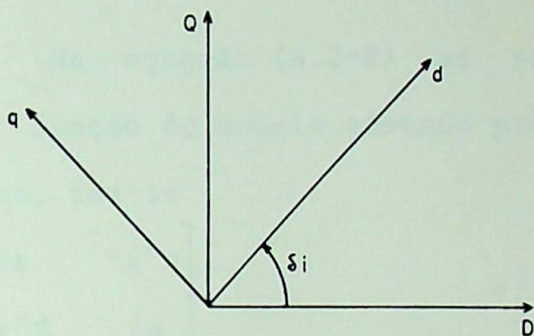


Figura A.2-1 - Deslocamento angular entre os eixos de referência (D-Q) da rede e os eixos (d-q) de uma máquina síncrona "i"

Portanto, utilizando-se as equações (A.2-4) e (A.2-2), obtém-se a equação da rede elétrica reduzida aos nós dos geradores expressa em relação aos eixos de referência (d-q) das máquinas:

$$I_M = T' Y_N T V_M = Y_E V_M \quad (\text{A.2-7})$$

onde $I_M = [I_{d_1}, I_{q_1}, \dots, I_{d_n}, I_{q_n}]'$

$V_M = [V_{d_1}, V_{q_1}, \dots, V_{d_n}, V_{q_n}]'$

$$T = \begin{bmatrix} [T_1] & & \\ & \ddots & \\ & & [T'_n] \end{bmatrix}$$

A expressão para V na equação (A.2-7) e definida pela equação abaixo:

$$V_M = V_I - Z_M I_M \quad (A.2-8)$$

$$Z = \begin{bmatrix} [z_M^1] & & \\ & \ddots & \\ & & [z_M^{n'}] \end{bmatrix} \quad V_I = \begin{bmatrix} [v_I^1] \\ \vdots \\ [v_I^{n'}] \end{bmatrix}$$

Na equação (A.2-8) as submatrizes z e os subvetores v são função do modelo adotado para cada gerador. No caso deste trabalho, fez-se

$$z_M^1 = \begin{bmatrix} R_a & -x''q \\ x''d & R_a \end{bmatrix} \quad v_I^1 = \begin{bmatrix} \Delta E''d \\ \Delta E''q \end{bmatrix}$$

Utilizando-se a expressão (A.2-4), pode-se escrever que

$$V_N = T V_M \quad e \quad (A.2-9)$$

$$I_M = T' I_N \quad (A.2-10)$$

O índice "M" indica quantidades cujas referências são os rotores dos geradores.

Linearizando-se a equação (A.2-2), tem-se

$$\Delta I_N = Y_N \Delta V_N \quad (A.2-11)$$

Linearizando-se a equação (A.2-9), tem-se

$$\Delta V_N = T \Delta V_M + E' \Delta \delta \quad (A.2-12)$$

onde

$$E' = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -V_{Q1} \\ V_{D1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -V_{Q2} \\ V_{D2} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} -V_{Qn'} \\ V_{Dn'} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\Delta\delta = [\Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_n,]'$$

Linearizando-se a equação (A.2-10), tem-se

$$\Delta I_M = T' \Delta I_N + J \Delta\delta \quad (A.2-13)$$

onde

$$J = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{q1} \\ -I_{d1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{q2} \\ -I_{d2} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} I_{qn'} \\ -I_{dn'} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Substituindo-se a equação (A.2-11) na

(A.2-13),

$$\Delta I_M = Y_E \Delta V_M + K \Delta\delta \quad (A.2-14)$$

$$\text{onde } Y_E = T' Y_N T$$

$$K = T' Y_N E' + J$$

A expressão matricial linearizada que relaciona a tensão interna e a tensão do estator referido ao sistema de coordenada dos rotores pode ser obtida da equação (A.2-8),

$$\Delta V_M = \Delta V_I - Z_M \Delta I_M \quad (A.2-15)$$

Substituindo-se a equação (A.2-15) na (A.2-14),

$$\Delta I_M = (I + Y_E Z_M)^{-1} Y_E \Delta V_I + (I + Y_E Z_M)^{-1} K \Delta \delta \quad (A.2-16)$$

onde I é a matriz identidade. Ou,

$$\Delta I_M = Y_E (Y_E + Y_M)^{-1} Y_M \Delta V_I + (I - Y_E (Y_E + Y_M)^{-1} K) \Delta \delta \quad (A.2-17)$$

onde $Z_M = Y_M^{-1}$

Substituindo-se a equação (A.2-17) na (A.2-15),
obtem-se o seguinte

$$\Delta V_M = (Y_E + Y_M)^{-1} Y_M \Delta V_I - (Y_E + Y_M)^{-1} K \Delta \delta \quad (A.2-18)$$

Escrevendo-se as equações (A.2-17) e (A.2-18)

na forma matricial vem

$$\Delta I_M = H_I \begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (A.2-19)$$

$$\Delta V_M = H_V \begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (A.2-20)$$

onde H_I e H_V são matrizes completamente cheias, de ordem $(2n' \times 3n')$.

A.2.2 - Matriz de Estado

A formação da matriz de estado do sistema de potência pode ser feita partindo-se das equações linearizadas para o l -ésimo gerador e seus controladores:

$$\dot{\Delta x}_1 = F'_1 \Delta x_1 + G_1 \begin{bmatrix} \Delta Id_1 \\ \Delta Iq_1 \end{bmatrix} + G'_1 \begin{bmatrix} \Delta vd_1 \\ \Delta Vq_1 \end{bmatrix} \quad (A.2-21)$$

onde

Δx_1 é o vetor de estado para gerador e seus controladores definidos pela equações (A.1-1), (A.1-2) e (A.1-3), ou seja

$$\Delta x_1 = [\Delta E'q, \Delta E''q, \Delta E''d, \Delta W, \Delta \delta, \Delta Vr, \Delta Efd, \Delta Vso, \Delta Y1, \Delta Y2, \Delta Y3, \Delta Y4]'$$

(Vide figura A.2-2)

No caso, a ordem de Δx_1 é 12.

F'_1, G_1, G'_1 são submatrizes relativas ao l-ésimo gerador, tendo a forma mostrada na figura (A.2-2), para o caso dos modelos definidos pelas equações (A.1-1), (A.1-2) e (A.1-3) para o gerador, sistema de excitação e Sinal Adicional Estabilizador, respectivamente.

A equação (A.2-21) extendida para o caso de um sistema com n' unidades de geração e definida por

$$\dot{\Delta x} = F' \Delta x + G \Delta I_M + G' \Delta V_M \quad (A.2-22)$$

onde

$\Delta x = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{n'}]'$ é o vetor de estado de ordem $(12n')$,

$$F' = \begin{bmatrix} [F'_1] & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & [F'_{n'}] \end{bmatrix} \quad \text{é uma matriz bloco diagonal de ordem } (12n' \times 12n'),$$

$$G = \begin{bmatrix} [G_1] & & \\ & \ddots & \\ & & [G_{n'}] \end{bmatrix} \quad \text{é uma matriz bloco diagonal de ordem } (12n' \times 2n')$$

$$G' = \begin{bmatrix} [G'_1] & & \\ & \ddots & \\ & & [G'_{n'}] \end{bmatrix} \quad \text{é uma matriz bloco diagonal de ordem } (12n' \times 2n')$$

$\Delta I_M = [\Delta Id_1, \Delta Iq_2, \dots, \Delta Id_{n'}, \Delta Iq_n]'$ é um vetor de ordem $(2n')$

$\Delta V_M = [\Delta Vd_1, \Delta Vq_1, \dots, \Delta Vd_{n'}, \Delta Vq_n]'$ é um vetor de ordem $(2n')$

Substituindo-se as equações (A.2-19) e

(A.2-20) na (A.2-22), tem-se

$$\dot{\Delta x} = F' \Delta x + GH_I \begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + G'H_V \begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (A.2-23)$$

Sendo

$$\begin{aligned} \Delta V_I &= [\Delta E''d_1, \Delta E''q_2, \dots, \Delta E''d_{n'}, \Delta E''q_n]' \\ \Delta \delta_I &= [\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \dots, \Delta \delta_{n'}]' \end{aligned}$$

pode-se definir uma matriz P_C , tal que

$$\begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = P_C \Delta x \quad (A.2-24)$$

Substituindo-se a equação (A.2-24) na

(A.2-23), tem-se

$$\begin{aligned}\dot{\Delta x} &= F' \Delta x + GH_I P_C \Delta x + G'H_V P_C \Delta x, \quad \text{ou} \\ \Delta \dot{x} &= [F' + (GH_I + G'H_V) P_C] \Delta x = A \Delta x\end{aligned}\tag{A.2-25}$$

A formulação apresentada sugere operações envolvendo matrizes de ordem elevada para um sistema geral de n' unidade geradora. Entretanto, isto não se verifica pois os produtos matriciais GH e $G'H$ podem ser obtidos de modo particionado utilizando-se os blocos G_I e G'_I para cada unidade geradora.

