

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AJUSTE DO SINAL ADICIONAL DE GERADORES ELÉTRICOS  
UTILIZANDO MÉTODOS DIRETOS

TRABALHO SUBMETIDO À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA



UFSC-BU

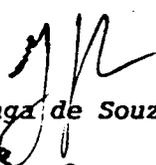
*Percival Bueno de Araujo*

**AJUSTE DO SINAL ADICIONAL DE GERADORES ELÉTRICOS  
UTILIZANDO MÉTODOS DIRETOS**

**Percival Bueno de Araujo**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

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

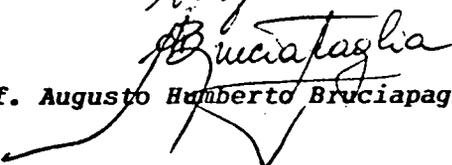
  
**Prof. Márcio Cherem Schneider, D.Sc.  
Coordenador do Curso de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica**

**BANCA EXAMINADORA:**

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

  
**Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.**

  
**Prof. Luis Jairo Branco Machado, Dr. Ing.**

  
**Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr. Ing.**



## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, pela valiosa orientação e incentivo na elaboração deste trabalho.

Ao professor Ildemar Cassana Decker e a todos os professores do Curso de Pós-Graduação que, direta ou indiretamente, contribuíram em seu desenvolvimento.

Aos professores Anna Diva Plasencia Lotufo e Júlio Borges de Souza, Coordenadores do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, que asseguraram a infra-estrutura necessária para sua realização.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, pelo apoio.

Ao Aldo, Joaquim e Marcelo, pelo apoio dado durante sua execução.

Aos amigos de S. J. do Rio Preto - SP, pelo incentivo.

Ao PICD/CAPES pelo apoio financeiro.

## Í N D I C E

RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Definição do Problema .....	1
1.2 Histórico do Problema .....	2
1.3 Contribuições Deste Trabalho .....	4
1.4 Organização do Texto .....	4
2. MODELOS MATEMÁTICOS DOS GERADORES E ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA .....	6
2.1 Introdução .....	6
2.2 Modelo Matemático da Máquina Síncrona .....	6
2.3 Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP).....	12
2.4 Conclusão .....	16

3. PROBLEMA DA OTIMIZAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS .....	17
3.1 Introdução .....	17
3.2 Estabilidade de Sistemas Lineares .....	17
3.2.1 Problema .....	17
3.2.2 Considerações Preliminares .....	19
3.2.3 Sistemas Lineares com Matriz A Simétrica....	26
3.2.4 Sistemas Lineares com Matriz A Não Simétrica.....	32
3.3 Conclusão .....	35
4. ESTABILIZAÇÃO DE GERADORES ELÉTRICOS ATRAVÉS DO AJUSTE DOS PARÂMETROS DO ESTABILIZADOR.....	37
4.1 Introdução.....	37
4.2 Procedimento Para Estabilização de Geradores Elétricos .....	37
4.3 O Procedimento Proposto e o Método da Compensação de Fase Para Ajuste do ESP .....	44
4.4 Coeficientes de Sincronização e Amortecimento Equivalentes.....	49
4.5 O Ajuste do Sinal Estabilizador em Função do Ponto de Operação .....	62
4.6 Conclusão .....	68
5. AJUSTE DE PARÂMETROS NO CASO MULTIMÁQUINAS .....	70
5.1 Introdução .....	70

5.2	Localização do Estabilizador .....	70
5.3	Procedimento Multimáquinas .....	73
5.4	Conclusão .....	85
6.	CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
	APÊNDICES .....	96
1.	Linearização da Máquina Síncrona .....	97
2.	O Problema de Otimização .....	100
3.	O Método da Compensação de Fase .....	103
4.	Programa AUTOVAL .....	108
5.	Dados do Sistema Multimáquinas .....	112
6.	Simbologia .....	115

## RESUMO

Este trabalho propõe um procedimento para ajuste dos parâmetros de estabilizadores de sistemas de potência, utilizando um deslocamento dos autovalores da matriz  $A$ , associada à representação do sistema linear dinâmico, para o semi-plano esquerdo do plano complexo, através da solução de um problema de programação não linear.

Na solução do problema de otimização é usado um critério de parada definido em função dos amortecimentos medidos em relação a um dado valor especificado externamente.

Inicialmente é proposto um procedimento para estabilização de sistemas lineares, que é aplicado ao caso máquina x barra infinita.

O caso multimáquinas também é discutido e um procedimento alternativo para o ajuste dos parâmetros do estabilizador para este caso é proposto.

O trabalho descreve os instrumentos necessários à execução destes procedimentos e são apresentados exemplos ilustrativos.

**ABSTRACT**

This work suggests a procedure for the tuning parameters of power system stabilizer, by a shifting the eigenvalues of the A matrix associated to the dynamic linear system representation to left half-side of the complex plane. The shifting of the eigenvalues is obtained through the solution of a nonlinear programming problem.

In the solution of the optimization problem, a stopping criterion defined as a function of an external specified damping is used.

The multimachine case is also treated, and an alternative procedure for tuning the parameters of power system stabilizers for this case proposed.

The work describes the tools required to implement these procedures, and illustrative examples are presented.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Definição do Problema

O problema da estabilidade na operação da máquina síncrona é objeto de estudos intensos na literatura. A tendência é que este problema continue sendo pesquisado, visto que a máquina síncrona é um importante componente do sistema elétrico de potência e sua operação de modo estável é sempre necessária. Além disso, com o aumento do porte dos sistemas elétricos o problema da estabilidade se torna cada vez mais complexo.

O uso de reguladores de tensão de respostas muito rápidas promove uma sensível melhoria no tocante à estabilidade transitória mas em compensação pode provocar problemas para a estabilidade de regime permanente (ou dinâmica). Em certos casos surgem oscilações pouco amortecidas em regime permanente, que limitam a capacidade de transferência de potência. Para o amortecimento destas oscilações, a máquina síncrona pode ser equipada com um sistema de controle adicional: o estabilizador de sistema de potência (ESP). (1,3,5,6,7,11)

A aplicação dos estabilizadores em sistemas de potência pode aumentar os limites de transferência de potência, que são caracterizados por oscilações levemente amortecidas surgidas espontaneamente na faixa de frequências de 0,2 a 2,5 Hz. (3)

Maior amortecimento também é necessário sob condições de cargas pesadas e/ou ligações de transmissão fracas. Contingências tais como saída de linhas geralmente precipitam estas condições. Mesmo sistemas elétricos que possuem amortecimento adequado podem beneficiar-se de estabilizadores quando da ocorrência destas condições anormais.

Da interação entre os parâmetros do sistema, da máquina e seus reguladores, do ponto de operação e dos parâmetros do sinal estabilizador, tem-se um melhor ou pior desempenho do sistema elétrico.

O problema que se coloca, então, consiste em fornecer um procedimento para ajustar os parâmetros do sinal adicional.

## 1.2 Histórico do Problema

Muitos trabalhos já foram desenvolvidos a respeito do ajuste do ESP, ajuste este que é função do ponto de operação, estrutura do sistema e frequência de oscilação. (1,3,5,7,10,11,19)

Analisando a evolução histórica destes estudos, vê-se que basicamente duas técnicas tem sido utilizadas: a compensação de fase (1,3,5) e o método do lugar das raízes. (3,5)

A primeira consiste em fazer com que o ajuste do estabilizador compense os atrasos de fase introduzidos pelo gerador, sistema de excitação e sistema de potência, de modo que o estabilizador forneça torque elétrico em fase com as variações de velocidade. Esta técnica tem sido muito utilizada pois é de fácil implementação no campo.

O método do lugar das raízes trabalha com os autovalores instáveis ou pouco amortecidos do sistema e com o ajuste dos pólos e zeros do estabilizador no plano  $s$ . Esta técnica permite uma melhor compreensão do desempenho do sistema, mas é mais complicada e de difícil implementação no campo.

Mais recentemente surgiram estudos de ajuste dos parâmetros do sinal estabilizador utilizando o cálculo de autovalores e autovetores do sistema, para se detectar modos de oscilação pouco amortecidos e também a melhor localização do estabilizador no ambiente

multimáquinas<sup>(7,11,12)</sup>. A teoria de controle ótimo também tem sido sugerida para o projeto do estabilizador.<sup>(32,33)</sup>

DeMello e Concórdia<sup>(1)</sup> utilizando um modelo linear máquina-barras infinita (sub-ítem 2.1), tratam dos efeitos do regulador de tensão na estabilidade dinâmica e fornecem breves considerações sobre um ESP com sinal de estrada derivado das variações de velocidade do rotor. Larsen e Swann<sup>(3)</sup> traçam linhas-guias para o ajuste do ESP com sinais de entrada derivados da velocidade, potência elétrica e frequência, onde o ajuste dos parâmetros do ESP é feito na frequência natural de oscilação da máquina síncrona. Mattos<sup>(5)</sup> trata do ajuste do ESP fazendo uma crítica ao uso da frequência natural de oscilação como frequência de ajuste. Moussa e Yu<sup>(2)</sup> sugerem o ajuste utilizando a frequência complexa do modo mecânico, o mesmo ocorrendo com Fleming, Mohan e Parvatisam<sup>(6)</sup>. Gooi e outros<sup>(17)</sup> propõem o ajuste num sistema multimáquinas, situando o problema de ajuste como um problema de autovalores do modo mecânico, onde as interações entre as diversas máquinas do sistema seriam levadas em consideração.

No caso do controle ótimo<sup>(32)</sup>, a grande dificuldade é encontrar a matriz de ponderação, onde devem ser fixados no mínimo  $n$  parâmetros ( $n$  = número de variáveis de estado). Em se tratando do ajuste de fase, deve ser determinado a priori os modos de oscilação do sistema e depois fazer o ajuste dos parâmetros do ESP para o modo de oscilação mecânico. Geralmente, a determinação e identificação dos modos do sistema não é tarefa trivial<sup>(11)</sup>, o que dificulta o ajuste do ESP.

### 1.3 Contribuições Deste Trabalho

No presente trabalho busca-se um procedimento que tenta minizar o número de especificações de parâmetros e priori a serem feitos, procurando estabelecer um amortecimento mínimo aceitável para o sistema, através do uso do estabilizador de sistema de potência.

Será considerado um estabilizador com sinal de entrada derivado da velocidade do eixo do rotor e a técnica de ajuste utilizará conceitos de otimização e estabilidade no sentido de Liapunov.

Esta técnica deverá promover a migração dos autovalores da matriz A (onde alguns de seus elementos dependem dos parâmetros do estabilizador) de um sistema linear do tipo  $\dot{x} = Ax + Bu$  para o semi-plano esquerdo do plano s.

### 1.4 Organização do Texto

No capítulo 2 são fornecidos maiores detalhes da técnica a ser utilizada no ajuste do ESP, onde também são mostrados o modelo da máquina e estabilizador que serão utilizados.

As deduções e formulações matemáticas necessárias ao entendimento de como se promoverá a migração dos autovalores da matriz A para o semi-plano esquerdo do plano s, tratada como um problema de otimização, são colocados na capítulo 3.

No capítulo 4 é mostrado o procedimento proposto para o ajuste dos parâmetros de estabilizador de sistema de potência, como um caso particular da teoria desenvolvida no capítulo 3. São introduzidos conceitos de torques de sincronização e amortecimento equivalentes, bem como a influência do ponto de operação no ajuste do estabilizador. Exemplos a respeito de cada tópico tratado são apresentados e discutidos.

Os sistemas multimáquinas são tratados no capítulo 5. Neste capítulo é colocada a questão da escolha da melhor localização do sinal estabilizador e um procedimento alternativo para seu ajuste . O programa AUTOVAL é utilizado para a determinação da melhor localização do ESP no sistema. Os resultados obtidos de exemplos referentes a este assunto e a discussão a respeito deles também são colocados.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos posteriores.

Seguem-se as Referências Bibliográficas e Apêndices, necessários para uma melhor compreensão do trabalho.

## 2. MODELOS MATEMÁTICOS DE GERADORES E ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

### 2.1 Introdução

Neste capítulo é mostrado o modelo linearizado de Heffron-Phillips para máquina-barra infinita que será utilizado no decorrer deste trabalho.

Deduzido o modelo, as equações que regem o comportamento da máquina são colocadas na forma de espaço de estado, obtendo-se portanto a matriz de estado do modelo máquina-barra infinita.

Em seguida é feita uma explanação sobre estabilizadores de sistemas de potência e mostrada sua estrutura. As equações que descrevem seu efeito no comportamento dinâmico da máquina síncrona são incorporadas às equações de estado da máquina, que foram deduzidas anteriormente.

### 2.2 Modelo Matemático da Máquina Síncrona:

O sistema a ser estudado é o da máquina síncrona ligada a barra infinita através de uma linha de transmissão de impedância  $Z_e = R_e + jX_e$ , conforme a figura 1.

O modelo matemático da máquina síncrona empregado é o linearizado de Heffron-Phillips, que foi popularizado por deMello e Concordia<sup>(1)</sup>.

Neste modelo, válido para pequenas perturbações em torno de um dado ponto de operação, a máquina síncrona ligada a uma barra infinita é representada pelas seguintes constantes:

$$K_1 = \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \Bigg|_{E'_q = \text{cte}} = \text{variação no torque elétrico}$$

devido à variação no ângulo do rotor, com enlace de fluxo de eixo direto constante.

$$K_2 = \frac{\Delta T_e}{\Delta E'_q} \Bigg|_{\delta = \text{cte}} = \text{variação no torque elétrico}$$

devido à variação no enlace de fluxo de eixo direto, com ângulo do rotor constante.

$$K_3 = \frac{x'_d + x_e}{x_d + x_e} = \text{fator de impedância, para o caso}$$

em que a impedância externa é uma reatância pura.

$$K_4 = \frac{1}{K_3} \frac{\Delta E'_q}{\Delta \delta} \Bigg|_{E_{fd} = \text{cte}} = \text{efeito desmagneti-}$$

zante devido à variação do ângulo do rotor, com  $E_{fd}$  constante.

$$K_5 = \frac{\Delta V_t}{\Delta \delta} \Bigg|_{E'_q = \text{cte}} = \text{variação na tensão termi-}$$

nal devido à variação no ângulo do rotor, com  $E'_q$  constante.

$$K_6 = \frac{\Delta V_t}{\Delta E'_q} \Bigg|_{\delta = \text{cte}} = \text{variação na tensão terminal}$$

devido à variação no enlace de fluxo de eixo direto, com ângulo do rotor constante.

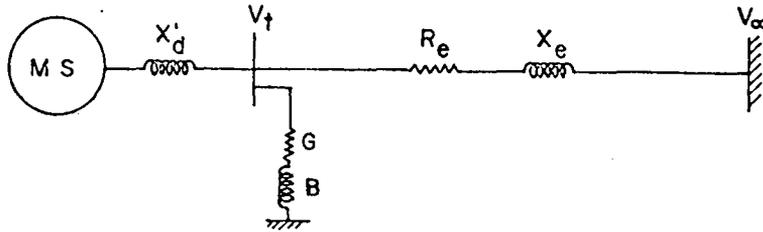


Figura 1 - Diagrama unifilar: máquina síncrona x barra infinita

Deve ser observado que, com exceção de  $K_3$ , que é uma relação de impedâncias, todas as constantes do modelo linearizado devem ser calculadas para um dado ponto de operação, já que dependem deste (ver apêndice 1).

A constante  $K_1$  é o coeficiente de torque de sincronização e decresce com o aumento da carga suprida pela máquina.

Pela definição de  $K_4$ , pode-se notar que ela traduz o efeito do aumento da carga sobre a tensão  $E'_q$ . Além disso,  $K_4$  representa o efeito desmagnetizante da reação da armadura.

O parâmetro  $K_5$  pode se tornar negativo, dependendo do nível de carregamento da máquina. Este fato pode trazer um efeito indesejável de redução do amortecimento natural da máquina, quando se usa reguladores de tensão rápidos.

Comparando-se o modelo linear de Heffron-Phillips com o modelo clássico, nota-se que este último não leva em consideração o efeito desmagnetizante da reação da armadura, manifestado como uma variação em  $E'_q$ . No modelo clássico supõe-se que a constante de tempo  $T'_{d0}$  é muito grande.

Sendo assim, o modelo clássico linearizado é um caso particular do modelo linear, com  $K_2 = K_6 = 0$  (13).

Utilizando as constantes anteriores, as equações da máquina

síncrona são:

$$\Delta \omega = \frac{1}{Ms} (\Delta T_m - \Delta T_e - D \Delta \omega)$$

$$\Delta \delta = \frac{\omega_b}{s} \Delta \omega$$

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{1 + sK_3 T'_{d0}} (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta)$$

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q$$

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q$$

Supondo a máquina equipada com sistema de excitação estático tem-se ainda:

$$\Delta E_{fd} = \frac{K_A}{1 + sT_A} (\Delta V_{ref} - \Delta V_t)$$

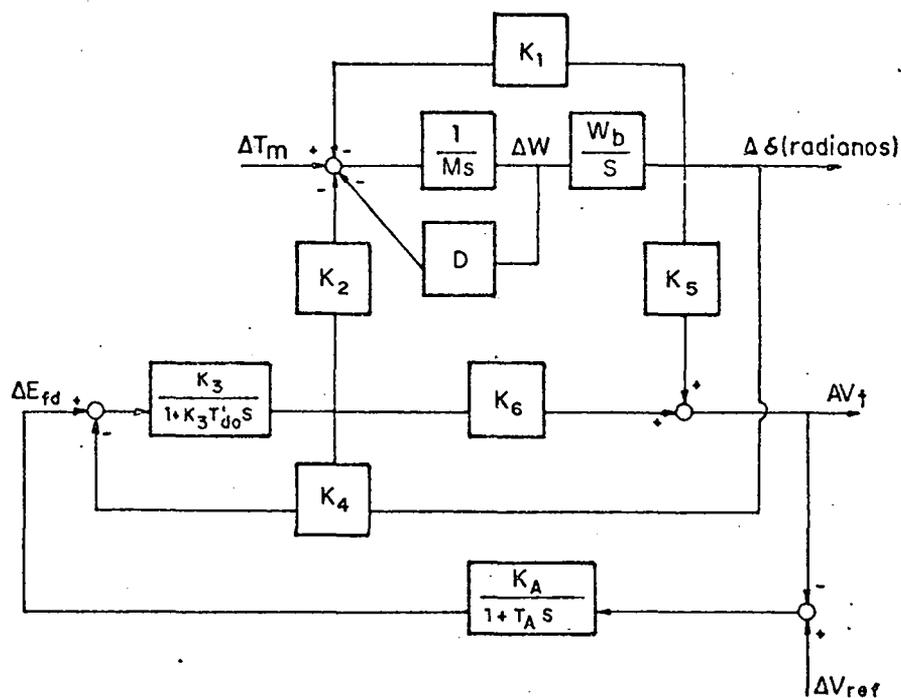


Figura 2 - Diagrama de blocos: máquina x barra infinita.

A figura 2 mostra o diagrama de blocos referentes ao sistema máquina-barra infinita.

Trabalhando com as equações anteriores no domínio do tempo e rearranjando seus elementos, é possível escrever um sistema de equações diferenciais da forma:

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u \quad (2.1)$$

onde:

$$x_1^t = [ \Delta\omega \quad \Delta\delta \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{fd} ] \quad (2.1.a)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-D}{M} & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 \\ \omega_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_4}{T'_{d0}} & \frac{-1}{K_3 T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ \frac{-K_A K_5}{T_A} & \frac{-K_A K_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} & \end{bmatrix} \quad (2.1.b)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} \quad (2.1.c)$$

$$u^t = [ \Delta T_m \quad \Delta V_{ref} ] \quad (2.1.d)$$

Este modelo tem sido amplamente utilizado no estudo dinâmico da máquina síncrona contra barra infinita, e existe a possibilidade

de estendê-lo ao caso multimáquinas<sup>(2)</sup>. Sua principal vantagem está na possibilidade de se empregar técnicas de análise de sistemas lineares como transformada de Laplace, autovalores, autovetores, etc...

