



**CCPgEE/CCT-UFPb**

COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES EM COMPENSADORES  
ESTÁTICOS DE REATIVOS BASEADO EM TÉCNICAS DE CONTROLE  
MODERNO E TEORIA IDENTIFICAÇÃO

**JOÃO VIANA DA FONSECA NETO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior

Coordenação de Pós-Graduação

Rua Aprimada, 150 - Tel. (083) 321-7222-R 355.

58.100 - Campina Grande - Paraíba

JOÃO VIANA DA FONSECA NETO

PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES EM COMPENSADORES ESTÁ-  
TICOS DE REATIVOS BASEADO EM TÉCNICAS DE CONTROLE  
MODERNO E TEORIA DA IDENTIFICAÇÃO.

Dissertação apresentada à coordenação dos  
cursos de Pós graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento  
parcial às exigências para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : Processamento de Energia.

ORIENTADOR : WELLINGTON SANTOS MOTA

CAMPINA GRANDE

SETEMBRO-1986

715  
FONCP

PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES EM COMPENSADORES ESTÁ-  
TICOS DE REATIVOS BASEADO EM TÉCNICAS DE CONTROLE  
MODERNO E TEORIA DA IDENTIFICAÇÃO.



F676p

Fonseca Neto, Joao Viana da

Projeto de sinais estabilizadores em compensadores estaticos de reativos baseado em tecnicas de controle moderno e teoria da identificacao / Joao Viana da Fonseca Neto. - Campina Grande, 1986.

125 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Energia Eletrica 2. Processamento de Energia 3. Sistema Eletrico de Potencia 4. Dissertacao I. Mota, Wellington Santos, Dr. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)

CDU 621.3(043)

PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES EM COMPENSADORES  
ESTÁTICOS DE REATIVOS BASEADO EM TÉCNICAS DE  
CONTROLE MODERNO E TORIA DA IDENTIFICAÇÃO.

JOÃO VIANA DA FONSECA NETO

Dissertação aprovada em 24/09/86

PROF. WELLINGTON SANTOS MOTA - Ph.D

- Presidente -

PROF. JOSÉ CALAZANS DE CASTRO - DOUTOR

- Componente da Banca -

PROF. MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR - Ph.D


- Componente da Banca -

CAMPINA GRANDE

SETEMBRO DE 1986


DIS  
313(043)  
F676p

DIS  
F676p



Dedico aos meus pais

João e Carminha



Agredecimento especial

À minha companheira Sílvia Helena.

Agradeço ao Prof. Wellington Santos Mota por seu apoio e sua valiosa orientação, sem os quais este trabalho não se concretizaria.

Agradeço aos professores José Calazans de Castro e Ângela Maria da Silveira que muito colaboraram na realização deste trabalho.

Agradeço ao pessoal do NPD de Campina Grande e João Pessoa pelos recursos computacionais oferecidos.

Agradeço a Luís Carlos Dantas Matias, como também aos professores Creso S. Rocha e Eugênio Mariano Loureiro, pela ajuda na confecção final do texto.

Agradeço às pessoas que de alguma forma contribuíram para realização desta pesquisa.





## RESUMO

Este trabalho apresenta um projeto de sinais estabilizadores para compensadores estáticos de reativos derivados de variações do fluxo de potência ativa na linha e/ou módulo da tensão na barra e/ou ângulo de tensão na barra de interligação compensador / restante do sistema C.A., de maneira a amortecer as oscilações destas variáveis sob pequenas perturbações no sistema elétrico de potência, fortemente carregado.

O projeto é baseado na estratégia da realimentação ótima de estados para um modelo linearizado do compensador conectado a um modelo equivalente dinâmico de um grande sistema de potência. Algumas variáveis do sistema C.A. necessárias ao projeto, mas que não estão representadas no modelo equivalente dinâmico, são identificadas pelo método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado e incorporadas ao sistema.

Finalmente, testes de implementação são feitos utilizando o sistema oeste de 500 Kv da CHESF.

## ABSTRACT

This work presents the design of stabilizing signals for reactive static compensator from variations of active power flow and / or voltage absolute value and/or voltage angle at the interconnection bus compensator / A.C. system, in order to damp these variables under small perturbations in the electric power system, heavily loaded.

The design of the controller is based on optimal state feedback strategy for a linearized model of the static compensator connected to a dynamic equivalent model of a large system. Some variables of the power system required on the design process are not available in the equivalent model, these variables are identified by the generalized recursive least square method and incorporated in the model.

Finally, applications are performed for a realistic power system ( CHESF WEST ), Consisting of a 500 kv Brazilian power system.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO

1

INTRODUÇÃO

1.1. PRELIMINARES. ....	01
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA...03	
1.3. OS PRÓXIMOS CAPÍTULOS. ....	07
1.4. CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA .....	08

2 O COMPENSADOR ESTÁTICO E SISTEMA DE POTÊNCIA TESTE

2.1.	INTRODUÇÃO.....	09
2.2.	O COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS.....	10
2.2.1.	O Compensador Estático tipo R.C.T.....	11
2.2.2.	A Influência do G.E.R. no Desempenho Dinâmico do S.E.P.....	13
2.2.3.	O Modelo Dinâmico do G.E.R.....	16
2.3.	O SISTEMA MULTI-MÁQUINA TESTE.....	18
3	A TEORIA BÁSICA E A TÉCNICA PARA UM PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES	
3.1.	INTRODUÇÃO.....	30
3.2.	MODELO EQUIVALENTE DINÂMICO DO SISTEMA DE POTÊNCIA .....	31
3.3.	IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS.....	34

3.4 A ESTRATÉGIA DO CONTROLE ÓTIMO COM ÍNDICE DE DESEMPENHO QUADRÁTICO.....	39
3.4.1. A Realimentação Ótima de Estados.....	40
3.4.2. A Realimentação Ótima das Saídas.....	44
4 O PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES	
4.1. INTRODUÇÃO .....	45
4.2. MODELOS LINEARES NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA. ....	47
4.2.1. Modelo Equivalente Dinâmico Linear do S.E.P....	47
4.2.2. Modelo Dinâmico Linear do Compensador Estático... ..	48
4.2.3. Modelo Interligado C.E.R./Equivalente Dinâmico. ....	51

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 882 Tel. (083) 321 7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

4.3.	O FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NA LINHA E ÂNGULO DE TENSÃO NA BARRA DE INTERLIGAÇÃO EM FUNÇÃO DOS ESTADOS DO MODELO EQUIVALENTE DINÂMICO LINEAR INTERLIGADO.....	52
4.4.	MODELAGEM FINAL E PROJETO DOS SINAIS ADICIONAIS. ....	56
4.4.1.	Modelagem Final.....	56
4.4.2.	Projeto de Sinais Adicionais.....	59
4.4.3.	Implementação e Simulações do Sinal Adicional no Modelo Linear.....	61
4.5.	IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÕES DOS SINAIS ADICIONAIS NO MODELO NÃO LINEAR DO S.E.P.....	73
5	RESULTADOS E COMENTÁRIOS.....	87

## APÊNDICE

A	MODELO EQUIVALENTE DINÂMICO DO SISTEMA DE POTÊNCIA TESTE.....	92
B	AJUSTE DOS PARÂMETROS E CONDIÇÕES INICIAIS DO COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS.....	115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1 : O C.E.R. ideal.....	11
Figura 2.2.2 : O R.C.T. com capacitores fixos. .....	12
Figura 2.2.3 : O diagrama de blocos do compensador estático utilizado na pesquisa. .....	17



Figura 2.3.1 : Diagrama unifilar do sistema de 500 KV.....	19
Figura 2.3.2 : Diagrama de blocos do sistema de excitação (Máq. 1, 2, 3, 8 e 9). .....	27
Figura 2.3.3 : Diagrama de blocos do sistema de excitação (Máq. 4, 5 e 6). .....	27
Figura 3.2 : Modelo Interligado G.E.R./Equivalente Dinâmico.....	32
Figura 4.1: Diagrama de blocos para o sistema de potência na forma de variáveis de estado sem sinais adicionais e com sinais adicionais.....	46
Figura 4.3.1 : Ilustra o processo de obtenção dos dados necessários para identificação dos parâmetros da potência na linha em função dos estados do modelo equivalente dinâmico. .....	54

Figura 4.3.2 : Identificação do desvio do fluxo de potência ativa na linha 21-20.	55
Figura 4.3.3 : Identificação do Desvio de ângulo de tensão na barra-7.	56
Figura 4.4.3.1 : Resultado de simulações no modelo linear para $R = [ 0.0001 ]$ , os sinais são dados pela equação 4.4.2.1.	64
Figura 4.4.3.2 : Resultado de simulações no modelo linear para $R = [ 0.0050 ]$ . Sinal adicional sub - ótimo $u = [ -1.081 ] [ p_1 ]$ .	67
Figura 4.4.3.3 : Resultado de simulações no modelo linear para $R = [ 0.000001 ]$ . Sinal adicional sub - ótimo $u = [ -295.1 ] [ p_1 ]$ .	68
Figura 4.4.3.4 : Resultado de simulações no modelo linear $R = ( 0.005 )$ , os sinais implementados são dados pela equação 4.4.3.4.	72

Figura 4.5.1 Diagrama de blocos de um controlador sub-ótimo em cascata com um filtro wash-out introduzidos no modelo não linear do sistema G.A., realimentando desvios do fluxo potência ativa..... 74

Figura 4.5.2 : Resultados de simulações no modelo não linear - mostra o comportamento de grandezas ligadas à barra do compensador, antes e após a implementação de sinais adicionais..... 77

Figura a.1.1 : Diagrama de blocos da função de transferência corrente / tensão com ruído..... 96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.3.1 : Resultados de um fluxo de cargas em p.u. na base de 100 MVA e bases de tensões do sistema.....	20
Tabela 2.3.2 : Dados de carga (base 100 MVA) .....	22
Tabela 2.3.3 : Dados das linhas de transmissão na base de 100 MVA e tensões do sistema.....	23
Tabela 2.3.4 : Dados dos transformadores em p.u. na base de 100 MVA e bases de tensões do sistema.....	24

Tabela 2.3.5 : Dados dos reatores em p.u. na base de 100 MVA e bases de tensão do sistema.....	25
Tabela 2.3.6 : Dados das máquinas em p.u. na base de 100 MVA.....	26
Tabela 2.3.7 : Dados do sistema de excitação .....	28
Tabela 2.3.8 : Parâmetros do compensador estático de reativos.....	29
Tabela 4.4.3.1: Autovalores do sistema interligado compensador estático/equivalente dinâmico, para a equação 4.4.3.1 e sem sinais adicionais.....	65
Tabela 4.5.1 : Mostra o comportamento dinâmico do fluxo de potência ativa na linha 21-20 e tensão na barra 7, para pequenas perturbações nas tensões das barras 20 e 7.....	81

Tabela 4.5.2 : Mostra o comportamento do fluxo de potência ativa na linha 21-20 e módulo da tensão na barra 7, para pequenas perturbações na barra 20 e 7 durante 0.3 segundos..... 82

Tabela 4.5.3 : Mostra atuação dos sinais estabilizadores sub-ótimos, derivados do fluxo de potência ativa na linha e desvios do módulo de tensão na barra 7, para pequenas perturbações nas barras 20 e 7 durante 0.3 segundos..... 84

## LISTA DE ABREVIATURAS

- C.A. - Corrente Alternada
- C.C. - Corrente Contínua;
- C.C.T. - Capacitor Chaveado a Tiristores.
- C.E.R. - Compensador Estático de Reativos.
- CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco;
- C.S. - Compensadores Síncronos;
- F.T. - Função de Transferência;
- Kv - Quilo-Volt;
- HVDC - Alta Tensão em Corrente Contínua;
- P-f - Potência ativa - Freqüência
- Q-V - Potência reativa - tensão;
- R.C.T. - Reator Controlado a Tiristores;
- R.S. - Reator Saturado.
- S.E.P. - Sistema Elétrico de Potência;
- VAR - Volt-Ampere Reativo.

PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES EM COMPENSADORES ESTÁ-  
TICOS DE REATIVOS BASEADO EM TÉCNICAS DE CONTROLE  
MODERNO E TEORIA DA IDENTIFICAÇÃO.



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1. PRELIMINARES

Os equipamentos relacionados ao controle de grandezas elétricas em sistemas de potência por meio de variações na potência reativa, dentre eles, capacitores séries e paralelos, compensadores síncronos e compensadores estáticos têm mostrado eficiência na melhoria do desempenho de sistemas de potência. Estes equipamentos atuam basicamente no aumento da potência de transmissão e controle de tensão do sistema elétrico de potência, como também no amortecimento de oscilações no sistema C.A. O desenvolvimento de sofisticados equipamentos para melhoria da estabilidade tornou os sistemas de transmissão C.A. tecnicamente e economicamente competitivos com os sistemas de transmissão C.C. (MILLER, 1982).

O presente trabalho propõe estudar o comportamento

dinâmico de compensadores estáticos, em particular, o projeto de uma malha adicional para amortecer oscilações relacionadas à malha de controle P-f do sistema C.A. Esta malha é adicionada à malha de controle C-V do compensador estático de reativos.

A aplicação do C.E.R. tem aumentado devido a vantagens, tais como: controle rápido, manutenção reduzida e baixo preço em relação a outros equipamentos de compensação de reativos (JULING et al, 1979). Entretanto, para valores pequenos de potência reativa, esta afirmativa pode não ser verdadeira. Após programas-testes de energização e desempenho, como também três anos de excelente operação, afirma-se que a tecnologia do C.E.R. pode ser integrada com sucesso nos sistemas de potência (GUTMAN et alii, 1985). TAKESHI et alii (1985) propõe uma configuração economicamente viável, aplicada na melhoria da estabilidade do sistema elétrico de potência.

O compensador estático de VAR é um sistema integrado de componentes elétricos estáticos combinados para suprir de maneira rápida e contínua a potência reativa para compensação paralela e controlada (BYERLY, 1982).

A habilidade do equipamento em manter a tensão perto de um nível constante como também a atuação na melho-

ria da estabilidade e fator de potência são importantes benefícios adquiridos pela aplicação do C.E.R. em sistema de potência. Outras aplicações do C.E.R. consistem no emprego destes equipamentos para minimização das perdas de transmissão através da geração ou absorção local da potência reativa, eliminação da ressonância síncrona, como parte do controle C.A. perto dos terminais de conversoras HVDC (MILLER, 1982). Das aplicações mencionadas acima, dá-se ênfase ao problema da estabilidade, particularmente, à aplicação do compensador no amortecimento das oscilações no sistema elétrico de potência (S.E.P.).

Esta pesquisa realiza o projeto de sinais adicionais, isto é, o projeto de malhas de realimentação que introduzidas no sistema de controle do C.E.R. amortecem as oscilações do fluxo de potência ativa na linha e agindo de forma secundária, melhoram o desempenho dinâmico do sistema na região próxima ao compensador. O projeto utiliza técnicas de controle ótimo e teoria da identificação (MOTA, 1981).

## 1.2. REVISÃO DOS TRABALHOS ANTERIORES E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Sinais adicionais, sinais suplementares, sinais auxiliares e filtros reset foram termos técnicos encontrados nas referências SCHWEICKARDT et alii (1980); BYERLY et alii (1982); MILLER (1982); JULING et alii (1985); MARTINS

(1984) para designar melhoras de realimentação através do sistema de controle dos compensadores estáticos com a finalidade de amortecer oscilações em sistemas de potência.

A introdução de sinais estabilizadores através do sistema de excitação do gerador síncrono melhora o desempenho dinâmico do sistema C.G., aumentando o amortecimento das oscilações do mesmo (MOTA, 1981; SILVA, 1983).

As propriedades dinâmicas dos compensadores estáticos controlados eletronicamente podem ser modificadas ou otimizadas para melhorarem o amortecimento das oscilações (SCHWEICKARDT (1978); MILLER (1982), TAKESHI (1985)). Deve-se observar o compromisso existente entre o amortecimento e controle de tensão exercido por instalações de C.E.R. A técnica de controle aplicada por MOTA (1981) em sistemas de excitação estáticos de máquinas síncronas permite respeitar esse compromisso.

O projeto de sinais adicionais proposto por MARTINS (1984) analisa o efeito dos compensadores na estabilidade para pequenas perturbações, empregando técnicas de resposta em frequência. Os resultados mostraram-se positivos na influência destas instalações no desempenho dinâmico do

sistema C.A. Os sinais adicionais podem ser derivados do fluxo de potência ativa em linhas de transmissão e/ou desvios de frequência na barra, onde os benefícios são verificados pela análise de autovalores e simulações no sistema de potência. Analisou-se o desempenho do C.E.R. em um grande sistema através de simulações (JULING et alii, 1979) constatando-se o aumento do amortecimento da potência ativa, onde os sinais adicionais foram derivados do desvio da potência ativa e/ou desvios da frequência na rede.

A referência BYERLY et alii (1982) mostra a atuação do C.E.R. no amortecimento dos modos instáveis de oscilação e aumento dos limites de estabilidade do sistema malhado em estudo. Após um curto circuito de 0.05 segundos em uma dada barra, observa-se o comportamento do ângulo de torque de uma máquina síncrona perto da barra que sofreu a perturbação, com e sem sinal auxiliar através do sistema de controle do C.E.R. instalado em outra barra do sistema. O sinal auxiliar derivado da velocidade da máquina mostrou-se efetivo na melhoria da estabilidade do sistema, confirmando publicações anteriores quanto à situação e importância destes sinais. O uso de controles suplementares de amortecimento através do sistema de regulação do C.E.R. é ilustrado em MILLER (1982), utilizando-se um sistema radial, onde aumenta-se o amortecimento da oscilação angular do rotor pela realimentação de um sinal derivado do fluxo de potência na linha. Geralmente sinais derivados da frequência na barra provocam melhor amortecimento, MILLER (1984).

Os filtros reset são aplicados ao circuito detector de tensão do C.E.R. produzindo amortecimento no sistema de potência devido a sua característica em avanço (TAKESHI et alii, 1985). Essa referência mostra analiticamente o efeito do filtro reset na melhora do amortecimento do sistema e pequena redução do coeficiente do torque sincronizante. O controle de tensão proposto por TAKESHI et alii (1985), não responde a mudanças adicionais e existe a possibilidade que flutuações periódicas possam ser amplificadas pelo controle bang-bang do C.E.R. Para solucionar este problema utilizou-se o filtro reset, que implica em produzir perdas mínimas e harmônicas que são dificilmente geradas pelo C.E.R.

Os sinais adicionais auxiliares podem ser derivados da frequência em alguma barra, da velocidade da máquina síncrona, da potência de aceleração da máquina, do fluxo de potência em linhas de transmissão e desvio de ângulo em alguma barra, BYERLY et alii (1982). Os esquemas sugeridos por SCHWEICKARDT (1970); MARTINS (1984); TAKESHI et alii (1985), para implementação destes sinais utilizam técnicas de controle clássico.

As técnicas de estimação de estados e controle ótimo utilizadas por MOTA (1981) no projeto de sinais estabilizadores para máquinas e compensadores síncronos são também empregadas nesta pesquisa, onde uma função de custo

é escolhida para minimizar variáveis acessíveis na barra de Interligação C.E.R. Sistema de Potência .

Na literatura investigada, a referência TAKESHI et alii (1985) trata especificamente sobre o amortecimento através do sistema de regulação do C.E.R.: logo percebe-se que o projeto de sinais adicionais está em fase de estudos e nada foi mencionado sobre implementações de campo.

**Motivação da pesquisa :** do exposto acima advém a necessidade de estudar o efeito das malhas suplementares de amortecimento através do sistema de regulação de compensadores estáticos, pois destacam-se na melhoria da estabilidade de sistemas de corrente alternada. Devido a importância destes sinais no desempenho do sistema de potência surgiu a necessidade de se desenvolverem técnicas de projeto que considerem o compromisso entre amortecimentos e capacidade de controle de tensão .

### 1.3. OS PRÓXIMOS CAPÍTULOS.

O segundo capítulo apresenta o tipo de compensador utilizado na pesquisa (sua estrutura física, modelagem e influência no desempenho dinâmico do sistema C.A.) e a modelagem dos equipamentos do sistema de potência necessários para estudos de estabilidade dinâmica.

O capítulo 3 trata sobre a técnica de controle empregada na estabilização de oscilações no sistema C.A. e manipulações necessárias ao sistema para aplicação da técnica de controle proposta.

O capítulo 4 apresenta a união dos dois capítulos anteriores formando o Projeto de Sinais Estabilizadores em Compensadores Estáticos de Reativos baseado em Técnicas de Controle Moderno e Teoria da Identificação.