Para programação, a função da matriz P_C que não é formada, é desempenhada por dois vetores de endereçamento de ordem n' e $2n'$. Estes vetores são utilizados na adição dos elementos dos produtos GH_I e $G'H_V$ aos elementos correspondentes da matriz F' .

A.3 - Formação da Matriz de Entrada B (nx1)

A matriz B aqui considerada refere-se à entrada V_{ref_1} , referência de tensão do RAT da 1-ésima unidade geradora.

Essa matriz é constituída de valor nulo em todas as linhas exceto naquela correspondente a variável ΔV_r do sub-vetor de estado Δx_1 , que deve ser igual a K_a/T_a do RAT da 1-ésima unidade geradora.

A.4 - Formação da Matriz de Saída C (1xn)

A.4.1 - PARA VARIÁVEL DE SAÍDA POTÊNCIA ATIVA P

Linearizando-se a equação

$$P = V_d I_d + V_q I_q \quad \text{tem-se} \quad (A.4-1)$$

$$\Delta P_1 = V_{d0} \Delta I_{d0} + V_{q0} \Delta I_{q0} + I_{d0} \Delta V_{d0} + I_{q0} \Delta V_{q0} \quad (A.4-2)$$

$$\text{ou} \quad \Delta P_1 = [V_{d0} \quad V_{q0}] \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} + [I_{d0} \quad I_{q0}] \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} \quad (A.4-3)$$

A equação (A.4-3) pode ser ainda escrita como

$$\Delta P_1 = V_{M0}' \Delta I_M + I_{M0}' \Delta V_M \quad (A.4-4)$$

$$\text{onde } V_{M0}' = [0, 0, \dots, V_{d01}, V_{q01}, \dots, 0, 0]$$

$$I_{M0}' = [0, 0, \dots, I_{d01}, I_{q01}, \dots, 0, 0]$$

Substituindo-se a equação (A.2-24) e (A.2-20)

em (A.4-4), obtem-se

$$\Delta P_1 = V_M o' H_I \begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + I_M o' H_V \begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (A.4-5)$$

Substituindo-se a equação (A.2-24) na (A.4-5),
obtem-se finalmente

$$\Delta P_1 = (V_M o' H_I + I_M o' H_V) P_c \Delta x \quad (A.4-6)$$

então,

$$C = (V_M o' H_I + I_M o' H_V) P_c \quad (A.4-7)$$

A.4.2 - Para Variável de Saída Velocidade do Rotor

A matriz C é constituída de valor nulo em todas as colunas, exceto na posição correspondente a variável de estado W da unidade geradora em análise que é igual a unidade.

APÊNDICE B

Nó e Anti-nó

Considere-se um sistema de potência de configuração como mostrada na figura B.1.

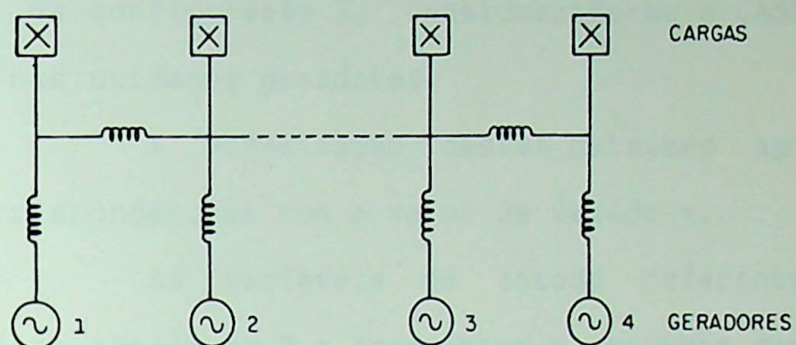


Figura B.1 - Sistema de potência de estrutura longitudinal

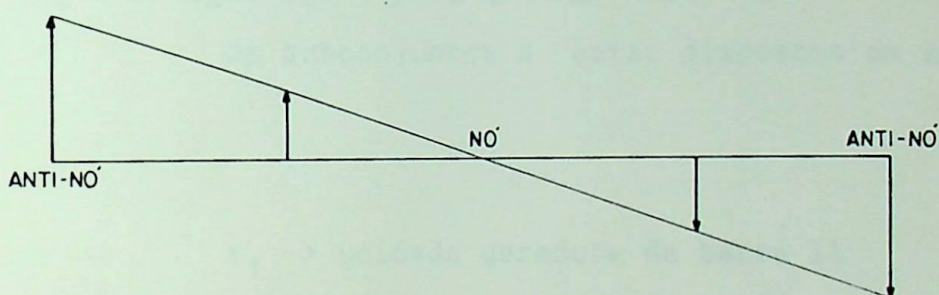


Figura B.2 - "Mode-Shape"

A figura B.2 mostra o "Mode-Shape" para o modo de oscilação de menor frequência do sistema de potência de estrutura longitudinal. O nó e o anti-nó, podem ser entendida como aqueles indicados na figura B.2.

APÊNDICE C

C.1 - Matrizes de Estado, de Entrada e Saída do Exemplo 1

As matrizes listadas a seguir, correspondem ao caso exemplo da configuração 1, considerando-se o CASO BASE, ou seja sem SAE nas unidades geradoras.

A organização dessas matrizes apresenta as seguintes correspondências com o vetor de estado x .

As variáveis de estado referentes a cada unidade geradora totalizam 8 e apresentam a seguinte sequência.

$$x_1 = [E'q_1, E''q_1, E''d_1, W_1, \delta_1, Vr_1, Efd_1, Vso_1]'$$

Os subconjuntos x estão dispostos da seguinte maneira:

x_1 -> unidade geradora da barra 11

x_2 -> unidade geradora da barra 09

x_3 -> unidade geradora da barra 08

x_4 -> unidade geradora da barra 01

x_5 -> unidade geradora da barra 05

O vetor de estado completo é composto da seguinte maneira

$$x = [x_1', x_2', x_3', x_4', x_5']' \text{ cuja dimensão é igual a 40.}$$

Matriz de Estado DIM(40x40)									
VE N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	- .99999996D-01	- .2252673D+00	- .1391379D-01	0.0	- .1449814D+00	0.0	0.99999996D-01	0.0	0.0
2	0.50000000D+02	- .5603394D+02	- .3726910D+00	0.0	- .3883433D+01	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.3602675D+01	- .1083282D+03	0.0	0.3895435D+02	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	- .1546826D+00	0.1248749D+00	0.0	- .1856611D+00	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.3769910D+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	- .9779600D+03	- .5383701D+03	0.0	0.1748733D+03	- .6666667D+01	0.0	- .2000000D+04	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9999997D+02	- .9999997D+02	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1999999D+01	- .1999999D+01	- .5000000D+01	0.0
9	0.0	0.6368446D-01	- .3756600D-01	0.0	0.6237517D-01	0.0	0.0	0.0	- .1666666D+00
10	0.0	0.6507906D+00	- .3838864D+00	0.0	0.6374109D+00	0.0	0.0	0.0	0.3333333D+02
11	0.0	0.7622888D+01	0.1292284D+02	0.0	- .1022626D+02	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.6935820D-03	- .4600929D-01	0.0	0.4699422D-01	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	- .8219423D+02	- .1823654D+02	0.0	- .1273730D+02	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.6368446D-01	- .3756608D-01	0.0	0.6237525D-01	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.6507906D+00	- .3838872D+00	0.0	0.6374117D+00	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.7622899D+01	0.1292284D+02	0.0	- .1022625D+02	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.6935604D-03	- .4600930D-01	0.0	0.4699422D-01	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	- .8219421D+02	- .1823654D+02	0.0	- .1273734D+02	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.5298207D-01	- .3129291D-01	0.0	0.5193338D-01	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.5414230D+00	- .3197817D+00	0.0	0.5307064D+00	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.6349948D+01	0.1075111D+02	0.0	- .8504632D+01	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0.0	0.2596080D-03	- .3843307D-01	0.0	0.3913422D-01	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	- .6853860D+02	- .1455618D+02	0.0	- .1128200D+02	0.0	0.0	0.0	0.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	0.0	0.3261306D-02	- .4528474D-02	0.0	0.5839765D-02	0.0	0.0	0.0	0.0
34	0.0	0.332722D-01	- .4627638D-01	0.0	0.5967646D-01	0.0	0.0	0.0	0.0
35	0.0	0.9189163D+00	0.6617831D+00	0.0	- .3226759D+00	0.0	0.0	0.0	0.0
36	0.0	- .7560267D-03	- .3094390D-02	0.0	0.2855355D-02	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	- .6354058D+01	0.8072281D-01	0.0	- .2498529D+01	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA C-1 - MATRIZ DE ESTADO