### 2.3 Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP)

A função básica dos sinais estabilizadores é aumentar os limites de estabilidade através da modulação da excitação do gerador, de modo a fornecer amortecimento para as oscilações dos rotores das máquinas. Isto é obtido pela introdução de amortecimento adicional no sistema, por meio do estabilizador de sistema de potência.

Deve ser compreendido que aumentar o amortecimento do sistema não é um fim em si, mas um meio para se conseguir ampliar limites estáveis de transferência de potência.

Para fornecer amortecimento, o ESP deve produzir componente de torque elétrico em fase com as variações de velocidade<sup>(3)</sup>.

O sinal de entrada do ESP pode ser a própria velocidade, bem como a frequência ou potência elétrica. A figura 3 mostra o diagrama de blocos normalmente atribuído ao estabilizador<sup>(4)</sup>.

A introdução do sinal de saída do estabilizador no regulador de tensão traz como efeito uma interferência na tensão a ser controlada. Por isso, os sinais estabilizadores possuem limitadores ajustáveis para que a interferência se dê dentro de limites aceitáveis<sup>(5)</sup>.

O bloco diferenciador, mostrado na figura 3, tem como função não permitir que variações de velocidade angular ou potência, originadas da atuação do regulador de velocidade influam no controle da tensão terminal da máquina síncrona em regime permanente. Os blocos de avanço-atraso permitem o ajuste de fase adequado e  $K$  é o ganho ajustável do ESP.

Neste trabalho é proposto o estudo do ajuste dos parâmetros

do ESP com sinal de entrada derivado da velocidade do rotor, através de um processo de otimização e conceitos de estabilidade no sentido de Liapunov.

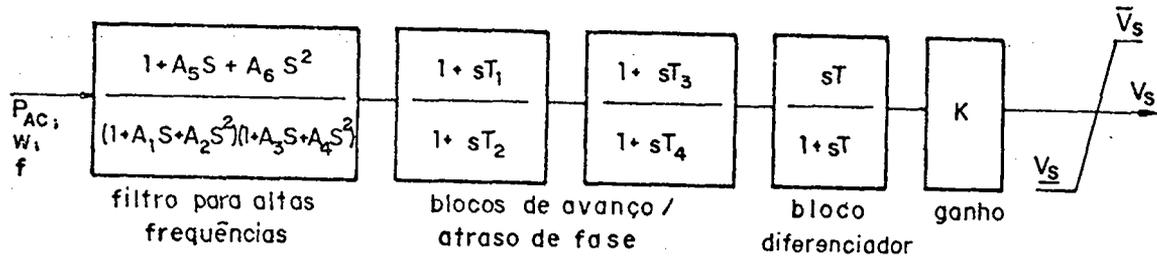


Figura 3 - Diagrama de blocos geral do ESP

Basicamente, o foco de estudo é a matriz  $A$  de um sistema linear do tipo:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.2)$$

Esta matriz é função dos parâmetros do sistema e também do ESP. Estes parâmetros deverão ser determinados de modo que todos os autovalores da matriz  $A$  tenham partes reais negativas - condição suficiente para a resposta livre de (2.2) ser estável no sentido de Liapunov.

Serão considerados como parâmetros a ajustar o ganho e as constantes de tempo do bloco compensador de fase e bloco diferenciador do ESP, conforme a estrutura mostrada na figura 4.

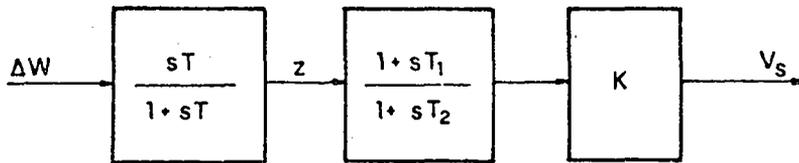


Figura 4 - Estrutura do ESP

Com base nesta figura pode-se escrever:

$$\dot{z} = \Delta\omega - \frac{1}{T} z$$

$$\dot{V}_s = K \frac{T_1}{T_2} \dot{z} + \frac{K}{T_2} z - \frac{1}{T_2} V_s$$

Seguindo o mesmo procedimento do sub-ítem 2.1, pode-se adicionar o efeito do ESP às equações de estado da máquina<sup>(9)</sup>.

Neste caso tem-se:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.3)$$

onde:

$$x^t = \left[ \Delta\omega \quad \Delta\delta \quad \Delta E'_q \quad \Delta E'_{fd} \quad \vdots \quad z \quad V_s \right] \quad (2.3.a)$$

$$A = \left[ \begin{array}{cccc|cc} & & & & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 \\ & & A_1 & & 0 & 0 \\ & & & & 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ \hline \frac{-D}{M} & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & \frac{-1}{T} & 0 \\ \frac{-T_1 D}{T_2 M} & \frac{-KT_1 K_1}{T_2 M} & \frac{-KT_1 K_2}{T_2 M} & 0 & \frac{K}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) & \frac{-1}{T_2} \end{array} \right] \quad (2.3.b)$$

$$B = \left[ \begin{array}{cc} & B_1 \\ \hline \frac{1}{M} & 0 \\ \frac{KT_1}{T_2 M} & 0 \end{array} \right] \quad (2.3.c)$$

U é mesmo de (2.1.d).

Como já mencionamos, o ajuste do ESP depende do ponto de operação e sistema de potência externo. Tendo em vista que o ponto de operação varia no decorrer do dia através da curva de carga diária, é de se esperar que um ajuste feito para apenas uma situação não ofereça desempenho ótimo para todo o período. Mais ainda, podem surgir situações em que o ajuste feito no ESP leve o sistema a modos instáveis de operação.

## 2.4 Conclusão

Escolhidos o modelo da máquina síncrona e a estrutura do estabilizador que serão utilizados, foi obtida a matriz de estado  $A$  do sistema composto pela máquina síncrona, barra infinita, regulador de tensão e sinal estabilizador.

O objetivo da inclusão do estabilizador é fazer com que a matriz  $A$  se torne definida negativa (sistema estável), agindo sobre alguns de seus elementos, que dependem dos parâmetros do estabilizador.

Os fundamentos matemáticos para realizar tal processo são mostrados no capítulo seguinte.

### 3. PROBLEMA DA OTIMIZAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS

#### 3.1 Introdução

Este capítulo trata essencialmente da formulação matemática de um procedimento para estabilização de sistemas lineares, agindo sobre a matriz de estado do sistema.

O problema de agir sobre um ou mais elementos desta matriz para que o sistema seja estável, isto é: a matriz tenha todos os autovalores com parte real negativa; será colocado como um problema de otimização.

Serão apresentados teoremas e proposições necessários à formulação do processo de otimização para os casos em que a matriz é simétrica e não simétrica

#### 3.2 Estabilização de Sistemas Lineares

##### 3.2.1 Problema

Seja:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

um sistema linear instável ou com pouco amortecimento, onde  $A$  é uma matriz  $(n - m) \times (n - m)$  e  $x$  é vetor do  $\mathbb{R}^{n - m}$ .

Quando se insere uma malha de controle, são adicionados ao sistema  $m$  variáveis de estado e  $r$  parâmetros a partir da definição da estrutura do controlador.

No caso do sistema (2.3), se for utilizada uma compensação de fase e um bloco diferenciador (figura 4), serão acrescentadas ao sistema original  $m = 2$  variáveis de estado e  $r = 4$  parâmetros, de modo que (2.3) é reescrito como:

$$\dot{x} = A(P)x + Bu \quad (3.1)$$

onde:  $x \in R^7$

$P \in R^4$ .

Considere um controlador compensador de fase definido pelos parâmetros  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  e o bloco diferenciador por  $P_4$ , conforme a estrutura da figura 4. Desta forma a inclusão do controlador e bloco diferenciador implica no aumento de duas variáveis de estado, de modo que se tem um estado aumentado  $x \in R^n$  e  $A$   $n \times n$  e o sistema com controlador se torna (3.1), com  $P$  dado por:

$$P^t = [ P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 ] \quad (3.1.a)$$

Assim, dado um controlador, o problema geral consiste em encontrar, se existir, um vetor de parâmetros  $P$  de modo que a resposta livre de (3.1) seja assintoticamente estável.

Para isto é necessário e suficiente que os autovalores de  $A$  tenham parte real negativa<sup>(8)</sup>.

### 3.2.2. Considerações Preliminares

Proposição 1:

Se  $A$  é uma matriz diagonal, então os autovalores  $\gamma_i$  de  $(A^t + A)$  obedecem a relação:

$$\gamma_i = 2 \lambda_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

onde  $\lambda_i$  é autovalor de  $A$ .

Prova:

Neste caso segue diretamente que

$$A = [\lambda_i] \quad \text{e} \quad [A^t + A] = 2 [\lambda_i]$$

Proposição 2:

Se  $a$  é uma matriz simétrica, então os autovalores de  $(A^t + A)$  também obedecem a relação:

$$\gamma_i = 2 \lambda_i.$$

Prova:

Se  $A$  é simétrica

$$A^t = A$$

e então:

$$Q = A^t + A = 2A$$

Além disso,  $A$  tem autovalores reais e pode ser diagonalizada. Como os autovalores são invariantes sob uma transformação de similaridade  $x^* = Tx$ , os autovalores de  $A$  e  $A^* = T^{-1}AT$  são os mesmos.

Como:

$$Q^* = T^{-1} [A^t + A] T = T^{-1} [2A] T = 2T^{-1} [A] T$$

segue da proposição anterior que:

$$\gamma_i = 2 \lambda_i$$

Teorema 1:

Seja  $A$  uma matriz simétrica e  $Q = A^t + A$  uma matriz indefinida.

Então as seguintes relações se verificam:

$$\min ( \gamma_i ) < \min ( \lambda_i )$$

$$\gamma_i \in I^- \quad \lambda_i \in J^-$$

$$\max ( \gamma_i ) \geq \max ( \lambda_i )$$

$$\gamma_i \in I^+ \quad \lambda_i \in J^+$$

onde:

$\gamma_i$  é autovalor de  $Q$ .

$\lambda_i$  é autovalor de  $A$ .

$I^-$ ,  $I^+$  são conjuntos de autovalores de  $Q < 0$  e  $\geq 0$ , respectivamente.

$J^-$ ,  $J^+$  são conjuntos de autovalores de  $A < 0$  e  $\geq 0$ , respectivamente.

Prova:

Segue diretamente da proposição anterior, separando-se os autovalores de  $A$  em dois conjuntos: um

contendo os autovalores negativos e o outro con  
tendo os autovalores positivos ou nulos e associando  
do-se os conjuntos  $I^-$  e  $I^+$ , respectivamente.

Proposição 3:

Se  $A$  é uma matriz não simétrica, é possível escre  
ver:

$$A = A_S + C$$

onde  $A_S$  é uma matriz simétrica e  $C$  é matriz não  
simétrica e será chamada "matriz de perturbação  
de simetria".

Prova:

Basta tomar os elementos de  $A_S$  como sendo:

$$a_{sij} = \frac{a_{ij} + a_{ji}}{2}$$

e escolher

$$C = A - A_S$$

onde  $a_{ij}$  e  $a_{sij}$  são elementos de  $A$  e  $A_s$ , respectivamente.

Proposição 4:

Se  $Q$  é uma matriz hermitiana, então a relação

$$\underline{\gamma} \leq \frac{x^t Q x}{x^t x} \leq \bar{\gamma}$$

se verifica para todo  $x \neq 0$  no espaço  $n$ -dimensional  $C^n$ , onde:

$$\underline{\gamma} = \min \{ \gamma_i, \gamma_i \in I^- \cup I^+ \}$$

$$\bar{\gamma} = \max \{ \gamma_i, \gamma_i \in I^- \cup I^+ \}$$

$$x^t x = \|x\|^2 = \sum_{i=1}^n |x_i|^2$$

$\gamma_i$  é autovalor de  $Q$ .

Prova: (8)

Observe que  $x^t I x$  é um número real para todo  $x \neq 0$  de  $C^n$ .

Seja  $R$  a matriz cujas colunas são os autovetores normalizados de  $Q$ . Então:

$$R^{-1} = R^t$$

e também

$$\hat{Q} = R Q R^t$$

onde  $\hat{Q}$  é uma matriz diagonal, formada pelos autovalores de  $Q$ .

Seja:

$$\hat{x} = R x$$

Ou:

$$x = R^{-1} \hat{x} = R^t \hat{x}$$

Então:

$$\begin{aligned} x^t Q x &= (R^t \hat{x})^t Q R^t \hat{x} = \hat{x}^t R Q R^t \hat{x} = \\ &= \hat{x}^t \hat{Q} \hat{x} = \sum_{i=1}^n \gamma_i |\hat{x}_i|^2 \end{aligned}$$

onde  $\gamma_i$  são os autovalores de  $Q$ ,  $i=1, \dots, n$ .

Então:

$$\frac{x^t Q x}{x^t x} = \frac{\hat{x}^t \hat{Q} \hat{x}}{\hat{x}^t \hat{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i |\hat{x}_i|^2}{\sum_{i=1}^n |\hat{x}_i|^2}$$

Também:

$$\begin{aligned} x^t x &= (P^t \hat{x})^t P^t \hat{x} = \hat{x}^t P P^t \hat{x} = \\ &= \hat{x}^t \hat{x} = \|\hat{x}\|^2 = \sum_{i=1}^n |\hat{x}_i|^2 \end{aligned}$$

Portanto:

$$\frac{x^t Q x}{x^t x} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i |\hat{x}_i|^2}{\sum_{i=1}^n |\hat{x}_i|^2}$$

E então, tomando-se  $\gamma_i = \underline{\gamma}$  e  $\gamma_i = \bar{\gamma}$  na expressão acima, tem-se:

$$\underline{\gamma} \leq \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i |\hat{x}_i|^2}{\sum_{i=1}^n |\hat{x}_i|^2} = \frac{x^t Q x}{x^t x} \leq \bar{\gamma}$$

### 3.2.3 Sistemas Lineares com Matriz A Simétrica:

Seja:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.2}$$

onde A é matriz nxn e  $x \in R^n$  e por hipótese, (3.2) representa um sistema com um compensador de fase com parâmetros a determinar, de modo que a origem de (3.2) seja assintoticamente estável, isto é,

tenha autovalores negativos ( $A$  é simétrica).

Neste caso, se  $A$  é instável, os conjuntos  $J^+$  e  $I^+$  são diferentes de vazio, já que  $\gamma_i = 2\lambda_i$ . Além disso, vale a relação:

$$\bar{\gamma} = \max_{\gamma_i \in I^+} (\gamma_i) \geq \max_{\lambda_i \in J^+} (\lambda_i) \quad (3.3)$$

Considere agora como função de Liapunov para o sistema linear e invariante no tempo descrito por (3.2) a forma quadrática:

$$V(x, t) = x^t I x \quad (3.4)$$

onde  $I$  é a matriz identidade.

Então:

$$\dot{V}(x, t) = \dot{x}^t I x + x^t I \dot{x} = x^t (A^t + A) x = x^t Q x \quad (3.5)$$

Se a origem de (3.2) é estável, então  $V(x, t)$  é definida positiva e  $\dot{V}(x, t)$  é definida negativa.

Seja:

$$\eta = - \frac{\dot{V}(x, t)}{V(x, t)} = - \frac{x^t (A^t + A) x}{x^t I x} \quad (3.6)$$

em alguma região do espaço de estados, excluindo-se a origem.

Neste caso,  $\eta$  é sempre positivo e a expressão (3.6) fornece uma indicação de quão rapidamente o sistema se dirige ao seu estado de equilíbrio. (35)

Fazendo:

$$\eta_{\min} = \min \left[ - \frac{\dot{V}(x,t)}{V(x,t)} \right] \quad (3.7.a)$$

tem-se:

$$\dot{V}(x,t) \leq - \eta_{\min} V(x,t) \quad (3.7.b)$$

e

$$V(x,t) \leq V_0 e^{-\eta_{\min}(t-t_0)} \quad (3.7.c)$$

onde  $V_0$  é o valor de  $V(x,t)$  no estado  $x=x_0$  no instante  $t=t_0$ .

De (3.7.a), vê-se que o valor  $1/\eta_{\min}$  corresponde à maior constante de tempo relativa a variações na função de Liapunov e equivale a cerca da metade da constante de tempo definida para o sistema (35).

Considere agora a expressão:

$$\underline{\gamma} \leq \frac{x^t (A^t + A)x}{x^t I x} = \frac{\dot{V}(x, t)}{V(x, t)} \leq \bar{\gamma} \quad (3.8.a)$$

onde  $\bar{\gamma}$  é o maior autovalor de  $(A^t + A)$  e  $\underline{\gamma}$  é o menor autovalor de  $(A^t + A)$ .

Trabalhando nos limites inferior e superior da expressão acima, tem-se:

$$V = V_0 e^{\underline{\gamma} t} \quad (3.8.b)$$

$$V = V_0 e^{\bar{\gamma} t} \quad (3.8.c)$$

Supondo  $A$  com autovalores distintos, os estados do sistema serão descritos por expressões da forma:

$$x_i = L_i e^{\lambda_i t} \quad (3.9)$$

onde  $\lambda_i$  é autovalor de  $A$  e  $L_i$  é constante dependente da condição inicial.

Então:

$$\bar{x} = L_1 e^{\lambda t} \quad (3.10.a)$$

$$\underline{x} = L_2 e^{-\lambda t} \quad (3.10.b)$$

onde  $\bar{x}$  e  $\underline{x}$  são os estados com o menor e maior decaimentos do sistema e  $L_1$  e  $L_2$  são constantes dependentes da condição inicial

Como  $\gamma = 2\lambda$ , pode-se especificar  $\bar{\gamma}$  conveniente na relação (3.8.a) e trabalhar no limite superior desta expressão, pois assim se estaria estudando o caso de pior decaimento.

Se forem feitas modificações na matriz  $Q(P) = A^t(P) + A(P)$  de modo que  $\bar{\gamma}$  diminua, existirá uma modificação nos elementos de  $A$  tal que  $\bar{\lambda}$  diminuirá.

As modificações podem ser feitas resolvendo-se o problema de programação não-linear (PNL) dado por (3.11).

$$\min f(P)$$

$$\text{s. a. } \frac{x^t Q(P) x}{x^t x} = \bar{\gamma} \quad (3.11)$$

onde  $f(P)$  é um critério a ser adotado para a determinação do vetor de parâmetros  $P$ , que poderá ser escolhido de acordo com as necessidades do projetista.

Escolhendo-se por exemplo:

$$f(P) = P^t P \quad (3.12)$$

como função objetivo do problema de otimização proposto anteriormente, está se procurando diminuir o esforço do controlador, ao mesmo tempo em que as restrições pertinentes ao problema são obedecidas.

Se o problema acima admite solução, então pode-se encontrar  $P$  tal que o sistema seja estável e o decaimento de sua resposta satisfaz a especificação estabelecida.

Uma vantagem importante do uso do problema acima reside no fato de que a procura de valores adequados dos vários parâmetros do controlador pode ser feita de forma sistemática, através da variação de apenas um parâmetro  $\bar{\lambda}$ , função do decaimento desejado, desde que o (PNL) tenha solução.