O capítulo 5 expõe conclusões, vantagens e dificuldades encontradas durante o projeto e implementação dos sinais, como também alguns comentários.

#### 1.4. CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.

A principal contribuição da pesquisa consiste no emprego da técnica de controle ótimo (realimentação de estados) em sistemas de potência, especificamente na sub-área Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência, para projetar de uma maneira sistemática sinais estabilizadores derivados da potência e/ou tensão na barra e/ou ângulo de tensão, através do sistema de regulação de tensão dos compensadores estáticos de reativos. O projeto baseia-se no modelo em forma de variáveis de estado do compensador interligado a um modelo equivalente dinâmico do sistema de potência. Até então as publicações só mencionam a aplicação desta técnica em sistema de excitação estático de geradores e compensadores síncronos.



## CAPÍTULO 2

### O COMPENSADOR ESTÁTICO E SISTEMA DE POTÊNCIA TESTE

#### 2.1. INTRODUÇÃO.

Este capítulo apresenta as características e modelagem do compensador estático de reativos, equipamento ao qual o sinal estabilizador será implementado diretamente, como também as características e modelagem do sistema C.A. teste, onde está inserido o compensador.

O compensador estático de reativos (C.E.R.) é um sistema de compensação de potência reativa de rápida atuação formado basicamente por dispositivos eletrônicos, reatores e capacitores. Os compensadores estáticos modificam a potência reativa do sistema C.A., alterando assim as tensões nas barras do mesmo no intuito de melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Nos sistemas de transmissão, o compensador executa funções de redução de sobretensões

provocadas por rejeição de carga, melhoria na estabilidade em sistemas de transmissão a longa distância e compensação pela variação da potência reativa provocada por variação na potência de transmissão ou por chaveamento devido a falhas ou mudanças na configuração da rede (LEMES, 1984).

A configuração dados e resultados de um fluxo de cargas do sistema teste são apresentados na seção 2.3., como também uma descrição da modelagem dos equipamentos do sistema C.A. para estudos de estabilidade.

## 2.2. O COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS (C.E.R.)

Os compensadores estáticos de reativos estão dentro da classe dos compensadores ativos, isto é, dispositivos ligados em paralelo ao sistema C.A. que tendem a manter a tensão constante nos seus terminais através da geração ou absorção da potência reativa; normalmente, são capazes de variação contínua e resposta rápida (MILLER, 1982).

O C.E.R. é um dispositivo de controle de tensão que opera através da variação da admitância de um reator e/ou capacitor. A figura 2.1 representa um compensador estático ideal. O equipamento ajusta continuamente sua potência reativa, sem atraso de resposta a variações de tensão nos seus terminais.

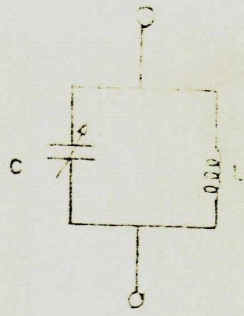


Figura 2.2 - O C.E.R. real.

O comportamento do sistema de potência determina a configuração adequada de C.E.R. empregada na solução de problemas específicos surgidos durante o regime permanente ou transitório. Existem três configurações básicas de C.E.R. a partir das quais derivam-se outros tipos de sistemas ativos de compensação de reativos, são estas: reator controlado a tiristores (R.C.T.), capacitor chaveado a tiristores (C.C.T.) e reator saturado (R.S.).

### 2.2.1. O Compensador Estático R.C.T.

O diagrama da figura 2.2.1. representa o C.E.R. utilizado nesta pesquisa: um reator controlado a tiristores com bancos de capacitores fixos.

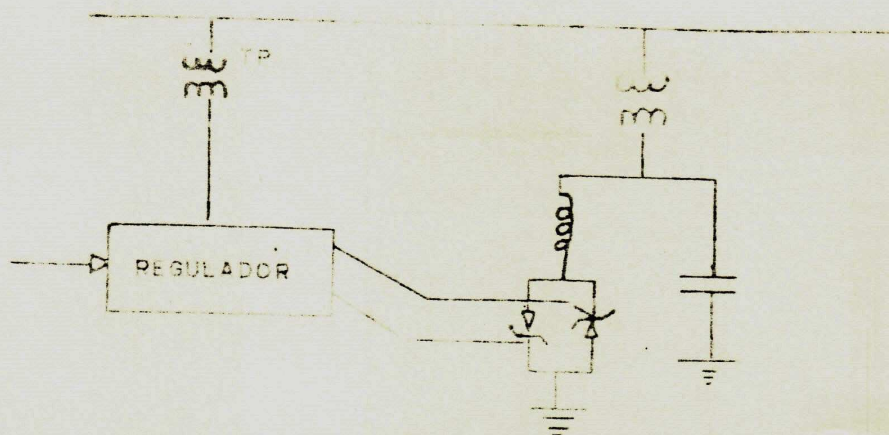


Figura 2.2.1: O R.C.T. com capacitores fixos.

Um reator e dois tiristores ligados em antiparalelo formam o R.C.T. elementar. O princípio de operação consiste na variação da corrente através do reator, pelo disparo dos tiristores, variando a susceptância do sistema de compensação. Logo, a potência reativa a ser controlada pode variar continuamente dentro da faixa de variação da tensão de operação.

O reator operando na região de saturação e/ou sua operação para vários ângulos de condução dos tiristores geram correntes harmônicas que afetam a operação do sistema A.C., ao qual está ligado. Os efeitos destas correntes podem ser atenuados pela ligação delta e operação em doze pulsos do C.E.R. Estudos sobre os princípios de operação e geração de harmônicos podem ser encontrados nas referências

Os bancos de capacitores responsáveis pela geração em degrau da potência reativa, ao contrário da R.C.T. que absorve continuamente potência reativa dentro dos limites de variação de tensão, podem ser divididos em grupos de bancos de capacitores chaveados e autorizados para determinadas frequências harmônicas por bancos de reatores ligados em série, evitando o fluxo de correntes harmônicas para o sistema C.A.

A tensão secundária do transformador deve ser escolhida a permitir que os tiristores trabalhem com a máxima utilização possível.

O regulador determina o ângulo de gatilhamento dos tiristores, ou seja, determina o momento e a quantidade de variação da admitância do C.E.R. A estratégia do regulador depende da natureza do problema, basicamente pode ser de malha aberta ou fechada.

### 2.2.2. Influência do C.E.R. no Desempenho Dinâmico de S.E.P's.

As fontes de reativos ajustáveis são basicamente utilizadas em S.E.P's. para manter a estabilidade de máquinas síncronas, controlar a tensão no regime permanente

dentro dos limites especificados, garantindo a qualidade do serviço de transmissão de energia elétrica. Um estudo sobre o comportamento dinâmico do C.E.R. interligado ao sistema de potência é realizado para um sistema radial e malhado multi-máquina MILLER (1982); RAMOS et alii (1985).

No sistema radial constituído por uma linha de transmissão ligando um centro gerador a um centro de carga, verifica-se o comportamento dinâmico para defeitos que provocam variações de tensões no sistema, onde são investigados os curto-circuitos, rejeição de carga, perda de componentes do sistema, etc. Nos sistemas não radiais multi-máquina as investigações vão além dos fenômenos que provocam variações de tensão, estudando-se as condições de estabilidade dinâmica e estabilidade transitória para determinados defeitos.

A capacidade máxima de geração ou absorção da potência reativa pelo sistema de compensação é atingida durante as grandes perturbações do sistema C.A., onde o desempenho conjunto sistema C.A./C.E.R. pode se menos eficaz do que o sistema C.A. sem compensador. RAMOS et alii (1985) sugerem uma estratégia de controle que atua no sentido de reduzir para zero VAR a potência do C.E.R., quando a tensão em seus terminais atinge um valor inferior a um limite especificado. O C.E.R. será religado após um intervalo de tempo  $t$ , logo depois da limpeza do afundamento de tensão dado por um valor limite. A seguir, traça-se um paralelo

entre a atuação dos compensadores estáticos (C.E.R's.) e compensadores síncronos (C.S's.) para duas situações distintas de defeito: o curto circuito trifásico equilibrado e sobretensões.

Durante o curto-circuito, o C.E.R. mostrou-se ineficiente na sua capacidade de fornecer potência reativa devido a redução de tensão nos seus terminais; já os compensadores síncronos, máquinas rotativas, atuaram de forma a minimizar os efeitos do curto-circuito, já que são capazes de suprir transitoriamente a potência reativa, devido a constância do seu fluxo durante certo período de tempo. A atuação do C.E.R. para sobretensões, como rejeição de carga, é rápida e benéfica para o sistema C.A., pois o dispositivo está na faixa de operação contínua do R.C.T., e sua potência reativa (absorção) cresce com o nível de sobretensão dentro da capacidade do dispositivo. Os C.S's. não operam satisfatoriamente em relação ao C.E.R., pois devem reduzir o fluxo, o qual depende do transitório, ligado a uma constante de tempo, a qual é maior para o compensador síncrono.

Durante o período oscilatório o C.E.R. introduz amortecimento no sistema, evitando que oscilações pouco amortecidas levem o sistema C.A. a perder o sincronismo. Este amortecimento aumenta a margens de estabilidade para pequenas perturbações normais a operação, ou nas grandes oscilações após a remoção do defeito.

A interação entre as malhas de controle Q-V (potência reativa-tensão) nas quais os C.E.R's. atuam pela natureza do projeto, e a malha de controle P-f (potência ativa-frequência) é mínima, limitando assim a atuação dos C.E.R's. no amortecimento de oscilações relacionadas a malha de controle P-f; no entanto, a introdução de sinais adicionais no sistema de regulação do C.E.R., derivados de grandezas ligadas a malha P-f, como o fluxo de potência ativa em linhas de transmissão e/ou frequência na barra de interligação contribuem para estabilização do sistema C.A. Estes sinais são necessários quando o sistema opera próximo dos limites de estabilidade dinâmica e em situações de deficiência de amortecimento.

### 2.2.3. Modelo Dinâmico do C.E.R.

O diagrama de blocos da figura 2.2.3. representa a admitância variável do T.C.R. Junto com o banco de capacitores e seus controles. A dinâmica dos circuitos de controle é representada por diagrama de blocos e suas limitações físicas por não linearidades. O modelo é limitado para eventos equilibrados e não são considerados os retardos e constantes de tempo dos circuitos de linearização e aqueles intrínsecos ao disparo dos tiristores, que a rigor constituem um processo descontínuo (SILVEIRA, 1985).



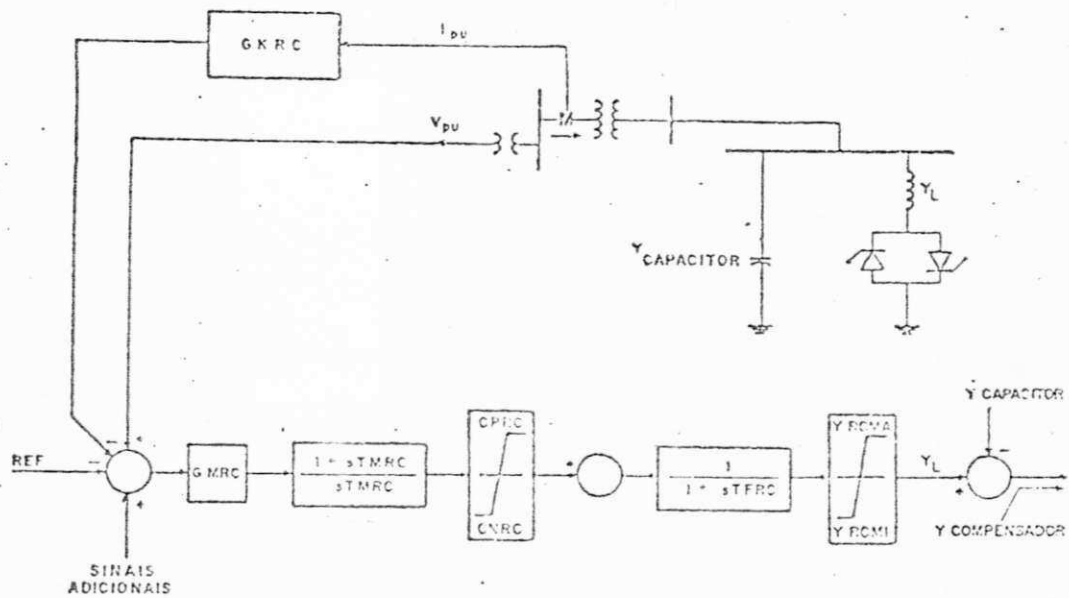


Figura 2.2.3 : O diagrama de blocos do compensador estático utilizado na pesquisa.

Os parâmetros das funções de transferência do diagrama de blocos da figura 2.2.3. representam:

- GMRC - ganho do regulador de tensão (p.u. de admitância/p.u. de tensão).
- GKRC - ganho do filtro de medição de corrente.
- TMRC - constante de tempo do regulador de tensão.
- TFRC - constante de tempo de atraso da representação da susceptância variável.
- $Y_{comp.}$  - admitância líquida do compensador (p.u.).
- $Y_{cap.}$  - admitância do capacitor (p.u.).
- $Y_L$  - admitância líquida do indutor (p. u.).

CPRG, CNRC - limites do regulador de tensão.

YRCMA, YRCMI - limites da susceptância variável.

Vref. - tensão de referência.

Vs. - entrada para sinais adicionais.

Os ganhos do regulador de tensão (GMRC) do filtro de medição de corrente (GKRC) e a constante de tempo do regulador de tensão (TFRC) são parâmetros ajustáveis do C.E.R. Esses parâmetros foram ajustados utilizando-se técnicas de controle moderno e otimização implementadas por SILVEIRA (1985) onde ajustam-se os parâmetros no intuito de maximizar a velocidade de resposta sem grandes oscilações.

### 2.3. O SISTEMA MULTI-MÁQUINA TESTE

O sistema C.A. em estudo possui vinte e quatro geradores síncronos, dezessete linhas de transmissão, treze indutores, três compensadores síncronos e um compensador estático. Os geradores síncronos ligados a uma barra comum são tratados como uma máquina equivalente, onde seus parâmetros, resistência e indutância, representam o equivalente dos parâmetros das máquinas individuais vistas em paralelo a partir do barramento comum; a constante de inércia equivalente é a soma das constantes de inércia das máquinas individuais.

O diagrama unifilar da figura 2.3.1. representa o sistema real de 500 KV da CHESF utilizado para verificar a

controle moderno e ótimo, no desempenho do sistema de potência durante pequenas perturbações.

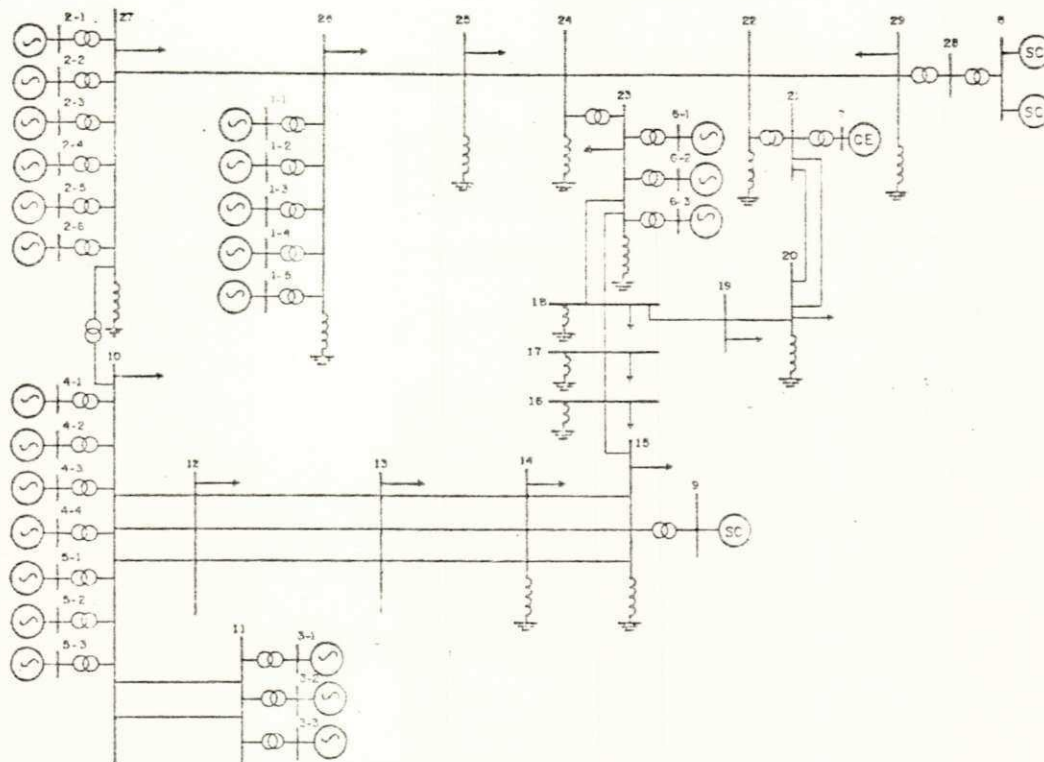


Figura 2.3.1 : Diagrama unifilar do sistema de 500 KV.

#### Dados do Sistema C.A.

As condições de carga e os dados do sistema C.A., necessários ao projeto e verificação da atuação dos sinais adicionais junto ao sistema de potência, são apresentados a seguir.

Tabela 2.3.1 : Resultados de um fluxo de cargas em p.u. na base de 100 MVA e bases de tensões do sistema

Barra	Tensão		Geração	
	Módulo	Ângulo	Ativa	Reativa
1	1.020	2.80	8.75	0.208
2	1.040	0.00	22.34	-1.516
3	1.010	0.20	2.70	-0.84
4	1.040	1.20	2.70	-0.018
5	1.040	-0.10	7.40	-0.260
6	1.020	-13.20	1.80	0.322
7	1.000	-26.60	0.00	-0.461
8	1.040	-33.20	0.00	0.617
9	1.040	-49.40	0.00	1.154
10	1.049	-6.00	0.00	0.00
11	1.048	-5.50	-	-
12	1.022	-19.00	-	-
13	1.017	-26.03	-	-
14	1.010	-40.2	-	-
15	0.996	-40.2	-	-
16	0.965	-49.4	-	-
17	0.953	-36.5	-	-
18	0.997	-27.7	-	-
19	1.016	-29.9	-	-

Continuação da Tabela 2.3.1.

Barra	Tensão		Geração	
	Módulo	Ângulo	Ativa	Reativa
20	1.032	-29.5	-	-
21	1.018	-25.6	-	-
22	1.014	-24.8	-	-
23	1.007	-49.1	-	-
24	1.017	-18.4	-	-
25	1.022	-9.9	-	-
26	1.022	-2.0	-	-
27	1.051	-5.2	-	-
28	1.028	-33.2	-	-
29	1.010	-33.3	-	-

Tabela 2.3.2 : Dados de carga (base 100 MVA)

Barra	Carga	
	Ativa (p.u.)	Reativa (p.u.)
10	10.05	-1.94
12	0.31	0.12
13	0.72	0.12
14	0.37	-0.23
15	3.19	0.62
16	0.28	0.07
17	0.20	0.11
18	0.79	0.30
19	0.26	0.15
20	0.89	-0.17
23	0.30	0.18
25	0.27	0.13
26	2.48	0.12
27	20.80	-5.54
29	3.32	-1.43

Tabela 2.3.3 : Dados das linhas de transmissão -  
na base de 100 MVA e tensões do  
sistema.

Linha	Barra	Barra	R	X	Y
1	27	26	0.0029	0.0417	4.3646
2	26	25	0.0018	0.0256	2.6056
3	25	24	0.0022	0.313	3.2082
4	22	29	0.0031	0.0454	4.7966
5	10	11	0.0005	0.0028	0.0792
6	10	12	0.0705	0.0549	0.8598
7	12	13	0.0052	0.0271	0.4250
8	13	14	0.0139	0.0719	1.1379
9	14	15	0.0098	0.0559	0.8598
10	15	16	0.0372	0.2125	0.3682
11	16	17	0.0278	0.1634	0.2808
12	18	23	0.0147	0.0777	0.1271
13	17	18	0.0295	0.1554	0.2593
14	18	19	0.0362	0.1905	0.3117
15	19	20	0.0181	0.0953	0.1558
16	20	21	0.0087	0.0684	0.9172
17	24	22	0.0019	0.0264	2.6840

Tabela 2.3.4 . Dados dos transformadores em p.u.  
na base de 100 MVA e bases de  
tensões do sistema.