Matriz de Estado DIM(40x40)									
VE N°	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0.3989021D-01	-5808538D-03	0.0	0.2418929D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3989023D-01
2	0.1068488D+01	-1555859D-01	0.0	0.6479276D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1068488D+01
3	0.1503996D+00	0.1032872D+02	0.0	-9933168D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1503885D+00
4	0.1301868D-01	-3637158D-01	0.0	0.4300292D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1301872D-01
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	-1346161D+03	-8026398D+02	0.0	-1846619D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	-1346160D+03
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	-4272487D+00	-1858604D-01	0.0	-3323032D+00	0.0	0.1666666D+00	0.0	0.0	0.1242787D+00
10	-3769937D+02	-1899304D+00	0.0	-3395801D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1270002D+01
11	0.3771478D+01	-1200305D+03	0.0	0.4758420D+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3771457D+01
12	-2016626D+00	0.1163209D+00	0.0	-2323087D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3042247D-01
13	0.0	0.0	0.3769910D+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	-3897163D+03	-3350310D+03	0.0	0.9427260D+02	-9999997D+01	0.0	-9999995D+03	0.0	-1178670D+03
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1562500D+01	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2187499D+00	-1562500D+01	-2000000D+01	0.0	0.0
17	0.1242787D+00	-1858618D-01	0.0	0.9164119D-01	0.0	0.0	0.0	-1666666D+00	-4272490D+00
18	0.1270002D+01	-1899318D+00	0.0	0.9364803D+00	0.0	0.0	0.0	0.3333333D+02	-3769937D+02
19	0.3771505D+01	0.2521861D+02	0.0	-2223656D+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3771478D+01
20	0.3042242D-01	-7204288D-01	0.0	0.8792353D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	-2016628D+00
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	-1178671D+03	-8112729D+02	0.0	0.8911255D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	-3897161D+03
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.5086723D-01	-1413606D-01	0.0	0.4384367D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5086725D-01
26	0.5198115D+00	-1444561D+00	0.0	0.4480378D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5198116D+00
27	0.2868486D+01	0.1032196D+02	0.0	-8316777D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2868475D+01
28	0.8770164D-02	-3178829D-01	0.0	0.3603936D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8770198D-02
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	-5355173D+02	-2731784D+02	0.0	-5209671D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	-5355168D+02
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	0.3710377D-02	-3026391D-02	0.0	0.5134113D-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3710381D-02
34	0.3791626D-01	-3092663D-01	0.0	0.5246541D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3791631D-01
35	0.6141142D+00	0.7529083D+00	0.0	-3668471D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6141134D+00
36	0.6234716D-04	-2732336D-02	0.0	0.2688182D-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6235042D-04
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	-5283014D+01	-1347501D+01	0.0	-1821431D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	-5283013D+01
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA C-1 - (CONTINUAÇÃO)

Matriz de Estado DIM(40x40)									
VE N°	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	- .5808109D-03	0.0	0.2418929D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3300890D-01	- .3566659D-02
2	- .1555745D-01	0.0	0.6479276D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8841675D+00	- .9553552D-01
3	0.1032872D+02	0.0	- .9933316D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9235100D+00	0.8546947D+01
4	- .3637159D-01	0.0	0.4300289D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7974334D-02	- .3114517D-01
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	- .8026411D+02	0.0	- .1846649D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	- .1177536D+03	- .5609630D+02
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	- .1858595D-01	0.0	0.9164113D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4934384D-01	- .1877486D-01
10	- .1899296D+00	0.0	0.9364797D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5042439D+00	- .1918600D+00
11	0.2521861D+02	0.0	- .2223657D+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3809791D+01	0.1001283D+02
12	- .7204288D-01	0.0	0.8792353D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6025720D-02	- .3229883D-01
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	- .8112744D+02	0.0	0.8911148D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	- .5565508D+02	- .2272798D+02
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	- .1858605D-01	0.0	- .3323035D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4934376D-01	- .1877491D-01
18	- .1899306D+00	0.0	- .3395804D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5042431D+00	- .1918605D+00
19	- .1200306D+03	0.0	0.4758412D+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3809800D+01	0.1001282D+02
20	0.1163208D+00	0.0	- .2323087D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6025709D-02	- .3229880D-01
21	0.0	0.3769910D+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	- .3350315D+03	0.0	0.9427264D+02	- .9999997D+01	0.0	- .9999995D+03	0.0	- .5565506D+02	- .2272798D+02
23	0.0	0.0	0.0	0.1562500D+01	- .1562500D+01	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.2187499D+00	- .2187499D+00	- .2000000D+01	0.0	0.0	0.0
25	- .1413600D-01	0.0	0.4384359D-01	0.0	0.0	0.0	- .1666666D+00	- .3722153D+00	- .2196775D-01
26	- .1444556D+00	0.0	0.4480370D+00	0.0	0.0	0.0	0.3333333D+02	- .3713698D+02	- .2244881D+00
27	0.1032197D+02	0.0	- .8316757D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4457690D+01	- .1088631D+03
28	- .3178828D-01	0.0	0.3603928D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	- .1841228D+00	0.8666801D-01
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	- .2731789D+02	0.0	- .5209671D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	- .4413164D+03	- .3712512D+03
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	- .3026387D-02	0.0	0.5134106D-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4512455D-02	- .3653135D-02
34	- .3092659D-01	0.0	0.5246535D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4611270D-01	- .3733131D-01
35	0.7529092D+00	0.0	- .3668464D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7412928D+00	0.9156660D+00
36	- .2732337D-02	0.0	0.2688177D-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8774921D-04	- .3312803D-02
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	- .1347507D+01	0.0	- .1821431D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	- .6399896D+01	- .1657395D+01
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA C-1 - (CONTINUAÇÃO)

Matriz de Estado DIM(40x40)										
VE N°	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
1	0.0	0.2286125D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7767177D-01	- .2666162D-01	0.0	
2	0.0	0.6123552D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2080496D+01	- .7141508D+00	0.0	
3	0.0	- .7820795D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6903450D+01	0.2011145D+02	0.0	
4	0.0	0.3515377D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2196822D-02	- .7948989D-01	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	- .1421660D+02	0.0	0.0	0.0	0.0	- .3147300D+03	- .7089409D+02	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.4732782D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1087545D+00	- .7228261D-01	0.0	
10	0.0	0.4836422D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1111361D+01	- .7386554D+00	0.0	
11	0.0	- .7561263D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1466758D+02	0.2206844D+02	0.0	
12	0.0	0.3513898D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	- .3134649D-02	- .8120674D-01	0.0	
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14	0.0	- .1042313D+02	0.0	0.0	0.0	0.0	- .1466832D+03	- .2437640D+02	0.0	
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17	0.0	0.4732778D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1087544D+00	- .7228279D-01	0.0	
18	0.0	0.4836418D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1111360D+01	- .7386568D+00	0.0	
19	0.0	- .7561238D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1466761D+02	0.2206842D+02	0.0	
20	0.0	0.3513890D-01	0.0	0.0	0.0	0.0	- .3134668D-02	- .8120674D-01	0.0	
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
22	0.0	- .1042317D+02	0.0	0.0	0.0	0.0	- .1466832D+03	- .2437643D+02	0.0	
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
25	0.0	- .29333427D+00	0.0	0.1666666D+00	0.0	0.0	0.1396780D+00	- .7457751D-01	0.0	
26	0.0	- .2997664D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1427367D+01	- .7621068D+00	0.0	
27	0.0	0.3735721D+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1513326D+02	0.2834341D+02	0.0	
28	0.0	- .1928536D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4927136D-02	- .9877735D-01	0.0	
29	0.3769910D+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
30	0.0	0.1042618D+03	- .9999997D+01	0.0	- .9999995D+03	0.0	- .1745898D+03	- .4501834D+02	0.0	
31	0.0	0.0	0.1562500D+01	- .1562500D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
32	0.0	0.0	0.2187499D+00	- .2187499D+00	- .2000000D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	
33	0.0	0.6222539D-02	0.0	0.0	0.0	- .1666666D+00	- .7688951D-01	- .1778708D+00	0.0	
34	0.0	0.6358796D-01	0.0	0.0	0.0	0.3333333D+02	- .3411905D+02	- .1817657D+01	0.0	
35	0.0	- .4609006D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3609348D+02	- .4893571D+02	0.0	
36	0.0	0.3292894D-02	0.0	0.0	0.0	0.0	- .1666080D+00	- .1278079D+00	0.0	
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3769910D+03	
38	0.0	- .2134117D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	- .7054324D+03	- .6131433D+03	0.0	
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

TABELA C-1 - (CONTINUAÇÃO)