O problema de otimização (PNL) apresenta algumas dificuldades de convergência, em virtude da forma da função objetivo onde, quando se usa Multiplicadores de Lagrange para sua solução, aparece o termo  $x^t x$  no seu denominador (o problema de otimização procura tornar esta relação zero, o que provoca uma tentativa de divisão por zero).

Uma formulação alternativa que evita este fato, consiste em tornar o (PNL) num problema não linear modificado (PNLM) da seguinte forma:

$$\min f(P) \tag{3.12}$$

$$\text{s.a } x^t Q(P) x = 2\bar{\lambda}$$

$$x^t x = 1.0$$

### 3.2.4. Sistemas Lineares com Matriz A Não Simétrica

Considere novamente o sistema (3.2) onde agora, por hipótese, A não é simétrica e neste caso, a princípio, o procedimento anterior não se aplica diretamente.

Se A não é simétrica, ela pode ser decomposta numa soma de matrizes, sendo uma delas simétrica (proposição 3). Então:

$$A = A_S + C \quad (3.13)$$

Deste modo pode-se obter:

$$Q_S = A_S^t + A_S \quad (3.14)$$

Como  $A_S$  é simétrica, pode-se aplicar o mesmo procedimento anterior, apenas substituindo Q por  $Q_S$ .

Observe-se agora que:

$$\begin{aligned} Q_S &= A_S^t + A_S = (A-C)^t + (A-C) = (A^t + A) - (C^t + C) = \\ &= Q - B \end{aligned} \quad (3.15)$$

onde  $B = C^t + C$ .

Sejam as matrizes C e B escritas como:

$$C = [c_{ij}]_{n \times n} \quad (3.16.a)$$

$$B = [b_{ij}]_{n \times n}, \quad b_{ij} = c_{ij} + c_{ji} \quad (3.16.b)$$

Da proposição 3:

$$c_{ij} = a_{ij} - a_{sji} = \frac{1}{2} (a_{ij} - a_{ji})$$

$$c_{ji} = a_{ji} - a_{sji} = \frac{1}{2} (a_{ji} - a_{ij})$$

Como:

$$b_{ij} = c_{ij} + c_{ji} = 0 \quad (3.17.a)$$

vem que:

$$B = 0 \quad (3.17.b)$$

Assim, de (3.15) e (3.17.b) pode-se concluir que:

$$Q = Q_s \quad (3.18)$$

Desta forma, pode-se trabalhar diretamente com a matriz  $A$  sem necessidade de decomposição e usar o procedimento para matrizes simétricas no sentido de diminuir a parte real do autovalor menos amortecido de  $A$ :  $\max \operatorname{Re} \{ \lambda_i \}$ .

Neste caso,  $A$  não sendo simétrica, não se conhece uma relação explícita entre  $\lambda_i$  e  $\gamma_i$ . Deste modo, pode-se usar o PNL com  $\bar{\gamma}$  especificado inicialmente como sendo  $2\operatorname{Re} \{ \bar{\lambda} \}$ , onde  $\bar{\lambda}$  é autovalor com maior parte real desejada, em função de um amortecimento especificado para o sistema e resolver PNL para obter-se  $P^1$ . Se  $A(P^1)$  não tiver  $\max \operatorname{Re} \{ \lambda_i \}$  satisfatório em relação a um amortecimento especificado, pode-se diminuir  $\bar{\gamma}$  especificado e proceder-se de forma semelhante e sucessiva até que  $\max \operatorname{Re} \{ \lambda_i \}$  seja satisfatório.

O procedimento para isto pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Obtenha a matriz  $A(P)$  em função dos parâmetros do controlador usado, defina  $\bar{\gamma}^0, P^0, x^0 \in R^n, \eta > 0$  e  $\Delta\bar{\gamma}$ , faça  $k = 0$ .

2. Defina o problema não linear (PNL) para  $P^k$ :

$$\min f(P)$$

$$\text{s. a. } \frac{x^t Q x}{x^t x} = \bar{\gamma}^{-k}$$

e obtenha  $x^{k+1}$  e  $P^{k+1}$

3. Encontre os autovalores de  $A(P^{k+1})$ .

Se  $\text{Re}(\bar{\lambda}^{-k}) < -\eta$ , pare.

Se não faça:

$$\bar{\gamma}^{k+1} = \bar{\gamma}^{-k} + \Delta\bar{\gamma}$$

e volte ao passo 2.

Se para  $P^0$  fornecido inicialmente  $A(P^0)$  é instável, isto é,  $A(P^0)$  tem algum autovalor positivo e se o amortecimento aceito for  $\eta = 0$ , então o processo converge para valores de parâmetros ótimos  $-P^*$  (desde que PNL sempre tenha solução para todo  $k$ ), uma vez que  $\bar{\gamma} > \text{Re}\{\lambda_i\}$ ,  $\lambda_i \in I^+$ .

### 3.3. Conclusão

Neste capítulo foi apresentado de forma geral, uma solução para o problema da estabilidade de sistemas lineares na forma de um processo de otimização. Deve ser observado que neste processo apenas um parâmetro é especificado ( $\bar{\gamma}$ ), em função do mínimo amortecimento

aceitável para o sistema.

Foi proposto um problema de Programação Não Linear Modificado (PNLM) que pode ser utilizado principalmente nos casos onde a estabilização deve ser feita sobre sistemas com características bem definidas, através do uso de compensadores do tipo avançadores de fase.

Este é o caso da estabilização de geradores elétricos, através do uso de estabilizadores de sistema de potência, que será tratada no capítulo seguinte.

## 4. ESTABILIZAÇÃO DE GERADORES ELÉTRICOS ATRAVÉS DO AJUSTE DOS PARÂMETROS DO ESTABILIZADOR:

### 4.1 Introdução

Como uma aplicação do processo descrito no capítulo anterior, é proposto um procedimento para a estabilização de geradores elétricos, através do ajuste dos parâmetros do estabilizador de sistema de potência. A necessidade de alteração no ajuste dos parâmetros do estabilizador deve-se principalmente às influências associadas às mudanças do ponto de operação do sistema elétrico e/ou topologia do sistema de transmissão externo. Para fins de comparação, são feitos ajustes dos parâmetros do ESP utilizando o método da compensação de fase.

São também introduzidos os conceitos de coeficientes de torques de sincronização e amortecimento equivalentes e finalizando, a influência do ponto de operação no ajuste do sinal estabilizador.

### 4.2. Procedimento para Estabilização de Geradores Elétricos

As equações de estado de um sistema máquina - barra infinita, incluindo os parâmetros do sinal adicional são da forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.1)$$

onde  $x \in R^n$ ,  $A(P)$  é  $n \times n$  e  $P^t = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4]$ .

O vetor P deve ser determinado de forma que A(P) tenha autovalores com parte real negativa. Neste caso A(P) não é simétrica, mas pode-se aplicar o processo descrito em (3.2.4).

Para isto, implementou-se o algoritmo mostrado na figura 5 para solução do problema:

$$\min f(P) = P^t P$$

$$\text{s. a. } x^t Q(P) x = v$$

$$x^t x = 1.0$$

$$x_C^t x_C = I$$

$$P_i \leq P_i \leq \bar{P}_i$$

onde:

$$Q(P) = A^t(P) + A(P)$$

$$x^t = [ \Delta\omega \quad \Delta\delta \quad \Delta E' \quad \Delta E_{fd} \quad z \quad V_s ]$$

$$x_C^t = [ z \quad V_s ]$$

$$P^t = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4] = [K \ T_1 \ T_2 \ T]$$

$$I < 1.0$$

A penúltima restrição foi incluída para se forçar uma participação maior das variáveis de estado referentes ao estabilizador na solução do problema de minimização, isto é, as primeiras e segundas restrições de igualdade seriam satisfeitas com parcelas maiores de  $z$  e  $V_g$ . Como o valor destas variáveis de estado dependerão intrinsecamente dos parâmetros do estabilizador, estes parâmetros teriam maior influência na migração dos autovalores da matriz de estado  $A$  do sistema para o semi-plano esquerdo do plano complexo.

Nas ilustrações seguintes, decidiu-se nesta fase, fixar-se um dos parâmetros (no caso, a constante de tempo do bloco diferenciador -  $T$ ) para diminuir o número de variáveis do problema e a solução se tornar mais fácil.

Desta forma, o vetor  $P$  do (PNLM) se tornou:

$$P^t = [P_1 \ P_2 \ P_3] = [K \ T_1 \ T_2]$$

O valor pré-especificado  $V$  foi variado dentro de uma faixa ( -10.0 a 0.0 ) e o critério de parada adotado foi o de que todos os autovalores de  $A$  tivessem um amortecimento maior ou igual a  $\xi$  previamente fixado. Para a penúltima restrição (restrição de ponderação), o valor adotado foi  $I=0.9$

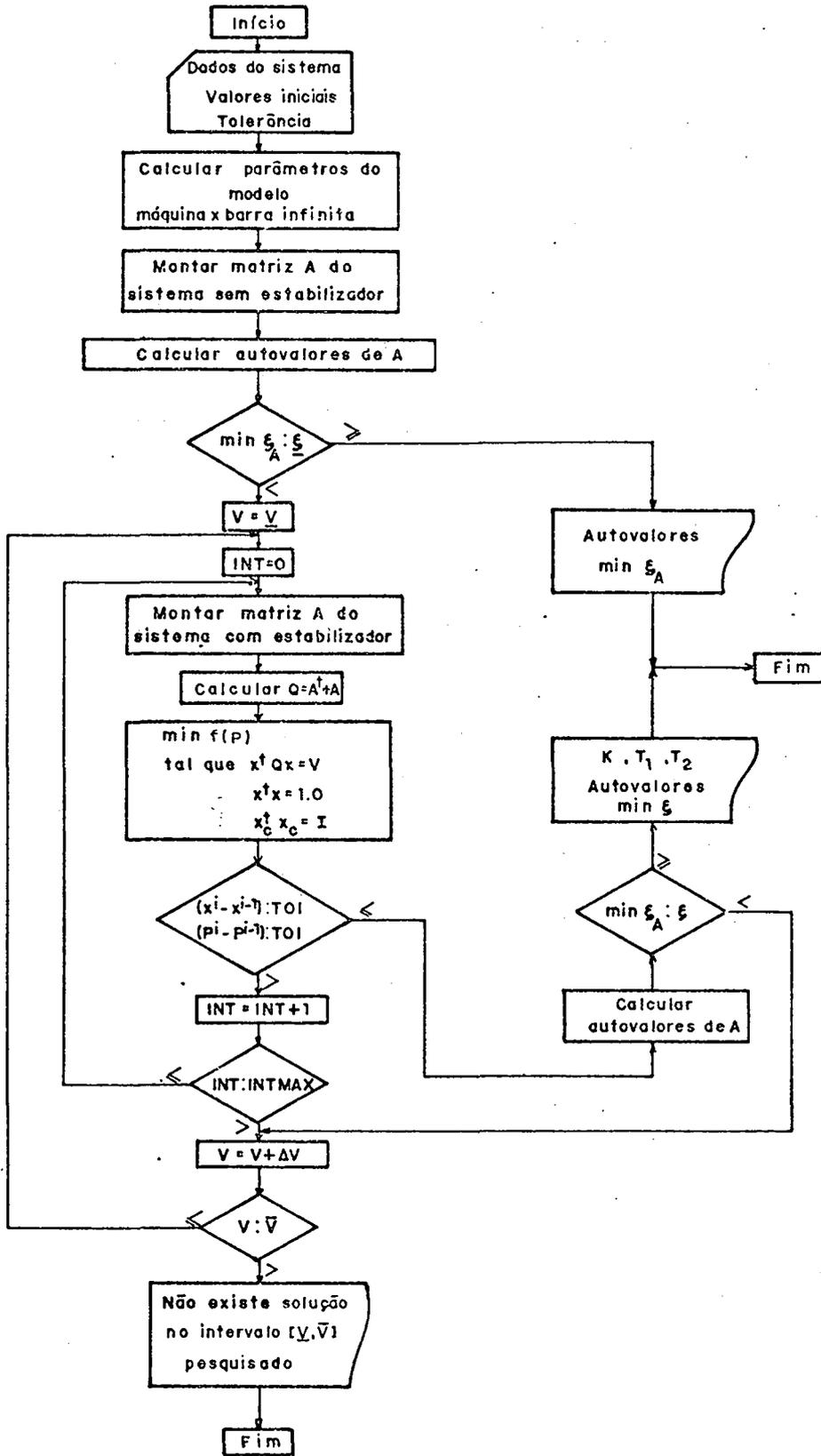


Figura 5 - Algoritmo Proposto

Com estas considerações adicionais, verificou-se que os valores resultantes dos parâmetros foram semelhantes aos valores normalmente encontrados na literatura.

Uma observação que pode ser feita em relação ao problema de otimização é que este foi formulado usando-se multiplicadores de Lagrange e o método de Newton-Raphson. Consequentemente, a cada passo do laço interno do algoritmo, necessitou-se de uma inversão de matriz, já que o Jacobino não era constante (Apêndice 2).

O algoritmo foi aplicado a dois sistemas cujos principais dados estão listados nas tabelas 1 e 2 e os resultados obtidos na tabela 3. A tabela 4 mostra os autovalores dos sistemas com e sem o sinal adicional estabilizador.

Analisando-se os dados obtidos da tabela 4, pode-se notar que os sistemas sem o sinal estabilizador são instáveis (a matriz  $A$  possui autovalores com parte real positiva e consequentemente estes autovalores possuem coeficientes de amortecimento negativos)

Com a aplicação do sinal adicional estabilizador ajustado de acordo com o algoritmo proposto (tabela 3), todos os autovalores de  $A$  ficam com parte real negativa, o que garante a estabilidade do sistema (tabela 4).

Nestes exemplos o critério de parada adotado foi o de que todos os autovalores de  $A$  tivessem um amortecimento maior ou igual a  $\xi = 0.05$ . Pode-se observar que esta condição é satisfeita visto que o autovalor menos amortecido do sistema 1 tem  $\xi \approx 0.07$  e o do sistema 2 possui  $\xi \approx 0.06$ .

Observe também que a parte imaginária dos autovalores sofrem pouca variação quando comparadas com a variação sofrida pela parte real. Este é um resultado animador pois a parte imaginária está intimamente ligada com o torque de sincronização da máquina, torque este muito importante no que diz respeito tanto à estabilidade dinâ

TABELA 1 - Dados dos Sistemas:

sistema	$x_d$ (pu)	$x'_d$ (pu)	$x_q$ (pu)	M (seg)	$T'_{d0}$ (seg)	$K_A$ (pu)	$T_A$ (seg)
1	0.973	0.190	0.550	9.26	7.76	50.0	0.05
2	1.700	0.245	1.640	4.74	6.00	100.0	0.05

TABELA 2 - Coeficientes do Modelo Linearizado e Frequência Natural de Oscilação:

sistema	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$\omega_n$ rad/s
1	0.5441	1.2067	0.6584	0.6981	-0.0955	0.8159	4.7066
2	1.0755	1.2578	0.3072	1.7124	-0.0409	0.4975	9.2488

TABELA 3 - Parâmetros do ESP

sistema	T (seg)	K (pu/pu)	$T_1$ (seg)	$T_2$ (seg)
1	3.0	7.0069	0.2256	0.0114
2	1.0	1.0185	0.3788	0.0093

TABELA 4 - Autovalores dos Sistemas:

sistema	sem estabilizador			com estabilizador		
	autovalores $\sigma+j\omega$		$\xi$	autovalores $\sigma+j\omega$		$\xi$
	$\sigma$ (rad/s)	$\omega$ (rad/s)		$\sigma$ (rad/s)	$\omega$ (rad/s)	
1.	0.295	4.959	-0.0594	-0.349	4.928	0.0706
	0.295	-4.959	-0.0594	-0.349	-4.928	0.0706
	-10.393	3.283	0.9530	-9.566	5.152	0.8804
	-10.393	-3.283	0.9530	-9.566	-5.152	0.8804
				-88.460	0.0	
				-0.338	0.0	
2.	0.205	9.278	-0.0221	-0.541	9.057	0.0597
	0.205	-9.278	-0.0221	-0.541	-9.057	0.0597
	-10.477	8.650	0.7711	-9.543	10.031	0.6892
	-10.477	-8.650	0.7711	-9.543	-10.031	0.6892
				-108.512	0.0	
				-1.004	0.0	

mica quanto à estabilidade transitória.

#### 4.3 O Procedimento Proposto e o Método da Compensação de Fase Para Ajuste do ESP:

O método da Compensação de Fase<sup>(1,2,3,5,9)</sup> consiste em fazer com que o ajuste dos parâmetros do ESP compense os atrasos de fase introduzidos pelo gerador, sistema de excitação e sistema de potência. Os instrumentos necessários para a aplicação deste método são dados no Apêndice 3.

A título de comparação com o procedimento proposto neste trabalho, foram calculados os parâmetros do ESP utilizando a compensação de fase para os mesmos sistemas do sub-ítem anterior. Os resultados obtidos são mostrados nas tabelas 5 e 6, onde:

$\alpha$  = atraso de fase introduzido pelo gerador, sistema de potência e sistema de excitação na frequência de ajuste (em graus).

$\beta$  = fase do bloco diferenciador, na frequência de ajuste (em graus).

$\psi$  = fase que deve ter o bloco compensador na frequência de ajuste (em graus).

Foram feitos ajustes na frequência natural de oscilação (tabela 5) e na frequência complexa de modo mecânico (tabela 6), desejando-se amortecimentos de 0.05 a 0.2 para os autovalores dominantes dos sistemas.

Os parâmetros calculados pelo método foram o ganho do estabilizador ( $K$ ) e a constante de tempo do bloco de compensação de fase ( $T_1$ ). As constantes de tempo do bloco diferenciador ( $T$ ) e do bloco compensador ( $T_2$ ) foram escolhidas como sendo as mesmas obtidas nos exemplos do sub-ítem anterior.

A tabela 7 mostra os autovalores dos sistemas com o estabilizador ajustado de acordo com os parâmetros da tabela 5, enquanto que na tabela 8 os autovalores foram obtidos utilizando-se os parâmetros da tabela 6.

Comparando-se os amortecimentos dos autovalores dominantes nas tabelas 7 e 8, nota-se que se obtém um melhor desempenho do ESP quando seu ajuste é feito utilizando-se a frequência complexa de modo mecânico em vez da frequência natural de oscilação, o que vai de encontro às conclusões já obtidas por outros autores<sup>(2,4,9)</sup>.

Observando-se agora os amortecimentos especificados para os sistemas (0.05 e 0.2), e os realmente obtidos após o ajuste do ESP, vê-se que estes últimos possuem valores menores que os especificados. Ainda mais: quando foi mantido  $\xi = 0.05$ , o ajuste do ESP não conseguiu estabilizar o sistema 1 e no caso do sistema 2, o amortecimento mínimo obtido permanece abaixo do valor especificado. Utilizando-se  $\xi = 0.2$ , os dois sistemas se tornam estáveis após a inclusão do ESP assim ajustados, mas com amortecimentos reais menores que 0.2.

Este fato não ocorreu com o procedimento proposto neste trabalho porque, pela própria estrutura do algoritmo, o amortecimento do autovalor dominante do sistema será maior ou igual ao especificado externamente, o que pode ser visto como uma vantagem deste método.

TABELA 5 - Compensação de Fase - Ajuste em  $s = j \omega_n$ Sistema 1:  $\omega_n = 4.7066$  rad/seg.Sistema 2:  $\omega_n = 9.2488$  rad/seg.