Transformador	Barra	Barra	X
1	2	27	0.0044
2	10	27	0.0059
3	4	10	0.0655
4	5	10	0.0151
5	3	11	0.0398
6	9	15	0.0400
7	6	23	0.0588
8	7	21	0.0400
9	8	28	0.0200
10	23	24	0.0300
11	21	22	0.015
12	1	26	0.0112
13	28	29	0.0300



Tabela 2.3.5 : Dados dos reatores em p.u. na base de 100 MVA e bases de tensão do sistema.

Reator	Barra	Y
1	14	-0.3
2	15	-0.4
3	16	-0.2
4	17	-0.2
5	18	-0.1
6	20	-0.2
7	22	-3.5
8	23	-0.2
9	24	-2.0
10	25	-2.0
11	26	-3.5
12	27	-3.0
13	29	-4.0

Tabela 2.3.6 : Dados dos geradores em p.u. na base  
de 100 MVA

Máquina	$X'd$	$X_q$	$X_d$	H	$T'do$
1	0.0329	0.0566	0.0823	39.68	5.6
2	0.0127	0.0263	0.0344	122.02	5.0
3	0.0615	0.1489	0.2090	14.82	4.4
4	0.1167	0.2292	0.3479	13.01	5.5
5	0.0297	0.0682	0.1077	42.64	4.6
6	0.1206	0.2626	0.4234	7.65	4.0
8	0.1750	0.4500	0.7500	4.5	9.0
9	0.350	0.900	1.500	2.25	9.0

Os sistemas de excitação dos geradores síncronos são representados pelos diagramas das figuras 2.3.2 e 2.3.3. As constantes estão em p.u. do sistema de tensão unitário.

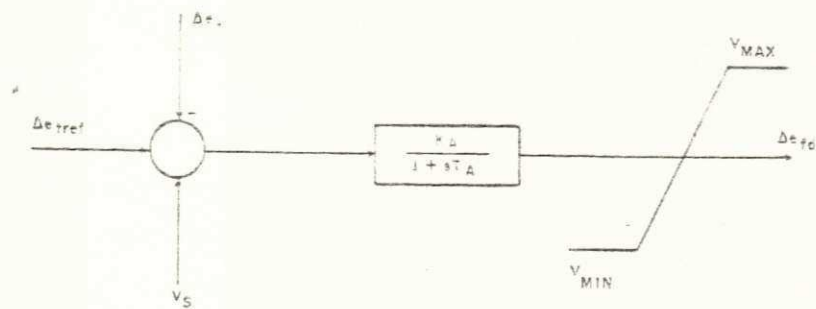


Figura 2.3.2 : Diagrama de blocos do sistema de excitação (Máq. 1, 2, 3, 8 e 9).

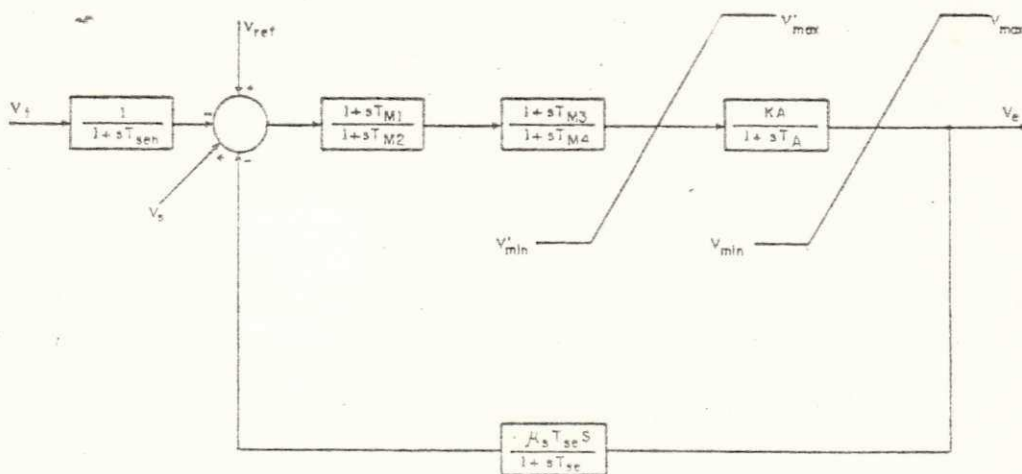


Figura 2.3.3 : Diagrama de blocos do sistema de excitação (Máq. 4, 5 e 6).

Tabela 2.3.7 : Dados do sistema de excitação

Tabela 2.3.7a

Máq.	Ka	Ta	Vmax	Vmin	V'max	V'min	Tm1	Tm2	Tm3	Tm4
1	50	-	-	-	2.0	-1.5	-	-	0.196	0.026
2	300	-	4.0	4.0	-	-	2.0	2.0	-	-
3	300	-	3.28	-2.95	3.28	-2.95	-	-	2.0	2.00
8	400	-	-	-	7.0	7.0	0.129	0.045	0.1	0.3
9	400	-	-	-	7.0	7.0	0.129	0.045	0.1	0.3

Tabela 2.3.7b

Máq.	Ka	Ta	Vmax	Vmin	V'max	V'min	Ke	Te	Ax	s	Tse
4	400	0.04	3.5	-3.5	-0.17	0.95	0.0027	1.918	0.0027	1.04	1.19
5	400	0.05	3.5	-3.5	-0.17	0.95	0.0027	1.918	0.0027	1.04	1.00
6	400	0.04	3.5	-3.5	0.17	0.95	0.0027	1.918	0.0027	1.04	1.19

O diagrama de blocos da figura 2.3.2. representa o C.E.R. implementado no programa de estabilidade transitória, onde alguns parâmetros são fornecidos pelo fabricante e outros são determinados pelas condições de operação do sistema (ver apêndice B - ajuste de parâmetros e condições iniciais do C.E.R. empregado na pesquisa).

Tabela 2.3.8 : Parâmetros do compensador estático de reativos.

Tensão de referência (p.u.)	Admitância líquida inicial $Y_0$ (p.u.)	Admitância base (MVA)	Admitância da barra de capacitores (p.u.)
1.0	-0.461	100	2
GKRC	GMRC	TMRC	TFRC
0.0	0.47	0.0035	0.015
As não linearidades			
CNRC	CPRC	YRCMI	YRCMA
0.0	999.0	0.0	999.0

## CAPÍTULO 3

### A TEORIA BÁSICA E A TÉCNICA PARA UM PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES

#### 3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a teoria necessária ao projeto de sinais estabilizadores para C.E.R's. baseado em técnicas de controle ótimo. O sistema a ser controlado consiste de um compensador estático conectado a um modelo equivalente dinâmico linear do sistema de potência para fins de projeto. O modelo mostra-se adequado ao projeto de controladores ótimos pois considera a dinâmica de um grande sistema representado pelo modelo equivalente. O levantamento de um modelo equivalente de 12<sup>a</sup> (décima segunda) ordem mostrou-se suficiente para representar a dinâmica do sistema elétrico de potência. Aumentando-se a ordem do modelo, cresce a precisão, entretanto surge o inconveniente de o modelo equivalente tornar-se tão complexo quanto a modelagem

completa do S.E.P. Sendo assim, evita-se o aumento da ordem do modelo para obter modelos equivalentes dinâmicos de ordem reduzida e simples manuseio.

A estratégia do controle ótimo, apresentado na secção 3.4, exige que as variáveis, a serem amortecidas, estejam expressas em função dos estados do modelo linear interligado C.E.R./Equivalente Dinâmico. Entretanto, isto não acontece com algumas grandezas utilizadas no processo de projeto de sinais adicionais, como o fluxo de potência ativa na linha, ângulo de tensão na barra, etc. Uma técnica de identificação de parâmetros, secção 3.3, traz a solução do problema mencionado acima, quando identifica-se as variáveis não disponíveis em função dos estados do modelo interligado.

### 3.2. MODELO EQUIVALENTE DINÂMICO DO SISTEMA DE POTÊNCIA FORMA DE VARIÁVEIS DE ESTADO

O modelo equivalente dinâmico representa o sistema de potência no ponto de interligação com o compensador. Para o levantamento do modelo equivalente dinâmico, utiliza-se uma modelagem não linear do sistema teste, ou seja, uma modelagem detalhada do sistema para estudos de estabilidade, implementada em computador digital, e levanta-se um modelo na forma de variáveis de estado, empregando-se teoria da identificação de sistemas dinâmicos (MOTA, 1981). A figura 3.2 ilustra o compensador estático interligado ao modelo

equivalente dinâmico do sistema de potência visto pela barra  
7.

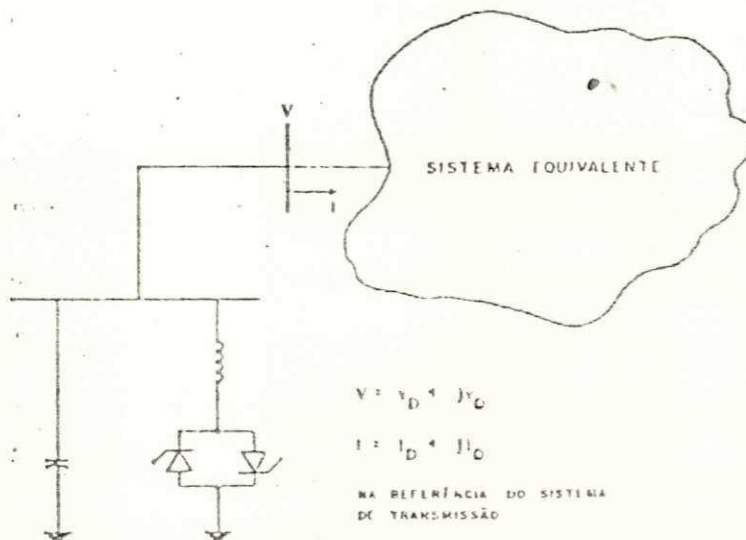


Figura 3.2. Modelo Interligado C.E.R./Equivalente Dinâmico.

A seguir, narra-se brevemente o tratamento dado ao sistema C.A. para o levantamento do modelo equivalente dinâmico, então :

Inicialmente, a partir de medições de tensão e corrente no ponto de interligação, onde parte do S.E.P. será representado por um modelo equivalente dinâmico, determinamos quatro funções de transferência (tensão/corrente) relacionando partes reais/imaginárias dos vetores corrente e tensão. Os parâmetros das funções de transferências (F.T.) são estimados empregando-se o estimador de variância mínima na forma de Kalman (MOTA, 1981), onde cada medida é processada uma de cada vez após sua medição (on



line) ou leitura (off line) o método combina uma estimativa antiga e um novo conjunto de medições para se obter uma nova estimativa dos parâmetros das F.T's. Logo após reestima-se os parâmetros, tendo em conta que o ruído relacionado com a saída possui curva de distribuição normal, é aditivo. Logo, as medições de saída não dependem do ruído nos instantes anteriores. Sendo assim, o estimador é chamado unbiased e a técnica de estimação dos parâmetros :

#### Método dos Mínimos Quadráticos Recursivo Generalizado.

As funções de transferência são representadas em forma de variáveis de estados discretas após a estimação dos seus parâmetros. Realizada esta etapa, representa-se o sistema discreto na forma de variáveis de estado contínuas no ponto inicial. A transição entre estas representações é feita por meio de manipulações com a matriz modal, formada a partir dos autovetores do sistema discreto em variáveis de estado, obtendo-se o sistema discreto e contínuo diagonalizados, antes da representação final em variáveis de estado do modelo equivalente.

As equações que representam o modelo equivalente dinâmico na forma de variáveis de estado são :

$$\dot{X}_e = A_e X_e + B_e V \quad ( 3.2.1 )$$

$$I = C_e X_e + D_e V \quad ( 3.2.2 )$$

onde,

$$x_e = [ x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{12} ]^T$$

$$V = \begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix}$$

No apêndice A, apresenta-se de forma sucinta a teoria sobre o levantamento de um modelo equivalente dinâmico linear e uma aplicação prática dessa teoria. Em MOTÁ (1981) e SILVEIRA (1985), têm-se maiores detalhes sobre a teoria e suas aplicações. Por uma questão de simplicidade omitiu-se o delta na equação de estado, mas subentende-se que sejam linearizadas.

### 3.3. IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS.

Seja um sistema dado por ,

$$Y = Ua + W \quad ( 3.3.1 )$$

onde,

Y - Vetor de medidas r dimensional;

W - é um vetor de ruído associado às medidas;

r - denota um número sequencial de medição;

U - entrada do modelo;

a - vetor de parâmetros do modelo;

e

$$X = Ua \quad ( 3.3.2 )$$

onde, X é a entrada do modelo.

As seguintes considerações devem ser satisfeitas para determinação do estimador de variância mínima do vetor de parâmetros :

- Disponibilidade de um conjunto de medidas;
- O ruído W tenha curva de distribuição gaussiana;
- A variância do ruído seja conhecida a priori;

Se o ruído possui distribuição gaussiana, a probabilidade do ruído é :

$$p ( W ) = f ( N, r ) \exp ( W^T N^{-1} W / 2 ) \quad ( 3.3.3 )$$

onde f ( N, r ) é uma função de N e r.

O valor esperado e variância são dados por :

$$E ( W ) = 0 \quad ( 3.3.4 )$$

$$E ( W W^T ) = N \quad ( 3.3.5 )$$

O estimador de Markov do vetor de parâmetros a é derivado a seguir. Manipulando a equação 3.3.1 temos,

$$W = Y - U\hat{a} \quad ( 3.3.6 )$$

onde,  $\hat{a}$  é o vetor estimado.

Definindo-se a probabilidade do ruído em função do estimador  $\hat{a}$ ,

$$p(W) = p(Y - U\hat{a}) \quad (3.3.7)$$

O estimador  $\hat{a}$  de  $a$  de variância mínima é obtido quando

$$\frac{\partial p(W)}{\partial \hat{a}} = 0 \quad (3.3.8)$$

ou

$$\frac{\partial}{\partial \hat{a}} [ \ln [ p(Y - U\hat{a}) ] ] \quad (3.3.9)$$

temos que,

$$\begin{aligned} \ln [ p(Y - U\hat{a}) ] &= \ln [ f(N, r) + \\ &+ (Y - U\hat{a})^{-1} N^{-1} (Y - U\hat{a}) / 2 \end{aligned} \quad (3.3.10)$$

substituindo o resultado acima na equação 3.3.9,

$$\frac{\partial}{\partial \hat{a}} [ (Y - U\hat{a})^T N^{-1} (Y - U\hat{a}) ] = 0 \quad (3.3.11.a)$$

$$U^T N^{-1} U\hat{a}^* - U^T N^{-1} Y = 0 \quad (3.3.11.b)$$

Agora, determina-se um estimador equivalente ao

estimador dos mínimos quadrados ponderados.

$$\hat{a}^* = (U^T N^{-1} U)^{-1} U^T N^{-1} Y \quad (3.3.12)$$

O cálculo de  $\hat{a}$  de uma só vez por inversão de matrizes, chamada solução **one shot**, conduz a problemas de mau condicionamento na inversão das matrizes. A fim de evitar os problemas da solução **one shot**, propõe-se um método combinando uma estimativa antiga e um novo conjunto de medições para se ter um novo vetor  $\hat{a}^*$ . Denomina-se este método de formulação recursiva na forma de Kalman, onde cada medida é processada uma de cada vez após a medição. Desta forma será possível a implementação **on line**, do estimador.

A formulação recursiva do estimador de Markov na forma de Kalman:

Seja  $Y$  um sistema para um conjunto de  $m$  medições :

$$Y^m = U^m + W^m \quad (3.3.13)$$

O estimador que minimiza o termo  $(U^{Tm} N^{-1} U^m)^{-1}$  da matriz diagonal variância do erro  $(\hat{a} - a)$ , dado por :

$$\hat{a}^* = (U^{Tm} N^{-1m} U^m)^{-1} U^{Tm} N^{-1m} Y^m \quad (3.3.14)$$

Seja  $Y^S$  uma parte do sistema  $Y^m$  com  $S$  medidas adicionais.

$$Y^S = U^S a + W^S \quad ( 3.3.15 )$$

As m e S medidas combinadas

$$\begin{bmatrix} Y^m \\ Y^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^m \\ U^S \end{bmatrix} a + \begin{bmatrix} W^m \\ W^S \end{bmatrix} \quad ( 3.3.16 )$$

O estimador é dado por

$$\hat{a}^* = \begin{bmatrix} U^m & U^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N^m & 0 \\ 0 & N^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^m \\ U^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^m & U^{TS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N^m & 0 \\ 0 & N^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y^m \\ Y^S \end{bmatrix} \quad ( 3.3.17 )$$

ou

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} U^{Tm} & N^{-1m} & U^m & + & U^{TS} & ( N^S )^{-1} & U^S \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U^{Tm} & ( N^m )^{-1} & Y^m & + \\ + & U^{TS} & ( N^S )^{-1} & Y^S \end{bmatrix} \quad ( 3.3.18 )$$

A partir da definição de matriz variância do erro, a estimação dos parâmetros e a matriz de covariância do erro são expressas na forma de Kalman, combinando medições conhecidas a priori e medições adicionais. Após manipulações algébricas, temos o processo recursivo :

$$K = P^m U^{TS} ( N^S + U^S P^m U )^{-1} \quad ( 3.3.19 )$$

$$\hat{a}^* r = \hat{a}^* m + K ( Y^S - U^S \hat{a}^{*m} ) \quad ( 3.3.20 )$$

$$p^r = p^m + K U^S p^m \quad ( 3.3.21 )$$

A. formulação recursiva de Kalman, onde as medidas são processadas uma de cada vez :

$$K = P_k U_{k+1}^T ( q_{k+1} + U_{k+1} P_k U_{k+1}^T )^{-1} \quad ( 3.3.22 )$$

$$\hat{a}^*_{k+1} = \hat{a}^*_k + K ( Y_{k+1} - U_{k+1} a^*_k ) \quad ( 3.3.23 )$$

$$P_{k+1} = ( I - K U_{k+1} ) P_k \quad ( 3.3.24 )$$

com  $k = 1, 2, \dots, r$

Valores arbitrários para  $a$  e  $p$  são necessários para iniciar o processo. Se a variância  $q$  é a mesma para todas as medidas, ele não tem efeito na estimação do vetor de parâmetros, mas afeta a matriz variância dos erros. Referências sobre o método podem ser encontradas em MOTA (1981).

### 3.4. A ESTRATÉGIA DO CONTROLE ÓTIMO COM ÍNDICE DE DESEMPENHO QUADRÁTICO.

A dinâmica do sistema de potência da figura 2.3.1, exceto o compensador estático, é representada por equações de estado linearizadas, utilizando a técnica de identificação de sistemas dinâmicos, citada na secção 3.1 e apêndice B. Após o tratamento dado ao sistema de 500 Kv, faz-se a interligação do modelo linearizado do compensador estático, obti-

do a partir do diagrama de blocos da figura 2.2.3, no modelo equivalente dinâmico linear do sistema de potência.

O sistema interligado compensador/equivalente dinâmico pode ser estabilizado por uma lei linear de realimentação de estados, quando sujeito a distúrbios. Então emprega-se uma estratégia ótima de controle que leva em consideração a velocidade de convergência dos estados e a energia do sinal de entrada.

### 3.4.1. A Realimentação Ótima de Estados.

O problema do controle ótimo consiste na determinação do vetor de controle  $u$ , através da minimização de um índice de desempenho quadrático  $J$ , para um sistema linear invariante no tempo na forma de variáveis de estado e sob completa controlabilidade. O sistema a ser controlado :

$$\dot{X} = A X + B u \quad ( 3.4.1.1 )$$

$$Y = C X \quad ( 3.4.1.2 )$$

O índice de desempenho quadrático :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} ( X^T Q X + u^T R u ) dt \quad ( 3.4.1.3 )$$

A matriz peso  $Q$ , positiva semi definida (ou posi-



tiva definida) real e simétrica, e a matriz R, positiva definida real e simétrica, são responsáveis pela minimização dos estados e redução do esforço da energia de controle, respectivamente. Os termos entre parênteses possuem a forma de energia.

Unindo as equações de estado 3.4.1.1 - 2 e o índice de desempenho 3.4.1.3 por meio do vetor de co-variáveis de estado obtém-se uma nova função, de forma a minimizar o vetor de controle u, determinando assim a lei do controle ótimo. A nova função:

$$H \triangleq \frac{1}{2} [ X^T Q X + U^T R U ] + p^T [ A X + B u ] \quad ( 3.4.1.4 )$$

A expressão acima é chamada função Hamiltoniana generalizada de energia. O vetor p de co-variáveis de estado corresponde aos multiplicadores de Lagrange na mecânica clássica.