Matriz de Estado DIM(40x40)									
VE N°	37	38	39	40					
1	0.7374173D-01	0.0	0.0	0.0					
2	0.1975227D+01	0.0	0.0	0.0					
3	- .1126735D+02	0.0	0.0	0.0					
4	0.6450206D-01	0.0	0.0	0.0					
5	0.0	0.0	0.0	0.0					
6	- .1569635D+03	0.0	0.0	0.0					
7	0.0	0.0	0.0	0.0					
8	0.0	0.0	0.0	0.0					
9	0.1309589D+00	0.0	0.0	0.0					
10	0.1338267D+01	0.0	0.0	0.0					
11	- .7560122D+01	0.0	0.0	0.0					
12	0.6225198D-01	0.0	0.0	0.0					
13	0.0	0.0	0.0	0.0					
14	- .8002298D+02	0.0	0.0	0.0					
15	0.0	0.0	0.0	0.0					
16	0.0	0.0	0.0	0.0					
17	0.1309590D+00	0.0	0.0	0.0					
18	0.1338267D+01	0.0	0.0	0.0					
19	- .7560078D+01	0.0	0.0	0.0					
20	0.6225194D-01	0.0	0.0	0.0					
21	0.0	0.0	0.0	0.0					
22	- .8002292D+02	0.0	0.0	0.0					
23	0.0	0.0	0.0	0.0					
24	0.0	0.0	0.0	0.0					
25	0.1537223D+00	0.0	0.0	0.0					
26	0.1570886D+01	0.0	0.0	0.0					
27	- .1221912D+02	0.0	0.0	0.0					
28	0.8164096D-01	0.0	0.0	0.0					
29	0.0	0.0	0.0	0.0					
30	- .8256042D+02	0.0	0.0	0.0					
31	0.0	0.0	0.0	0.0					
32	0.0	0.0	0.0	0.0					
33	- .2233044D-01	0.0	0.1665656D+00	0.0					
34	- .2281944D+00	0.0	0.0	0.0					
35	0.1517365D+01	0.0	0.0	0.0					
36	- .1152478D-01	0.0	0.0	0.0					
37	0.0	0.0	0.0	0.0					
38	0.8275025D+01	- .9999997D+01	0.0	- .9999995D+03					
39	0.0	0.1562500D+01	- .1562500D+01	0.0					
40	0.0	0.2187499D+00	- .2187499D+00	- .2000000D+01					

TABELA C-1 - (CONTINUAÇÃO)

Matriz B (40 X 1)					
N°	Correspondente à variável Ref. de Tensão do RAT do Gerador da				
	BARRA 11	BARRA 09	BARRA 08	BARRA 01	BARRA 05
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.200000E+01	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.100000E+01	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.100000E+01	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.100000E+01	0.0
33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.100000E+01
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela C-2. Matriz B

Matriz C Transposta (40 X 1)					
N°	Correspondente à variável de saída Velocidade do rotor do gerador da				
	BARRA 11	BARRA 09	BARRA 08	BARRA 01	BARRA 05
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.100000E+01	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.100000E+01	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.100000E+01	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.100000E+01	0.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.100000E+01
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela C-3. Matriz C para variavel de saída velocidade do rotor w1

Matriz C Transposta (40 X 1)					
N°	Correspondente à variável de saída Pot. Elétrica do Gerador da				
	BARRA 11	BARRA 09	BARRA 08	BARRA 01	BARRA 05
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.154683E+02	-0.610342E-01	-0.610360E-01	-0.228442E-01	0.181447E+01
3	-0.124875E+02	0.404882E+01	0.404882E+01	0.338211E+01	0.742654E+01
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.185661E+02	-0.413549E+01	-0.413549E+01	-0.344381E+01	-0.685286E+01
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	-0.130187E+01	0.177463E+02	-0.267717E+01	-0.771772E+00	-0.149632E+00
11	0.363716E+01	-0.102363E+02	0.633979E+01	0.279737E+01	0.655761E+01
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	-0.430029E+01	0.204432E+02	-0.773728E+01	-0.317146E+01	-0.645164E+01
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	-0.130187E+01	-0.267718E+01	0.177463E+02	-0.771776E+00	-0.149640E+00
19	0.363716E+01	0.633978E+01	-0.102363E+02	0.279737E+01	0.655761E+01
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	-0.430029E+01	-0.773728E+01	0.204432E+02	-0.317146E+01	-0.645163E+01
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	-0.797433E+00	-0.530263E+00	-0.530261E+00	0.162028E+02	-0.201598E+00
27	0.311452E+01	0.284230E+01	0.284230E+01	-0.762681E+01	0.795073E+01
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	-0.351538E+01	-0.309223E+01	-0.309222E+01	0.169711E+02	-0.790295E+01
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	-0.219682E+00	0.275850E+00	0.275852E+00	-0.433586E+00	0.399860E+03
35	0.794900E+01	0.714620E+01	0.714620E+01	0.869241E+01	0.306739E+03
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	-0.645021E+01	-0.547818E+01	-0.547817E+01	-0.718441E+01	0.276595E+02
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela C-4. Matriz C para a variável de saída Pot. Elétrica P1

C.2 - Matriz dos Fatores de Participação (FP) (nxn)

A matriz listada a seguir, corresponde ao exemplo da configuração 1, ou seja, o caso sem SAE nas unidades geradoras.

Cada fila da matriz FP corresponde a cada variável de estado, conforme a sequência mostrada no item C.1.

Cada coluna corresponde a cada autovalor (na mesma sequência) da tabela 4.3.