$\xi$	sist.	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\psi$ ( $^\circ$ )	K(pu/pu)	$T_1$ (seg)	$T_2$ (seg)	T(seg)
0.05	1	-47.56	4.05	43.51	2.4907	0.2246	0.0114	3.0
	2	-64.37	6.17	58.20	1.0058	0.2133	0.0093	1.0
0.20	1	-47.56	4.05	43.51	9.9627	0.2246	0.0114	3.0
	2	-64.37	6.17	58.20	4.0232	0.2133	0.0093	1.0

TABELA 6 - Compensação de Fase - Ajuste em  $s = \sigma + j \omega$ Sistema 1:  $s = 0.295 + j 4.959$  rad/seg.Sistema 2:  $s = 0.205 + j 9.278$  rad/seg.

$\xi$	sist.	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\psi$ ( $^\circ$ )	K(pu/pu)	$T_1$ (seg)	$T_2$ (seg)	T(seg)
0.05	1	-48.72	3.82	44.90	2.5530	0.2409	0.0114	3.0
	2	-63.99	6.14	57.85	1.0070	0.2189	0.0093	1.0
0.20	1	-48.72	3.82	44.90	10.2120	0.2409	0.0114	3.0
	2	-63.99	6.14	57.85	4.0282	0.2189	0.0093	1.0

TABELA 7 - Ajuste por Compensação de Fase -  $s = j \omega_n$ 

Autovalores dos Sistemas:

$\xi$	sistema	sem estabilizador			com estabilizador			
		autovalores (rad/seg)		$\xi$	autovalores (rad/seg)		$\xi$	
		$\sigma$	$\omega$		$\sigma$	$\omega$		
0.05	1	0.295	4.959	-0.0594	0.073	4.964	-0.0147	
		0.295	-4.959	-0.0594	0.073	-4.964	-0.0147	
		-10.393	3.283	0.9530	-10.105	4.014	0.9294	
		-10.393	-3.283	0.9530	-10.105	-4.014	0.9294	
					-87.849	0.0		
				-0.335	0.0			
		2	0.205	9.278	-0.0221	-0.253	9.261	0.0273
			0.205	-9.278	-0.0221	-0.253	-9.261	0.0273
			-10.477	8.650	0.7711	-9.913	9.263	0.7307
			-10.477	-8.650	0.7711	-9.913	-9.263	0.7307
					-107.731	0.0		
				-1.005	0.0			
0.20	1	0.295	4.959	-0.0594	-0.614	4.871	0.1286	
		0.295	-4.959	-0.0594	-0.614	-4.871	0.1286	
		-10.393	3.283	0.9530	-9.207	5.813	0.8455	
		-10.393	-3.283	0.9530	-9.207	-5.813	0.8455	
					-88.232	0.0		
				-0.340	0.0			
		2	0.205	9.278	-0.0221	-1.834	8.736	0.2055
			0.205	-9.278	-0.0221	-1.834	-8.736	0.2055
			-10.477	8.650	0.7711	-8.023	11.394	0.5757
			-10.477	-8.650	0.7711	-8.023	-11.394	0.5757
					-1.020	0.0		
				-108.334	0.0			

TABELA 8 - Ajuste por Compensação de Fase -  $s = \sigma + j \omega_n$ 

Autovalores dos Sistemas:

$\xi$	sistemas	sem estabilizador			com estabilizador			
		autovalores (rad/seg)		$\xi$	autovalores (rad/seg)		$\xi$	
		$\sigma$	$\omega$		$\sigma$	$\omega$		
0.05	1	0.295	4.959	-0.0594	0.058	4.956	-0.0117	
		0.295	-4.959	-0.0594	0.058	-4.956	-0.0117	
		-10.393	3.283	0.9530	-10.084	4.115	0.9259	
		-10.393	-3.283	0.9530	-10.084	-4.115	0.9259	
					-87.862	0.0		
				-0.335	0.0			
		2	0.205	9.278	-0.0221	-0.264	9.255	0.0285
	0.205		-9.278	-0.0221	-0.264	-9.255	0.0285	
	-10.477		8.650	0.7711	-9.900	9.289	0.7292	
	-10.477		-8.650	0.7711	-9.900	-9.289	0.7292	
				-107.737	0.0			
			-1.005	0.0				
0.20	1	0.295	4.959	-0.0594	-0.683	4.812	0.1406	
		0.295	-4.959	-0.0594	-0.683	-4.812	0.1406	
		-10.393	3.283	0.9530	-9.129	6.135	0.8300	
		-10.393	-3.283	0.9530	-9.129	-6.135	0.8300	
					-88.284	0.0		
				-0.340	0.0			
		2	0.205	9.278	-0.0221	-1.863	8.673	0.2100
	0.205		-9.278	-0.0221	-1.863	-8.673	0.2100	
	-10.477		8.650	0.7711	-7.983	11.527	0.5694	
	-10.477		-8.650	0.7711	-7.983	-11.527	0.5694	
				-108.357	0.0			
			-1.020	0.0				

#### 4.4 Coeficientes de Sincronização e Amortecimento Equivalentes

Como mencionado anteriormente, a função do sinal estabilizador é fornecer amortecimento adicional às oscilações dos rotores das máquinas em regime permanente (estabilidade dinâmica). Um aspecto que precisa ser considerado é a influência que o estabilizador terá na manutenção do sincronismo da máquina, sincronismo este ligado intimamente à estabilidade transitória do sistema de potência.

Para se estudar esta influência, serão apresentados conceitos de torques de sincronização (em fase com as variações do ângulo  $\delta$ ) e amortecimento (em fase com as variações de velocidade) equivalentes<sup>(10)</sup>.

Considere o modelo linear da máquina síncrona tratada no sub-ítem 2.2 e suponha que não há atuação do regulador de tensão e também que o efeito da reação da armadura esteja sendo desprezado.

Neste caso o modelo linear se torna o da figura 6.

A equação característica deste sistema é:

$$s^2 + \frac{D}{M} s + \frac{\omega_b K_1}{M} = 0 \quad (4.2.a)$$

que, quando comparada com a forma padrão:

$$s^2 + 2 \xi \omega_n s + \omega_n^2 = 0, \quad (4.2.b)$$

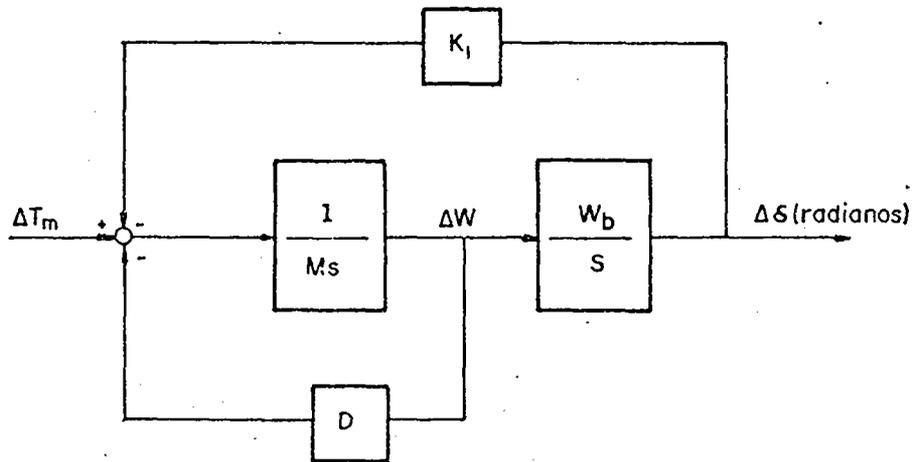


Figura 6 - Laço mecânico - máquina síncrona x barra infinita

fornece a frequência natural de oscilação ( $\omega_n$ ), o coeficiente de amortecimento ( $\xi$ ) e a frequência natural amortecida  $\omega_0$  através das expressões:

$$\omega_n = \left( \frac{\omega_b K_1}{M} \right)^{1/2} \quad (4.2.c)$$

$$\xi = \frac{D}{2 (\omega_b K_1 M)^{1/2}} \quad (4.2.d)$$

$$\omega_0 = \omega_n (1 - \xi^2)^{1/2} \quad (4.2.e)$$

para uma raiz  $s$  da forma:

$$s = -\sigma + j\bar{\omega} = -\xi\omega_n + j\omega_0 \quad (4.2.f)$$

Observa-se que no sistema sob estudo (figura 6) existem duas componentes de torque elétrico: uma em fase com os desvios de velocidade ( $\Delta T_d$ ) e outra em fase com os desvios do ângulo  $\delta$  ( $\Delta T_s$ ). A primeira se refere ao "torque de amortecimento" e a segunda ao "torque de sincronização". Estas componentes são:

$$\Delta T_d = D \Delta\omega = K_{dD} \Delta\omega \quad (4.3)$$

$$\Delta T_s = K_1 \Delta\delta = K_{sK_1} \Delta\delta \quad (4.4)$$

onde  $K_{dD}$  e  $K_{sK_1}$  são coeficientes de amortecimento devido ao fator D e sincronização devido ao fator  $K_1$ , respectivamente.

Considere agora as atuações do regulador de tensão e sinal estabilizador com sinal de entrada derivado da velocidade do rotor, cujas funções de transferência são  $RT(s)$  e  $EST(s)$ , respectivamente, cujo modelo agora é mostrado na figura 7.

Como o sistema é linear, o princípio da superposição de efeitos pode ser aplicado. Estudando então cada fonte de torque elétrico do sistema em separado<sup>(1)</sup>, tem-se:

$$\Delta T_{e_{K_4}} = - \frac{F(s)K_2K_4}{1 + F(s)RT(s)K_6} \Delta \delta \quad (4.5.a)$$

$$\Delta T_{e_{K_5}} = - \frac{F(s)RT(s)K_2K_5}{1 + F(s)RT(s)K_6} \Delta \delta \quad (4.5.b)$$

$$\Delta T_{e_{EST}} = \frac{F(s)RT(s)EST(s)}{1 + F(s)RT(s)K_6} \Delta \delta \quad (4.5.c)$$

onde  $\Delta T_{e_{K_4}}$ ,  $\Delta T_{e_{K_5}}$  e  $\Delta T_{e_{EST}}$  são componentes de torque elétrico produzidos pelos "caminhos" de  $K_4$ ,  $K_5$  e sinal estabilizador, respectivamente, e  $F(s)$  é dada por:

$$F(s) = \frac{K_3}{1 + s K_3 T'_{d0}}$$

Para um dado  $s=s_0$ , as componentes acima podem ser decompostas em parte real e imaginária; a saber:

$$\Delta T_{e_{K_4}} = [R_{K_4}(s_0) + jI_{K_4}(s_0)] \Delta \delta = R_{K_4} \Delta \delta + jI_{K_4} \Delta \delta \quad (4.6.a)$$

$$\Delta T_{e_{K_5}} = [R_{K_5}(s_0) + jI_{K_5}(s_0)] \Delta \delta = R_{K_5} \Delta \delta + jI_{K_5} \Delta \delta \quad (4.6.b)$$

$$\Delta T_{e_{EST}} = [R_{EST}(s_0) + jI_{EST}(s_0)] \Delta \omega = R_{EST} \Delta \omega + jI_{EST} \Delta \omega \quad (4.6.c)$$

Considerando  $s_0 = j \omega_0$  tem-se:

$$\Delta \delta = \frac{\omega_b}{s_0} \Delta \omega = \frac{\omega_b}{j\omega_0} \Delta \omega$$

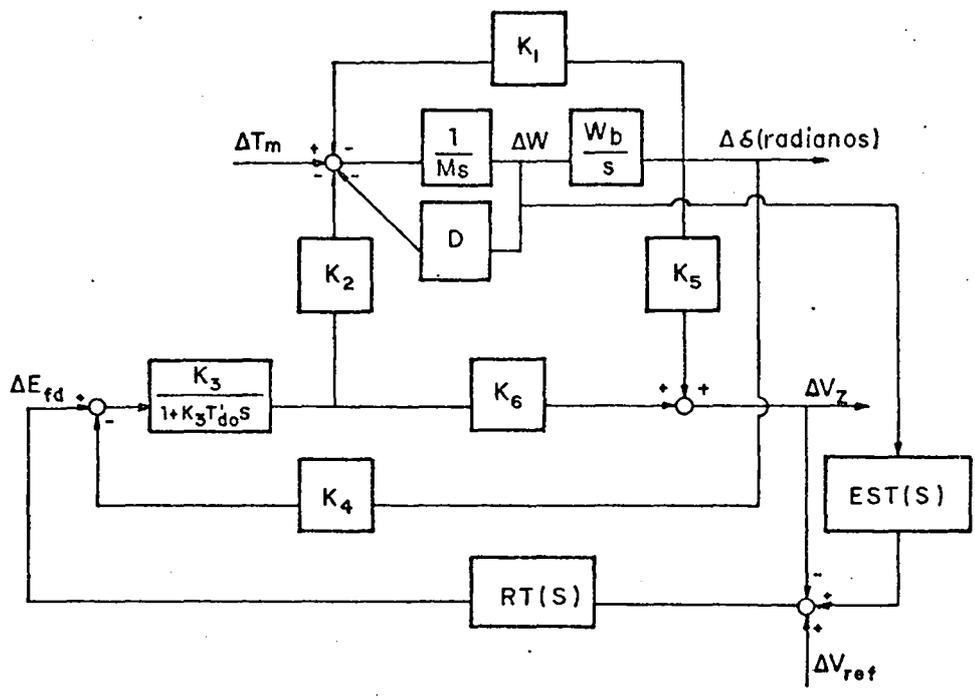


Figura 7 - Diagrama de blocos: máquina síncrona x barra infinita com regulador de tensão e ESP

Então:

$$j \Delta \delta = - \frac{\omega_b}{\omega_0} \Delta \omega \quad (4.7.a)$$

$$j \Delta \omega = - \frac{\omega_0}{\omega_b} \Delta \delta \quad (4.7.b)$$

Logo:

$$\Delta T_{e_{K_4}} = R_{K_4} \Delta \delta + \frac{\omega_b}{\omega_0} I_{K_4} \Delta \omega = K_{s_{K_4}} \Delta \delta + K_{d_{K_4}} \Delta \omega \quad (4.8.a)$$

$$\Delta T_{e_{K_5}} = R_{K_5} \Delta \delta + \frac{\omega_b}{\omega_0} I_{K_5} \Delta \omega = K_{s_{K_5}} \Delta \delta + K_{d_{K_5}} \Delta \omega \quad (4.8.b)$$

$$\Delta T_{e_{EST}} = - \frac{\omega_0}{\omega_b} I_{EST} \Delta \delta + R_{EST} \Delta \omega = K_{s_{EST}} \Delta \delta + K_{d_{EST}} \Delta \omega \quad (4.8.c)$$

onde  $K_{s_{K_4}}$ ,  $K_{s_{K_5}}$ ,  $K_{s_{EST}}$ ,  $K_{d_{K_4}}$ ,  $K_{d_{K_5}}$  e  $K_{d_{EST}}$  são coeficientes de torques de sincronização e amortecimento devido aos "caminhos"  $K_4$ ,  $K_5$  e EST, respectivamente.

A expressão (4.8.c) será utilizada para verificar a influência do sinal estabilizador nos coeficientes de sincronização e amortecimento do sistema máquina síncrona x barra infinita.

Somando termo a termo as expressões (4.3), (4.4) e (4.8.a-c), tem-se o torque elétrico total desenvolvido no sistema:

$$\Delta T_e = \Delta T_s + \Delta T_d = K_s \Delta \delta + K_d \Delta \omega \quad (4.9)$$

onde:

$\Delta T_s$  = torque de sincronização total;

$\Delta T_d$  = torque de amortecimento total;

$K_s = K_{s_{K_1}} + K_{s_{K_4}} + K_{s_{K_5}} + K_{s_{EST}}$  = coeficiente de sincronização equivalente;

$K_d = K_{d_D} + K_{d_{K_4}} + K_{d_{K_5}} + K_{d_{EST}}$  = coeficiente de amortecimento equivalente.

Com estes coeficientes pode-se definir um sistema máquina-barra infinita "equivalente" da mesma forma que na figura 6, apenas trocando  $K_1$  e D por  $K_s$  e  $K_d$ , respectivamente.

Para uma melhor avaliação da influência do sinal adicional estabilizador no amortecimento e sincronização da máquina, foram calculados os coeficientes de sincronização e amortecimento equivalentes para os dois sistemas do sub-ítem anterior, equipados com os respectivos estabilizadores anteriormente ajustados. Os resultados são mostrados nas tabelas 9 (a) e (b).

Observemos inicialmente o desempenho do estabilizador na frequência natural de oscilação dos sistemas (0.7913 Hz para o sistema 1 e 1.4720 para o sistema 2).

Analisando-se os resultados obtidos vê-se que a aplicação do estabilizador fornece uma grande parcela do amortecimento da máquina (a variação em  $K_d$  é cerca de 203% e 356% para os sistemas 1 e 2, respectivamente), o que é um resultado desejável.

Por outro lado, ele tem um efeito nocivo no coeficiente de sincronização, que se reflete diretamente na frequência de oscilação. Observe que nos dois casos, o coeficiente de sincronização é reduzido devido à ação do estabilizador.

Nestes casos as reduções foram relativamente pequenas (cerca de 0,07% e 3% para os sistemas 1 e 2, respectivamente); o que se espera não comprometa a capacidade de sincronização da máquina, já que o coeficiente de sincronização não sofreu grande redução.