A Condição para realimentação ótima de estados :

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 \quad ( 3.3.1.5 )$$

Derivando a equação 3.4.1.4 em relação a u e aplicando a condição 3.4.1.5, obtém-se a lei do controle ótimo :

$$u = - R^{-1} B^T p \quad ( 3.4.1.6 )$$

As equações do vetor co-estado são obtidas a partir da relação entre o Hamiltoniano  $H$  e Lagrangeano  $L$  encontrada na mecânica clássica ( YU, 1983 ), então,

$$H ( p, x, t ) = x^T p - L ( x, \dot{x}, t ) \quad ( 3.4.1.7 )$$

Manipulando as derivadas da equação 3.4.1.7, tanto à esquerda como à direita, obtemos expressões que relacionam o vetor de estados e o vetor de co-estados com a função de energia, equação 3.4.1.4. As relações obtidas são:

$$\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial p} \quad ( 3.4.1.8 )$$

$$\dot{p} = - \frac{\partial H}{\partial x} \quad ( 3.4.1.9 )$$

Substituindo as derivadas parciais da função de energia nas expressões 3.4.1.8 e 3.4.1.9 obtem-se a mesma representação para variáveis de estado e uma representação adicional para os vetores de co-estado. A nova representação na forma matricial :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -S \\ 0 & A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ p \end{bmatrix} \quad (3.4.1.10)$$

onde  $S = B R^{-1} B$

A equação 3.4.1.6 determina a lei do controle ótimo em função dos co-estados. Necessita-se uma relação entre os vetores de estado e co-estados, pois deseja-se uma realimentação ótima de estados a fim de estabilizar o sistema interligado, que possui a forma das equações 3.4.1.1 - 2, onde os co-estados não fazem parte do sistema. Existe uma relação linear entre o vetor de estados e co-estados, porque ambos estão definidos em espaço de estados lineares, então :

$$p = K X \quad (3.4.1.11)$$

A matriz  $K$ , simétrica positiva definida e única, é solução da equação matricial de Riccati. Derivando 3.4.1.11 em relação ao tempo e substituindo nas equações 3.4.1.10 chega-se a equação matricial de Riccati para sistemas lineares e invariantes no tempo. A equação :

$$K A + A^T K - K S K + Q = 0 \quad (3.4.1.12)$$

### 3.4.2 Realimentação Ótima das Saídas.

Agora, minimiza-se o índice de desempenho em função dos desvios das saídas, que podem ser estados do sistema representado pelas equações 3.4.1.1 - 2 ou uma combinação linear dos estados e redução do esforço da energia de controle.

O índice de desempenho quadrático :

$$J = \int_0^{\infty} ( Y^T Q_c Y + u^T R u ) dt \quad ( 3.4.2.1 )$$

A matriz  $Q_c$  e  $R$  possuem as mesmas propriedades que as matrizes  $Q$  e  $R$  da equação 3.4.1.3. Substituindo-se a equação 3.4.1.2 em 3.4.2.1, chega-se a um índice de desempenho, em função das variáveis de estado e uma nova matriz  $Q$ , idêntico ao índice definido em 3.4.1.3, então :

$$J = \int_0^{\infty} ( X^T Q X + u^T R u ) dt \quad ( 3.4.2.2 )$$

onde  $Q = C^T Q_c C$ .

Após manipulações com as equações 3.4.1.2, 3.4.1.1 e 3.4.1.6, obtém-se a nova lei do controle ótimo :

$$u = - R^{-1} B^T K C^{-1} Y \quad ( 3.4.2.3 )$$

Se a matriz  $C$  não é inversível, o controle poderá ser realizado estimando-se os estados do sistema através das variáveis mensuráveis ( MOTA, 1981 ).

## CAPÍTULO 4

### O PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES

#### 4.1. INTRODUÇÃO

As técnicas de controle e identificação de parâmetros, expostas no capítulo 3, são utilizadas no sistema de potência de 500 KV da CHESF, figura 2.3.1. Sendo mais específico, estas técnicas são aplicadas no sistema de controle do compensador estático localizado na barra 7, tendo por objetivo aumentar o amortecimento, para pequenas perturbações, de variáveis ligadas à barra de interligação C.E.R./restante do grande sistema C.A.

A dinâmica do sistema de potência no ponto de interligação é representada por um modelo equivalente dinâmico na forma de variáveis de estado contínuas e lineares.

rizadas; após a interligação ao modelo linearizado do G.E.R., obtém-se o modelo interligado ou total do S.E.P na forma de variáveis de estado.

Agora, através da minimização de um índice de desempenho quadrático, comprometido com o sistema interligado, determina-se a lei do controle ótimo, onde os estados do modelo são realimentados por meio de ganhos constantes. A figura 4.1. ilustra o sistema não otimizado e com sinais ótimos na forma de variáveis de estado.

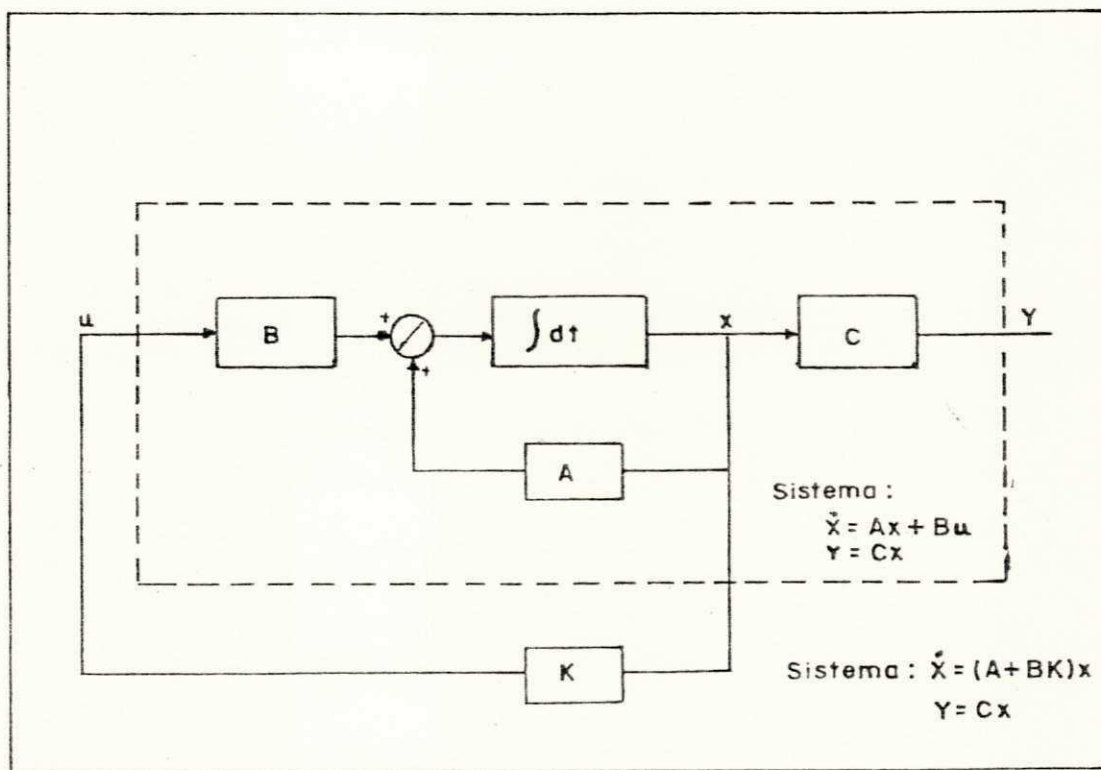


Figura 4.1: Diagrama de blocos para o sistema de potência na forma de variáveis de estado sem sinais adicionais e com sinais adicionais.

Realizado o projeto dos sinais adicionais, verifica-se a influência destes sinais (leis do controle ótimo) no desempenho dinâmico do S.E.P. através da análise de autovalores, como também através de simulações no modelo linear e não linear do sistema de potência.

#### 4.2. MODELOS LINEARES NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

O sistema de potência, representado pelo diagrama unifilar da figura 2.3.1, e o compensador estático de reativos, representado pelo diagrama de blocos da figura 2.2.3, são modelados na forma de variáveis de estado contínuas e linearizadas em torno de um ponto de operação formando o modelo interligado equivalente dinâmico/compensador estático. As técnicas de otimização, que são empregadas no projeto de sinais adicionais, exigem o tratamento mencionado acima. Por uma questão de simplicidade omitiu-se na notação das técnicas de projeto e variáveis a serem amortecidas o delta ( $\Delta$ ), correspondente as variáveis incrementais (lineares).

##### 4.2.1. Modelo Equivalente Dinâmico Linear do Sistema de Potência.

Realizado o projeto dos sinais adicionais, verifica-se a influência destes sinais (leis do controle ótimo) no desempenho dinâmico do S.E.P. através da análise de autovalores, como também através de simulações no modelo linear e não linear do sistema de potência.

#### 4.2. MODELOS LINEARES NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

O sistema de potência, representado pelo diagrama unifilar da figura 2.3.1, e o compensador estático de reativos, representado pelo diagrama de blocos da figura 2.2.3, são modelados na forma de variáveis de estado contínuas e linearizadas em torno de um ponto de operação formando o modelo interligado equivalente dinâmico/compensador estático. As técnicas de otimização, que são empregadas no projeto de sinais adicionais, exigem o tratamento mencionado acima. Por uma questão de simplicidade omitiu-se na notação das técnicas de projeto e variáveis a serem amortecidas o delta (  $\delta$  ), correspondente as variáveis incrementais (lineares).

##### 4.2.1. Modelo Equivalente Dinâmico Linear do Sistema de Potência.



O apêndice A, parte a.2, contém as matrizes numéricas do modelo equivalente dinâmico levantado para o sistema de potência em estudo. Forma final reduzida do modelo na forma de variáveis de estado, conforme as equações a.1.1-2:

$$\dot{X}_e = A_e X_e + B_e V \quad (4.2.1.1.)$$

$$I = C_e X_e + D_e V \quad (4.2.2.2.)$$

$$V = \begin{bmatrix} - \\ - \\ V_D \\ - \\ V_Q \\ - \\ - \end{bmatrix} \quad \text{vetor de entrada}$$

$$I = \begin{bmatrix} - \\ - \\ I_D \\ - \\ I_Q \\ - \\ - \end{bmatrix} \quad \text{vetor de saída}$$

#### 4.2.2. Modelo Dinâmico Linear do C.E.R.

A partir do diagrama de blocos do modelo não linear do C.E.R., a figura 2.2.3. deduz-se em equações não linearizadas na forma de variáveis de estado em torno do

ponto de operação do compensador. O modelo possui dois estados, o primeiro estado não tem significado físico, já o segundo representa a admitância variável do reator. Este modelo foi deduzido e utilizado em SILVEIRA, 1985.

Equações para valores em p.u.:

$$\dot{X}_c = A_c X_c + B_c u + C_c I \quad (4.2.2.1)$$

$$V = D_c X_c + E_c I \quad (4.2.2.2)$$

$$Y = F_c X_c \quad (4.2.2.3)$$

onde,

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & \frac{GMRC}{TMRC} \frac{V_0}{Y_0} \\ \frac{1}{TFRC} & \frac{GMRC}{TFRC} \frac{V_0}{Y_0} - \frac{1}{TFRC} \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} GMRC \\ TMRC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ TFRC \end{bmatrix}$$

matriz  $C_c$ , seus elementos :

$$C_{1,1} = - \frac{GMRC \cdot GKRC \cdot I_{D0}}{TMRC \cdot I_0} + \frac{GMRC V_{Q0}}{TMRC V_0 Y_0}$$

$$C_{1,2} = - \frac{GMRC \cdot GKRC \cdot I_{Q0}}{TMRC \cdot I_0} - \frac{GMRC V_{D0}}{TMRC V_0 Y_0}$$

$$C_{1,1} = C_{2,1} \quad e \quad C_{1,2} = C_{2,2}$$

$$D_c = \begin{bmatrix} 0 & \frac{V_{D0}}{Y_0} \\ 0 & \frac{V_{Q0}}{Y_0} \end{bmatrix} \quad E_c = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{Y_0} \\ \frac{1}{Y_0} & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_c = [ 0 \quad 1 ]$$

e,

$$X_c = [ X_{c1} \quad X_{c2} ]^T \quad \text{vetor de estados:}$$

$$V = [ V_D \quad V_Q ]^T \quad \text{vetor de tensão:}$$

$$I = [ I_D \quad I_Q ]^T \quad \text{vetor de corrente:}$$

$$Y = [ X_{c2} ] \quad \text{vetor de saída;}$$

$$u = V_S \quad \text{vetor de entrada.}$$

#### 4.2.3 Modelo Interligado C.E.R./Equivalente Dinâmico.

O modelo interligado é formado a partir das equações 4.2.1.1 e 4.2.2.1-3. Equações do modelo conforme SILVEIRA, (1985) :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_c \\ \dot{X}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_c + C_c D_e R D_c & C_c C_e + C_c D_e R E_c C_e \\ B_e R D_c & A_e + B_e R E_c C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ X_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_c \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.2.3.1)$$

$$Y = G X \quad (4.2.3.2)$$

onde,

$$R = [ 1 - E_c D_e ]^{-1} \quad (4.2.3.3)$$

e

$$X = [ X_{c1} \quad X_{c2} \quad X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_{12} ]^T$$

$$u = V_S$$

As condições iniciais do compensador estático e os valores numéricos do sistema interligado são apresentados no apêndice B.

Esta modelagem possui catorze estados, sendo os dois primeiros referentes ao modelo do C.E.R., o primeiro estado não possui significado físico, já o segundo representa a admitância líquida do reator. Os doze estados restantes correspondem aos estados do modelo equivalente dinâmico do S.E.P., os quais não possuem significado físico.

#### 4.3 O Fluxo de Potência Ativa na Linha e Ângulo de Tensão na Barra em Função dos Estados do Modelo Interligado C.E.R./Equivalente Dinâmico.

As oscilações das variáveis mensuráveis (fisicamente acessíveis : tensão, ângulo, frequência na barra e fluxo de potência ativa na linha ) ligadas ao barramento compensador/sistema C.A., podem ser amortecidas para pequenas perturbações, realimentando-se estas variáveis através do sistema de regulação do C.E.R. Entre estas variáveis, a potência na linha e ângulo de tensão na barra apresentaram maior desvio do regime permanente, em face a pequenas perturbações, sendo escolhida para comporem o sinal adicional através de técnicas de controle ótimo.

As técnicas de controle ótimo, da secção 3.4, só podem ser empregadas quando o problema está totalmente formulado em variáveis de estado. O fluxo de potência ativa e ângulo de tensão na barra, grandezas físicas a serem amortecidas, devem ser incorporadas ao modelo dado pelas equações 4.2.3.1-2, a fim de utilizar-se a técnica de estabilização da secção 3.4.

A seguir, a potência na linha e ângulo de tensão são incorporados à saída do modelo, utilizando-se a técnica de estabilização da secção 3.3.

Os dados necessários à identificação das variáveis mensuráveis do sistema de 500 Kv, a serem acopladas ao modelo equivalente interligado, são obtidas através de uma variação de 10% (dez por cento) na tensão de referência do C.E.R., durante 0.3 segundos ao longo de uma simulação de 1.0 segundo, no modelo equivalente interligado e no modelo não linear do sistema de potência. Os parâmetros  $c_{i,j}$  da equação  $Y = CX$  correspondente às saídas, que não pertencem a equação 4.2.3.3, são identificados utilizando-se valores de  $Y$  obtidos na simulação não linear e dos valores dos estados  $X$  obtidos da simulação na modelagem linear do sistema, onde  $Y$  pode ser o fluxo de potência na linha ( $P_i$ ) ou desvio do ângulo de tensão na barra  $i$  ( $V_i$ ). A figura 4.3.1 ilustra o processo de identificação dos parâmetros.

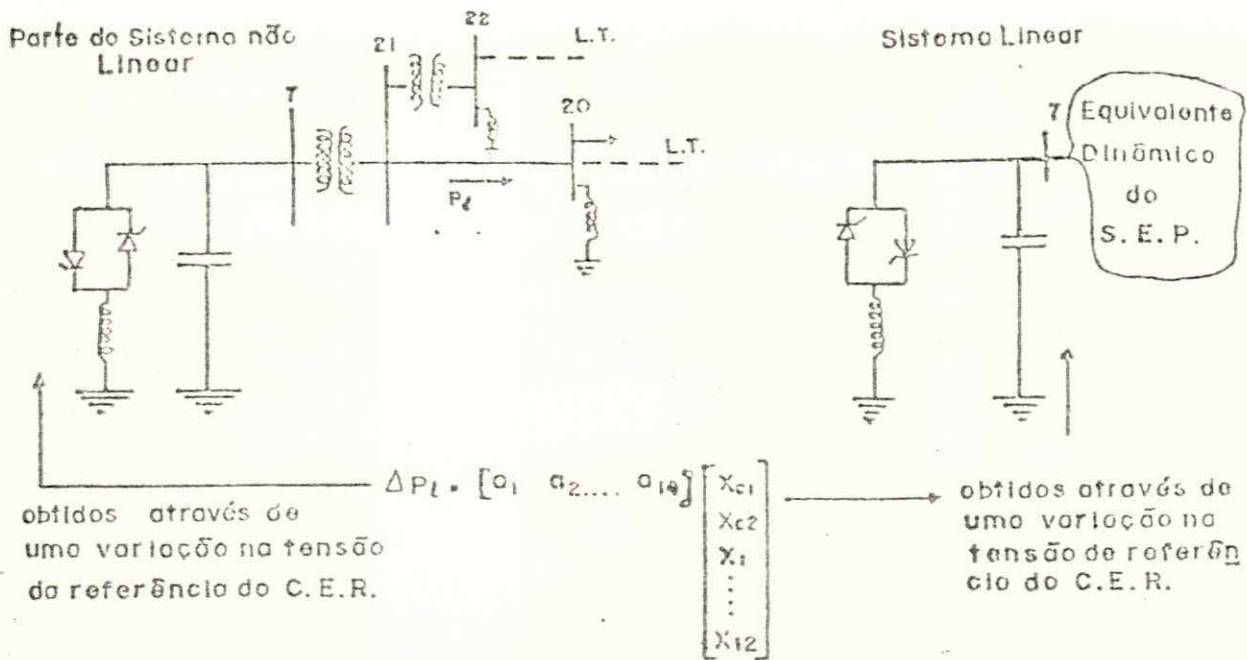


Figura 4.3.1 : Ilustra o processo de obtenção dos dados necessários para identificação dos parâmetros da potência na linha em função dos estados do modelo equivalente dinâmico.

A equação matricial 4.3.1, logo abaixo, expressa os desvios da potência ativa na linha 21-20 e ângulo de tensão na barra 7 em função dos estados. As funções foram identificadas utilizando 81 pontos (representando 1 segundo) e 14 estados. As figuras 4.3.2-3 mostram a eficiência da técnica quando comparamos as curvas identificadas com as curvas obtidas no modelo não linear do sistema de potência.

A matriz de medição identificada correspondente às variáveis não acessíveis no modelo linear, à potência ativa na linha 21-20 ( $P_1$ ) e ângulo de tensão na barra 7, é :

$$\begin{array}{c}
 P_1 \\
 \\
 \\
 \\
 V_7
 \end{array}
 =
 \begin{array}{ccccc}
 -0.007 & 0.126 & 0.078 & 0.100 & 0.128 \\
 0.289 & -0.140 & 0.021 & 0.203 & -0.030 \\
 -0.286 & 0.287 & -0.016 & 0.066 & \\
 \\
 -0.001 & -0.020 & 0.074 & 0.052 & 0.035 \\
 -0.208 & -0.020 & -0.023 & 0.024 & 0.130 \\
 -0.031 & -0.031 & -0.179 & -0.179 &
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_{c1} \\
 X_{c2} \\
 X_1 \\
 \\
 \\
 \\
 X_{12}
 \end{array}$$

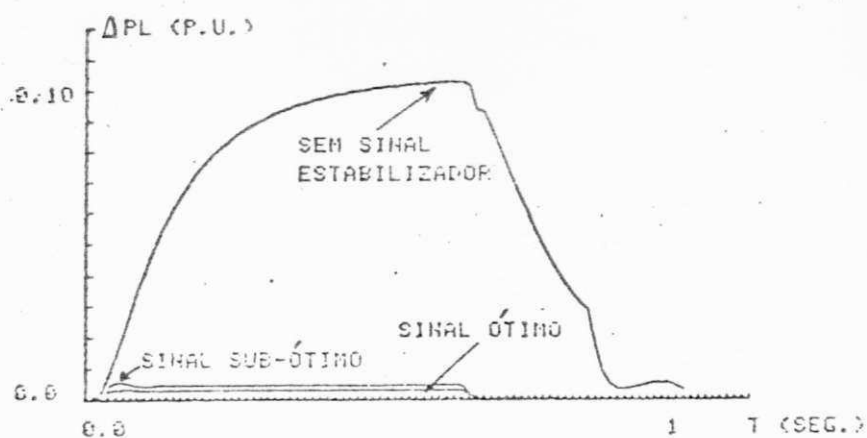


Figura 4.3.2 : Identificação do desvio do fluxo de potência ativa na linha 21-20.