Matriz de Fatores de Participação DIM(40x40)									
VE N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.2729120D-16	0.8268343D-04	0.6568839D-05	0.4150921D-02	0.2319069D-01	0.2319069D-01	0.8687609D-01	0.9727988D-02	0.9727988D-02
2	0.1663519D-14	0.3528872D-04	0.1170478D-04	0.1169040D-01	0.3770525D-01	0.3770525D-01	0.1002448D-01	0.2136204D-01	0.2136204D-01
3	0.1337835D-12	0.6856911D+00	0.7060980D-01	0.2235865D+00	0.1306759D-02	0.1306759D-02	0.1124588D-02	0.1548990D-01	0.1548990D-01
4	0.1649407D-15	0.1172308D-02	0.1226996D-03	0.8009984D-04	0.2423180D-04	0.2423180D-04	0.1297745D-02	0.3631461D-03	0.3631461D-03
5	0.1649402D-15	0.1172308D-02	0.1226996D-03	0.8009984D-04	0.2423180D-04	0.2423180D-04	0.1297745D-02	0.3631461D-03	0.3631461D-03
6	0.8059676D-17	0.2910098D-04	0.2215540D-05	0.2671886D-02	0.6654729D+00	0.6654729D+00	0.9134183D-01	0.9002106D-02	0.9002106D-02
7	0.2988536D-16	0.2250845D-03	0.1844981D-04	0.1509055D-01	0.1021313D+01	0.1021313D+01	0.2465696D+00	0.2179796D-01	0.2179796D-01
8	0.5297497D-17	0.5587118D-04	0.4674716D-05	0.7041902D-02	0.6648219D+00	0.6648219D+00	0.1794085D+00	0.1938649D-01	0.1938649D-01
9	0.1054661D-07	0.7598917D-06	0.7197616D-07	0.2515373D-04	0.1817132D-05	0.1817132D-05	0.8351641D-04	0.5338568D-03	0.5338568D-03
10	0.1727398D-06	0.4946459D-04	0.1536890D-05	0.7880049D-03	0.6094828D-04	0.6094828D-04	0.4075150D-02	0.1675089D-01	0.1675089D-01
11	0.5016111D+00	0.1597349D+00	0.6598897D-01	0.2509178D+00	0.6473165D-03	0.6473165D-03	0.1498497D-02	0.1676256D-01	0.1676256D-01
12	0.8059948D-03	0.2266023D-03	0.7193673D-04	0.3098274D-04	0.3998494D-06	0.3998494D-06	0.5022591D-04	0.6013486D-04	0.6013486D-04
13	0.8059948D-03	0.2266023D-03	0.7193673D-04	0.3098274D-04	0.3998494D-06	0.3998494D-06	0.5022591D-04	0.6013486D-04	0.6013486D-04
14	0.7753400D-08	0.2565720D-06	0.4218547D-07	0.5622924D-05	0.2341913D-06	0.2341913D-06	0.1502524D-04	0.2447494D-03	0.2447494D-03
15	0.7380035D-08	0.2422287D-06	0.3980576D-07	0.5213160D-05	0.2147927D-06	0.2147927D-06	0.1381611D-04	0.2269204D-03	0.2269204D-03
16	0.8382670D-10	0.4149864D-08	0.7000176D-09	0.2191537D-06	0.1043117D-07	0.1043117D-07	0.1381328D-05	0.3852526D-04	0.3852526D-04
17	0.1054412D-07	0.7598866D-06	0.7197752D-07	0.2515357D-04	0.1817128D-05	0.1817128D-05	0.8351632D-04	0.5338568D-03	0.5338568D-03
18	0.1726814D-06	0.4946432D-04	0.1536939D-05	0.7880003D-03	0.6094817D-04	0.6094817D-04	0.4075144D-02	0.1676254D-01	0.1676254D-01
19	0.5016126D+00	0.1597341D+00	0.6598875D-01	0.2509173D+00	0.6473165D-03	0.6473165D-03	0.1498499D-02	0.1676254D-01	0.1676254D-01
20	0.8059950D-03	0.2266000D-03	0.7193595D-04	0.3098273D-04	0.3998503D-06	0.3998503D-06	0.5022596D-04	0.6013605D-04	0.6013605D-04
21	0.8059950D-03	0.2266000D-03	0.7193595D-04	0.3098273D-04	0.3998503D-06	0.3998503D-06	0.5022596D-04	0.6013605D-04	0.6013605D-04
22	0.7751910D-08	0.2565711D-06	0.4218582D-07	0.5213109D-05	0.2341910D-06	0.2341910D-06	0.1502523D-04	0.2447487D-03	0.2447487D-03
23	0.7378618D-08	0.2422278D-06	0.3980609D-07	0.5213109D-05	0.2147924D-06	0.2147924D-06	0.1381610D-04	0.2269198D-03	0.2269198D-03
24	0.8381081D-10	0.4149849D-08	0.7000233D-09	0.2191515D-06	0.1043115D-07	0.1043115D-07	0.1381327D-05	0.3852515D-04	0.3852515D-04
25	0.6571802D-17	0.7996783D-06	0.5915498D-06	0.2789854D-04	0.1409910D-05	0.1409910D-05	0.6203223D-04	0.6139704D-03	0.6139704D-03
26	0.3564123D-15	0.3850578D-04	0.1409761D-04	0.8735658D-03	0.4742203D-04	0.4742203D-04	0.2927222D-02	0.1858276D-01	0.1858276D-01
27	0.8921870D-14	0.1797861D-02	0.7994275D+00	0.1813341D+00	0.4433112D-03	0.4433112D-03	0.5623491D-03	0.1719148D-01	0.1719148D-01
28	0.7217512D-16	0.2086855D-05	0.9400870D-03	0.2766948D-04	0.2066981D-06	0.2066981D-06	0.4152437D-04	0.1697640D-04	0.1697640D-04
29	0.7217530D-16	0.2086855D-05	0.9400870D-03	0.2766948D-04	0.2066981D-06	0.2066981D-06	0.4152437D-04	0.1697640D-04	0.1697640D-04
30	0.1086060D-18	0.1718563D-07	0.3153662D-06	0.6247781D-05	0.1819854D-06	0.1819854D-06	0.8661936D-05	0.2969570D-03	0.2969570D-03
31	0.1032965D-18	0.1622489D-07	0.2975761D-06	0.5792481D-05	0.1669111D-06	0.1669111D-06	0.7964883D-05	0.2753249D-03	0.2753249D-03
32	0.1139480D-20	0.2775650D-09	0.5233125D-08	0.2435075D-06	0.8105850D-08	0.8105850D-08	0.7963250D-06	0.4674311D-04	0.4674311D-04
33	0.1559354D-17	0.1817679D-06	0.3396183D-10	0.1448804D-04	0.5259083D-06	0.5259083D-06	0.2525465D-03	0.2519102D-01	0.2519102D-01
34	0.9045955D-16	0.8982109D-05	0.5659696D-09	0.3467701D-03	0.1693198D-04	0.1693198D-04	0.7447646D-02	0.7856651D+00	0.7856651D+00
35	0.6056869D-15	0.1392736D-04	0.4439125D-03	0.7463484D-01	0.3338105D-03	0.3338105D-03	0.5468651D-01	0.7138299D+00	0.7138299D+00
36	0.8741430D-18	0.3438533D-06	0.2706542D-06	0.1570323D-04	0.7657082D-06	0.7657082D-06	0.5393527D-04	0.6523777D-03	0.6523777D-03
37	0.8741706D-18	0.3438533D-06	0.2706542D-06	0.1570323D-04	0.7657082D-06	0.7657082D-06	0.5393527D-04	0.6523777D-03	0.6523777D-03
38	0.5215108D-20	0.9626281D-09	0.2330798D-10	0.6058585D-05	0.6827379D-07	0.6827379D-07	0.7682714D-04	0.1174672D-01	0.1174672D-01
39	0.4928880D-20	0.9088135D-09	0.2199304D-10	0.5626345D-05	0.6261851D-07	0.6261851D-07	0.7064462D-04	0.1089102D-01	0.1089102D-01
40	0.4106365D-22	0.1556982D-10	0.3867098D-12	0.2365234D-06	0.3040998D-08	0.3040998D-08	0.7063013D-05	0.1849016D-02	0.1849016D-02