Nas figuras 8(a) e (b) são mostradas as mudanças dos coeficientes de sincronização e amortecimento equivalentes com a aplicação do estabilizador para várias frequências. Note-se que na frequência natural de oscilação, a mudança de um ponto ao outro é feita sobre uma linha praticamente vertical, o que pode garantir um bom desempenho do estabilizador pois, "se na frequência natural de oscilação da máquina em consideração, a inserção do estabilizador de sistema de potência resulta numa

TABELA 9(a) - Coeficientes de Sincronização e Amortecimento  
Equivalentes Para Várias Frequências

sistema 1

f (Hz)	sem ESP		ESP		com ESP	
	$K_{seg}$	$K_{deq}$	$K_{sESP}$	$K_{dESP}$	$K_{seg}$	$K_{deq}$
0.6	0.6233	-6.7887	-0.0086	11.6730	0.6147	4.8843
0.7913	0.6076	-6.0344	-0.0004	12.2921	0.6072	6.2577
0.8	0.6022	-5.7698	0.0039	12.4652	0.6061	6.6955
1.0	0.5821	-4.7455	0.0283	12.8993	0.6104	8.1538
1.2	0.5648	-3.8080	0.0638	12.9071	0.6286	9.0991
1.4	0.5512	-3.0044	0.1073	12.5256	0.6585	9.5212
1.6	0.5412	-2.3463	0.1551	11.8495	0.6963	9.5032
1.8	0.5342	-1.8232	0.2039	10.9859	0.7381	9.1627
2.0	0.5296	-1.4154	0.2512	10.0282	0.7808	8.6129
2.2	0.5269	-1.1006	0.2954	9.0463	0.8222	7.9457
2.4	0.5254	-0.8590	0.3357	8.0869	0.8610	7.2280
2.6	0.5248	-0.6735	0.3717	7.1781	0.8965	6.5046

unidades:  $K_s$  - (pu de potência/radianos)

$K_d$  - (pu de potência/pu de velocidade)

TABELA 9(b) - Coeficientes de Sincronização e Amortecimento  
Equivalentes Para Várias Frequências

sistema 2

f (Hz)	sem ESP		ESP		còm ESP	
	$K_{seq}$	$K_{deq}$	$K_{sESP}$	$K_{dESP}$	$K_{seq}$	$K_{deq}$
0.4	1.1277	-3.1676	-0.0150	2.0962	1.1126	-1.071
0.6	1.1223	-3.0654	-0.0269	2.9546	1.0954	-0.111
0.8	1.1149	-2.9114	-0.0390	3.9453	1.0759	1.0339
1.0	1.1058	-2.7012	-0.0476	5.0169	1.0582	1.0339
1.2	1.0957	-2.4375	-0.0488	6.0541	1.0469	3.6166
1.4	1.0853	-2.1329	-0.0400	6.9287	1.0454	4.7958
1.4720	1.0817	-2.0171	-0.0341	7.1825	1.0477	5.1655
1.6	1.0757	-1.8081	-0.0202	7.5383	1.0555	5.7301
1.8	1.0674	-1.4870	0.0092	7.8348	1.0765	6.3478
2.0	1.0609	-1.1902	0.0452	7.8301	1.1060	6.6400
2.2	1.0563	-0.9306	0.0844	7.5791	1.1407	6.6485
2.4	1.0533	-0.7136	0.1238	7.1547	1.1772	6.4411
2.6	1.0518	-0.5380	0.1614	6.6270	1.2131	6.0890

unidades:  $K_s$  - (pu de potência/radianos)

$K_d$  - (pu de potência/pu de velocidade)

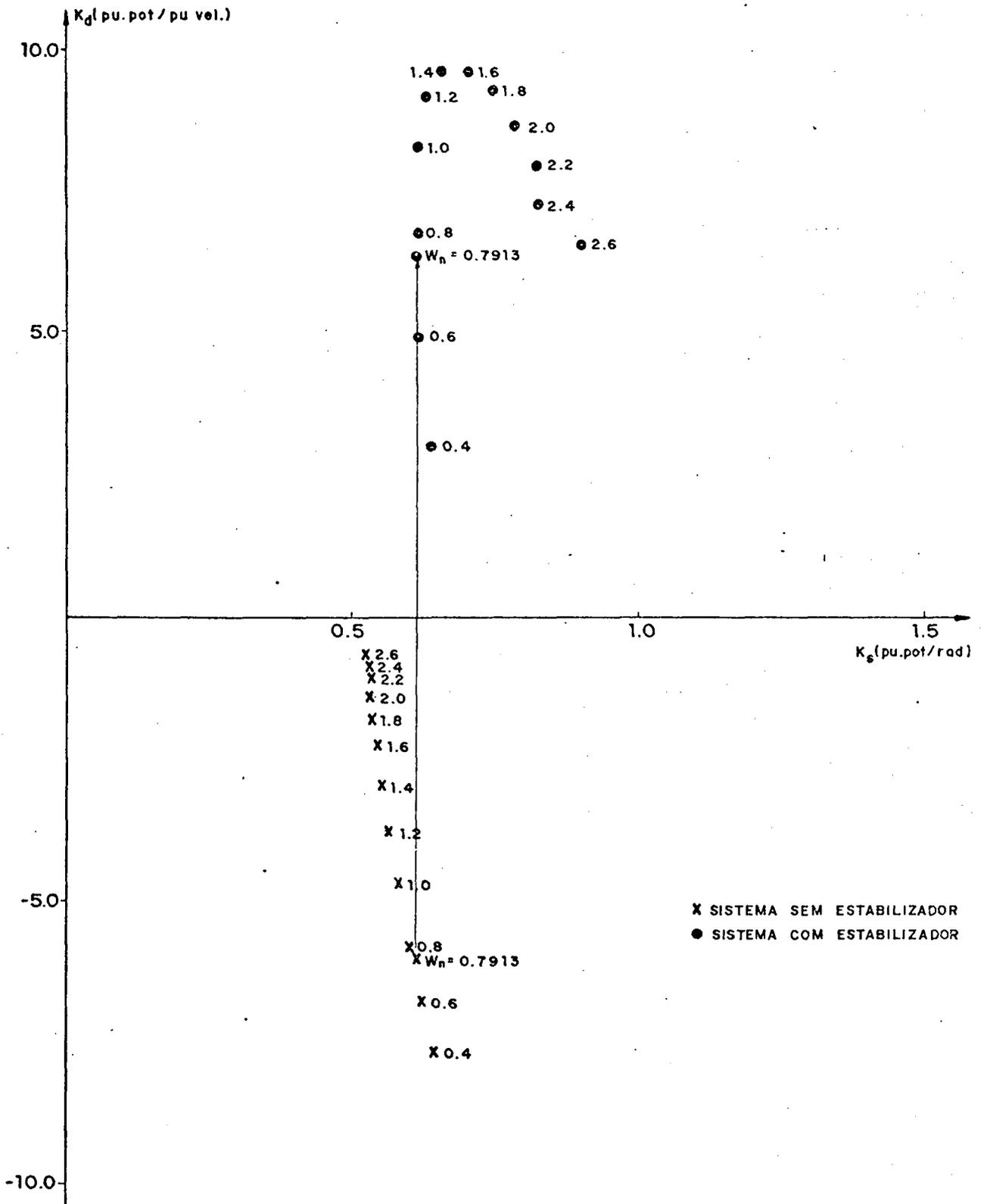


Figura 8(a) - Variação dos coeficientes de sincronização e amortecimento equivalentes - sistema 1. Frequências em Hz

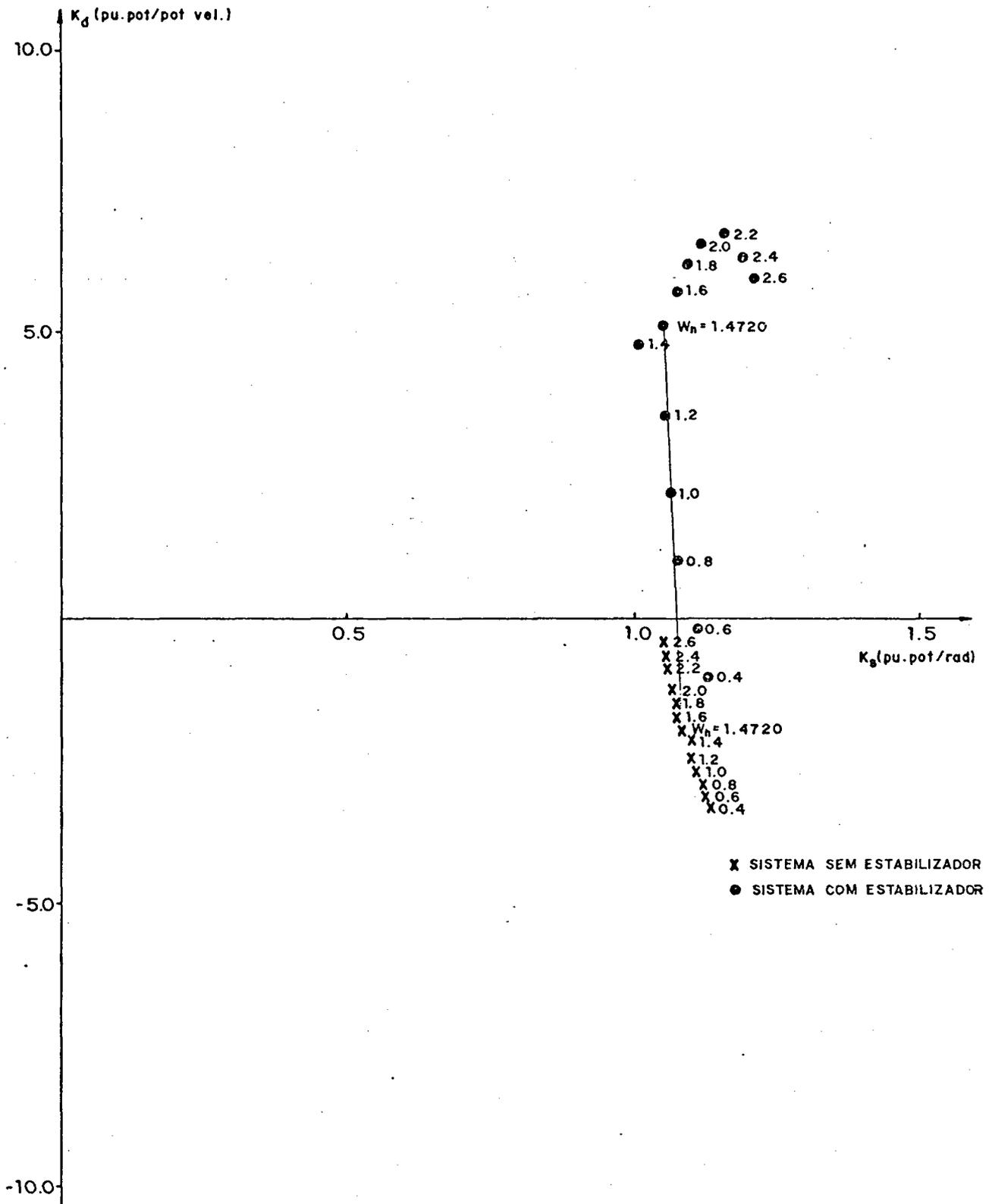


Figura 8(b) - Variação dos coeficientes de sincronização e amortecimento equivalentes - sistema 2. Frequências em Hz

substancial variação no coeficiente de torque de amortecimento e apenas mínima variação no coeficiente de torque de sincronização como evidenciado pelo "vetor de variação" quase vertical destes dois coeficientes, então excelente desempenho do estabilizador pode ser antecipado"<sup>(10)</sup>.

Analisando agora a faixa de frequências de 0.4 a 0.6 Hz (frequências típicas de modos de oscilação inter-área, que geralmente ocorrem quando há a agregação de uma área com outra<sup>(3)</sup>), pode-se afirmar (com base nas figuras 8(a) e (b)) que o ajuste feito no estabilizador do sistema 1, responderá bem a estes modos de oscilação pois produziu grande amortecimento com variação pequena do coeficiente de sincronização. O mesmo não se pode afirmar do estabilizador do sistema 2, pois este não variou muito o coeficiente de sincronização mas, em compensação, também não forneceu o amortecimento necessário ao sistema.

Para uma faixa de frequências maiores, começa a haver uma diminuição do amortecimento fornecido pelo estabilizador e a variação no coeficiente de sincronização se torna maior. É exatamente por isto que "geralmente é indesejável para um estabilizador responder a oscilações intra-usinas, tipicamente limitadas à frequências de 1.5 a 2.5 Hz, pois isto diminui sua capacidade de aumentar os limites de transferência de potência da usina. Algumas vezes tem-se utilizado velocidade média derivada de múltiplas unidades de uma usina como entrada para todos os estabilizadores da usina, impedindo assim que eles respondam às oscilações intra-usinas"<sup>(3)</sup>.

#### 4.5 O Ajuste do Sinal Estabilizador em Função do Ponto de Operação

Sabe-se que o ajuste do sinal adicional estabilizador depende das condições de operação do sistema de potência e também da rede de transmissão externa.

Larsen e outros<sup>(3)</sup> desenvolveram um trabalho onde buscavam as melhores situações de ajuste para estabilizadores com sinais de entrada derivadas da velocidade, potência elétrica e frequência. Para os dois primeiros, concluíram que a melhor condição de ajuste era sistema com carga pesada e rede de transmissão forte enquanto que para estabilizadores com sinal de entrada derivado da frequência, a melhor condição de ajuste ocorria com rede de transmissão moderadamente fraca.

Neste mesmo artigo é comentado que o estabilizador teria um desempenho bom nas condições em que foi ajustado, podendo vir a ter um desempenho pior em outras condições.

Com base neste conhecimento, o algoritmo mostrado na figura 5 foi ligeiramente modificado, tornando-se o da figura 9.

Neste algoritmo várias condições de carregamento da máquina são consideradas. Estas condições a princípio, simulam a curva de carga na qual a máquina normalmente opera. A influência do ponto de operação é transmitida ao ajuste do estabilizador através dos coeficientes do modelo máquina-barra infinita.

Inicialmente especifica-se um amortecimento mínimo desejável e faz-se o ajuste para o primeiro ponto de operação.

Para o próximo ponto de operação é feito um teste com o estabilizador ajustado na condição anterior. Se nesta nova situação o amortecimento se mantém maior ou igual ao mínimo aceitável, o estabilizador não precisa ser reajustado. Caso contrário, novo ajuste é feito onde as condições iniciais para

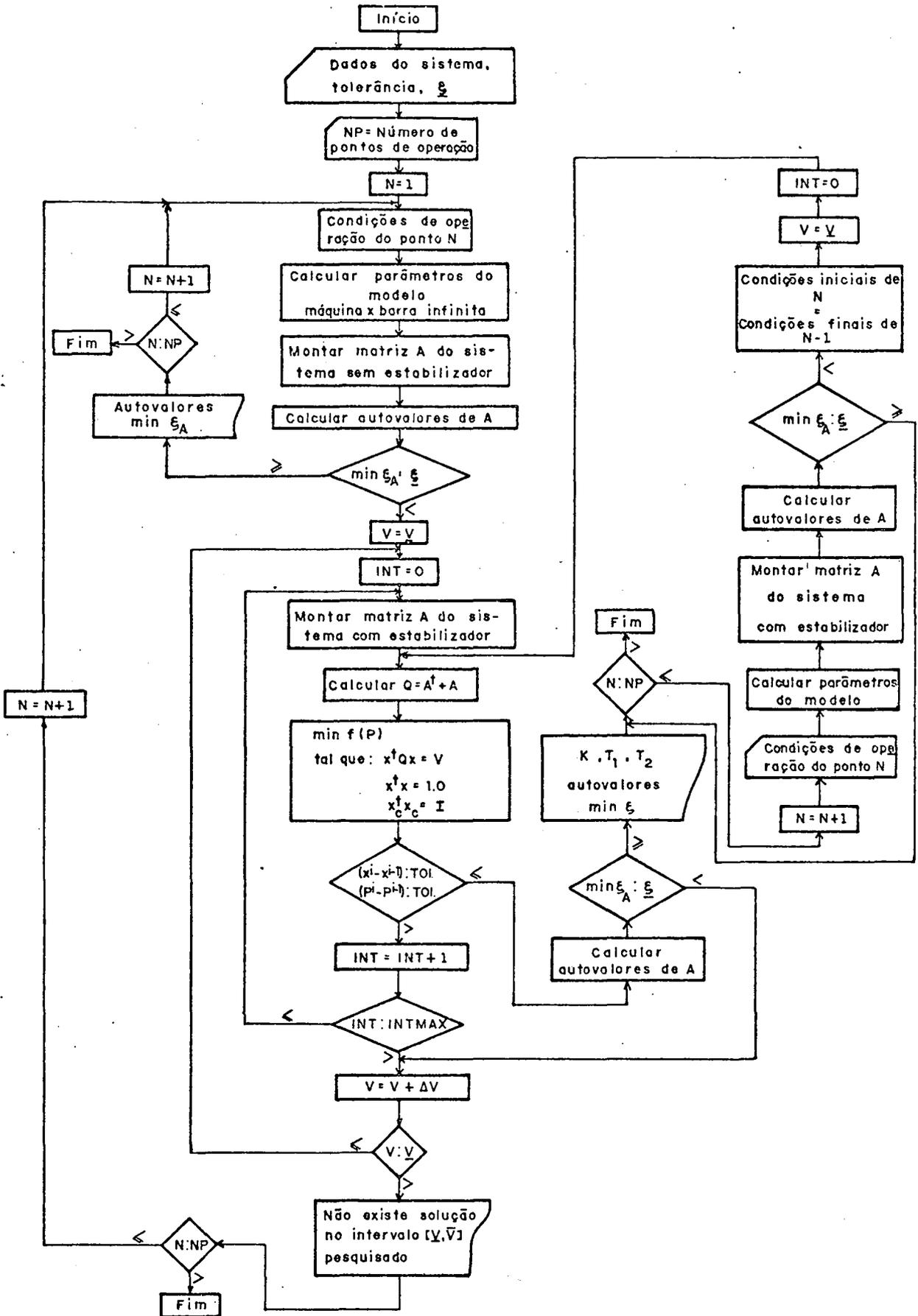


Figura 9. - Algoritmo modificado: Influência do Ponto de Operação no Ajuste do ESP

esta nova situação são as condições finais da situação anterior.

Este procedimento é repetido até que todos os pontos de operação são estudados, obtendo-se no final ajustes do estabilizador que garantem o comportamento mínimo aceitável do sistema.

Este algoritmo foi aplicado a um sistema cujos principais dados e os coeficientes do modelo linearizado para cada ponto de operação estão na tabela 10, enquanto que a tabela 11 mostra os ajustes feitos para o estabilizador. A tabela 12 fornece o valor do amortecimento mínimo para cada ponto de operação, com e sem a aplicação do estabilizador, para cada ajuste obtido.

Neste exemplo o amortecimento mínimo especificado como critério de parada para o algoritmo foi  $\xi \leq 0.03$  que "é tido como o mínimo aceitável para autovalores associados a modos de oscilação eletromecânica. Este valor corresponde a uma oscilação que decresce 37% de sua amplitude inicial em 5.3 ciclos de oscilação e apesar de não ser bem amortecida pelos padrões de controle, é característica do fenômeno de oscilações eletromecânicas em sistemas de potência".<sup>(12)</sup>

Observe que com exceção dos pontos 1, 2 e 3, todos os outros são condições instáveis de operação.

O estabilizador foi inicialmente ajustado para o primeiro ponto de operação (ajuste 1), que apesar de estável, tinha o menor amortecimento menor que o mínimo especificado. Este ajuste se mostrou eficiente para todas as condições de operação, com exceção do ponto 7, pois neste caso o amortecimento mínimo foi de 0.0142. Fez-se então novo ajuste do estabilizador (ajuste 2), conseguindo-se assim que o sistema operasse dentro das condições previamente fixadas.

Observe que o ajuste 2 mantém todos os pontos de operação do sistema sob estudo dentro das condições pré-estabelecidas, o

TABELA 10 - Coeficientes do Modelo Linearizado

e o Ponto de Operação:  $S = P + jQ$ e  $V_t = 1.0$  pu nos terminais da máquina

$x_d = 1.6$		$x'_d = 0.32$		$x_q = 1.55$		$M = 10.0$		$T'_{d0} = 8.0$		$K_A = 30.0$		$T_A = 0.05$	
caso	$P + jQ$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$						
1	0.2 + j 0.2	0.6789	0.4024	0.3600	0.5150	0.0352	0.5406						
2	0.5 + j 0.5	0.8707	0.6992	"	0.8949	0.0027	0.5091						
3	0.7 + j 0.7	0.9095	0.8066	"	1.0324	-0.0420	0.4928						
4	0.9 + j 0.4	1.0307	1.1402	"	1.4594	-0.0682	0.4210						
5	1.0 + j 0.0	1.1739	1.4683	"	1.8794	-0.1171	0.3012						
6	0.9 - j 0.4	1.2593	1.6859	"	2.1597	-0.1744	0.1460						
7	0.8 - j 0.6	1.2232	1.7445	"	2.2330	-0.2296	0.0313						
8	0.5 - j 0.5	1.3378	1.6780	"	2.1479	-0.0409	0.1549						

TABELA 11 - Parâmetros do ESP

ajuste	K(pu/pu)	T <sub>1</sub> (seg.)	T <sub>2</sub> (seg.)	T(seg.)
1	4.0778	0.3934	0.0117	1.0
2	4.9885	0.3928	0.0117	1.0

TABELA 12 - O Ponto de Operação e os Amortecimentos Obtidos

ponto	$\xi$ sem ESP	$\xi$ com ESP ajuste 1	$\xi$ com ESP ajuste 2
1	0.0181	0.0366	0.0424
2	0.0082	0.0470	0.0559
3	-0.0024	0.0410	0.0508
4	-0.0065	0.0499	0.0627
5	-0.0183	0.0468	0.0615
6	-0.0346	0.0340	0.0494
7	-0.0566	0.0142	0.0300
8	0.0115	0.0742	0.0880

TABELA 13 - Coeficientes de Sincronização e Amortecimento  
Equivalentes nas Diversas Condições de Ope  
ração.

PONTO	$\omega_n$ (Hz)	sem ESP		ESP - ajuste 1		ESP - ajuste 2	
		$K_{seq}$	$K_{deq}$	$K_{seq(1)}$	$K_{deq(1)}$	$K_{seq(2)}$	$K_{deq(2)}$
1	0.8052	0.6746	1.0753	0.6787	3.6077	0.6796	4.1692
2	0.9118	0.8654	0.9259	0.8792	5.2531	0.8823	6.2121
3	0.9319	0.9047	-0.2728	0.9226	4.6917	0.9267	5.7919
4	0.9921	1.0204	-0.7957	1.0599	6.0466	1.0638	7.5623
5	1.0588	1.1524	-2.3779	1.2152	6.0064	1.2293	7.8630
6	1.0966	1.2192	-4.5910	1.3087	4.4206	1.3286	6.4154
7	1.0808	1.1643	-7.2854	1.2634	1.6536	1.2855	3.6320
8	1.1303	1.3223	1.6006	1.4147	10.4944	1.4352	12.4631

unidades:  $K_s$  - (pu de potência/radianos)

$K_d$  - (pu de potência/pu de velocidade)

que não ocorre com o ajuste 1. Desta forma, devido às dificuldades práticas de se reajustar o ESP durante a operação do sistema de potência, poderia se escolher o ajuste 2 como condição de ajuste para todos os pontos de operação.

Na tabela 13 são mostrados os coeficientes de torques de sincronização e amortecimento equivalentes para o sistema sob estudo, em cada ponto de operação considerado. Estes coeficientes foram calculados na frequência natural de oscilação ( $\omega_n$ ), de cada condição de operação, para os dois ajustes mostrados na tabela 11. Observe que o ajuste 2 fornece maior torque de amortecimento equivalente que o ajuste 1 para o sistema sob estudo, em todas as condições de operação consideradas. O mesmo ocorre com o torque de sincronização equivalente, onde pode ser visto que em todos os casos, este torque tem seu valor aumentado.

Estes fatos indicam um bom desempenho do estabilizador, principalmente quando do ajuste 2, pois este além de fornecer torque de amortecimento ao sistema, também melhorou a sincronização, de forma mais eficiente que o ajuste 1.

#### 4.6 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado um procedimento para ajuste de sinais adicionais em geradores elétricos.

Por este procedimento, os parâmetros obtidos para o estabilizador são tais que produzem um torque de amortecimento adicional, tornando o sistema anteriormente instável ou pouco amortecido num sistema com um amortecimento mínimo pré-especificado. A título de comparação, foram calculados ajustes para o ESP utilizando-se o método da compensação de fase e pode ser observado que no caso da aplicação deste método,

geralmente se obtêm o amortecimento mínimo do sistema menor que o especificado, o que não ocorre com o procedimento proposto.

Como o estabilizador também tem influência no torque de sincronização do sistema, foram introduzidos conceitos de coeficientes de sincronização e amortecimento equivalentes que serviram para avaliar o impacto do sinal adicional na sincronização da máquina.

Outro assunto abordado foi o da dependência do ajuste do estabilizador e o ponto de operação do sistema. Esta dependência foi considerada através das modificações introduzidas no algoritmo proposto para ajuste do sinal adicional (figura 8), e mostraram que dependendo do ponto de operação do sistema, o estabilizador precisa ser reajustado para manter as condições especificadas.

Exemplos foram realizados aplicando os conceitos apresentados e os valores obtidos foram discutidos.

## 5. AJUSTE DE PARÂMETROS NO CASO MULTIMÁQUINAS

### 5.1 Introdução

Neste capítulo é discutido o ajuste do estabilizador no ambiente multimáquinas. São comentadas as dificuldades inerentes a este caso e, em vista disso, é proposto um procedimento alternativo.

A questão da melhor localização do estabilizador no sistema de potência é comentada e é utilizado o programa AUTOVAL (ver Apêndice 4) para se fazer tal localização.

Finalmente é mostrado um exemplo onde foi aplicado o procedimento alternativo e os resultados obtidos são discutidos.

### 5.2 Localização do Estabilizador

Em se tratando do ambiente multimáquinas, além do modo de oscilação local (frequências da ordem de 1.0 Hertz), outros modos de oscilação também são importantes, sendo o de maior interesse o modo inter-área (frequências na faixa de 0,4 a 0,6 Hertz).

É sabido que uma unidade geradora pode participar de ambos os modos de oscilação<sup>(3)</sup> e sendo assim, seu estabilizador deve dar boa resposta a ambos os modos.

No caso multimáquinas poderia se pensar como primeira solução, equipar todas as máquinas do sistema com estabilizadores adequadamente ajustados e assim resolver o problema dos modos de oscilação pouco amortecidos ou instáveis.

Este procedimento apresenta dificuldades por dois aspectos:

o econômico e o técnico.

O econômico devido logicamente ao grande número de máquinas existentes nos sistemas de potência reais.

A restrição técnica vem do fato de que "uma unidade geradora responde apenas por uma parte do valor total da potência de oscilação inter-área. Desta maneira, um estabilizador de sistema de potência aplicado a uma única unidade pode somente contribuir para o amortecimento do modo inter-área na proporção da capacidade de geração de potência da unidade, relativa à capacidade total da área a qual faz parte."<sup>(3)</sup>

Sendo assim, o problema que se coloca é saber em que unidade geradora do sistema de potência deve ser colocado o estabilizador para que este responda de modo "ótimo" ao amortecimento das oscilações. Quando o fenômeno da instabilidade é claramente identificado em uma máquina ou grupo de máquinas, a melhor localização do ESP fica automaticamente determinada. Em casos mais gerais, a escolha da máquina a ser equipada com o ESP é bastante complicada.

DeMello e outros<sup>(11)</sup> estudaram este assunto e utilizando análise de autovalores e autovetores do sistema, propuseram um procedimento para se determinar a melhor localização do estabilizador no sistema de potência.

Para a aplicação deste procedimento, são necessárias a identificação do modo natural de deslocamento do ângulo do rotor de cada máquina, do seu amortecimento intrínseco e da sensibilidade do amortecimento em função do ganho do ESP, quando este é colocado em determinada máquina. Para isto, o sistema multimáquinas é considerado em escala reduzida, onde cada máquina é representada por 2 (duas) variáveis de estado (variações de velocidade e ângulo  $\delta$ ). Aplicando-se um determinado distúrbio, obtém-se as curvas de oscilação que serão posteriormente

analisadas.

A identificação do modo natural de deslocamento do ângulo do rotor através das curvas de oscilação é difícil, principalmente porque existem vários modos e apenas alguns são pouco amortecidos. Além disso, a excitação de determinado modo é função do distúrbio considerado. Dessa maneira, a identificação do modo de oscilação problemático exigirá várias simulações, o que tornaria esta técnica proibitiva.

A solução encontrada foi através da análise de autovalores e autovetores do sistema. Os autores determinam a máquina a ser equipada com o ESP pela observação dos elementos do autovetor correspondente ao autovalor do ângulo do rotor que precisa ser melhor amortecido. O elemento do autovetor é escolhido como sendo aquele de maior magnitude (este elemento representa o anti-nó da oscilação), mas a localização do nó é determinada se produzir o maior decaimento ao modo de oscilação considerado. Comentam também que os efeitos amortecedores fornecem amortecimento a oscilações de altas frequências e que a instabilidade dinâmica está geralmente associada a frequências baixas e desta forma, os estabilizadores são mais necessários em máquinas que possuem um grande efeito no amortecimento de modos de baixa frequência.

Finalmente, deve ser colocado que a técnica considerada em (11) deve ser vista apenas como guia para localização do estabilizador no sistema de potência, já que os autovalores que se obtém do sistema reduzido mostram os modos de oscilação de um sistema reduzido e portanto, podem não terem sido excitados pelo tipo de distúrbio considerado.

O programa AUTOVAL é a implementação computacional do processo descrito em (11) acima citado, e será utilizado neste trabalho para a localização do ESP no sistema multimáquinas.

### 5.3 Procedimento Multimáquinas

Para o ambiente multimáquinas o procedimento de estabilização apresentado no sub-ítem 4.2 poderia ser aplicado, bastando para isto que a matriz de estado  $A$  do sistema descrevesse o caso  $n$ -máquinas.

Desta forma foi utilizado o modelo linearizado para  $n$ -máquinas<sup>(2,6)</sup> e assim obteve-se a matriz  $A$  e  $Q$  necessárias ao algoritmo.

A decisão sobre em qual máquina aplicar o estabilizador para amortecer determinado modo de oscilação foi obtida após o processamento do programa AUTOVAL.

Resolvidos estes aspectos do problema, a dificuldade encontrada para aplicação do algoritmo mostrado na figura 5 do capítulo 4 foi de ordem computacional. De acordo com o modelo dado em (2) e (6), cada máquina seria representada por quatro variáveis de estado, sendo que estas variáveis são função das variáveis de estado das demais máquinas. Considerando a estrutura do ESP adotada neste trabalho, pelo menos mais duas variáveis de estado seriam adicionadas ao sistema, resultando em seis variáveis de estado por máquina. Além disso, para cada ESP colocado, mais três variáveis (neste caso, os parâmetros do estabilizador) deveriam ser determinadas. Admitindo-se agora um sistema de 50 (cinquenta) máquinas, sendo que 10 (dez) delas seriam equipadas com estabilizadores, haveria necessidade de se determinar 250 (duzentos e cinquenta) variáveis. Com isso, já é problemática a convergência do método de otimização e a análise dos resultados através de autovalores começa a se tornar impraticável.

Optou-se então por um procedimento alternativo que é resumido nos seguintes passos:

1. via AUTOVAL, determine a máquina que deve ser equipada com sinal adicional estabilizador de modo a fornecer amortecimento ao modo de oscilação mais crítico (menos amortecido).
2. faça um equivalente do sistema n-máquinas visto pelos terminais da máquina escolhida, transformando assim o sistema num sistema máquina-barras infinita.
3. aplique o procedimento proposto no sub-ítem 4.2 ao sistema equivalente, obtendo os valores dos parâmetros do estabilizador.
4. calcule os autovalores do sistema n-máquinas, com a máquina escolhida equipada com o estabilizador obtido em 3 (use por exemplo, o AUTOVAL)
5. verifique se existe algum autovalor pouco amortecido.

Se sim, volte ao passo 1.

Se não, pare.

Deve ser ressaltado que o equivalente feito no passo 2 é o de Thevenin, que é um equivalente estático, por já estar disponível como uma das opções de saída do programa AUTOVAL.

Por este procedimento, espera-se poder amortecer todos os

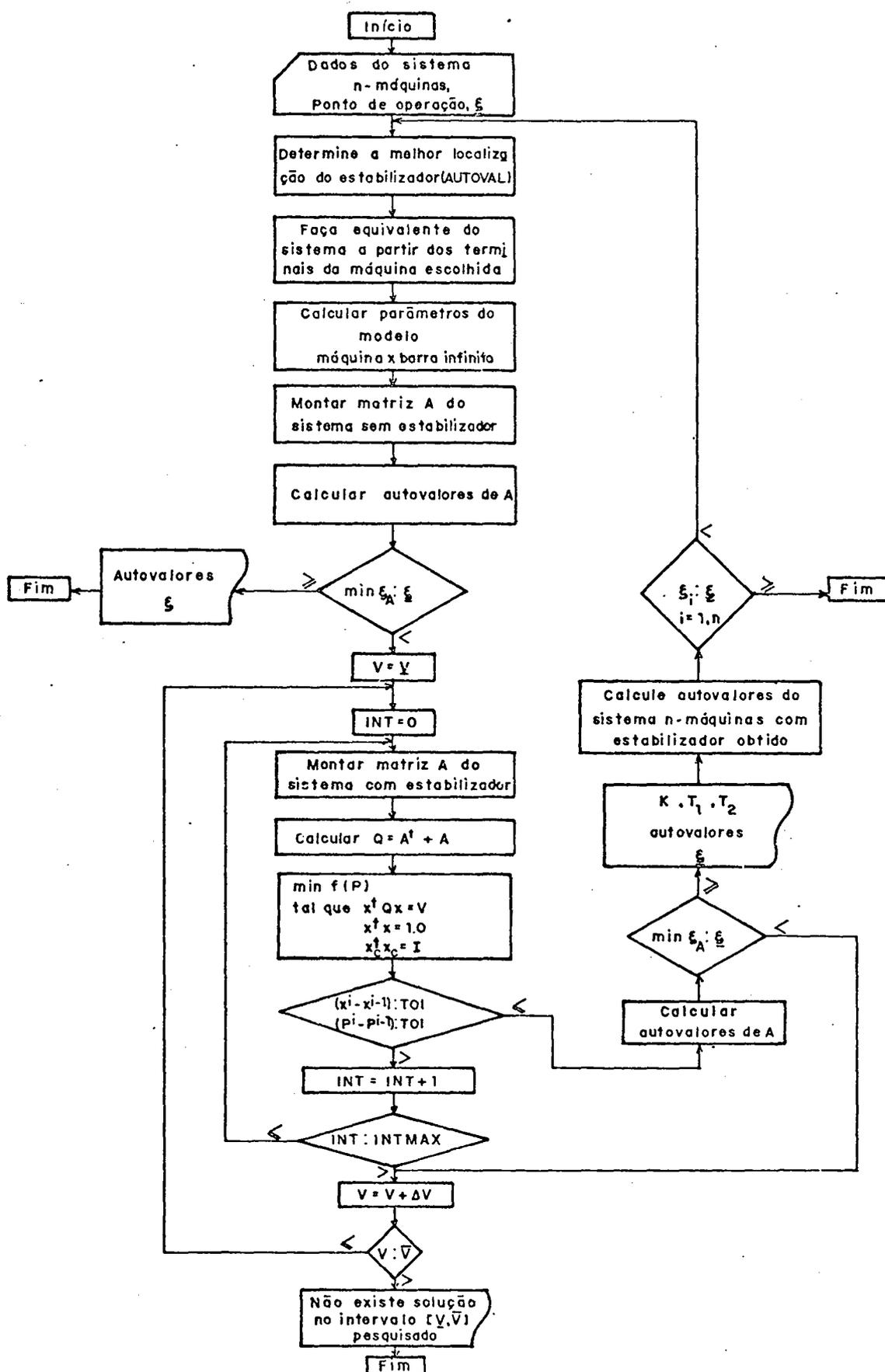


Figura 10 - Algoritmo multimáquinas

modos problemáticos do sistema, através de um processo iterativo entre o sistema equivalente máquina-barras infinita e o sistema multimáquinas.

A figura 10 mostra o fluxograma referente a este processo, que foi aplicado ao sistema multimáquinas apresentado em (13), com ligeiras modificações. Seus principais dados estão listados no apêndice 5. A tabela 14 mostra os autovalores do sistema sob estudo sem sinal estabilizador e as componentes do autovetor relativos às variações de velocidade dos rotores, que indicam a melhor localização do sinal estabilizador<sup>(11)</sup>, estão na tabela 15.

Partindo-se do princípio de melhorar primeiro o autovalor menos amortecido é com base na tabela 15, a melhor localização do estabilizador seria a máquina 2. Foi feito então um equivalente de Thevenin do sistema visto pelos terminais desta máquina e aplicado o algoritmo da figura 10. Os coeficientes do modelo linearizado estão na tabela 16.

Neste caso, o valor do amortecimento mínimo especificado foi  $\xi = 0.03$  (observe que no caso multimáquinas o autovalor menos amortecido tem  $\xi = 0.0204$  - tabela 14) e a resposta do algoritmo foi de que não necessitava de sinal adicional no sistema pois o autovalor menos amortecido tinha  $\xi$  maior que o mínimo especificado. Aumentou-se então o valor de  $\xi$  mínimo e os resultados obtidos para os parâmetros do estabilizador estão na tabela 17, enquanto que na tabela 18 são mostrados os autovalores do sistema equivalente.

O estabilizador ajustado pelo algoritmo foi colocado na máquina 2 e através do programa AUTOVAL os autovalores do sistema multimáquinas foram calculados. Seus valores estão na tabela 19.

Observe que todos os autovalores variam, tornando-se mais amortecidos, principalmente o autovalor para o qual a máquina 2

TABELA 14 - Autovalores do Sistema:  
3 máquinas - sem ESP

N	AUTOVALORES (rad/s)		$\xi$
	REAL	IMAG	
1	-0.7677	12.7822	0.0600
2	-0.7677	-12.7822	0.0600
3	-0.1693	8.2994	0.0204
4	-0.1693	-8.2994	0.0204
5	-8.8623	0.0	
6	-9.2158	0.0	
7	-3.7678	0.0	
8	-1.1448	1.1039	0.7200
9	-1.1448	-1.1039	0.7200
10	-0.0484	0.0	
11	-0.9628	0.0	
12	-0.5030	0.0	
13	-5.5829	0.0	
14	-0.1116	0.0	

TABELA 15 - Componentes do Autovetor Relativos às Variações de Velocidade dos Rotores para o Sistema 3-máquinas

AUTOVALOR (rad/seg)		BARRA	MÓDULO (pu)	FASE (grau)
REAL	IMAG			
-0.7677	12.7822	1	0.0382	-181.5
		2	0.3157	-177.6
		3	1.0	0.0
-0.1693	8.2994	1	0.3666	181.9
		2	1.0	0.0
		3	0.5979	2.3

TABELA 16 - Coeficientes do Modelo Linearizado para os Sistemas Equivalentes:

sistema	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
máq.2	2.4746	3.0952	0.3177	2.0254	0.0644	0.5075
máq.3	1.9622	2.3211	0.2699	2.3833	0.1401	0.4427

TABELA 17 - Parâmetros do ESP

sistema	$K$ (pu/pu)	$T_1$ (seg.)	$T_2$ (seg.)	$T$ (seg.)
máq. 2 x barra inf.	9.2562	0.5390	0.0137	1.0
máq. 3 x barra inf.	12.3425	0.5662	0.0152	1.0

tinha maior sensibilidade (o de número 3 na tabela 14 e o de número 4 na tabela 19).

Um fato que chama atenção é o "otimismo" com respeito ao valor dos amortecimentos que se obtém quando se usa o sistema equivalente.

O menor amortecimento obtido para o sistema multimáquinas sem estabilizador é 0.2004 (tabela 14) que é menor que o pior amortecimento obtido quando se usa o sistema equivalente ( $\xi = 0.0308$  - tabela 18). O mesmo fato ocorre quando se adiciona o estabilizador. Pelo sistema equivalente o valor de  $\xi$  mínimo é 0.0855 (tabela 18) que outra vez é maior que o mínimo calculado no ambiente multimáquinas ( $\xi = 0.0564$  - tabela 19).

Acredita-se que este "otimismo" se deve principalmente ao equivalente empregado que é um equivalente estático, quando na realidade deveria ser um equivalente dinâmico.

Para se confirmar o aspecto do otimismo e principalmente observar a importância da localização do estabilizador no amortecimento de determinado modo de oscilação, foi aplicado o mesmo procedimento anterior, apenas que agora o equivalente do sistema foi feito a partir dos terminais da máquina 3. Os valores obtidos para os parâmetros estão listados na tabela 17, enquanto seus autovalores estão nas tabelas 18 e 20.

A obtenção de informações otimistas sobre o amortecimento quando se usa o sistema equivalente é novamente verificada, tanto para o sistema sem como para com estabilizador. A importância da localização do sinal adicional também é observada.

Analisando-se os valores da tabela 20, vê-se que o autovalor que obteve maior amortecimento com a aplicação do estabilizador é o de número 2 (ou número 1 na tabela 10). Este autovalor é justamente aquele no qual a máquina 3 tem maior influência, conforme a tabela 15.