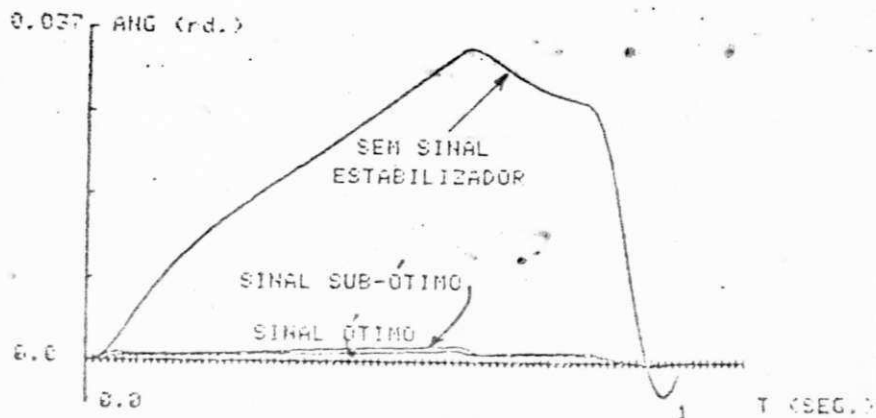


Figura 4.3.3 : Identificação do desvio do ângulo de tensão na barra-7.

#### 4.4 MODELAGEM FINAL E PROJETO DE SINAIS ADICIONAIS.

##### 4.4.1 Modelagem Final.

O desvio do fluxo de potência na linha 21-20 e/ou ângulo de tensão na barra 7, equação 4.3.1, podem ser acopladas ao sistema dinâmico interligado, equação b.8.9 no apêndice B. Para tanto, faz-se necessário que a matriz **C** possua forma quadrática e seja inversível, a fim de que sinais adicionais baseados na técnica de realimentação ótima de saídas, subsecção 4.3.2, sejam projetados sem maiores

dificuldades. Desta forma, apenas para fins de projeto, o vetor saída terá a seguinte forma :

$$Y = [ X_{c1} \quad X_{c2} \quad X_1 \quad \dots \quad X_{12} ]^T \quad ( 4.4.1.1 )$$

Caso o número de saídas seja menor que o número de estados, o controle pode ser feito estimando-se os estados a partir das saídas ( MOTA, 1981 ). Para iniciar-se o processo do projeto de sinais adicionais, inclui-se o fluxo de potência  $P_1$  na equação 4.4.4.1, em substituição a  $X_{c2}$ , arbitrariamente.

Então o modelo a ser manipulado será :

$$\dot{X} = A X + B u \quad ( 4.4.1.2 )$$

$$Y_1 = C X \quad ( 4.4.1.3 )$$

onde,

$$Y_1 = [ X_{c1} \quad P_1 \quad X_1 \quad \dots \quad X_{12} ]^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & & & \\ & 1 & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & 1 & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & 1 & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & 1 & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & 1 & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & & & & & & & & 1 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

$a_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 14$ ) são os parâmetros das funções identificadas para  $P_i$ , obtidos a partir da equação 4.3.1.

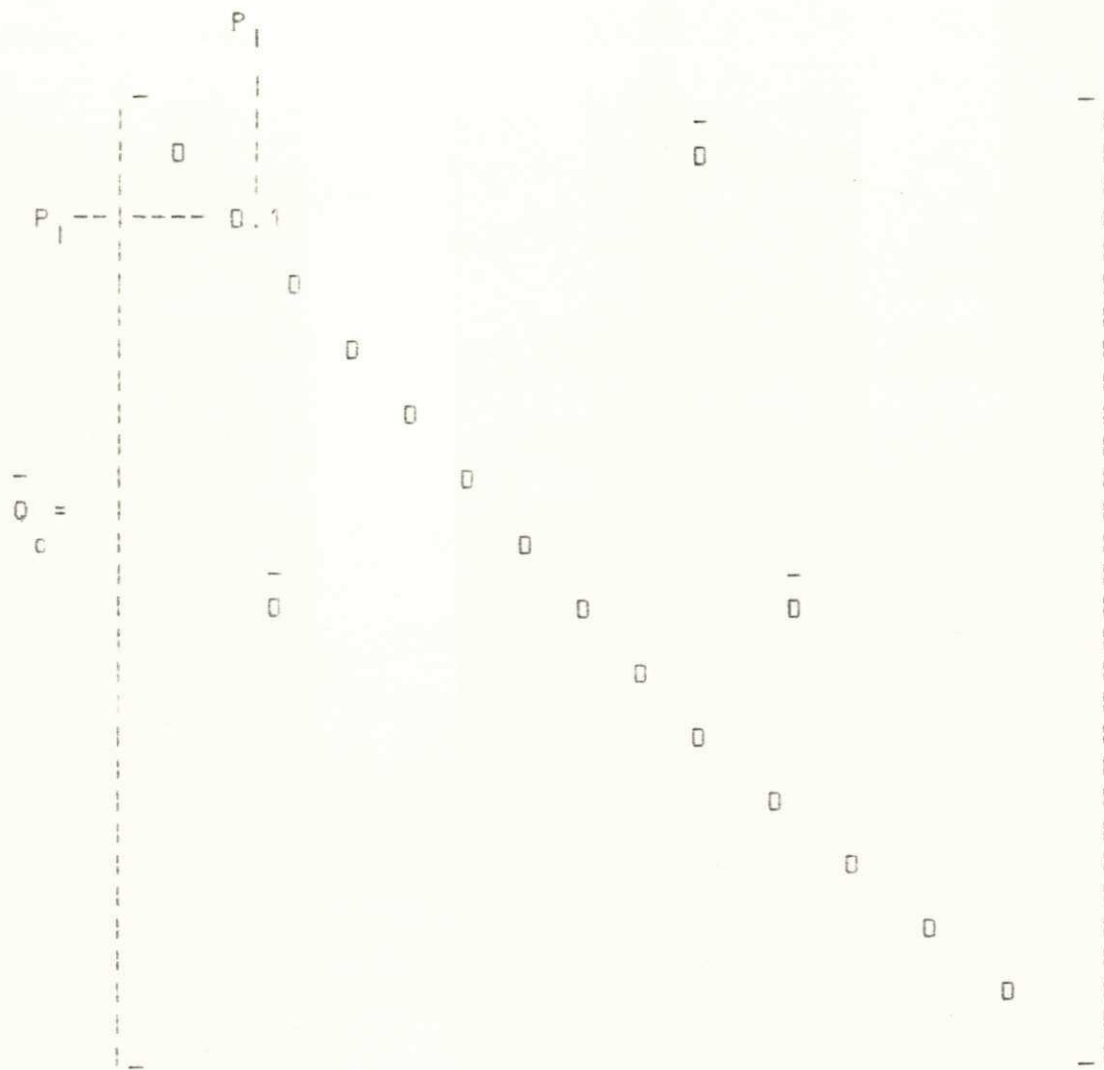
#### 4.4.2 Projeto de Sinais Adicionais.

Determina-se a lei do controle com realimentação ótima de estados, conforme o exposto na subsecção 3.4.2, para o modelo formado pelas equações 4.4.1.2-3. Na minimização do índice de desempenho, é necessário atribuir-se valores numéricos adequados para as matrizes peso  $Q$  e  $R$ .

A fim de obter-se o amortecimento da variável  $P_1$ , deve-se atribuir maior peso ao elemento da diagonal na matriz  $Q$  correspondente a  $P_1$ . Com isso, o índice de desempenho será predominantemente função da variação de potência ativa na linha: desta forma a lei de controle irá minimizar estas variações como requerido pelo projetista.

Inicialmente, atribui-se os seguintes valores para  $Q$  e  $R$  :

$$P = [ 0.0001 ]$$



Obtém-se a partir da solução da equação algébrica de Riccati, através do método dos autovalores ( CASTRO & MOTA, 1984 ), a seguinte lei :



O novo sistema interligado ( C.E.R./ Sinal Adicional )/ Equivalente Dinâmico é :

$$\dot{X} = ( A + B K ) X \quad ( 4.4.3.1 )$$

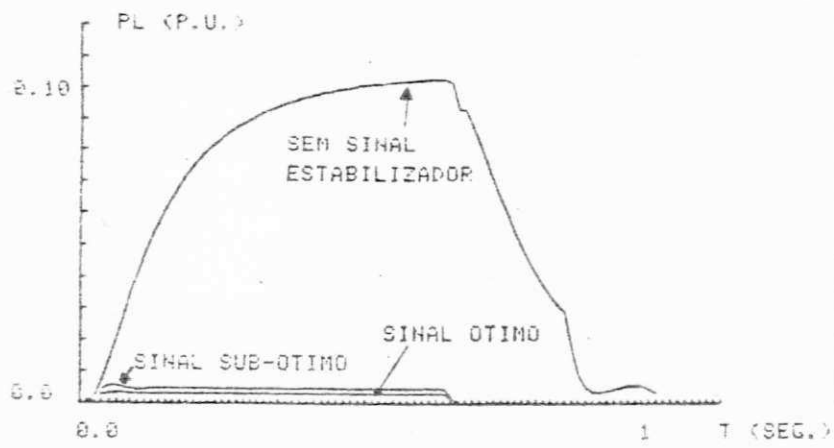
$$Y_1 = C X \quad ( 4.4.3.2 )$$

O sinal adicional projetado considera a realimentação de variáveis desprovidas de significado físico, só podendo ser implementado no modelo dinâmico linear interligado. A fim de tornar o sinal adicional fisicamente realizável, podendo ser implementado em sistemas realísticos de potência, despreza-se os ganhos correspondentes às variáveis de estado com significado meramente matemático, restando o ganho correspondente ao amortecimento do fluxo de potência, que é uma variável fisicamente realizável e acessível para uma realimentação de campo do sinal. Este sinal será chamado de sinal adicional subótimo.

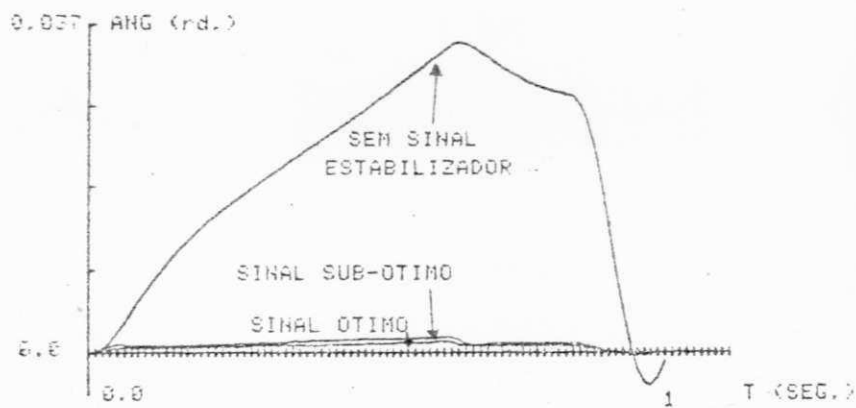
Inicialmente, verifica-se a atuação do sinal ótimo e subótimo no modelo linear do sistema elétrico de potência, equações 4.4.3.1-2. Logo após, implementa-se o sinal subótimo, através do sistema de controle do C.E.R., no modelo não linear do S.E.P. respaldado na análise dos autovalores e simulações no modelo linear. O modelo não linear do S.E.P. se aproxima mais do sistema real de 500 kv, figura 2.3.1, enquanto que o modelo linear é um modelo simplificado para fins de projeto.

A figura 4.4.3.1 apresenta o comportamento dinâmico do fluxo de potência na linha 21-20 e desvio do ângulo de tensão na barra 7, para uma variação de 10% na tensão de referência do C.E.R., durante 0.3 segundos, quando implementa-se sinais adicionais ótimos e subótimos. Observa-se um substancial amortecimento das respostas de  $P_1$  e  $V_7$  tanto para o controlador ótimo como para o controlador subótimo. Isto mostra ser bastante promissor a implementação de apenas uma variável ( no caso  $P_1$  ) na composição do sinal adicional, o que facilitará sua utilização em sistemas realísticos. Observa-se através do posicionamento dos autovalores o que significa o corte das variáveis não mensuráveis do controlador ótimo. A tabela 4.4.3.1 mostra os autovalores do modelo linear C.E.R./Equivalente Dinâmico sem sinal adicional, com sinal adicional ótimo e subótimo, respectivamente. Vê-se que pouca mudança ocorreu no posicionamento dos autovalores mais predominantes do modelo quando ocorre o corte das variáveis não mensuráveis do controlador ótimo. Isto confirma o bom resultado obtido, através da simulação mostrada na figura 4.4.3.1 na implementação do controlador subótimo.





a : Desvio do fluxo de potência ativa na linha 21-20



b : Desvio do ângulo de tensão na barra 7

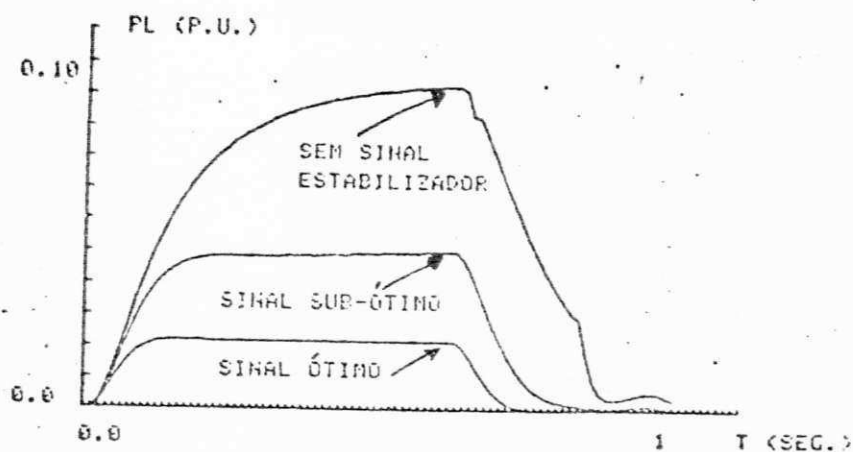
Figura 4.4.3.1 : Resultado de simulações no modelo linear para  $R = [ 0.0001 ]$ , os sinais são dados pela equação 4.4.2.1.

Tabela 4.4.3.1 : Autovalores do sistema interligado compensador estático/equivalente dinâmico, para a equação 4.4.3.1 e sem sinais adicionais.

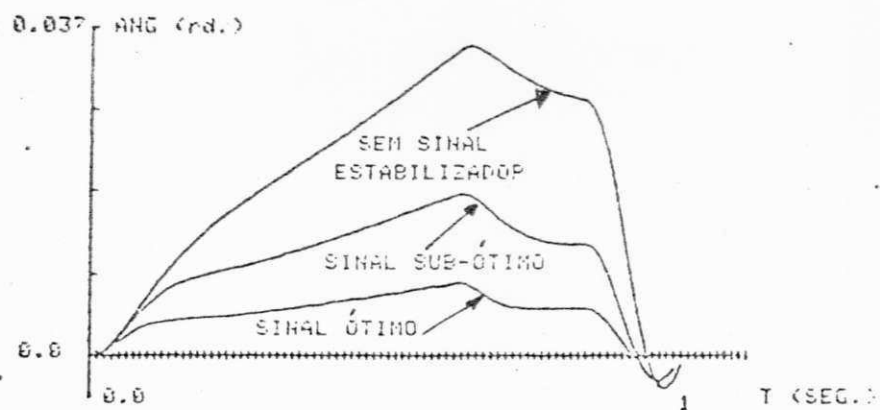
Autovalores para o sistema :		
não otimizado	otimizado	sub-otimizado
-50.88	$-140.1 \bar{+} j 111.7$	$-66.98 \bar{+} j 137.7$
-21.11		
$-2.027 \bar{+} j 11.15$	$-2.025 \bar{+} j 11.48$	$-2.015 \bar{+} j 11.47$
$-0.5208 \bar{+} j 7.991$	$-0.3086 \bar{+} j 7.332$	$-0.3289 \bar{+} j 7.336$
$-0.9856 \bar{+} j 8.132$	$-0.7755 \bar{+} j 8.650$	$-0.7706 \bar{+} j 8.639$
$-1.31 \bar{+} j 5.948$	$-1.832 \bar{+} j 5.990$	$-1.814 \bar{+} j 6.002$
-6.975	-4.810	-4.953
-0.2883	-0.2137	-0.2163
-2.059	-2.137	-2.163
-1.268	-1.250	-1.252

A fim de se obter uma maneira sistemática para o projeto de sinais adicionais, investigou-se algumas alterações nas matrizes peso da função objetiva  $J$ , variando-se unicamente o valor numérico da matriz diagonal  $R$ , responsável pela minimização da energia de controle na função de custo. Os sinais adicionais foram projetados seguindo os mesmos passos empregados no projeto do sinal dado pela equação 4.4.2.1, no intuito de determinar-se ganhos que provocam menor ou maior amortecimento em relação aos ganhos do sinal projetado anteriormente. A respeito da variação de  $R$ : se  $R$  cresce, os ganhos diminuem; se  $R$  diminui, os ganhos aumentam, levando os pólos mais à esquerda do eixo imaginário, exigindo maior esforço dos controladores ótimos. Este fato é muito importante para a implementação do controlador no sistema não linear, pois grandes esforços do sinal adicional, podem levar o regulador a atingir seus limites (não linearidades) para pequenas perturbações. Portanto, a escolha adequada de  $R$  será uma questão de um bom desempenho do sistema para pequenas perturbações. As figuras 4.4.3.2-3 apresentam os sinais adicionais e os resultados de simulações para pequenas perturbações, quando estes sinais são implementados no modelo linear. As simulações mostram que maiores ganhos provocam menor tempo de acomodação e mais amortecimento com ganhos menores, isto é, dentro de uma certa faixa. As condições de simulação são as mesmas dos resultados apresentados nas figura 4.4.3.1. As reduções ou aumentos dos valores absolutos de  $Q$  são equivalentes aos aumentos ou reduções de  $R$ , respectivamente. Logo, alterações

em  $\theta$  não foram investigadas.

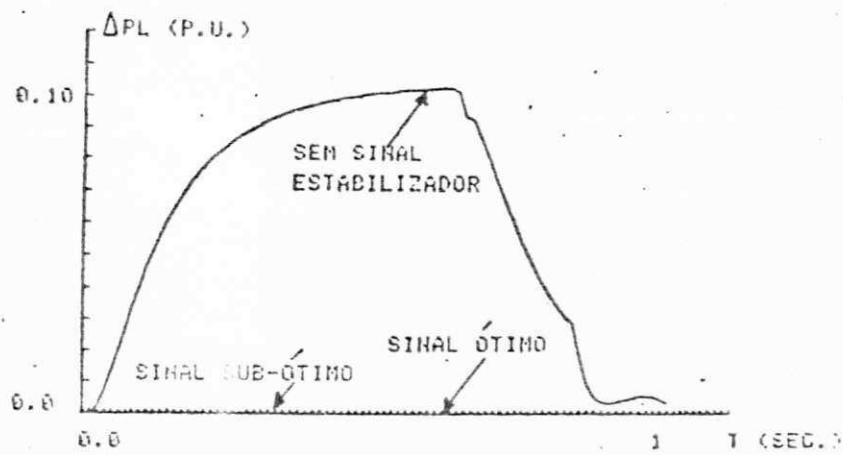


a : Desvio do fluxo de potência ativa na linha 21-20.

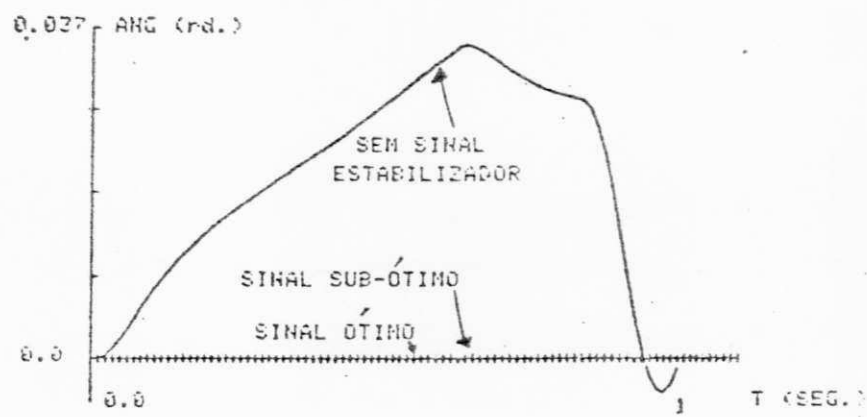


b : Desvio do ângulo de tensão na barra 7.