TABELA C-4

Matriz de Fatores de Participação DIM(40x40)									
VE N°	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0.3224595D-02	0.2687342D-06	0.3097169D-16	0.2498523D-03	0.2498523D-03	0.2971971D-03	0.2971971D-03	0.3215950D-06	0.3215950D-06
2	0.9496893D-02	0.4012328D-05	0.1470457D-15	0.1059803D-03	0.1059803D-03	0.1698046D-03	0.1698046D-03	0.3683822D-06	0.3683822D-06
3	0.4344911D-03	0.1010029D-05	0.1333002D-17	0.4766225D-04	0.4766225D-04	0.2539555D-04	0.2539555D-04	0.2832156D-06	0.2832156D-06
4	0.5262263D-04	0.8771194D-08	0.4350676D-18	0.9549461D-05	0.9549461D-05	0.2164163D-04	0.2164163D-04	0.1553271D-06	0.1553271D-06
5	0.5262263D-04	0.8771194D-08	0.4351139D-18	0.9549461D-05	0.9549461D-05	0.2164163D-04	0.2164163D-04	0.1553271D-06	0.1553271D-06
6	0.2664563D-02	0.1570270D-06	0.2305886D-16	0.7703385D-04	0.7703385D-04	0.9896263D-04	0.9896263D-04	0.1275000D-06	0.1275000D-06
7	0.6607752D-02	0.3871893D-06	0.5671908D-16	0.2227572D-03	0.2227572D-03	0.2777255D-03	0.2777255D-03	0.3547659D-06	0.3547659D-06
8	0.6300991D-02	0.3603846D-06	0.5171131D-16	0.2563123D-03	0.2563123D-03	0.3199942D-03	0.3199942D-03	0.4091152D-06	0.4091152D-06
9	0.3854597D-02	0.1638604D-02	0.6892159D-02	0.9197402D-03	0.9197402D-03	0.7710057D-02	0.7710057D-02	0.2188632D-02	0.2188632D-02
10	0.3507682D+00	0.1382823D+00	0.5138904D+00	0.4342664D-03	0.4342664D-03	0.3655641D-02	0.3655641D-02	0.1009362D-02	0.1009362D-02
11	0.6460334D-03	0.1304442D-05	0.2442888D-04	0.1153742D-03	0.1153742D-03	0.1905845D-03	0.1905845D-03	0.3264942D-04	0.3264942D-04
12	0.8847324D-03	0.5654215D-03	0.2879214D-02	0.2946145D-04	0.2946145D-04	0.1785846D-03	0.1785846D-03	0.2033971D-04	0.2033971D-04
13	0.8847324D-03	0.5654215D-03	0.2879214D-02	0.2946145D-04	0.2946145D-04	0.1785846D-03	0.1785846D-03	0.2033971D-04	0.2033971D-04
14	0.1622253D-02	0.3072604D-03	0.7179598D-03	0.8990193D-02	0.8990193D-02	0.1706213D+00	0.1706213D+00	0.7854705D-01	0.7854705D-01
15	0.1530824D-02	0.2883140D-03	0.6710087D-03	0.6400171D-03	0.6400171D-03	0.1129996D-01	0.1129996D-01	0.5906006D-02	0.5906006D-02
16	0.3300354D-03	0.5735409D-04	0.1248739D-03	0.9701760D-02	0.9701760D-02	0.1739078D+00	0.1739078D+00	0.7868937D-01	0.7868937D-01
17	0.3854601D-02	0.1638609D-02	0.6892156D-02	0.9197392D-03	0.9197392D-03	0.7710041D-02	0.7710041D-02	0.2188625D-02	0.2188625D-02
18	0.3507683D+00	0.1382826D+00	0.5138901D+00	0.4342659D-03	0.4342659D-03	0.3655634D-02	0.3655634D-02	0.1009358D-02	0.1009358D-02
19	0.6460324D-03	0.1304400D-05	0.2442917D-04	0.1153743D-03	0.1153743D-03	0.1905848D-03	0.1905848D-03	0.3264935D-04	0.3264935D-04
20	0.8847349D-03	0.5654238D-03	0.2879219D-02	0.2946148D-04	0.2946148D-04	0.1785857D-03	0.1785857D-03	0.2034024D-04	0.2034024D-04
21	0.8847349D-03	0.5654238D-03	0.2879219D-02	0.2946148D-04	0.2946148D-04	0.1785857D-03	0.1785857D-03	0.2034024D-04	0.2034024D-04
22	0.1622254D-02	0.3072608D-03	0.7179584D-03	0.8990182D-02	0.8990182D-02	0.1706209D+00	0.1706209D+00	0.7854679D-01	0.7854679D-01
23	0.1530825D-02	0.2883144D-03	0.6710074D-03	0.6400163D-03	0.6400163D-03	0.1129994D-01	0.1129994D-01	0.5905986D-02	0.5905986D-02
24	0.3300355D-03	0.5735417D-04	0.1248737D-03	0.9701749D-02	0.9701749D-02	0.1739074D+00	0.1739074D+00	0.7868910D-01	0.7868910D-01
25	0.2768736D-02	0.8955540D-02	0.1201975D-15	0.1095715D-02	0.1095715D-02	0.6685330D-02	0.6685330D-02	0.9937683D-02	0.9937683D-02
26	0.2520396D+00	0.7479291D+00	0.6116677D-14	0.5198615D-03	0.5198615D-03	0.3168538D-02	0.3168538D-02	0.4556497D-02	0.4556497D-02
27	0.5643203D-03	0.7454918D-05	0.1318854D-15	0.1204939D-03	0.1204939D-03	0.1480477D-03	0.1480477D-03	0.1773118D-03	0.1773118D-03
28	0.5974535D-03	0.3013425D-02	0.1160111D-15	0.8616775D-05	0.8616775D-05	0.6484204D-04	0.6484204D-04	0.8778343D-04	0.8778343D-04
29	0.5974535D-03	0.3013425D-02	0.1160112D-15	0.8616775D-05	0.8616775D-05	0.6484204D-04	0.6484204D-04	0.8778343D-04	0.8778343D-04
30	0.1164719D-02	0.1754787D-02	0.5266514D-16	0.1072483D-01	0.1072483D-01	0.1479457D+00	0.1479457D+00	0.3561283D+00	0.3561283D+00
31	0.1099076D-02	0.1646582D-02	0.4922091D-16	0.7635067D-03	0.7635067D-03	0.9798194D-02	0.9798194D-02	0.2677753D-01	0.2677753D-01
32	0.2369953D-03	0.3275534D-03	0.9159849D-17	0.1157369D-01	0.1157369D-01	0.1507954D+00	0.1507954D+00	0.3567736D+00	0.3567736D+00
33	0.7735410D-03	0.6200758D-06	0.1307121D-13	0.5144250D-01	0.5144250D-01	0.1252540D-02	0.1252540D-02	0.4074919D-05	0.4074919D-05
34	0.6495060D-01	0.3391306D-03	0.5250533D-12	0.2429137D-01	0.2429137D-01	0.5997764D-03	0.5997764D-03	0.1956218D-05	0.1956218D-05
35	0.1786068D-03	0.1491851D-03	0.1900376D-12	0.7238504D-02	0.7238504D-02	0.5230893D-04	0.5230893D-04	0.3110702D-07	0.3110702D-07
36	0.2541191D-03	0.8814980D-05	0.6543377D-15	0.1380068D-03	0.1380068D-03	0.4964619D-04	0.4964619D-04	0.3352357D-07	0.3352357D-07
37	0.2541191D-03	0.8814980D-05	0.6543255D-15	0.1380068D-03	0.1380068D-03	0.4964619D-04	0.4964619D-04	0.3352357D-07	0.3352357D-07
38	0.3597192D-03	0.2938428D-06	0.6817760D-14	0.5023330D+00	0.5023330D+00	0.2774418D-01	0.2774418D-01	0.1473250D-03	0.1473250D-03
39	0.3394457D-03	0.2757237D-06	0.6371973D-14	0.3576138D-01	0.3576138D-01	0.1837450D-02	0.1837450D-02	0.1107746D-04	0.1107746D-04
40	0.7318221D-04	0.5484952D-07	0.1185854D-14	0.5420923D+00	0.5420923D+00	0.2827859D-01	0.2827859D-01	0.1475919D-03	0.1475919D-03

TABELA C-4 (CONTINUAÇÃO)