Comparando-se as tabelas 14 e 19, nota-se que ao amortecer primeiro o modo de oscilação mais crítico, os outros modos de oscilação também ficaram mais amortecidos. Isto é novamente verificado observando-se o menor amortecimento obtido na tabela 14 ( $\xi = 0.0204$ ) e comparando-se com a da tabela 20 ( $\xi = 0.0306$ ).

Suponha agora, por exemplo, que o amortecimento mínimo especificado para todos os autovalores do sistema fosse  $\xi = 0.05$ .

Com o arranjo mostrado na tabela 19 o problema estaria solucionado enquanto que para o da tabela 20 necessitar-se-ia de no mínimo mais um estabilizador.

Este fato é mostrado na tabela 21 onde foram colocados estabilizadores nas máquinas 2 e 3.

Deve ser enfatizado que esta melhoria no amortecimento dos demais modos de oscilação quando um particular modo é corrigido nem sempre ocorre. Não está provado que um estabilizador ajustado para fornecer amortecimento a um determinado modo de oscilação sempre melhorará os outros modos. Podem existir situações que a melhoria de um modo, degenere os demais.

Baseado neste fato é que se descarta a possibilidade de, no procedimento alternativo apresentado, exigir-se maior amortecimento de um único estabilizador para corrigir todos os modos de oscilação de um dado sistema de potência.

Observe também que em todos os casos, o amortecimento mínimo aumenta mas em compensação, a parte imaginária dos autovalores sofre maior variação, o que nem sempre é desejável. Nos casos mostrados a variação é positiva, indicando maior poder de sincronização das máquinas, mas podem ocorrer casos em que a aplicação do estabilizador diminua o coeficiente de sincronização.

TABELA 18 - Autovalores dos Sistemas Equivalentes:

s	esp $\xi$	SEM ESP AUTOVALORES (rad/seg)		$\xi$	COM ESP AUTOVALORES (rad/seg)		$\xi$
		REAL	IMAG		REAL	IMAG	
2	0.05	-0.263	8.553	0.0308	-0.791	9.224	0.0855
		-0.263	-8.553	0.0308	-0.791	-9.224	0.0855
		-0.890	0.0		-0.928	0.158	0.9858
		-9.108	0.0		-0.928	-0.158	0.9858
					-73.285	0.0	
					-7.776	0.0	
3	0.03	-0.313	11.145	0.0280	-0.991	12.607	0.0784
		-0.313	-11.145	0.0280	-0.991	-12.607	0.0784
		-0.656	0.0		-66.667	0.0	
		-9.348	0.0		-7.259	0.0	
					-0.851	0.0	
					-0.764	0.0	

TABELA 19 - Autovalores do Sistema 3-máquinas:

ESP na máquina 2

N	AUTOVALORES (rad/s)		$\xi$
	REAL	IMAG	
1	-73.302	0.0	
2	-0.872	12.976	0.0670
3	-0.872	-12.976	0.0670
4	-0.491	8.696	0.0564
5	-0.491	-8.696	0.0564
6	-9.109	0.0	
7	-7.617	0.0	
8	-3.764	0.0	
9	-1.207	1.160	0.7210
10	-1.207	-1.160	0.7210
11	-0.038	0.0	
12	-1.030	0.361	0.9440
13	-1.030	-0.361	0.9440
14	-5.581	0.0	
15	-0.487	0.0	
16	-0.112	0.0	
17	-1.000	0.0	

TABELA 20 - Autovalores do Sistema 3-máquinas:

ESP na máquina 3

N	AUTOVALORES (rad/s)		$\xi$
	REAL	IMAG	
1	-66.667	0.0	
2	-1.222	14.097	0.0864
3	-1.222	-14.097	0.0864
4	-0.257	8.393	0.0306
5	-0.257	-8.393	0.0306
6	-9.037	0.0	
7	-7.100	0.0	
8	-5.315	0.0	
9	-3.946	0.0	
10	-1.193	1.140	0.7230
11	-1.193	-1.140	0.7230
12	-0.037	0.0	
13	-0.990	0.276	0.9630
14	-0.990	-0.276	0.9630
15	-0.556	0.0	
16	-0.112	0.0	
17	-1.000	0.0	

TABELA 21 - Autovalores do Sistema 3-máquinas:  
ESP nas máquinas 2 e 3

N	AUTOVALORES (rad/s)		$\xi$
	REAL	IMAG	
1	-73.302	0.0	
2	-66.665	0.0	
3	-1.262	14.245	0.0833
4	-1.262	-14.245	0.0833
5	-0.647	8.824	0.0732
6	-0.647	-8.824	0.0732
7	-7.886	0.0	
8	-6.826	0.0	
9	-5.333	0.0	
10	-3.969	0.0	
11	-1.277	1.194	0.7300
12	-1.277	-1.194	0.7300
13	-0.031	0.0	
14	-1.056	0.436	0.9240
15	-1.056	-0.436	0.9240
16	-0.540	0.0	
17	-0.938	0.0	
18	-0.112	0.0	
19	-1.000	0.0	
20	-1.000	0.0	

#### 5.4 Conclusão

A melhor localização do sinal adicional estabilizador num sistema multimáquinas foi brevemente discutida, e um procedimento alternativo de ajuste para esta situação foi proposto.

Este procedimento surgiu devido à dificuldade de se trabalhar com o sistema global, onde a dimensão das matrizes envolvidas e o número de variáveis a se determinar são muito grandes.

Foi efetuado um exemplo-teste utilizando o procedimento e resultados foram obtidos. Da análise destes resultados foi possível confirmar a eficácia do algoritmo da figura 9 e também a importância da escolha da localização do estabilizador no ambiente multimáquinas.

## 6. CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Neste trabalho apresentou-se um procedimento para a estabilização de sistemas lineares, envolvendo conceitos de otimização e estabilidade no sentido de Liapunov.

Inicialmente considera-se um sistema linear instável ou pouco amortecido, descrito na forma de equações de estado ( $\dot{x} = Ax + Bu$ ). Define-se então a estrutura de um controlador tal que, ao ser aplicado ao sistema anterior faz com que os autovalores da matriz de estado do sistema resultante de sua inclusão, migrem para o semi-plano esquerdo do plano complexo  $s$ . Deve ser salientado que teoricamente, a estrutura do controlador pode ser qualquer uma. A condição para a escolha da estrutura é que de fato, seus parâmetros tenham um acoplamento com os do sistema, de modo que sua inclusão influencie os valores de amortecimento do sistema original.

Este procedimento foi utilizado para se ajustar os parâmetros do sinal adicional estabilizador de sistema de potência, de maneira que após seu ajuste, o sistema de potência se tornasse estável com um amortecimento mínimo pré-especificado. Considerando este objetivo, foi desenvolvido um algoritmo para a estabilização de sistemas lineares, baseado em propriedades de uma matriz simétrica e na formulação de um problema de programação não linear.

Este algoritmo é iterativo e mostrou ser facilmente aplicável. Os valores de certas constantes ( $\bar{V}$ ,  $\underline{V}$  e  $I$ ) são definidos inicialmente. O processamento repetido do algoritmo permite que estes valores possam ser melhor adaptados ao caso em estudo.

Deve ser observado que estas constantes servem apenas como instrumento para a obtenção do valor do amortecimento mínimo pré-especificado para o sistema. Este amortecimento define o critério de parada do algoritmo.

Considerando que as constantes  $\bar{V}$ ,  $\underline{Y}$  e  $I$  são "constantes de apoio" ao algoritmo, vê-se que na realidade apenas um parâmetro é fixado: o amortecimento mínimo que deverão ter os autovalores do sistema após a estabilização.

Como este algoritmo foi utilizado para ajuste do sinal adicional de geradores eléticos, foram discutidos o modelo matemático da máquina síncrona x barra infinita (linearizado) e a estrutura do estabilizador. Comentários a respeito da utilização dos modelos da máquina e estabilizador também foram incluídos.

Aplicou-se o algoritmo a dois sistemas máquina x barra infinita e da análise dos resultados obtidos pode-se ver que o objetivo foi atingido: a parte real dos autovalores do sistema, após a inclusão do estabilizador cujos parâmetros foram determinados pelo algoritmo, tornou-se negativa com um amortecimento maior ou igual ao previamente fixado.

Para comparação com os resultados anteriores, fez-se o ajuste dos estabilizadores dos dois sistemas pelo método da compensação de fase. Observou-se que por este método, o amortecimento que se obtém é menor que o mínimo especificado e que, para se atingir este mínimo é necessário exigir-se um amortecimento maior a nível de projeto.

Este fato pode ser visto como uma vantagem do procedimento proposto neste trabalho, já que por sua própria estrutura, os parâmetros do ESP são determinados somente após os autovalores do sistema ficarem com o amortecimento pré-especificado.

Para se verificar a influência do ESP na sincronização da máquina síncrona foram calculados coeficientes equivalentes de

sincronização e amortecimento, para fins de comparação.

Os resultados obtidos foram coerentes com estudos já realizados por outros autores e mostraram a capacidade que o ESP tem de aumentar o coeficiente de amortecimento, mas ao mesmo tempo podendo diminuir o de sincronização.

Em seguida variou-se o ponto de operação do sistema máquina síncrona x barra infinita e em todos os pontos estudados foi possível tornar o sistema estável com a inclusão do estabilizador ajustado pelo algoritmo. Neste caso observou-se a necessidade de reajustar os parâmetros do estabilizador, dependendo do ponto de operação do sistema, já que com a mudança das características do sistema, o estabilizador ajustado para um determinado ponto não mantinha o sistema dentro dos padrões pré-estabelecidos para todos os pontos. Devido às dificuldades práticas de se reajustar o ESP durante a operação do sistema, procurou obter-se um ajuste que satisfizesse todos os pontos de operação considerados. Novamente, foram calculados os coeficientes de sincronização e amortecimento equivalentes para cada ponto de operação, na respectiva frequência natural de oscilação. Observou-se que neste caso o ESP além de fornecer amortecimento ao sistema, também melhorou sua sincronização.

Questões relativas ao sistema multimáquinas também foram discutidas e um procedimento alternativo de ajuste do ESP neste ambiente foi sugerido e testado.

Dos resultados obtidos, observou-se um "otimismo" do procedimento em relação aos amortecimentos do sistema multimáquinas, mas mesmo assim foi possível atingir o amortecimento mínimo pré-especificado. Este "otimismo" ocorre devido ao uso de um equivalente estático no procedimento alternativo. Como os valores dos amortecimentos que servem como critério de parada do algoritmo são calculados no sistema global

(e não no sistema equivalente) e o processo é iterativo, no final garante-se o amortecimento mínimo para todos os autovalores do sistema multimáquinas. Dessa forma, este "otimismo" observado deixa de ser um fator limitante do algoritmo, pois é eliminado durante o processo.

De forma geral, baseado nos resultados obtidos nos diversos tópicos tratados no trabalho, pode-se afirmar que o algoritmo proposto realiza sua tarefa (tornar os autovalores da matriz de estado  $A$  do sistema com parte real negativa), desde que a ele sejam fornecidos valores usuais do sistema sob estudo.

Como vantagens contidas no algoritmo podem ser citadas a possibilidade de, teoricamente, poderem ser escolhidas e testadas outras estruturas para o estabilizador e também incluir na modelagem reguladores de tensão mais sofisticados. Além disso, outros sinais de entrada para o estabilizador podem ser considerados (por exemplo, frequência e/ou potência elétrica), bastando para isto escrever as equações de estado do sistema considerando estes sinais de entrada.

Deve ser salientado que os parâmetros do estabilizador resultantes da aplicação do algoritmo devem ser vistos como guias (ou valores iniciais) para o ajuste nos sistemas. O ajuste final do estabilizador deve ser completado sempre em testes de campo, onde outras variáveis que não estão presentes nos estudos teóricos aparecem.

Como sugestões para futuros trabalhos pode-se citar:

- pesquisar entre os vários métodos de otimização existentes o que melhor se adapte à natureza não linear deste problema específico e aplicá-lo ao algoritmo para melhorar sua eficiência computacional;

- estudar cuidadosamente o modelo linearizado multimáquinas para poder aplicá-lo ao algoritmo e explorar as particularidades da matriz de estado do sistema para diminuir a dimensão do problema de otimização.

- estudar um equivalente dinâmico do sistema de potência, para aplicação no procedimento alternativo para n- máquinas;

- aplicar o algoritmo a estabilizadores com outros sinais de entrada e estrutura;

- através de uma seleção de contingências, estudar o ajuste dos parâmetros do ESP para diferentes topologias da rede de potência externa e condições de operação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DeMello, F. P. & Concórdia, C., (1969), "Concepts of Synchronous Machines Stability as Affected by Excitation Control". IEEE Trans. on PAS, Vol. 88, nº 4: 316 - 331.
2. Moussa, H. A. M. & Yu, Y., (1974). "Dynamic Interaction of Multimachine Power System and Excitation Control". IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, nº 4: 1150 - 1158.
3. Larsen, E. V. & Swann, D. A., (1981). "Applying Power System Stabilizers: Part I, II, III". IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, nº 6: 3017 - 3046.
4. IEEE Committee Report, (1981). "Excitation System Models for Power Stability Studies". IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, nº 2: 494 - 509.
5. Mattos, F. C. G., (1984), Ajuste de Parâmetros de Reguladores de Tensão e Sinais Estabilizadores de Sistemas de Potência, Tese de Mestrado, UFSC.
6. Fleming, R. J. & Mohan, M. A. & Parvatisam, K., (1981). "Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power Systems". IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, nº 5: 2329 - 2333.
7. Gooi, H. B. & Hill, E. F. & Mobarak, M. A. & Thorne, D. H. &

- Lee, T. H., (1981). "Coordinated Multimachine Stabilizer Settings Without Eigenvalue Drift". IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, nº8; 3879 - 3887.
8. Chen, C. T., (1979). Introduction to Linear System Theory, Holt, Rinehart and Winston, INC., USA.
9. Yu, Y. N., (1983), Electric Power System Dynamics, Academic Press, USA.
10. Mobarak, M. & Thorne, D. & Hill, E., (1980). "Contrast of Power System Stabilizer Performance on Hydro and Thermal Units". IEEE Trans. on PAS, Vol. 99, nº 4: 1522 - 1533.
11. DeMello, F. P. & Nolan, P. J. & Laskowski, T. F. & Undrill, J. M., (1980). "Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems". IEEE Trans. on PAS, Vol. 99, nº3: 892 - 901.
12. Programa AUTOVAL, (Manual do Usuário). (1983), ELETROBRÁS, Brasil.
13. Anderson, P. M. & Fouad, A. A., (1977). Power System Control and Stability, The Iowa State University Press, USA.
14. Kimbark, E. W., (1965). Power System Stability: Synchronous Machine, Dover Publications, INC., USA.
15. Young, C. C., (1972). "Equipment and Modeling for Large Scale Stability Studies". IEEE Trans. on PAS, Vol. 91, nº 5: 99 - 108.

16. El-Sheriny, M. K. & Mehta, D. M., (1973). "Dynamic System Stability - Part. I". IEEE Trans, on PAS, Vol. 92, nº 4: 1538 - 1546.
17. Yu, Y. N. & Siggers, C., (1970). "Stabilization and Optimal Control Signals for a Power System". IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference, 1469 - 1481.
18. Marshall, W. K. & Smolinski, W. J., (1973). "Dynamic Stability Determination by Synchronizing and Damping Torque Analysis". IEEE PES Winter Meeting, 1239 - 1246.
19. Souza, J. R. B. & Doraiswami, R., (1980). "Um Algoritmo Computacional para a Determinação dos Parâmetros de Controladores usando Programação Linear". 3º Congresso Brasileiro de Automática, RJ - Brasil, 309 - 315.
20. Hsu, Y. Y. & Chen, C. L., (1977). "Identification of Optimum Location for Stabilizer Applications Using Participation Factors". IEEE Proceedings, Vol. 134, nº 3: 238 - 244.
21. Moussa, H. A. M. & Yu, Y. N., (1971). "Optimal Power System Stabilization Through Excitation and/or Governor Control", IEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, 1166 - 1182.
22. Crary, S. B., (1962), Power System Stability: Vols. I, II, John Willey and Sons INC., USA.
23. Ribeiro, L. P. L. & Tsuzuki, M., (1977). "Influência do Sistema de Excitação no Torque Sincronizante e de

Amortecimento da Máquina - Ajuste de Sinais Estabilizantes".  
Anais do IV SNPTEE, Grupo IV, CTBA.GSP.15, RJ-Brasil.

24. Watson, W. & Coultres, M. E., (1973). "Static Exciter Stabilizing Signal on Large Generators-Mechanical Problems".  
IEEE Trans. on PAS, Vol. 92, nº 1.
25. Watson, W. & Manchur, G., (1973). "Experience with Supplementary Damping Signals for Generator Static Systems".  
IEEE Trans. on PAS, Vol. 92, nº 1: 199 - 203.
26. Soares, J. M. C. & Pons, F. H. & Figueiredo, F. F. & Paiva, P. M. P., (1981). "Aplicações de Sinais Adicionais Estabilizadores em Usinas Hidrelétricas - Testes de Campo, Problemas Práticos e Simulações". Anais do IV SNPTEE, Grupo IV, BC/GSP/17, SC-Brasil.
27. Ribeiro, L. P. L. & Mattos, F. C. G., (1984). "Procedimentos a serem adotados no Ajuste de Sinais Estabilizantes".  
Anais do VII SNPTEE, Grupo IV, GSP, Brasília-Brasil.
28. Gerhart, A. D. & Hilleshand, T. & Luini, J. F. & Rockfield, M. L., (1971). "Power System Stabilizer: Field Testing and Digital Simulation". IEEE Trans. on PAS, Vol. 90, nº 90: 2095 - 2100.
29. Velho, G. J. M. & Chaves, C. A. R. & Mendes, J. A. F., (1977). "Implementação de Um Modelo Completo de Máquina Síncrona e de um Método Direto de Solução de Redes no Programa de Estabilidade da Philadelphia" Anais do IV SNPTEE, Grupo IV, RJ/GSP/o8, RJ-Brasil.

30. DeMello, F. P. & Leuzinger, L. M., (1974). "Load Rejection Over voltages as Affected by Excitation System Control". IEEE PES Summer Meeting.
31. DeMello, F. P. & Laskowski, T.F., (1975). "Concepts of Power System Dynamic Stability". IEEE Trans. on PAS, Vol. 94, nº 3: 827 - 833.
32. Mota, W., (1981), Optimal Control Techniques in the Designin of Power System Stabilizers, Tese de Ph.D., Universidade de Waterloo, Canadá.
33. Yu, Y. & VVongsuriya, K. & Wedman, L., (1970). "Application of an Optimal Control Theory to a Power System". IEEE Trans. on PAS, Vol. 89, nº 1: 55 - 62.
34. El-Sherbiny, M. K. & Mehta, D. M. (1973). "Dynamic System Stability - Part I - Investigation of the Effect of Diferent Loading and Excitation Systems". IEEE Trans. on PAS, Vol. 92, nº 92: 1 - 9.
35. Ogata. K., (1970). Engenharia de Controle Moderno, Prentice Hall, Brasil.

**APÊNDICES**

## APÊNDICE 1

### Linearização da Máquina Síncrona

## Linearização da Máquina Síncrona

Para a linearização da máquina síncrona, as seguintes hipóteses são feitas:

- a influência dos enrolamentos amortecedores são desprezíveis, bem como a resistência do estator;
- a velocidade angular do rotor é constante ( $\omega = \omega_b$ );
- o efeito da saturação é desprezado e condições balanceadas são assumidas;
- a máquina síncrona é ligada a uma barra infinita através de uma linha de transmissão com parâmetros  $R_e + j X_e$ ;
- os termos referentes às tensões de transformação ( $\dot{\lambda}_d$  e  $\dot{\lambda}_q$ ) são desprezíveis quando comparadas com os termos das tensões de velocidade ( $\omega \lambda_d$  e  $\omega \lambda_q$ ).

As fórmulas abaixo permitem o cálculo dos parâmetros listados no sub-ítem 2.1:

$$E'_q = E + (x_d - x'_d) I_d$$

$$E_{qa0} = E'_{q0} - (x_q - x'_d) I_{d0}$$

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

$$K_1 = K_I V_0 \{ E_{qa0} [ R_e \text{sen}(\delta_0 - \alpha) + (x'_d + X_e) \cos(\delta_0 - \alpha) ] + \\ I_{q0} (x_q - x'_d) [ (X_e + x_q) \text{sen}(\delta_0 - \alpha) - R_e \cos(\delta_0 - \alpha) ] \}$$

$$K_2 = K_I \{ R_e E_{qa0} + I_{q0} [ R_e^2 + (x_q + X_e)^2 ] \}$$

$$K_3 = [ 1 + K_I (x_d - x'_d) (x_q - X_e) ]^{-1}$$

$$K_4 = V_0 K_I (x_d - x'_d) [ (x_q + X_e) \text{sen}(\delta_0 - \alpha) - R_e \cos(\delta_0 - \alpha) ]$$

$$K_5 = (K_I V_0 x'_d \frac{V_{q0}}{V_{t0}}) [ R_e \cos(\delta_0 - \alpha) - (x_q + X_e) \text{sen}(\delta_0 - \alpha) ] -$$

$$(K_I V_0 x_q \frac{V_{q0}}{V_{t0}}) [ (x'_d + X_e) \cos(\delta_0 - \alpha) + R_e \text{sen}(\delta_0 - \alpha) ]$$

$$K_6 = (\frac{V_{q0}}{V_{t0}}) [ 1 - K_I x'_d (x_q + X_e) ] - (\frac{V_{d0}}{V_{t0}}) K_I x_q R_e$$

## APÊNDICE 2

### O Problema da Otimização

## O Problema da Otimização

$$\begin{aligned}
 \min f(P) &= P^t P & (1) \\
 \text{sujeito a: } &x^t Q(P) x^t = V \\
 &x^t x = 1.0 \\
 &x_C^t x_C = I \\
 &\underline{P} \leq P_i \leq \bar{P}
 \end{aligned}$$

Trabalhando com as restrições de (1) e aplicando Multiplicadores de Lagrange:

$$\begin{aligned}
 \min FO \\
 \text{tal que } [ \nabla FO = 0 ]
 \end{aligned}$$

onde:

$$FO = f(P) - \mu_1 (x^t Q(P) x - V) - \mu_2 (x^t x - 1) - \mu_3 (x_C^t x_C - I)$$

$$[ \nabla FO ] = \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial FO}{\partial x_i} = 0 \quad i=1, \dots, n \\ \frac{\partial FO}{\partial P_i} = 0 \quad i=1, 2, 3 \\ \frac{\partial FO}{\partial \mu_i} = 0 \quad i=1, 2, 3 \end{array} \right] \quad (2)$$

Resolver (1) é equivalente a resolver o conjunto de

equações algébricas homogêneas não lineares dado por (2).

Aplicando o método de Newton-Raphson:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial FO}{\partial x_i} \\ \frac{\partial FO}{\partial P_j} \\ \frac{\partial FO}{\partial \mu_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_p} \left( \frac{\partial FO}{\partial x_i} \right) & \frac{\partial}{\partial P_q} \left( \frac{\partial FO}{\partial x_i} \right) & \frac{\partial}{\partial \mu_r} \left( \frac{\partial FO}{\partial x_i} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x_p} \left( \frac{\partial FO}{\partial P_j} \right) & \frac{\partial}{\partial P_q} \left( \frac{\partial FO}{\partial P_j} \right) & \frac{\partial}{\partial \mu_r} \left( \frac{\partial FO}{\partial P_j} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x_p} \left( \frac{\partial FO}{\partial \mu_m} \right) & \frac{\partial}{\partial P_q} \left( \frac{\partial FO}{\partial \mu_m} \right) & \frac{\partial}{\partial \mu_r} \left( \frac{\partial FO}{\partial \mu_m} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta P_q \\ \Delta \mu_r \end{bmatrix}$$

$$x_p^{k+1} = x_p^k + \Delta x_p$$

$$P_q^{k+1} = P_q^k + \Delta P_q$$

$$\mu_r^{k+1} = \mu_r^k + \Delta \mu_r$$

$$l, p = 1, \dots, n$$

$$j, q, m = 1, 2, 3$$

No caso específico de máquina síncrona x barra infinita, regulador de tensão estático e a estrutura do estabilizador adotada no trabalho,  $n = 7$ .

## APÊNDICE 3

O Método da Compensação de Fase

## O Método da Compensação de Fase <sup>(1,3,5,9)</sup>

Por este método, os parâmetros do ESP devem ser tais que compensem os atrasos de fase introduzidos pelo gerador, sistema de potência externo e regulador de tensão. Estes atrasos podem ser determinados a partir do diagrama de blocos da figura A.1, que envolve a malha de geração, excitação e transmissão.

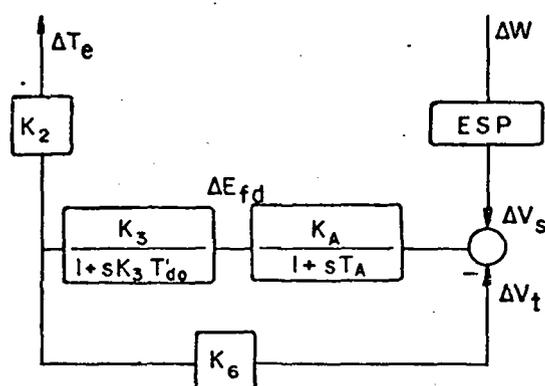


Figura A.1- Diagrama de Blocos: Malha de Geração, Excitação e Transmissão.

Considerando  $GET(s)$  como a função de transferência entre  $\Delta T_e(s)$  e  $V_s(s)$ , tem-se:

$$GET(s) = \frac{\Delta T_e(s)}{V_s(s)} = \frac{K_A K_2 K_6}{(1 + sT_A) (1 + sK_3 T'_{d0}) + K_A K_3 K_6} \quad (A.1)$$

Seja  $s^* = \sigma^* + j \omega^*$  (rad/seg.) a frequência na qual deve ser feito o ajuste do ESP. Desta forma, pode-se calcular o ganho e o atraso de fase de  $GET(s^*)$ , como definidos a seguir:

$$K_{GET} = \text{ganho de GET}(s^*) = \left| \text{GET}(s) \right|_{s = s^*} \quad (\text{A.2})$$

$$\alpha = \text{fase de GET}(s^*) \quad (\text{A.3})$$

Considerando o ESP como tendo a mesma estrutura da figura 4 (capítulo 2 - sub-ítem 2.3), define-se a fase do bloco diferenciador na frequência  $s^*$  ( $\beta$ ):

$$\beta = \text{arctg}\left(\frac{\omega^*}{\sigma^*}\right) - \text{arctg}\left(\frac{\sigma^* T}{1 + \sigma^* T}\right) \quad (\text{A.4})$$

para  $T$  já escolhido.

Assim, o bloco compensador na frequência  $s^*$ , deve ser tal que sua fase seja:

$$\psi = -(\alpha + \beta) \quad (\text{A.5})$$

Especificando-se a constante de tempo  $T_2$  do bloco compensador, pode-se determinar a constante de tempo  $T_1$  como a seguir:

$$T_1 = \frac{\text{tg}(\psi + \phi)}{\omega^* - \sigma^* \text{tg}(\psi + \phi)} \quad (\text{A.6})$$

onde:

$$\phi = \text{arctg}\left(\frac{\omega^* T_2}{1 + \sigma^* T_2}\right) \quad (\text{A.7})$$

Supondo que o ESP deve fornecer um torque de amortecimento de amplitude  $D_{\text{EST}}$ , pode-se escrever:

$$D_{\text{EST}} = 2 \xi \omega_n M \quad (\text{A.8})$$

onde:

$\xi$  = coeficiente de amortecimento

$\omega_n$  = frequência natural de oscilação (rad/seg.),

$M$  = momento de inércia (seg.)

De acordo com a figura A.1 tem-se

$$D_{\text{EST}} = K_{\text{GET}} + K_{\text{EST}} \quad (\text{A.9})$$

onde:

$K_{\text{EST}}$  = ganho do sinal estabilizador na frequência  $s^*$ ,

$K_{\text{GET}}$  = ganho de GET( $s^*$ ).

De acordo com a estrutura adotada para o estabilizador tem-se:

$$K_{EST} = K \left| \frac{s^* T}{1 + s^* T} \frac{1 + s^* T_1}{1 + s^* T_2} \right| = K K_C \quad (A.10)$$

Então, de A.1, A.8, A.9, A.10:

$$K = \frac{2 \xi \omega_n M}{K_{GET} * K_C} \quad (A.11)$$

onde K é o ganho ajustável do ESP.

**APÊNDICE 4****Programa AUTOVAL**

## Programa AUTOVAL<sup>(12)</sup>

O programa AUTOVAL versão V3:2 - nov/80, desenvolvido pelo CEPEL, se destina à análise da estabilidade dinâmica de sistemas de potência, utilizando o método dos autovalores.

O programa forma a matriz de estado do sistema de potência para um ponto de operação especificado e calcula seus autovalores. A presença de um ou mais autovalores com parte real positiva indica instabilidade do sistema para a dada condição de operação.

No IBM 4341 do NPD da UFSC, o programa AUTOVAL foi implantado em 3 versões:

versão 1: 100 estados (memória = 1700 k)

versão 2: 200 estados (memória = 2200 k)

versão 3: 500 estados (memória = 6000 k)

O programa tem capacidade para 1500 linhas, 1000 barras e 50 máquinas síncronas.

Inicialmente são lidos os dados da rede elétrica e resultados do fluxo de potência convergidos. A condição de operação escolhida é testada e a execução encerrada caso seja encontrada alguma imprecisão significativa (dependendo da tolerância especificada).

No caso da precisão ser aceitável, o programa monta e reduz a matriz admitância do sistema aos barramentos dos geradores, empregando técnicas de esparsidade. Neste processo as cargas são consideradas do tipo impedância constante.

As máquinas síncronas podem ser representadas por quatro modelos diferentes escolhidos pelo programa, de acordo com os

dados a ele fornecidos.

Para o sistema de excitação (reguladores de tensão), são disponíveis cinco modelos e os reguladores de velocidade podem ser representados por modelos simplificados de segunda ordem.

O sinal adicional estabilizador pode ser implementado por funções de transferência de até quarta ordem, podendo seu sinal de entrada ser derivado da velocidade do rotor, potência elétrica ou frequência. Além disso, o programa possui rotinas que permitem ao usuário definir outras estruturas para os controladores.

Quanto aos dados imprescindíveis à execução do programa, são necessários dois arquivos: um contendo dados da rede elétrica e outro referente às máquinas síncronas e seus controladores.

Os dados relativos à rede elétrica podem ser fornecidos ao AUTOVAL através do próprio usuário ou lidos diretamente de um arquivo histórico de acesso direto gerado pelo PECO.

Para as máquinas síncronas e seus controladores os dados devem sempre ser fornecidos pelo usuário, sendo permitida apenas uma máquina por barramento.

A forma de como estes dados devem ser fornecidos (definição de campos, tipo de variáveis, etc...) pode ser encontrada no "Manual do Usuário".

As funções do programa AUTOVAL são acionadas através de certos códigos, sendo que as principais funções são as relativas ao cálculo de autovalores e autovetores e ao controle da execução do programa.

#### 1. relativa ao cálculo de autovalores e autovetores:

0 = todos os autovalores do sistema são calculados e impressos.

1 = todos os autovalores do sistema são calculados e para

cada autovalor pouco amortecido ( $\xi < 0.05$ ) é gerada uma lista contendo os módulos dos componentes do autovetor, relativos às variações de velocidade dos rotores (esta lista pode ser empregada na determinação da localização de sinais estabilizadores em sistema de potência<sup>(11)</sup>).

2. relativa à execução do programa:

0 = execução normal.

1 = executa o programa, mesmo com imprecisão nos resultados do fluxo de potência.

2 = o teste de precisão do fluxo de potência não é realizado.

3 = encerra a execução após o cálculo das condições iniciais.

4 = ativa a opção "equivalente THEVENIN".

Maiores informações sobre o programa AUTOVAL podem ser encontradas no Manual do Usuário<sup>(12)</sup>.

## APÊNDICE 5

Dados do Sistema Multimáquinas

## Dados do Sistema Multimáquinas

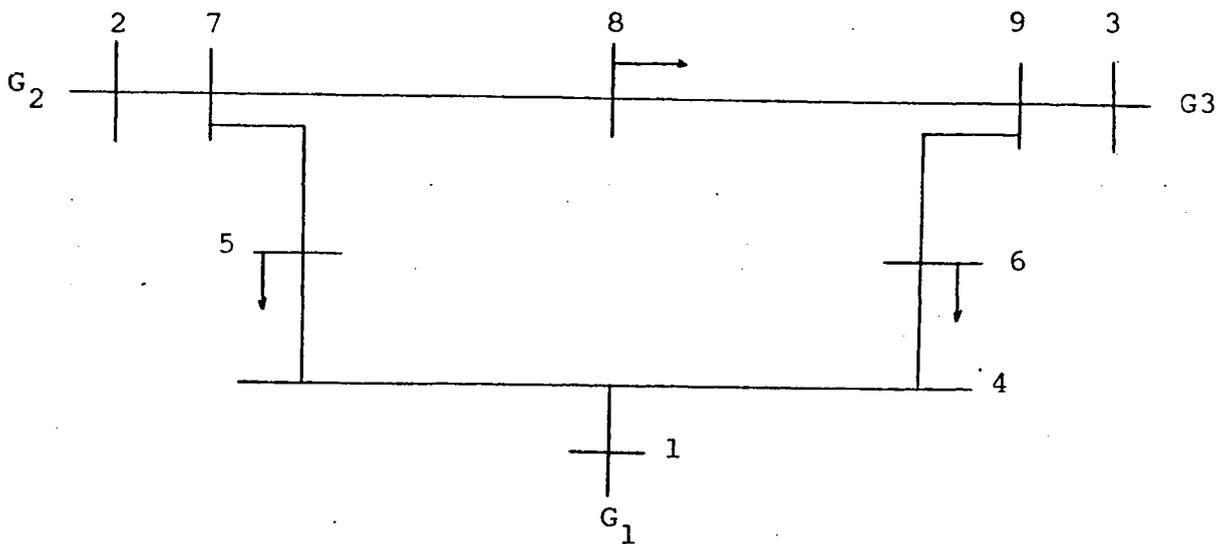


FIGURA A.2 - Diagrama unifilar: Sistema 3-máquinas

DADOS DE BARRA						
B	TENSÃO (pu)	ÂNGULO (grau)	GERAÇÃO		CARGA	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0400	0.0	71.636	27.034	0.0	0.0
2	1.0250	9.280	163.000	6.644	0.0	0.0
3	1.0250	4.665	85.000	-10.867	0.0	0.0
4	1.0258	-2.217	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.9956	-3.989	0.0	0.0	125.00	50.0
6	1.0127	-3.687	0.0	0.0	90.0	30.0
7	0.258	3.719	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1.0159	0.727	0.0	0.0	100.0	35.0
9	1.0324	1.967	0.0	0.0	0.0	0.0

DADOS DE LINHA				
barra-barra	resistência (pu)	reatância (pu)	susceptância (pu)	tap (pu)
1 - 2	0.0	0.0576	0.0	1.0
2 - 7	0.0	0.0625	0.0	1.0
3 - 9	0.0	0.0586	0.0	1.0
4 - 5	0.0100	0.0850	0.1760	-
4 - 6	0.0170	0.0920	0.1580	-
5 - 6	0.0320	0.1610	0.3060	-
6 - 9	0.0390	0.1700	0.3580	-
7 - 8	0.0085	0.0720	0.1490	-
8 - 9	0.0119	0.1008	0.2090	-

DADOS DOS ROTORES							
N	H KWS/KVA	$x'_d$ pu	$x'_q$ pu	$x_d$ pu	$x_q$ pu	$T'_{d0}$ s	$T''_{q0}$ s
1	23.64	0.0608	0.0969	0.1460	0.0969	8.96	0.0
2	6.40	0.1198	0.1969	0.8958	0.8645	6.00	0.535
3	3.01	0.1813	0.2500	1.3125	1.2578	5.89	0.600

SISTEMAS DE EXCITAÇÃO			
barra	tipo	$K_A$ (pu)	$T_A$ (s)
1	3	10.0	0.5
2	3	10.0	0.1
3	3	10.0	0.1

**APÊNDICE 6****Simbologia**

## SIMBOLOGIA

$D$  - coeficiente ou fator de amortecimento

$E'$  - tensão atrás da reatância transitória

$E_{fd}$  - tensão aplicada ao campo da máquina síncrona

$E'_q$  - componente do eixo em quadratura da tensão atrás da reatância transitória

$f$  - frequência

$H$  - constante de inércia da máquina síncrona

$I_d$  - componente de eixo direto da corrente terminal

$I_q$  - componente de eixo de quadratura da corrente terminal

$I_t$  - corrente terminal

$K$  - ganho ajustável do sinal estabilizador

$K_A$  - ganho do regulador de tensão tipo 3

$K_d$  - coeficiente de torque de amortecimento equivalente

$K_S$  - coeficiente de torque de sincronização equivalente

$K_1 - K_6$  - coeficiente do modelo linearizado do modelo máquina síncrona x barra infinita

$M$  - constante de inércia

$T_A$  - constante de tempo do regulador de tensão tipo 3

$T$  - constante de tempo do bloco diferenciador do sinal estabilizador

$T_1 - T_2$  - constante de tempo do bloco de avanço-atraso do sinal estabilizador

$T_D$  - torque de amortecimento

$T_e$  - torque elétrico

$T_m$  - torque mecânico

$T_s$  - torque de sincronização

$T'_{d0}$  - constante de tempo sub-transitória de eixo direto em circuito aberto

$T''_{q0}$  - constante de tempo sub-transitória de eixo em quadratura em circuito aberto

$R_e$  - resistência equivalente do sistema elétrico

$V_d$  - componente de eixo direto da tensão terminal

$V_q$  - componente de eixo de quadratura da tensão terminal

$V_{REF}$  - tensão de referência do regulador de tensão

$V_s$  - saída do sinal estabilizador

$V_t$  - tensão terminal da máquina síncrona

$V_\infty$  - tensão no barramento infinito

$x_d$  - reatância síncrona de eixo direto

$X_e$  - reatância equivalente do sistema elétrico

$x_q$  - reatância síncrona do eixo de quadratura

$x'_d$  - reatância transitória de eixo direto

$\omega$  - velocidade angular

$\omega_b$  - velocidade angular base (377 rad/seg)

$\omega_n$  - frequência natural de oscilação (rad/seg)

$\omega_0$  - frequência natural amortecida (rad/seg)

$Z_e$  - impedância equivalente do sistema elétrico

$\delta$  - ângulo do rotor

$\Delta$  - variação em torno de um dado ponto

$\xi$  - razão de amortecimento

$\alpha$  - atraso de fase introduzido pelo gerador, sistema de potência e sistema de excitação, na frequência de ajuste (em graus).

$\beta$  - fase do bloco diferenciador, na frequência de ajuste (em graus).

$\psi$  - fase a ser compensada pelo estabilizador de sistema de potência (em graus).