Figura 4.4.3.2 : Resultado de simulações no modelo linear para  $R = [ 0.0050 ]$ . Sinal adicional sub-ótimo  $u = [ -1.081 ] [ p_1 ]$ . Equação 4.4.3.3



a : Desvio de fluxo de potência ativa na linha 21-20



b : Desvio do ângulo de tensão na barra 7.

Figura 4.4.3.3 : Resultado de simulações no modelo linear para  $R = [ 0.000001 ]$ . Sinal adicional sub-ótimo  $u = [ -295.7 ] [ p_1 ]$ .

Projetou-se também sinais adicionais derivados de duas saídas fisicamente acessíveis à potência na linha 21-20 e ângulo de tensão na barra 7. Inicialmente, incluí-se os parâmetros identificados para o desvio de ângulo, equação 4.3.1, na saída do modelo linear, equação 4.4.1.3, compondo a seguinte saída :

$$Y_2 = [ X_{c1} \quad P_1 \quad X_1 \quad X_2 \quad X_3 \quad v_7 \quad \dots \quad X_{12} ]^T$$

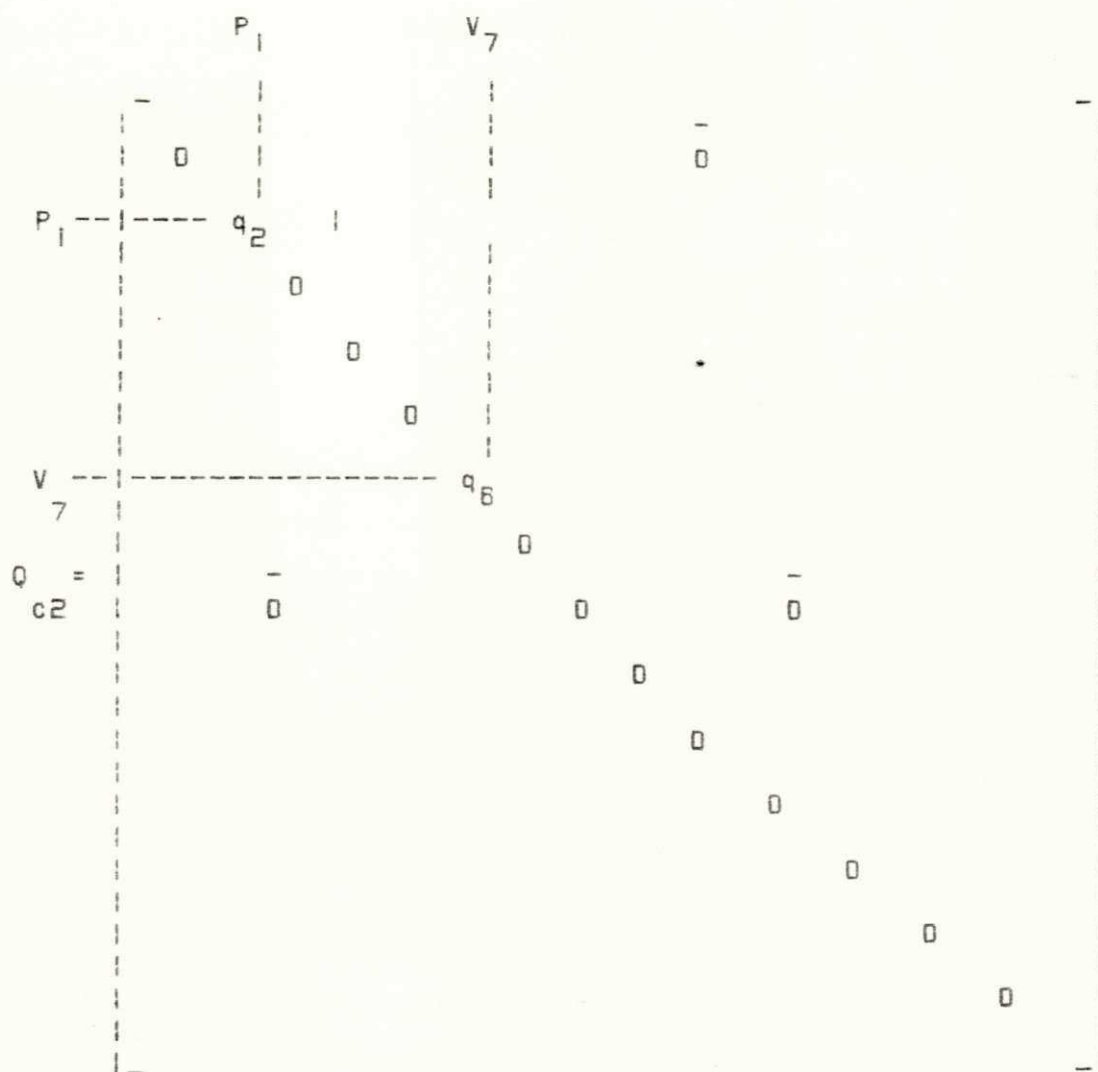
( 4.4.3.3 )

onde,  $v_7$  foi colocado em substituição ao quarto estado do modelo equivalente, arbitrariamente.

A saída  $Y_2$ , equação 4.4.3.3 e o sistema de equações diferenciais de primeira ordem, equação 4.4.1.2, formam um sistema interligado C.E.R./Equivalente Dinâmico empregado para projetar sinais adicionais baseados na minimização da função de custo  $J$ , equação 3.4.2.2.

As matrizes  $Q$  e  $R$  utilizadas na solução do problema acima são :

$$R = [ r ]$$



Modifica-se os valores de  $Q$  e  $R$ , cuja lei de controle ótimo é dada pela equação 4.4.2.1, pela atribuição do valor 0.01 à  $q_6$  e 0.001 à  $r$ . Logo após, a seguinte lei de controle ótimo é computada pela minimização da função de custo  $J$  com índice de desempenho quadrático. Então,

A lei do controle ótimo é :

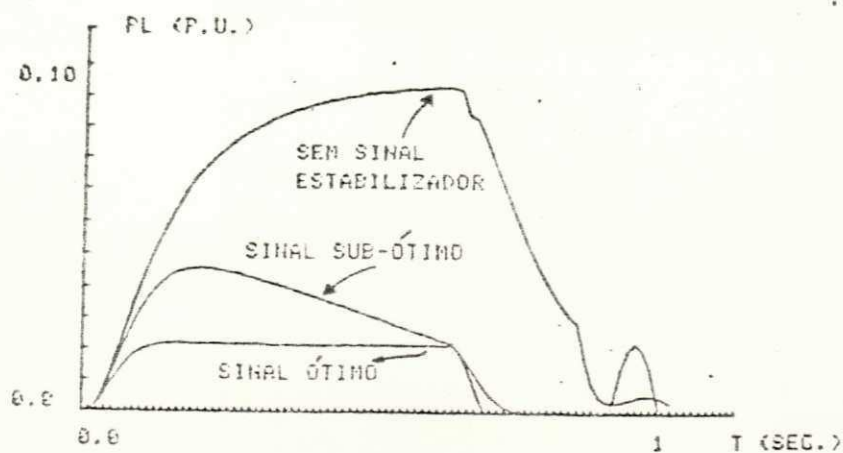
$$u = \begin{bmatrix} -0.283 & 0.264 & -6.793 & 17.140 & -10.609 \\ -7.495 & -3.623 & 4.901 & 2.119 & -114.52 \\ 9.256 & 3.409 & -4.968 & 2.425 \end{bmatrix}$$

( 4.4.3.4 )

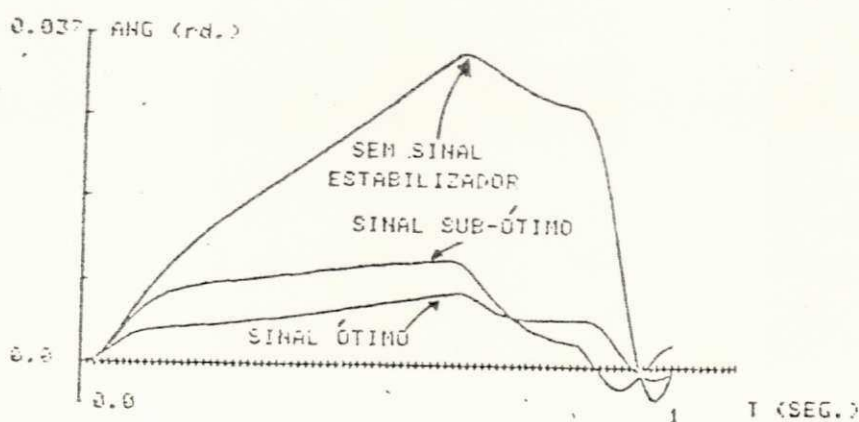
$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ P_1 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_4 \\ \sqrt{V_7} \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{12} \end{bmatrix}$$

Este sinal adicional, equação 4.4.3.4, é implementado no modelo linear do S.E.P., equações 4.4.1.2 e 4.4.3.3, e através de simulações no modelo linear, verifica-se a influência do sinal no amortecimento do fluxo de potência e ângulo de tensão na barra 7. Simula-se a perturbação anteriormente mencionada e a figura 4.4.3.4 mostra o resultado das simulações para o sinal dado pela equação 4.4.3.4. Neste sinal houve contribuição de uma variável a mais, possível de implementação real ( desvio do ângulo de tensão na barra ). A sua realimentação ótima não mostrou contribuição substancial no amortecimento do ângulo em relação a realimentação de uma só saída, no caso  $P_1$ , o que torna mais simples implementações destes sinais em sistemas realísticos, já que a realimentação de uma só saída ( o fluxo de potência ativa na linha ) trouxe amortecimento gratuito ao ângulo de tensão na barra.





a : Desvio do fluxo de potência ativa na linha 21-20



b : Desvio do ângulo de tensão na barra 7.

Figura 4.4.3.4 : Resultado de simulações no modelo linear  $R = ( 0.005 )$ , os sinais implementados são dados pela equação 4.4.3.4.

#### 4.5 IMPLEMENTAÇÕES E SIMULAÇÕES DO SINAL ADICIONAL JUNTO AO MODELO NÃO LINEAR DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.

Implementações e simulações dos sinais adicionais em uma modelagem não linear do sistema de potência tornaram-se necessárias a fim de verificar a influência destes sinais no desempenho dinâmico do sistema C.A., para o amortecimento do fluxo de potência ativa e controle de tensão na barra de interligação compensador / sistema C.A. Simula-se pequenas perturbações na tensão de referência do C.E.R. (simulação base) e pequenas perturbações na forma de variações de tensão, em barras próximas ao compensador estático.

Implementa-se no modelo não linear o sinal sub-ótimo base,

$$u = [ -21.12 ] [ P_1 ] \quad ( 4.5.1 )$$

obtido a partir do sinal adicional ótimo dado pela equação 4.4.2.1 ( do projeto base), com a finalidade de verificar a equivalência existente entre o modelo linear, utilizado para fins de projeto, e o modelo não linear, que é uma representação detalhada do sistema de potência.

Os sinais adicionais sub-ótimos são implementados no modelo não linear, o qual corresponde ao sistema de 500 Kv da CHESF, diagrama unifilar da figura 2.3.1, através do sistema de controle do C.E.R., representado pelo diagrama de blocos da figura 2.2.3, localizado na barra 7 em série com um filtro wash - out. Este filtro impede que o regulador atue devido a erros prolongados na potência. a figura 4.5.1 mostra o diagrama de blocos de um controlador sub - ótimo em cascata com um filtro wash - out.

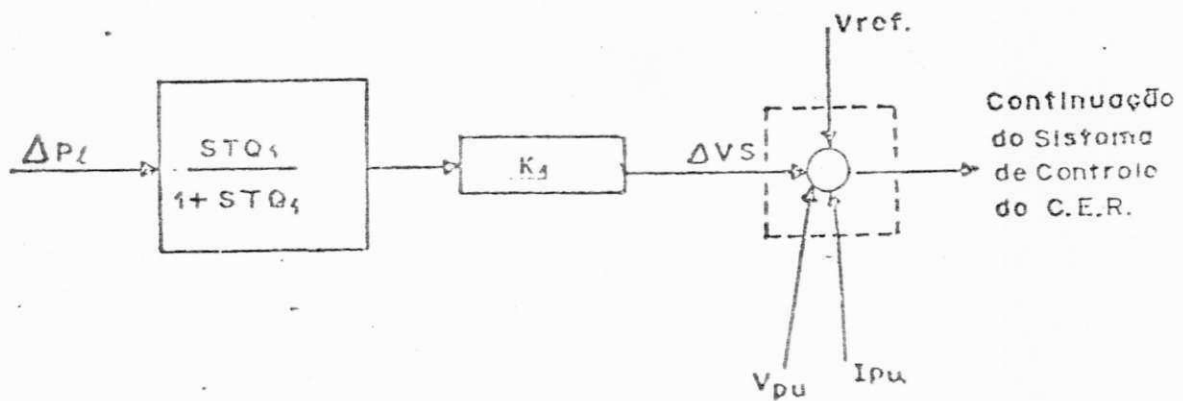


Figura 4.5.1 : Diagrama de blocos de um controlador sub - ótimo em cascata com um filtro wash-out introduzidos no modelo não linear do sistema C.A., realimentando desvios do fluxo potência ativa.

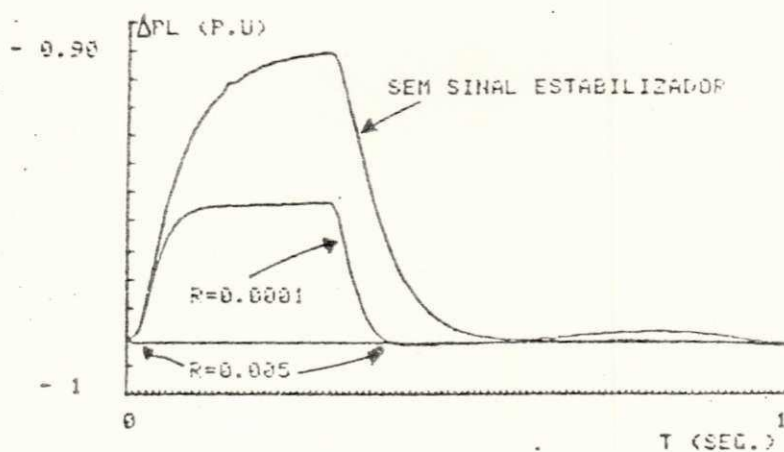
As implementações e simulações são realizadas em cima de uma modelagem não linear do sistema CHESF oeste de 500 Kv, obtida a partir do diagrama unifilar do sistema em estudo, figura 2.3.1, e dados do sistema real, apresentados na secção 2.3, as quais são executadas por computador digital.

Como a modelagem não linear é mais versátil que a linear, têm-se acesso a variáveis reais do sistema C.A. Realizou-se duas séries de simulações para pequenas perturbações, que podem ser classificadas em dois tipos: a primeira série chamada de simulações base por serem análogas às simulações realizadas no modelo linear, o segundo tipo consiste em variações na tensão em barras próximas ao compensador. Em ambos os casos, analisa-se a atuação dos sinais estabilizadores no amortecimento do fluxo de potência ativa e sua influência no controle de tensão do compensador.

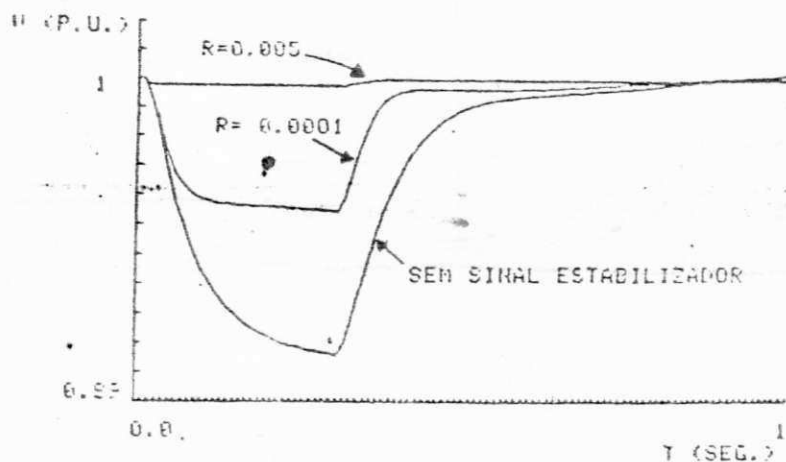
As simulações base:

A figura 4.5.2 mostra o comportamento dinâmico do fluxo de potência na linha 20 - 21 e módulo de tensão na barra 7, para pequenas perturbações na tensão de referência do compensador, para três situações distintas: 1) sem sinal adicional, 2) com sinal adicional básico equação 4.5.1, 3) com sinal adicional dado pela equação 4.4.3.3. Os sinais realimentam uma só saída ( $P_1$ ) através de ganhos constantes.

Os resultados destas simulações confirmam a eficiência da teoria de controle ótimo com índice de desempenho quadrático na estabilização do fluxo de potência ativa na linha, sem prejudicar o controle de tensão no barramento de interligação compensador / sistema C.A. As simulações também mostram a influência benéfica no amortecimento de variáveis que não foram beneficiadas pelo projeto linear dos controladores.



a - Fluxo de potência na linha 21 - 20



b - Módulo da tensão na barra 7

Figura 4.5.2 : Resultados de simulações no modelo não linear - mostra o comportamento de grandezas ligadas à barra do compensador, antes e após a implementação de sinais adicionais

As simulações do segundo tipo :

No intuito de se dar mais consistência à técnica de projeto empregada neste trabalho, simula-se perturbações nas tensões em barras próximas ao compensador e verifica-se a influência do sinal no amortecimento do fluxo de potência

ativa e tensão na barra do compensador.

Além de se verificar a atuação dos sinais projetados anteriormente, também se verifica a atuação de novos sinais, cujo projeto segue a mesma sistemática de projeto do sinal base e fundamenta-se na variação dos elementos das matrizes Q e R.

Os resultados são apresentados na forma de tabelas que mostram os valores extremos atingidos pela potência na linha 21 - 20 e tensão na barra 7, para pequenas perturbações, durante 0.3 segundos nas tensões em barras próximas ao compensador, ao longo de um segundo. E ainda, na finalidade de saber sobre a dinâmica das variáveis em jogo, faz-se comentários sobre o comportamento destas variáveis durante e após os distúrbios.

As simulações :

Simulação 1 - a tabela 1 mostra o comportamento dinâmico do fluxo de potência na linha 21 - 20 e tensão na barra 7, sem sinais adicionais, para pequenas perturbações na barra 20 e 7.

Simulação 2 - a tabela 2 mostra o comportamento dinâmico do fluxo de potência na linha 21 - 20 e tensão na barra 7, com sinais estabilizadores sub-ótimos realimentando uma só saída, no caso o desvio do fluxo de potência. Simula-se pequenas perturbações nas tensões das barras 20 e 7

durante 0.3 segundos.

Simulação 3 - a tabela 4 mostra a atuação dos sinais adicionais sub-ótimos, derivados do fluxo de potência na linha e desvios do módulo da tensão na barra 7, para pequenas perturbações na barra 20 e 7, durante 0.3 segundos. Neste projeto, ora dá-se maior ênfase ao amortecimento do fluxo de potência ativa, ora ao desvio de tensão na barra 7, através da escolha dos elementos da matriz peso diagonal  $Q$  e variando - se o esforço  $R$ .

Investigando-se o comportamento dinâmico do fluxo de potência na linha 21 - 20 nas simulações 3, 2, 1, verifica-se que os sinais projetados para realimentar só uma saída fisicamente realizável ( $P_1$ ), tabela 2, trouxeram mais amortecimento para esta variável em prejuízo ao controle de tensão realizado pelo compensador (fato confirmado quando confronta-se as tabelas 1 e 3). A fim de contornar este problema, projetou-se sinais adicionais que levam em consideração o amortecimento do desvio do módulo da tensão na barra 7 (simulação 3). Os resultados da simulação 3 mostram que o compromisso assumido na melhoria do controle de tensão pelos controladores prejudicam, de certa forma, o amortecimento do fluxo de potência. Estas simulações frisam o cuidado que se deve ter em projetar sinais adicionais tendo em vista não prejudicar o controle de tensão efetuado pelo compensador estático (MILLER, 1983).



A respeito da ordem de grandeza dos ganhos para sinais estabilizadores, estes devem ser escolhidos a fim de se evitar que o sistema de controle do compensador atinja suas não linearidades prejudicando o amortecimento das variáveis em questão e levando a não existência de uma equivalência entre os modelos linear e não linear do sistema de potência, na implementação destes sinais.

Após a pequena perturbação (simulações 3 e 4), as grandezas apresentam menor tempo de acomodação e maior estabilidade em torno do ponto de operação do que quando não se implementa estes sinais.

Durante estas simulações não implementou-se filtros passa baixa ou/e passa alta junto ao sinal estabilizador, normalmente empregado em implementações de campo, no intuito de minimizar prejuízos provocados por ruídos. Como também não incluiu-se o efeito de limitadores, a fim de evitar que sinais estabilizadores venham prejudicar o controle de tensão do C.E.R. durante grandes perturbações.

Tabela 4.5.1 : Mostra o comportamento dinâmico do fluxo de potência ativa na linha 21 - 20 e tensão na barra 7, para pequenas perturbações nas tensões das barras 20 e 7.

Barra	Variação de tensão	Tensão - 7 (p.u.)	Potência (p.u.)
20	3%	0.99	1.03
20	5%	0.99	1.05
20	10%	0.99	1.09
7	3%	0.97	1.04
7	5%	0.95	1.06
7	10%	0.90	1.12

Tabela 4.5.2 : Mostra o comportamento do fluxo de potência ativa na linha 21 - 20 e módulo da tensão na barra 7, para pequenas perturbações na barra 20 e 7 durante 0.3 segundos.

Barra	Variação de	ganho $k_1$	amortc. $\eta_{22}$	Tensão -7 (p.u.)	poten. (p.u.)
20	3%	-1.08	0.1	0.98	1.02
20	5%	-1.08	0.1	0.98	1.04
20	10%	-1.08	0.1	0.96	1.08
7	3%	-1.08	0.1	0.97	1.02
7	5%	-1.08	0.1	0.95	1.03
7	10%	-1.08	0.1	0.90	1.06
20	3%	-21.1	0.1	0.98	1.00
20	5%	-21.1	0.1	0.96	1.00

Continuação da Tabela 4.5.2.

Barra	Variação de	ganho $k_1$	amortc. $q_{22}$	Tensão -7 (p.u.)	poten. (p.u.)
20	10%	-21.1	0.1	0.93	1.01
7	3%	-21.1	0.1	0.98	1.00
7	5%	-21.1	0.1	0.96	1.01
7	10%	-21.1	0.1	0.93	1.01
7	3%	-95.3	0.1	0.97	1.00
7	5%	-95.3	0.1	0.95	1.00
7	10%	-95.3	0.1	0.90	1.00
20	3%	-95.3	0.1	0.98	1.00
20	5%	-95.3	0.1	0.96	1.00
20	10%	-95.3	0.1	0.92	0.99

Tabela 4.5.3 : Mostra atuação dos sinais estabilizado-  
res sub-ótimos, derivados do fluxo de  
potência ativa na linha e desvios do  
módulo de tensão na barra 7, para  
pequenas perturbações nas barras 20 e 7  
durante 0.3 segundos.

Convenção - variação de tensão : \* 3%  
\*\* 5%  
\*\*\* 10%

barra : + 20  
- 7

Ganho de Sinal		Amortecimento		tensão-7	Potência
$k_1$ (pot.)	$k_2$ (ten-7)	$\eta_{2,2}$	$\eta_{6,6}$	(p.u.)	(p.u.)
+*					
-20.43	15.57	1.0	0.1	0.99	1.01
+**					
-20.43	15.57	1.0	0.1	0.98	1.02
+***					
-20.43	15.57	1.0	0.1	0.96	1.04
+*					
-12.72	28.05	0.5	1.0	0.99	1.00
+**					
-12.72	28.05	0.5	1.0	0.99	1.03

Ganho do Sinal		Amortecimento		tensão-7	Potência
$k_1$ (pot.)	$k_2$ (ten-7)	$\eta_{2,2}$	$\eta_{6,6}$	(p.u.)	(p.u.)
+***					
-12.72	28.05	0.5	1.0	0.97	1.06
-*					
-20.43	15.57	1.0	0.1	0.98	1.02
-**					
-20.43	15.57	1.0	0.1	0.97	1.03
+***					
-20.43	15.57	1.0	0.1	0.94	1.05
-*					
-12.72	28.05	0.5	1.0	0.99	1.03
-**					
-12.72	28.05	0.5	1.0	0.99	1.05
-***					
-12.72	28.05	0.5	1.0	0.99	1.10
+*					
-105.3	28.42	1.0	0.1	0.98	1.01
+**					
-105.3	28.42	1.0	0.1	0.97	1.01
+***					
-105.3	28.42	1.0	0.1	0.94	1.02
+*					
-50.10	102.2	0.5	1.0	0.99	1.02

Continuação : Tabela 4.5.3.

Ganho do Sinal		Amortecimento		tensão-7	Potência
$k_1$ (pot.)	$k_2$ (ten-7)	$\eta_{2,2}$	$\eta_{6,6}$	(p.u.)	(p.u.)
+**					
-50.10	102.2	0.5	1.0	0.99	1.03
+***					
-50.10	102.2	0.5	1.0	0.97	1.06
-*					
-105.3	28.42	1.0	0.1	0.98	1.01
-**					
-105.3	28.42	1.0	0.1	0.96	1.02
-***					
-105.3	28.42	1.0	0.1	0.92	1.03
-*					
-50.10	102.2	0.5	1.0	0.99	1.02
-**					
-50.10	102.2	0.5	1.0	0.99	1.04
-***					
-50.10	102.2	0.5	1.0	0.96	1.10

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

Esta pesquisa apresentou um projeto de sinais estabilizadores para compensadores estáticos, através do sistema de regulação de tensão, no intuito de amortecer oscilações do fluxo de potência ativa no sistema de transmissão, empregando-se técnicas de controle moderno na determinação dos ganhos dos sinais adicionais.

Antes de fazer uso das técnicas de controle escolhidas, deu-se um tratamento adequado ao sistema elétrico de potência e compensador estático, onde obteve-se modelagens em torno do ponto de operação na forma de variáveis de estado contínuas.

Algumas vantagens da técnica utilizada foram : 1 ) a facilidade de selecionar funções de custo de maneira a amortecer a potência ativa e reduzir o esforço do sistema de controle através de manipulações com as matrizes  $Q$  e  $R$ , 2 ) facilidade de implementação das rotinas



computacionais, 3 ) grande quantidade de algoritmos que levam à solução do problema do regulador linear.

A identificação dos parâmetros, utilizando o método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado, para variáveis do sistema C.A. que não fazem parte das modelagens lineares do sistema de potência e compensador constitui uma grande vantagem para o projeto, pois estas variáveis são incorporadas à modelagem linearizada do sistema de 500 Kv para fins de projeto, sem precisar deduzir outra modelagem para o sistema C.A. e / ou compensador. Para evitar nova dedução é necessário modificar apenas o vetor saída do modelo interligado. Demonstra - se assim a flexibilidade da técnica de realimentação ótima de estados e do modelo equivalente dinâmico.

A fim de se obter sinais estabilizadores possíveis de implementações em sistemas realísticos a partir da técnica empregada neste trabalho, fez - se o cancelamento dos ganhos correspondentes às variáveis fisicamente não realizáveis ( com significado só matemático ) nas leis do controle ótimo. Estes sinais, chamados sinais adicionais sub - ótimos, mostraram - se eficientes no amortecimento da potência ativa para perturbações em barras próximas ao compensador, porque as interações dinâmicas do sistema de 500 Kv foram consideradas no seu projeto.

As simulações nos modelos linear e não linear

mostram o sucesso no emprego da técnica de controle ótimo, com índice de desempenho quadrático no projeto de sinais estabilizadores que visam o amortecimento de grandezas relacionadas à malha de controle P-f por dispositivos que atuam fortemente na malha de controle Q-V, no caso, o compensador estático.

Pode-se afirmar que o projeto de sinais estabilizadores visando o amortecimento da potência ativa de transmissão funcionou efetivamente para pequenas perturbações na tensão de referência do compensador, que ocasionaram oscilações nesta variável, e o sinal contribuiu enormemente para o amortecimento das tensões em barras próximas ao compensador e melhoria da estabilidade dinâmica como um todo.

No intuito de se evitar prejuízos no controle de tensão realizado pelo compensador, deve-se observar o compromisso existente entre o amortecimento da potência ativa e o controle de tensão do C.E.R. A implementação de um sinal derivado do desvio do módulo da tensão na barra de interligação minimiza este prejuízo, levando um pouco do amortecimento da potência. De qualquer forma, o sinal trouxe benefícios ao amortecimento desta variável.

Querendo-se evitar prejuízos provocados no sistema de regulação do compensador, sugere-se um controle adaptativo de forma a evitar que o sinal não atue para perturba-

ções que não sejam semelhantes à de projeto e volte a atuar logo após que o distúrbio venha a cessar, pois o sinal estabilizador contribui para amortecer flutuações após pequenas perturbações.

Como conclusão final, observa-se que a técnica de estabilização cumpriu eficientemente seu papel no projeto, apesar das dificuldades encontradas. Sua eficiência foi confirmada por exaustivas análises nas modelagens linear e não linear do sistema de 500 Kv.

A seguir, apresenta-se de forma sucinta as etapas básicas do projeto :

1. Cálculo de um modelo linearizado para o compensador estático.
2. Cálculo de um modelo equivalente dinâmico linearizado para o sistema de potência.
3. Computação de um modelo linear interligado C.E.R / Equivalente Dinâmico.
4. Identificação de parâmetros que compõem as matrizes de medições para a potência e/ou ângulo de tensão na barra, e/ou desvio do módulo da tensão em função dos estados do modelo linear interligado.
5. Projeto de sinais adicionais derivados da potência e / ou variáveis ligadas à barra de interligação baseado em realimentação ótima de estados.
6. Análise do comportamento dinâmico do modelo linear

interligado C.E.R. / Equivalente Dinâmico com implementação dos sinais adicionais.

7. Verificação da atuação do sinal adicional, implementado no modelo linear, no comportamento dinâmico do sistema original completo.

As grandes perturbações do tipo curto-circuito não foram simuladas, pois sempre que a tensão terminal do C.E.R. torna - se menor do que um certo valor ajustável especificado, o equipamento é praticamente levado a um ponto de operação de 0 Mvar ( RAMOS et alii, 1985 )

APÊNDICE A

MODELO EQUIVALENTE DINÂMICO DO SISTEMA  
DE POTÊNCIA TESTE.

## APÊNDICE A

Este apêndice trata sobre uma teoria para determinação de modelos equivalentes dinâmicos para sistemas de potência e uma aplicação prática no sistema de 500 Kv oeste da CHESF.

### a.1 - O Modelo Equivalente Dinâmico.

A forma final do modelo equivalente dinâmico será na forma de variáveis de estado contínuas e linearizadas em torno do ponto de operação :

$$\dot{X}_e = A_e X_e + B_e V \quad ( a.1.1 )$$

$$I = C_e X_e + D_e V \quad ( a.1.2 )$$

onde,

$$V = \begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix} \text{ vetor de entradas } I = \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \text{ vetor de saídas}$$

temos que,

$$V_D = V_D - V_{D0}$$

$$V_Q = V_Q - V_{Q0}$$

e

$$I_D = I_D - I_{D0}$$

$$I_Q = I_Q - I_{Q0}$$

O subíndice 0 corresponde ao ponto de operação inicial do sistema.

A determinação do modelo é iniciada quando identificamos quatro funções de transferência discretas no ponto de interligação, onde deseja-se representar parte de um sistema de potência. Então, as entradas e saídas destas funções são :

$$\frac{I_D}{V_D} \quad \frac{I_Q}{V_D} \quad \frac{I_D}{V_Q} \quad \frac{I_Q}{V_Q}$$

As funções identificadas na forma do operador retardo :

$$\frac{Y(Z)}{U(Z)} = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_{n-1} Z^{-(n-1)} + b_n Z^{-n}}{1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_{n-1} Z^{-(n-1)} + a_n Z^{-n}} \quad (\text{a.1.3})$$

Os parâmetros das funções de transferência são estimados usando a formulação recursiva de Kalman, onde as medidas são processadas uma de cada vez. O processo recursivo é descrito abaixo :

$$K = P_k U_{k+1}^T (q_{k+1} + U_{k+1} P_k U_{k+1}^T)^{-1} \quad (\text{a.1.4})$$

$$a_{k+1}^* = a_k^* + K (Y_{k+1} - U_{k+1} a_k^*) \quad (\text{a.1.5})$$

$$P_{k+1} = (I - K U_{k+1}) P_k \quad (\text{a.1.6})$$

A função de transferência no domínio do tempo,

$$Y_k + a_1 Y_{k-1} + \dots + a_n Y_{k-n} = b_0 U_k + b_1 U_{k-1} + \dots + b_n U_{k-n} \quad (\text{a.1.7})$$

$$Y_k = [ Y_{k-1}, \dots, Y_{k-n}, U_k, \dots, U_{k-n} ] \begin{bmatrix} -a_1 \\ \vdots \\ -a_n \\ \vdots \\ b_0 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (\text{a.1.8})$$



ou

$Y = U a$ , onde  $Y$  - vetor medição de saída;

$u$  - vetor de medição de entrada.

O estimador  $\hat{a}^*$ ,

$$\hat{a}^* = (U^T U)^{-1} U^T Y \quad (a.1.9)$$

Introduz-se no sistema o ruído existente nas medições. O diagrama de blocos abaixo ilustra a função de transferência com ruído.

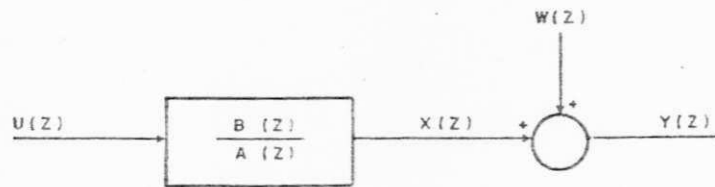


Figura a.1.1 : Diagrama de blocos da função de transferência corrente / tensão com ruído.

A função de transferência obtida a partir do diagrama de blocos acima :

$$Y(Z) = X(Z) + W(Z) \quad (a.1.10)$$

onde,

$$X(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)}$$

ainda,

$$Y(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)} + W(Z) \quad (\text{a.1.11})$$

ou

$$A(Z)Y(Z) = B(Z)U(Z) + A(Z)W(Z) \quad (\text{a.1.12})$$

no domínio do tempo

$$Y_k = [Y_{k-1}, \dots, Y_{k-n}, U_k, \dots, U_{k-n}]^{-a_1} + W_k + a_1 W_k + \dots + a_n W_{k-n} \quad (\text{a.1.13})$$

A nova medição de saída depende do ruído nos instantes anteriores, o estimador deve ser **unbiased**. Para tanto, usa-se um artifício matemático: multiplicamos o vetor medição de saída  $Y$  por  $1/A(Z)$ .

$$A(Z)\bar{Y}(Z) + B(Z)\bar{U}(Z) + W(Z) \quad (\text{a.1.14})$$

onde,

$$\bar{Y}(Z) = \frac{1}{A(Z)} Y(Z)$$

$$\bar{U}(Z) = \frac{1}{A(Z)} U(Z)$$

no domínio do tempo,

$$Y_k = [ Y_{k-1}, \dots, Y_{k-n}, U_k, \dots, U_{k-n} ] \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_1 \\ \vdots \\ -a_n \\ -b_0 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} + W_k \quad ( a.1.15 )$$

O cálculo do estimador unbiased é um processo iterativo. Inicialmente estima-se  $a = (a_1, \dots, -a_n, b_0, \dots, b_n)^T$  utilizando o estimador de Markov na forma recursiva de Kalman.

Temos que,

$$A(Z) = 1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_n Z^{-n} \quad ( a.1.16 )$$

então,

$$\bar{Y}_k = Y_k - a_1 Y_{k-1} - \dots - a_n Y_{k-n} \quad ( a.1.17 )$$

$$\bar{U}_k = U_k - U_{k-n} - \dots - a_n U_{k-n} \quad ( a.1.18 )$$

Efetuados os cálculos de  $Y$  e  $U$ , o vetor de parâmetros  $a$  é estimado até satisfazer o critério de convergência. A esta modificação chamamos de método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado.

Passos necessários para estimação dos parâmetros :

1. Inicialização do processo recursivo :

- vetor inicial dos parâmetros :

$$a = ( 1, 1, 1, \dots, 1 )^T$$

- matriz variância :  $\text{diag} ( 10^5, \dots, 10^5 )^T$

-  $q = 1$

- a componente  $b_0$  é retirada no cálculo da

estimativa dos parâmetros com a finalidade de facilitar o processo de sua estimação. Esta componente representa o regime permanente antes da falta no ponto de interligação; após a identificação dos parâmetros, a componente é acrescentada ao modelo equivalente dinâmico na forma de variáveis de estado.

2. Dados das medições;

3. Estimação dos parâmetros a partir dos dados das medições.

4. Cálculo dos vetores de medição na forma unbiased  $\bar{Y}$  e  $\bar{U}$ ;

5. Critério de convergência :

- se o vetor da medição da saída satisfaz um certo critério de convergência, paramos o processo.

- se o critério de convergência não é satisfeito, recalculamos  $\bar{Y}$  e  $\bar{U}$  e estimamos um novo vetor de parâmetros.

Os parâmetros das quatro funções de transferência identificadas de terceira ordem nos permite construir quatro modelos de terceira ordem discretos na forma de variáveis de estado.

A equação abaixo representa o sistema identificado. Supõe-se que os parâmetros foram estimados utilizando o método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado.

$$Y_{k+n} + a_1 Y_{k+n-1} + a_n Y_k = b_0 U_{k+n} + b_1 U_{k+n-1} + \dots + b_n U_k \quad (a.1.19)$$

A função de transferência na forma de variáveis de estado,

$$\begin{bmatrix} X_1(k+1) \\ X_2(k+1) \\ \vdots \\ X_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ \vdots \\ X_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} U_k \quad (a.1.20)$$

$$Y_k = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ \vdots \\ X_n(k) \end{bmatrix} + h_0 U_k \quad (a.1.21)$$

onde,

$$\begin{aligned} h_0 &= b_0 \\ h_1 &= b_1 - a_1 h_0 \\ &\vdots \\ h_n &= b_n h_{n-1} - \dots - a_n h_0 \end{aligned}$$

A transformação do sistema dinâmico discreto em contínuo na forma de variáveis de estado processa-se da seguinte forma :

O modelo equivalente discreto

$$X_{k+1} = \emptyset X_k + U_k \quad ( a.1.22 )$$

$$Y_k = C X_k + D U_k \quad ( a.1.23 )$$

onde,

$$\emptyset = \exp ( AT ) \quad e \quad \bar{I} = A^{-1} ( \emptyset - I ) B$$

Inicialmente diagonalizamos o sistema discreto através de manipulações com a matriz modal  $M$ , formada dos autovalores da matriz  $\emptyset$ . Determina-se uma equivalência entre a representação discreta e contínua na forma de variáveis de estado.

Utilizando a matriz modal  $M$ , temos :

$$X_k = M V_k \quad ( a.1.24 )$$

$$V_{k+1} = M^{-1} \emptyset M + M^{-1} \bar{I} U_k \quad ( a.1.25 )$$

$$Y_k = C M V_k = \emptyset V_k + \bar{I} U_k \quad ( a.1.26 )$$

ou,

$$V_{k+1} = \emptyset V_k + \bar{I} U_k \quad ( a.1.27 )$$

$$Y_k = C V_k + D U_k \quad ( a.1.28 )$$

Logo,

$$\theta = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix}$$

onde,  $z_1, z_2, \dots, z_n$  são os autovalores do sistema discreto.

A relação entre o sistema discreto e contínuo é estabelecida através da comparação entre os autovalores dos dois sistemas.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{s_1 T} \\ e^{s_2 T} \\ \dots \\ e^{s_n T} \end{bmatrix}$$

Determinamos os autovalores do sistema contínuo, obtendo - se a matriz A diagonalizada,

$$z_i = e^{s_i T} = e^{(T) + j \omega_i T} = e^{T \lambda_i} \quad (a.1.29)$$

onde,

$$|z_i| = e^{s_i T} \implies T_i = \frac{1}{T} \ln |z_i| \quad (a.1.29.a)$$

$$\frac{1}{Z_1} = w_1 T \quad \Rightarrow \quad w_1 = \frac{1}{T} \frac{1}{Z_1} \quad (\text{a.1.29.d})$$

A matriz  $\bar{A}$  é formada com  $S = T + J w_1$ , então :

$$\dot{V} = \bar{A} V + \bar{B} u \quad (\text{a.1.30})$$

$$Y = \bar{C} V + D u \quad (\text{a.1.31})$$

O modelo contínuo na forma de variáveis de estado em torno do ponto de operação inicial :

$$X = M V \quad \text{ou} \quad V = M^{-1} X \quad (\text{a.1.32})$$

$$M^{-1} \dot{X} = \bar{A} M^{-1} X + \bar{B} u \quad (\text{a.1.33})$$

$$Y = \bar{C} M^{-1} X + D u \quad (\text{a.1.34})$$

temos ainda,

$$\dot{X} = M \bar{A} M^{-1} X + M^{-1} \bar{B} u \quad (\text{a.1.35})$$

$$Y = \bar{C} M^{-1} X + D u \quad (\text{a.1.36})$$

a forma final :

$$\dot{X} = A X + B u \quad (\text{a.1.37})$$

$$Y = C X + D u \quad (\text{a.1.38})$$

onde,



$$A = M \bar{A} M^{-1}$$

$$B = M \bar{B}$$

$$C = \bar{C} M^{-1}$$

Passos para determinação do modelo equivalente dinâmico na forma de variáveis de estado :

1. Determinação da matriz modal - autovalores da matriz  $\theta$  do sistema discreto:

2. Diagonalização do sistema discreto, obtemos  $\theta = e^{AT}$

3. Formação da matriz A considerando um intervalo de tempo T:

4. Determinação do sistema contínuo modal, matrizes  $\bar{B}$  e  $\bar{C}$ :

5. Modelo equivalente dinâmico, na forma de variáveis de estado contínuas no ponto inicial, é obtido a partir da transformação  $V = M^{-1}$ . Referências podem ser encontradas em MOTA (1981).

#### a.2 Aplicação do Modelo Equivalente Dinâmico linear no sistema de potência de 500 Kv oeste da CHESF.

O sistema representado pelo diagrama unifilar da figura 2.3.1 é utilizado para o levantamento do seu modelo equivalente dinâmico na barra 7. O modelo equivalente dinâmico utilizado neste trabalho foi também empregado por

Os dados necessários a determinação dos parâmetros das funções de transferência são obtidos a partir de simulações no modelo não linear do sistema de potência. O C.E.R. é simulado como uma barra infinita, isto é, reatância pequena e constante de inércia muito grande, com a finalidade de se evitar que as oscilações do compensador interfiram no levantamento do modelo equivalente.

As funções de transferência identificadas separadamente pelo método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado são de terceira ordem e possuem a seguinte forma :

$$\frac{Y(Z)}{U(Z)} = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + b_3 Z^{-3}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + a_3 Z^{-3}} \quad (a.2.1)$$

temos que,

$$\frac{Y(Z)}{U(Z)} = \frac{I(Z)}{V(Z)}$$

e

$$a = [ -a_1 \quad -a_2 \quad -a_3 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3 ]^T$$

O conjunto de dados para determinação dos coeficientes das quatro funções de transferência são utilizados para representar a dinâmica do sistema na barra 7.

Os coeficientes das funções de transferência e critério para sua determinação:

a. a função de transferência  $I_D / V_D$  variação de 5% na parte real da tensão no ponto de interligação durante 0.2 segundos, com  $V_D$  constante.

$$a = [ 2.947 \quad -2.898 \quad 0.890 \quad -0.093 \quad 0.184 \quad 0.065 ]^T$$

( a.2.2 )

b. a função de transferência  $I_D / V_D$ , mesmas condições de simulação anterior.

$$a = [ 2.875 \quad -2.768 \quad 0.890 \quad -0.093 \quad 0.183 \quad -0.091 ]^T$$

( a.2.3 )

c. a função de transferência  $I_D / V_D$  variação de 5% na parte imaginária da tensão no ponto de interligação durante 0.2 segundos, com  $V_D$  constante.

$$a = [ 2.972 \quad -2.952 \quad 0.979 \quad -0.105 \quad 0.199 \quad 0.095 ]^T$$

( a.2.4 )

d. a função de transferência  $I_D / V_D$ , mesmas condições de simulação anterior.

$$a = [ 2.950 \quad -2.920 \quad 0.960 \quad 0.100 \quad -0.200 \quad 0.10 ]^T$$

( a.2.5 )

Os parâmetros dos quatro funções de transferência identificadas de terceira ordem possibilita construção de quatro modelos de terceira ordem na forma de variáveis de estado discretas. Cada modelo possui a seguinte forma literal, para o caso  $I_D / V_D$ :

$$\begin{bmatrix} X_1(k+1) \\ X_2(k+1) \\ X_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ X_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} V_D \quad (a.2.6)$$

$$I_D = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ X_3(k) \end{bmatrix} + h_0 V_D \quad (a.2.7)$$

onde,

$$\begin{aligned} h_0 &= b_0 \\ h_1 &= b_1 - a_1 h_0 \\ h_2 &= b_2 - b_1 h_1 - a_2 h_0 \\ h_3 &= b_3 - b_2 h_1 - b_1 h_2 - a_3 h_0 \end{aligned}$$

Modelos discretos em variáveis de estado montadas a partir dos coeficientes das funções identificadas:

1. a função de transferência  $I_D / V_D$

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.95 & -2.89 & 2.94 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{matrix} \theta_{e1} \\ \\ \end{matrix} + \begin{bmatrix} -0.06 \\ -0.06 \\ -0.06 \end{bmatrix} V_D$$

( a.2.8 )

$\bar{1}_1$

$$I_D = [ 1 \ 0 \ 0 ] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + [ 1.41 ] V_D \quad ( a.2.9 )$$

$C_{e1}$                        $D_{e1}$

2. a função de transferência  $I_D / V_D$ ,

$$\begin{bmatrix} x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \\ x_6(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.89 & -2.76 & 2.87 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix} +$$

$\theta_2$

( a.2.10 )

$$+ \begin{bmatrix} -0.09 \\ -0.08 \\ -0.07 \end{bmatrix} V_D$$

$\overline{I}_2$

$$I_D = [ 1 \ 0 \ 0 ] \begin{bmatrix} X_4(k) \\ X_5(k) \\ X_6(k) \end{bmatrix} + [ -8.67 ] V_D \quad ( a.2.11 )$$

$C_{e2}$

$D_{e2}$

3. a função de transferência  $I_D / V_Q$ ,

$$\begin{bmatrix} X_7(k+1) \\ X_8(k+1) \\ X_9(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.97 & -2.95 & 2.97 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_7(k) \\ X_8(k) \\ X_9(k) \end{bmatrix} +$$

( a.2.12 )

$\emptyset_{e3}$

$$+ \begin{bmatrix} -0.10 \\ -0.11 \\ -0.11 \end{bmatrix} V_Q$$

$\overline{I}_3$

$$I_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7(k) \\ x_8(k) \\ x_9(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8.41 \end{bmatrix} V_D \quad (a.2.13)$$

C<sub>e3</sub>

D<sub>e3</sub>

4. a função de transferência I<sub>Q</sub>/V<sub>Q</sub>'

$$\begin{bmatrix} x_{10}(k+1) \\ x_{11}(k+1) \\ x_{12}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.96 & -2.91 & 2.95 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{10}(k) \\ x_{11}(k) \\ x_{12}(k) \end{bmatrix} +$$

D<sub>e4</sub>

$$+ \begin{bmatrix} -0.10 \\ -0.11 \\ -0.11 \end{bmatrix} V_Q$$

( a.2.14 )

1/4

$$I_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{10}(k) \\ x_{11}(k) \\ x_{12}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.65 \end{bmatrix} V_Q \quad (a.2.15)$$

C<sub>e4</sub>

D<sub>e4</sub>

A combinação dos quatro modelos discretos de uma entrada e uma saída formam o modelo equivalente dinâmico discreto total na forma de variáveis de estado. O modelo possui a seguinte forma :

$$X(k+1) = D X_e(k) + \bar{I}_e V \quad (\text{a.2.16})$$

$$I = C_e X_e(k) + D_e V \quad (\text{a.2.17})$$

onde,

$$X_e = [ X_1(k), \dots, X_{12}(k) ]^T$$

$$I = \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad e \quad V = \begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix}$$

Matriz  $\theta$  formada de elementos bloco diagonais das  $\theta_{ei}$ , montadas a partir dos parâmetros das funções identificadas :

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 & & & \\ & \theta_2 & & \\ & & \theta_3 & \\ & & & \theta_4 \end{bmatrix}$$



A matriz  $\bar{I}_e$  formada a partir de :

$$\bar{I}_e = \begin{bmatrix} e1 & 0 \\ e2 & 0 \\ 0 & e3 \\ 0 & e4 \end{bmatrix}$$

$$C_e = \begin{bmatrix} C_{e1} & 0 & C_{e3} & 0 \\ 0 & C_{e2} & 0 & C_{e4} \end{bmatrix}$$

A matriz  $D_e$  é formada a partir das componentes de regime permanente de cada função de transferência :

$$D_e = \begin{bmatrix} h_{01} & h_{03} \\ h_{02} & h_{04} \end{bmatrix}$$

O modelo na forma de variáveis de estado contínuas obtido após manipulações com a matriz modal, conforme descrito em a.1 :

$$\dot{X}_e = A_e X_e + B_e V \quad ( a.2.18 )$$

$$I = C_e X_e + D_e V \quad ( a.2.19 )$$

A matriz  $A_e$  é formada de matrizes bloco diagonais  $A_{ei}$ . Então após os cálculos realizados por computador digital, obtem-se :

$$A_{e1} = \begin{bmatrix} -151.56 & 203.27 & -52.71 \\ -48.20 & -1.65 & 50.8 \\ 48.40 & -196.60 & 148.25 \end{bmatrix}$$

$$A_{e2} = \begin{bmatrix} -153.57 & 207.65 & -54.11 \\ -48.20 & -3.85 & 52.06 \\ 46.37 & -192.25 & 145.84 \end{bmatrix}$$

$$A_{e3} = \begin{bmatrix} -150.49 & 201.24 & -50.74 \\ -49.72 & -0.63 & 50.40 \\ 49.38 & -198.52 & 149.13 \end{bmatrix}$$

$$A_{e4} = \begin{bmatrix} -151.06 & 202.37 & -51.31 \\ -49.44 & 1.24 & 50.68 \\ 48.83 & -197.42 & 148.58 \end{bmatrix}$$

A matriz  $B_e$ , seus elementos em blocos :

$$B_{e1} = \begin{bmatrix} -6.73 \\ -6.68 \\ -6.62 \end{bmatrix}$$

$$B_{e2} = \begin{bmatrix} -9.78 \\ -8.82 \\ -7.92 \end{bmatrix}$$

$$B_{e3} = \begin{bmatrix} -10.09 \\ -10.88 \\ -11.63 \end{bmatrix}$$

$$B_{e4} = \begin{bmatrix} 10.68 \\ 11.10 \\ 11.44 \end{bmatrix}$$

As matrizes  $C_e$  e  $D_e$  são as mesmas do sistema em variáveis de estado discretas.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 832 Tel (033) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

APÊNDICE B

AJUSTE DOS PARÂMETROS E CONDIÇÕES INICIAIS DO  
COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS

## APÊNDICE B

As condições iniciais são calculadas a partir do resultado do fluxo de cargas na barra de interligação. A relação entre a tensão e a potência reativa na barra determina a admitância inicial do compensador.

Corrente líquida no C.E.R. :

$$I = Y_{\text{comp.}} V \quad (\text{ b.1 } )$$

A decomposição no eixo D e Q :

$$i_D + j i_Q = - j Y_{\text{comp.}} ( V_D + j V_Q ) \quad (\text{ b.2 } )$$

do resultado do fluxo de cargas, para a barra 7 :

$$V_7 = 1.0 \ / \ \underline{\underline{-25.6^\circ}} \ \text{p.u.} \quad (\text{ b.3.a } )$$

$$Q_7 = - 0.461 \ \text{p.u.} \quad (\text{ b.3.b } )$$

A admitância inicial :

$$Y_0 = \frac{Q_7}{VE} \quad Y_0 = -0.461 \text{ p.u.} \quad (b.4)$$

e as tensões iniciais do C.E.R. em quadratura,

$$V_{D0} = 0.90 \text{ p.u.} \quad (b.5.a)$$

$$V_{Q0} = -0.43 \text{ p.u.} \quad (b.5.b)$$

Manipulando as equações b.1 e b.2 determina-se a corrente líquida e as correntes em quadratura iniciais.

A corrente total :

$$I = -0.461 \text{ p.u.} \quad (b.6)$$

As correntes em quadratura :

$$I_{D0} = 0.199 \text{ p.u.} \quad (b.7.a)$$

$$I_{Q0} = -0.415 \text{ p.u.} \quad (b.7.b)$$

Após sua determinação as condições iniciais são substituídas nas equações 4.2.2.1 - 3, contribuindo assim na formação numérica do modelo linear do C.E.R., restando apenas a determinação dos parâmetros ajustáveis, os quais são determinados utilizando - se técnicas de otimização implementadas em computador digital ( IBM 4341 ), que visam a maximização da velocidade de resposta sem grandes

oscilações. A fim de realizar o modelo interligado e ajustar os parâmetros do compensador dá-se um chute inicial para os parâmetros ajustáveis e determina-se o ajuste ótimo dos parâmetros depois de n iterações efetuadas pela técnica de otimização via computador digital.

Parâmetros otimizados :

GKRC	GMRC	TMRC
0.0	0.47	0.0035

O modelo linear interligado C.E.R. / Equivalente Dinâmico obtido a partir das condições iniciais, b.3 - 7, do C.E.R., parâmetros do fabricante e parâmetros otimizados :

$$\dot{X} = A X + B u \quad (b.8)$$

$$Y = C X \quad (b.9)$$

onde,

$$X = ( X_{c1}, X_{c2}, X_1, X_2, \dots, X_{12} )^T$$

$$Y = X_{c2}$$

$$u = V_S$$

e

$$C = [ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ]^T$$

$$B = [ 134.3 \ 31.33 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ]^T$$

A matriz A :

MATRIZ C.E.R./EQUIV. DINAMICO

0.000000+00	-0.141950+02	0.392140+01	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00	0.138590+02	0.000000+00
0.000000+00	0.392140+01	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00	0.138590+02	0.000000+00
0.666670+02	-0.695790+02	0.914980+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00	0.323370+01	0.000000+00
0.000000+00	0.914980+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00	0.323370+01	0.000000+00
0.000000+00	0.587400+00	-0.151430+03	0.203270+03	-0.517120+02	-0.716120+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.135190+00	0.000000+00	0.000000+00	-0.716120+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.583220+00	-0.490750+02	-0.155380+01	0.508640+02	-0.711020+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.134230+00	0.000000+00	0.000000+00	-0.711020+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.578000+00	0.485350+02	-0.196660+03	0.142500+03	-0.704550+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.133030+00	0.000000+00	0.000000+00	-0.704550+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.853330+00	0.196400+00	0.000000+00	0.000000+00	-0.154610+03	0.000000+00	0.000000+00
-0.541160+02	0.196400+00	0.000000+00	0.000000+00	-0.114430+01	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.769750+00	0.177150+00	0.000000+00	0.000000+00	-0.471390+02	-0.335170+01	0.000000+00
0.520630+02	0.177150+00	0.000000+00	0.000000+00	-0.938430+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.691000+00	0.159060+00	0.000000+00	0.000000+00	0.455240+02	-0.122250+03	0.000000+00
0.145850+03	0.159060+00	0.000000+00	0.000000+00	-0.342530+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	-0.632050+00	0.110490+01	0.000000+00	0.000000+00	0.171500+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	-0.145350+03	0.201240+03	-0.507490+02	0.171500+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	-0.681930+00	0.119210+01	0.000000+00	0.000000+00	0.185030+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	-0.485300+02	-0.680800+00	0.504040+02	0.185030+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	-0.728900+00	0.127420+01	0.000000+00	0.000000+00	0.197780+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.502590+02	-0.198520+03	0.149130+03	0.177500+00	0.000000+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	0.669360+00	-0.117010+01	0.000000+00	0.000000+00	-0.181520+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	-0.117010+01	0.000000+00	0.000000+00	-0.151250+03	0.222390+03	-0.513150+02	0.000000+00
0.000000+00	0.695410+00	-0.121560+01	0.000000+00	0.000000+00	-0.188560+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	-0.121560+01	0.000000+00	0.000000+00	-0.496300+02	-0.124010+01	0.505970+02	0.000000+00
0.000000+00	0.716650+00	-0.125310+01	0.000000+00	0.000000+00	-0.194500+00	0.000000+00	0.000000+00
0.000000+00	-0.125310+01	0.000000+00	0.000000+00	0.436370+02	-0.167420+03	0.143590+03	0.000000+00



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

## BIBLIOGRAFIA

GASTRO, J. C. & MOTA, W. S., (1984). Aplicação da Teoria de Controle Moderno na Estabilização de Sistemas de Potência. 1<sup>o</sup> Congr. Latino Americano de Automática / 5<sup>o</sup> Congr. Brasileiro de Automática ----- Campina Grande, Paraíba. Minicurso, vol. único : 1-69.

BYERLY, R. T.; POZNANIAK, D. T. & TAYLOR, E.R., (1982). "Static Reactive compensation for Power Transmission Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, : 3997-4005 -----

GUTMAN, R.; KEANE, J. J.; RAHMAN, M. A. & VERAAS O Application and Operation of a Static System - American Electric Power Experience".

Part I : System Studies.

Part II : equipment Design and Instalation.

IEEE Transaction on Power Apparatus and systems,  
-----  
vol. PAS-104 : 1868-1875.

HE DAYU; HE FENGREN & LIN HAIXUE, ( 1985). " The  
Development and Application of Static VAR  
Compensation System in China". IFAC Electric  
Energy Systems, Rio de Janeiro. Vol. único : 263-  
-----  
266.

ISATIA, V.; PEREZ DE VERA, M. & SCARANO, M.,  
(1985). " On The application of Static Reactive  
Power Control Devices In Series Resistance-  
Inductance Circuits controlled by SCR". IFAC  
Electric Energy Systems, Rio de Janeiro. Vol. único  
-----  
: 267-277

JULING, W.; TYLL, H., WEINGAND M., (1979). "Effect  
of Static Compensators on the Dynamic Performance  
of A.C. Systems". Siemens AG, Erlanger, Federal  
Republic of Germany.

LEMES, M. N., (1984). "Compensadores Estáticos  
para Sistemas de Transmissão". Revista Siemens IV,  
-----  
No 2 : 30-36.

MARTINS, N., (1974). "O Efeito de Compensadores Estáticos de Reativos na Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas de Potência". 5<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande Paraíba. vol. 1 : 624-629

MILLER, T.J.E., (1982). "Reactive Power Control in Electric Systems". Willey Interscience Publication, New York, livro : 1-279

MOTA, W.S., (1981). "Optimal Control Techniques in the Design of Power Systems Stabilizers". Ph.d Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada

OOI, B.T. & BANAKAR, M.H., (1984). "Coordination of Static VAR Compensators with Long Distance Radial Transmission System for Damping Improvement". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103 : 3997-4005.

PINHEIRO, R. F., (1980). "Equipamentos Estáticos para Compensação de Reativos e Desequilíbrios em Sistemas Elétricos". Tese de Mestrado, Escola Federal de Itajubá.

RAMOS, J. P.; TAVARES, P. C. G. & LINS, L. R.,  
(1985). "Application of Static Compensators in  
Radial Power systems". IFAC Electric Energy Systems  
Rio de Janeiro, vol. único : 257-262.

SCHWEICKARDT, H. E.; ROMEGIALLI, G. & REICHERT., (1978)  
"Closed Loop Control of Static VAR Sources on EHV  
Transmission Lines", IEEE / PAS 1978, Winter  
Power Meeting, New York.

SILVA, M. da G., (1983). "Projeto de Sinais Es-  
tabilizadores em Sistemas de Potência". Tese de  
Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.

SILVEIRA, A.M., (1985). "Ajuste dos Parâmetros de  
Compensador Estático usando Técnicas de Controle  
Moderno e Otimização". Tese de Mestrado, Universi-  
dade Federal da Paraíba.

TAKESHI, O.; KIGOSHI, Y. & TAKAFUMI, M. (Tokyo  
Electric Power C.); HIROSHI, S. & SETSUROU, M.  
(Mitsubishi Electric Corp., Tokyo, Japan), (1985)  
"Effective Application of Static VAR to Damp  
Oscillations". IEEE Transaction on Power Apparatus  
and Systems, vol. PAS-106 : 1405-1410

YU, Y.N.; VONGSURIYA K. & WEDMAN, L.N., (1970).  
Application of an Optimal Control Theory to a  
Power System". IEEE Transactions on Power  
Apparatus". Vol. PAS-89 : 55-62.  
-----

YU, Y.N, (1983). Electric Power Dynamics. Academic  
Press, Inc. New York, N.Y. Livro, vol. único :  
-----  
1-255.