Matriz de Fatores de Participação DIM(40x40)										
VE N.	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
1	0.1066367D-16	0.1066367D-16	0.4360977D-02	0.4360977D-02	0.1421245D-03	0.1421245D-03	0.4604998D-15	0.4604998D-15	0.3426301D-01	
2	0.2473170D-16	0.2473170D-16	0.5048980D-02	0.5048980D-02	0.3566451D-04	0.3566451D-04	0.7852493D-15	0.7852493D-15	0.4701707D-02	
3	0.2457107D-16	0.2457107D-16	0.9754082D-02	0.9754082D-02	0.1036452D-03	0.1036452D-03	0.1906874D-14	0.1906874D-14	0.1147582D-02	
4	0.1073545D-15	0.1073545D-15	0.3325166D+00	0.3325166D+00	0.2975178D-02	0.2975178D-02	0.3331868D-13	0.3331868D-13	0.1513153D+00	
5	0.1073545D-15	0.1073545D-15	0.3325166D+00	0.3325166D+00	0.2975178D-02	0.2975178D-02	0.3331868D-13	0.3331868D-13	0.1513153D+00	
6	0.5196569D-17	0.5196569D-17	0.1158989D-02	0.1158989D-02	0.1649526D-04	0.1649526D-04	0.1012661D-15	0.1012661D-15	0.5629153D-02	
7	0.1439877D-16	0.1439877D-16	0.5117198D-02	0.5117198D-02	0.7124278D-04	0.7124278D-04	0.4023672D-15	0.4023672D-15	0.3152486D-01	
8	0.1661385D-16	0.1661385D-16	0.4364864D-02	0.4364864D-02	0.6176602D-04	0.6176602D-04	0.3619366D-15	0.3619366D-15	0.2255359D-01	
9	0.4838709D-02	0.4838709D-02	0.2051325D-02	0.2051325D-02	0.3097018D-02	0.3097018D-02	0.1086074D-01	0.1086074D-01	0.4246520D-02	
10	0.2157521D-02	0.2157521D-02	0.1207214D-02	0.1207214D-02	0.2050333D-02	0.2050333D-02	0.7735790D-02	0.7735790D-02	0.2125646D-02	
11	0.1044568D-03	0.1044568D-03	0.7047044D-03	0.7047044D-03	0.1240209D-02	0.1240209D-02	0.6505469D-02	0.6505469D-02	0.3731675D-03	
12	0.1430739D-03	0.1430739D-03	0.5085146D-01	0.5085146D-01	0.7868243D-01	0.7868243D-01	0.2524823D+00	0.2524823D+00	0.1023556D+00	
13	0.1430739D-03	0.1430739D-03	0.5085146D-01	0.5085146D-01	0.7868243D-01	0.7868243D-01	0.2524823D+00	0.2524823D+00	0.1023556D+00	
14	0.2558870D+00	0.2558870D+00	0.1989596D-03	0.1989596D-03	0.4020850D-03	0.4020850D-03	0.1826187D-03	0.1826187D-03	0.5265779D-03	
15	0.2541145D+00	0.2541145D+00	0.2077412D-01	0.2077412D-01	0.4416802D-03	0.4416802D-03	0.4927702D-03	0.4927702D-03	0.3958538D-02	
16	0.4838721D-02	0.4838721D-02	0.2051319D-02	0.2051319D-02	0.3097022D-02	0.3097022D-02	0.1086076D-01	0.1086076D-01	0.4246517D-02	
17	0.2157526D-02	0.2157526D-02	0.1207212D-02	0.1207212D-02	0.2050339D-02	0.2050339D-02	0.7735813D-02	0.7735813D-02	0.2125646D-02	
18	0.1044568D-03	0.1044568D-03	0.7046982D-03	0.7046982D-03	0.1240205D-02	0.1240205D-02	0.6505448D-02	0.6505448D-02	0.3731660D-03	
19	0.1430724D-03	0.1430724D-03	0.5085125D-01	0.5085125D-01	0.7868245D-01	0.7868245D-01	0.2524826D+00	0.2524826D+00	0.1023555D+00	
20	0.1430724D-03	0.1430724D-03	0.5085125D-01	0.5085125D-01	0.7868245D-01	0.7868245D-01	0.2524826D+00	0.2524826D+00	0.1023555D+00	
21	0.1430724D-03	0.1430724D-03	0.5085125D-01	0.5085125D-01	0.7868245D-01	0.7868245D-01	0.2524826D+00	0.2524826D+00	0.1023555D+00	
22	0.2558876D+00	0.2558876D+00	0.1989709D-03	0.1989709D-03	0.4020901D-03	0.4020901D-03	0.1826176D-03	0.1826176D-03	0.5265786D-03	
23	0.2077417D-01	0.2077417D-01	0.1989703D-03	0.1989703D-03	0.4416858D-03	0.4416858D-03	0.4927674D-03	0.4927674D-03	0.3653870D-02	
24	0.2541151D+00	0.2541151D+00	0.2133687D-03	0.2133687D-03	0.1387065D-01	0.1387065D-01	0.1456035D-14	0.1456035D-14	0.3011839D-02	
25	0.3997206D-15	0.3997206D-15	0.2887936D-02	0.2887936D-02	0.8517377D-02	0.8517377D-02	0.1006068D-14	0.1006068D-14	0.1526089D-02	
26	0.1477216D-15	0.1477216D-15	0.1707169D-02	0.1707169D-02	0.5757499D-02	0.5757499D-02	0.4011429D-15	0.4011429D-15	0.2879754D-03	
27	0.4298892D-16	0.4298892D-16	0.1008183D-02	0.1008183D-02	0.3438831D+00	0.3438831D+00	0.4044608D-13	0.4044608D-13	0.6985631D-01	
28	0.2479242D-15	0.2479242D-15	0.7211734D-01	0.7211734D-01	0.3438831D+00	0.3438831D+00	0.4044608D-13	0.4044608D-13	0.6985631D-01	
29	0.2479242D-15	0.2479242D-15	0.7211734D-01	0.7211734D-01	0.3438831D+00	0.3438831D+00	0.4044608D-13	0.4044608D-13	0.6985631D-01	
30	0.2102755D-13	0.2102755D-13	0.8424652D-04	0.8424652D-04	0.2669148D-03	0.2669148D-03	0.5537495D-16	0.5537495D-16	0.3832395D-03	
31	0.1707113D-14	0.1707113D-14	0.2766481D-03	0.2766481D-03	0.8052064D-03	0.8052064D-03	0.1278549D-15	0.1278549D-15	0.2880995D-02	
32	0.2088190D-13	0.2088190D-13	0.2966666D-03	0.2966666D-03	0.8844988D-03	0.8844988D-03	0.1494217D-15	0.1494217D-15	0.2659256D-02	
33	0.1544196D-16	0.1544196D-16	0.2776360D-04	0.2776360D-04	0.6816145D-05	0.6816145D-05	0.1193690D-17	0.1193690D-17	0.8457028D-02	
34	0.5446601D-17	0.5446601D-17	0.1795387D-04	0.1795387D-04	0.6525925D-05	0.6525925D-05	0.3424896D-18	0.3424896D-18	0.2257784D-02	
35	0.3782656D-17	0.3782656D-17	0.8787427D-05	0.8787427D-05	0.4157775D-06	0.4157775D-06	0.4767127D-16	0.4767127D-16	0.8794903D-03	
36	0.5775236D-17	0.5775236D-17	0.4462617D-03	0.4462617D-03	0.1479816D-03	0.1479816D-03	0.2867774D-15	0.2867774D-15	0.8552507D-01	
37	0.5775081D-17	0.5775081D-17	0.4462617D-03	0.4462617D-03	0.1479816D-03	0.1479816D-03	0.2867774D-15	0.2867774D-15	0.8552507D-01	
38	0.8046954D-15	0.8046954D-15	0.1717512D-05	0.1717512D-05	0.1778885D-05	0.1778885D-05	0.4179270D-18	0.4179270D-18	0.2775586D-03	
39	0.6532878D-16	0.6532878D-16	0.5639954D-05	0.5639954D-05	0.5366392D-05	0.5366392D-05	0.9664247D-18	0.9664247D-18	0.2086541D-02	
40	0.7991284D-15	0.7991284D-15	0.6048066D-05	0.6048066D-05	0.5894846D-05	0.5894846D-05	0.1126252D-17	0.1126252D-17	0.1925949D-02	

TABELA C-4 (CONTINUAÇÃO)

Matriz de Fatores de Participação DIM(40x40)										
VE N°	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
1	0.3426301D-01	0.5484751D+00	0.5484751D+00	0.3928672D-02	0.3928672D-02	0.1071813D-01	0.1071813D-01	0.1011719D-04	0.1011719D-04	0.1011719D-04
2	0.4701707D-02	0.3738226D-01	0.3738226D-01	0.1317514D-03	0.1317514D-03	0.2091772D-03	0.2091772D-03	0.1627658D-07	0.1627658D-07	0.1627658D-07
3	0.1147582D-02	0.2944238D-02	0.2944238D-02	0.4199581D-04	0.4199581D-04	0.3168336D-04	0.3168336D-04	0.3527236D-08	0.3527236D-08	0.3527236D-08
4	0.1513153D+00	0.1505269D-01	0.1505269D-01	0.7722458D-02	0.7722458D-02	0.3936342D-03	0.3936342D-03	0.1859994D-01	0.1859994D-01	0.1859994D-01
5	0.1513153D+00	0.1505269D-01	0.1505269D-01	0.7722458D-02	0.7722458D-02	0.3936342D-03	0.3936342D-03	0.1859994D-01	0.1859994D-01	0.1859994D-01
6	0.5629153D-02	0.5348737D-01	0.5348737D-01	0.4101705D-03	0.4101705D-03	0.9743134D-03	0.9743134D-03	0.8255275D-06	0.8255275D-06	0.8255275D-06
7	0.3152486D-01	0.4587897D+00	0.4587897D+00	0.3726468D-02	0.3726468D-02	0.8344259D-02	0.8344259D-02	0.6659262D-05	0.6659262D-05	0.6659262D-05
8	0.2255359D-01	0.3299154D+00	0.3299154D+00	0.1328843D-02	0.1328843D-02	0.1955436D-02	0.1955436D-02	0.4705312D-08	0.4705312D-08	0.4705312D-08
9	0.4246520D-02	0.8467770D-02	0.8467770D-02	0.6822392D-02	0.6822392D-02	0.1868496D+00	0.1868496D+00	0.1944259D-04	0.1944259D-04	0.1944259D-04
10	0.2125646D-02	0.1154848D-02	0.1154848D-02	0.2701688D-03	0.2701688D-03	0.6101012D-02	0.6101012D-02	0.9288677D-07	0.9288677D-07	0.9288677D-07
11	0.3731675D-03	0.4688327D-03	0.4688327D-03	0.8961951D-04	0.8961951D-04	0.3967646D-03	0.3967646D-03	0.5401770D-09	0.5401770D-09	0.5401770D-09
12	0.1023556D+00	0.3641298D-02	0.3641298D-02	0.3807935D-02	0.3807935D-02	0.2015681D-02	0.2015681D-02	0.1698158D-01	0.1698158D-01	0.1698158D-01
13	0.1023556D+00	0.3641298D-02	0.3641298D-02	0.3807935D-02	0.3807935D-02	0.2015681D-02	0.2015681D-02	0.1698158D-01	0.1698158D-01	0.1698158D-01
14	0.5265779D-03	0.3961982D-03	0.3961982D-03	0.5444850D-04	0.5444850D-04	0.2206936D-02	0.2206936D-02	0.7853878D-06	0.7853878D-06	0.7853878D-06
15	0.3958538D-02	0.8708282D-02	0.8708282D-02	0.4118768D-02	0.4118768D-02	0.1720086D+00	0.1720086D+00	0.6000382D-04	0.6000382D-04	0.6000382D-04
16	0.3653865D-02	0.9535750D-02	0.9535750D-02	0.3370647D-02	0.3370647D-02	0.9387511D-01	0.9387511D-01	0.9792404D-07	0.9792404D-07	0.9792404D-07
17	0.4246517D-02	0.8467763D-02	0.8467763D-02	0.6822402D-02	0.6822402D-02	0.1868495D+00	0.1868495D+00	0.2903058D-04	0.2903058D-04	0.2903058D-04
18	0.2125646D-02	0.1154846D-02	0.1154846D-02	0.2701698D-03	0.2701698D-03	0.6101010D-02	0.6101010D-02	0.1357792D-06	0.1357792D-06	0.1357792D-06
19	0.3731660D-03	0.4688333D-03	0.4688333D-03	0.8961938D-04	0.8961938D-04	0.3967637D-03	0.3967637D-03	0.8281571D-09	0.8281571D-09	0.8281571D-09
20	0.1023555D+00	0.3641296D-02	0.3641296D-02	0.3807932D-02	0.3807932D-02	0.2015680D-02	0.2015680D-02	0.1698155D-01	0.1698155D-01	0.1698155D-01
21	0.1023555D+00	0.3641296D-02	0.3641296D-02	0.3807932D-02	0.3807932D-02	0.2015680D-02	0.2015680D-02	0.1698155D-01	0.1698155D-01	0.1698155D-01
22	0.5265786D-03	0.3961978D-03	0.3961978D-03	0.5444834D-04	0.5444834D-04	0.2206934D-02	0.2206934D-02	0.1119859D-05	0.1119859D-05	0.1119859D-05
23	0.3958543D-02	0.8708273D-02	0.8708273D-02	0.4118756D-02	0.4118756D-02	0.1720085D+00	0.1720085D+00	0.8555746D-04	0.8555746D-04	0.8555746D-04
24	0.3653870D-02	0.9535740D-02	0.9535740D-02	0.3370637D-02	0.3370637D-02	0.9387506D-01	0.9387506D-01	0.1396266D-06	0.1396266D-06	0.1396266D-06
25	0.3011839D-02	0.6218368D-02	0.6218368D-02	0.8542529D-02	0.8542529D-02	0.1519076D+00	0.1519076D+00	0.1705711D-04	0.1705711D-04	0.1705711D-04
26	0.1526089D-02	0.8335368D-03	0.8335368D-03	0.3403990D-03	0.3403990D-03	0.4951682D-02	0.4951682D-02	0.7805816D-07	0.7805816D-07	0.7805816D-07
27	0.2879754D-03	0.3562692D-03	0.3562692D-03	0.1062747D-03	0.1062747D-03	0.3208589D-03	0.3208589D-03	0.7040429D-09	0.7040429D-09	0.7040429D-09
28	0.6985631D-01	0.2133396D-02	0.2133396D-02	0.2901409D-02	0.2901409D-02	0.1600914D-02	0.1600914D-02	0.1659632D-01	0.1659632D-01	0.1659632D-01
29	0.6985631D-01	0.2133396D-02	0.2133396D-02	0.2901409D-02	0.2901409D-02	0.1600914D-02	0.1600914D-02	0.1659632D-01	0.1659632D-01	0.1659632D-01
30	0.3832395D-03	0.2898745D-03	0.2898745D-03	0.7660438D-04	0.7660438D-04	0.1793187D-02	0.1793187D-02	0.7769054D-06	0.7769054D-06	0.7769054D-06
31	0.2880995D-02	0.6371329D-02	0.6371329D-02	0.5794755D-02	0.5794755D-02	0.1397610D+00	0.1397610D+00	0.5935576D-04	0.5935576D-04	0.5935576D-04
32	0.2659256D-02	0.6976737D-02	0.6976737D-02	0.4742212D-02	0.4742212D-02	0.7627572D-01	0.7627572D-01	0.9686644D-07	0.9686644D-07	0.9686644D-07
33	0.8457028D-02	0.4129876D-02	0.4129876D-02	0.6019356D+00	0.6019356D+00	0.1680274D-01	0.1680274D-01	0.9044137D-03	0.9044137D-03	0.9044137D-03
34	0.2257784D-02	0.3276101D-03	0.3276101D-03	0.2689352D-01	0.2689352D-01	0.5775630D-03	0.5775630D-03	0.4467529D-05	0.4467529D-05	0.4467529D-05
35	0.8794903D-03	0.5010414D-03	0.5010414D-03	0.6946721D-02	0.6946721D-02	0.4000657D-04	0.4000657D-04	0.4096280D-07	0.4096280D-07	0.4096280D-07
36	0.8552507D-01	0.1775200D-01	0.1775200D-01	0.1686663D-01	0.1686663D-01	0.3323647D-02	0.3323647D-02	0.4307217D+00	0.4307217D+00	0.4307217D+00
37	0.8552507D-01	0.1775200D-01	0.1775200D-01	0.1686663D-01	0.1686663D-01	0.3323647D-02	0.3323647D-02	0.4307217D+00	0.4307217D+00	0.4307217D+00
38	0.2775586D-03	0.1158254D-03	0.1158254D-03	0.7057811D-02	0.7057811D-02	0.2204056D-03	0.2204056D-03	0.1853722D-04	0.1853722D-04	0.1853722D-04
39	0.2086541D-02	0.2545796D-02	0.2545796D-02	0.5338896D+00	0.5338896D+00	0.1717842D-01	0.1717842D-01	0.1416248D-02	0.1416248D-02	0.1416248D-02
40	0.1925949D-02	0.2787700D-02	0.2787700D-02	0.4369154D+00	0.4369154D+00	0.9375263D-02	0.9375263D-02	0.2311262D-05	0.2311262D-05	0.2311262D-05

TABELA C-4 (CONTINUAÇÃO)

Matriz de Fatores de Participação DIM(40x40)									
VE N°	37	38	39	40					
1	0.1376912D-04	0.1376912D-04	0.1203771D-14	0.1203771D-14					
2	0.2123784D-06	0.2123784D-06	0.1439794D-16	0.1439793D-16					
3	0.3226969D-07	0.3226969D-07	0.2745029D-16	0.2745029D-16					
4	0.8781116D-06	0.8781116D-06	0.4803910D-14	0.4803910D-14					
5	0.8781116D-06	0.8781116D-06	0.4803911D-14	0.4803911D-14					
6	0.1186916D-05	0.1186916D-05	0.9816110D-16	0.9816110D-16					
7	0.1014295D-04	0.1014295D-04	0.8374621D-15	0.8374621D-15					
8	0.1908462D-05	0.1908462D-05	0.1249048D-15	0.1249048D-15					
9	0.7805409D-01	0.7805409D-01	0.2663950D+00	0.2663950D+00					
10	0.1968853D-02	0.1968853D-02	0.5110702D-02	0.5110702D-02					
11	0.2101960D-03	0.2101960D-03	0.7144056D-03	0.7144056D-03					
12	0.3345784D-03	0.3345784D-03	0.8903819D-03	0.8903819D-03					
13	0.3345784D-03	0.3345784D-03	0.8903819D-03	0.8903819D-03					
14	0.8260572D-03	0.8260572D-03	0.2589720D-02	0.2589720D-02					
15	0.7082573D-01	0.7082573D-01	0.2379850D+00	0.2379850D+00					
16	0.3199904D-01	0.3199904D-01	0.8709494D-01	0.8709494D-01					
17	0.7805424D-01	0.7805424D-01	0.2663951D+00	0.2663951D+00					
18	0.1968857D-02	0.1968857D-02	0.5110705D-02	0.5110705D-02					
19	0.2101963D-03	0.2101963D-03	0.7144050D-03	0.7144050D-03					
20	0.3345796D-03	0.3345796D-03	0.8903751D-03	0.8903751D-03					
21	0.3345796D-03	0.3345796D-03	0.8903751D-03	0.8903751D-03					
22	0.8260588D-03	0.8260588D-03	0.2589721D-02	0.2589721D-02					
23	0.7082586D-01	0.7082586D-01	0.2379851D+00	0.2379851D+00					
24	0.3199911D-01	0.3199911D-01	0.8709498D-01	0.8709498D-01					
25	0.3801258D+00	0.3801258D+00	0.1103233D-12	0.1103233D-12					
26	0.9569590D-02	0.9569590D-02	0.2113928D-14	0.2113929D-14					
27	0.1010918D-02	0.1010918D-02	0.3860131D-15	0.3860131D-15					
28	0.1766965D-02	0.1766965D-02	0.4255196D-14	0.4255196D-14					
29	0.1766965D-02	0.1766965D-02	0.4255197D-14	0.4255197D-14					
30	0.4019898D-02	0.4019898D-02	0.1100540D-14	0.1100540D-14					
31	0.3446640D+00	0.3446640D+00	0.1011352D-12	0.1011352D-12					
32	0.1557191D+00	0.1557191D+00	0.3701227D-13	0.3701227D-13					
33	0.2285632D-03	0.2285632D-03	0.3190140D-13	0.3190140D-13					
34	0.6011231D-05	0.6011231D-05	0.7012522D-15	0.7012522D-15					
35	0.6493303D-06	0.6493303D-06	0.1763941D-15	0.1763941D-15					
36	0.1146754D-04	0.1146754D-04	0.1089367D-12	0.1089367D-12					
37	0.1146754D-04	0.1146754D-04	0.1089367D-12	0.1089367D-12					
38	0.2594675D-05	0.2594675D-05	0.5256959D-15	0.5256959D-15					
39	0.2224661D-03	0.2224661D-03	0.4830896D-13	0.4830896D-13					
40	0.1005101D-03	0.1005101D-03	0.1767939D-13	0.1767939D-13					

TABELA C-4 (CONTINUAÇÃO)

DATA	____/____/19____
PRON.	_____
PRON.	_____
LIV.	_____
Nº	_____

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200473



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA