

DESEMPENHO DINÂMICO DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM
COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVO

Daniele de Vasconcelos Pereira da Motta

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D. Sc.

Prof. Paulo Gomes, D. Sc.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2005

MOTTA, DANIELE DE VASCONCELOS
PEREIRA DA

Desempenho Dinâmico de Sistemas
Elétricos com Compensadores Estáticos de
Reativo [Rio de Janeiro] 2005

XIV, 167p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Compensador Estático de Reativo, 2.
Estabilidade para pequenos desvios, 3. Análise
Modal, 4. Sistemas Lineares.

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

A TODA MINHA FAMÍLIA.

MUITO OBRIGADA,

DANIELE

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, em especial aos meus pais pelo incentivo e esforço para que eu recebesse sempre a melhor educação possível, e ao meu esposo pela compreensão, pela paciência e pelo apoio.

Ao professor Sebastião E. M. de Oliveira, orientador desta tese, pelo auxílio, pelos conhecimentos a mim transmitidos, pela disponibilidade quando solicitado, não apenas durante o período de elaboração deste trabalho, mas em todas as disciplinas que tive o privilégio de cursar, ministradas por ele nos cursos de graduação e de mestrado.

Ao ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico por ter investido em meu desenvolvimento profissional, permitindo que eu realizasse este curso de Mestrado.

Aos amigos que se colocaram à disposição para me ajudar no que fosse possível.

A Deus, que está sempre ao meu lado, e me concedeu a benção de chegar até aqui.

MUITO OBRIGADA

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESEMPENHO DINÂMICO DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM
COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVO

Daniele de Vasconcelos Pereira da Motta

Abril/2005

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta a modelagem de elementos de sistema de potência (gerador síncrono, sistema de excitação, compensador estático de reativo (CER), sinal adicional estabilizador e sistema de transmissão) para realização de estudos de estabilidade a pequenos desvios, com enfoque no desempenho do CER e sua contribuição para o sistema ao qual está conectado. Esta análise foi baseada na metodologia de cálculo de autovalores da matriz de estado do sistema global obtida a partir da linearização das equações de desempenho dinâmico dos elementos de sistema de potência mencionados.

Com o objetivo de apresentar resultados quantitativos para análise do desempenho dinâmico do sistema global sob pequenos desvios, foram desenvolvidas rotinas computacionais para definição das condições de regime permanente através da solução do fluxo de potência com representação do CER, para montagem da matriz de estado do sistema global e para o cálculo de autovalores.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DYNAMIC BEHAVIOR OF ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH STATIC
VOLTAGE COMPENSATOR

Daniele de Vasconcelos Pereira da Motta

April/2005

Advisor: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Department: Electrical Engineering

This work presents the modeling of power systems elements (synchronous generator, excitation system, static var compensator (SVC), additional stabilizer signal and transmission system) for carrying out of stability studies at small deviations, with emphasis in SVC's behavior and its contribution to the system where it is connected. The analysis was based on the methodology of calculation of state matrix eigenvalues for the global system, obtained from linearization of the equations that describe the dynamic behavior of the mentioned elements of power system.

With the objective of presenting quantitative results for the analysis of the global system dynamic behavior under small deviations, computational routines were developed for defining steady state conditions obtained from the power flow solution with a SVC, for the construction of the global system state matrix and for calculation of eigenvalues.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1-	Histórico.....	1
1.2-	Objetivo	18
1.3-	Estrutura da Tese	19
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE COMPENSADORES	
	ESTÁTICOS DE REATIVO	22
2.1-	Definições Básicas	22
2.1.1-	Compensador Estático de Reativo (CER).....	22
2.1.2-	Gerador e/ou Receptor Estático de Reativo.....	22
2.1.3-	Sistema Estático de Reativo (SER).....	22
2.1.4-	Sistema de Compensação de Reativo	22
2.2-	Objetivos da Utilização de CERs.....	22
2.3-	Interação SER x Sistema Elétrico	23
2.4-	Principais Tipos de CERs	27
2.4.1-	Capacitores fixos.....	27
2.4.2-	Reatores fixos	27
2.4.3-	Compensadores com Chaveamento mecânico [29].....	27
2.4.4-	Capacitores Chaveados por Tiristores (CCT).....	28
2.4.5-	Reatores Controlados a Tiristores (RCT)	32
2.4.6-	Transformador Controlado a Tiristor (TCT)	38
2.4.7-	RCT com capacitores em paralelo (fixos e chaveados).....	39
2.4.8-	Reator Saturado.....	42
2.5-	Modelagem de Compensadores Estáticos de Reativo para Estudos de	

Sistemas de Potência [10].....	46
2.5.1- Modelos para Estudos de Fluxo de Potência	47
2.5.2- Modelos básicos não-lineares para Simulação Dinâmica.....	49
2.5.3- Modelos Dinâmicos para outras Funções	55
2.5.4- Modelos para Programas de Pequenas Perturbações.....	59
3 INFLUÊNCIA DO SUPORTE DE TENSÃO SOBRE A	
ESTABILIDADE DO SISTEMA.....	60
3.1- Conceitos de Estabilidade	60
3.1.1- Estabilidade Transitória	60
3.1.2- Estabilidade de Regime Permanente (ou Estabilidade a Pequenos Sinais ou Desvios).....	60
3.2- Influência do Suporte de Tensão sobre a Estabilidade Transitória [33] 61	
3.3- Influência do Suporte de Tensão sobre a Estabilidade de Regime Permanente.....	67
4 ESTABILIDADE SOB PEQUENOS DESVIOS.....	71
4.1- Matriz de Estado.....	71
4.2- Autovalores.....	73
4.3- Autovetores.....	73
4.4- Equivalência de Equações Dinâmicas	74
4.5- Resíduo da Função de Transferência.....	75
4.6- Observabilidade	76
4.7- Controlabilidade	77
4.8- Solução das Equações de Estado	78
4.9- Modos de Oscilação Eletromecânicos	79

4.9.1- Modo Local ou Modo Máquina-Sistema	79
4.9.2- Modo Inter-áera	79
4.9.3- Modos dos Controles	79
4.9.4- Modos Torsionais	80
5	MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS PARA ESTUDOS DE
ESTABILIDADE	81
5.1- Representação de Geradores Síncronos	81
5.1.1- Equações de Eixo em Quadratura	82
5.1.2- Equação de Eixo Direto	84
5.1.3- Equações mecânicas dos geradores síncronos	87
5.2- Modelagem do Sistema de Excitação ou Regulador Automático de	
Tensão (RAT)	89
5.3- Modelagem do Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) ou Sinal	
Adicional Estabilizador (SAE)	91
5.4- Modelagem do Compensador Estático de Reativo (CER)	93
5.5- Modelagem do Sinal de Modulação ou Sinal Adicional Estabilizador do	
Compensador Estático de Reativo (CER)	97
5.6- Representação do Sistema Elétrico de Potência	99
5.7- Montagem das Submatrizes do Sistema Global	100
6	ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DO SISTEMA
	106
6.1- Determinação dos Autovalores	108
6.1.1- Procedimento Computacional	109
6.1.2- Cenários Analisados	110
6.1.3- Resultados e Análises	111
7	CONCLUSÕES
	130

ANEXO 1	133
ANEXO 2	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164

LISTA DE SÍMBOLOS

A	matriz de estado
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
CCT	Capacitor Chaveado a Tiristor
CER	Compensador Estático de Reativo
D	constante de amortecimento do gerador
Δ	simbologia para indicação de desvio na variável
δ	ângulo de carga do gerador
ESP	estabilizador de sistema de potência
E'	tensão atrás da reatância transitória de eixo direto X'_d
E_o	tensão atrás da reatância síncrona de eixo “q” X_q
E'_d	componente de eixo direto da tensão E'
E''	tensão atrás da reatância subtransitória X''_d
E''_d	componente de eixo direto da tensão E''
E_{fd}	tensão de campo do gerador
E'_q	componente de eixo de quadratura da tensão E'
E''_q	componente de eixo de quadratura da tensão E''
H	constante de inércia do rotor do gerador
I	corrente de estator do gerador
I_{CER}	corrente no CER
I_d	componente de eixo direto da corrente I
I_g	corrente nos terminais do gerador
I_{inf}	corrente na transmissão CA, na barra infinita
I_q	componente de eixo de quadratura da corrente I
K	ganho da função de transferência do RAT
K_w	ganho do bloco “washout” da função de transferência do SAE ou do sinal de modulação do CER

M	$M = 2H$
o	subscrito indicativo de valor de regime permanente
P_e	potência elétrica
P	potência elétrica produzida pelo gerador
P_m	potência mecânica fornecida pela turbina ao gerador
Π	matriz de autovetores
Q_g	potência reativa produzida pelo gerador
RAT	Regulador Automático de Tensão
RCT	Reator Controlado a Tiristor
SAE	Sinal Adicional Estabilizador
SAT	efeito da saturação em pu
SER	Sistema Estático de Reativo
σ_i	amortecimento do i -ésimo autovalor
T	constante de tempo do amplificador do RAT
\bar{T}	matriz de transformação $DQ \Rightarrow dq$
\bar{T}^{-1}	matriz de transformação $dq \Rightarrow DQ$
T_1, T_2	constantes de tempo do bloco avanço-atraso do RAT
TCT	Transformador Controlado a Tiristor
T'_{do}	constante de tempo transitória de eixo direto da armadura a circuito aberto
T''_{do}	constante de tempo sub-transitória de eixo direto da armadura a circuito aberto
T'_{qo}	constante de tempo transitória de eixo q da armadura a circuito aberto
T''_{qo}	constante de tempo subtransitória de eixo q da armadura a circuito aberto
T_w	constante de tempo do bloco “washout” da função de transferência do SAE
$T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}$	constantes de tempo dos blocos avanço-atraso do SAE ou do sinal de modulação do CER

T_{w5}, T_{wr}	constantes de tempo dos blocos “lagnl” do sinal de modulação do CER
u	vetor de variáveis de entrada
Λ	matriz de autovalores
Λ_i	i-ésimo autovalor
V	Tensão
V_f	tensão aplicada ao enrolamento de campo do gerador
V_{inf}	tensão na barra infinita
V_0	tensão para o qual o CER não gera reativo
V_{ref}	sinal de referência de controle de tensão do gerador
V'_{ref}	sinal de referência de controle de tensão do CER
V_{sac}	sinal adicional gerado pelo SAE do CER
V_{sad}	sinal adicional gerado pelo SAE do gerador
V_t	tensão na barra terminal
V_{td}	componente de eixo direto da tensão terminal do gerador
V_{tD}	componente real da tensão terminal do gerador
\bar{V}_{tdq}	vetor de componentes “d” e “q” da tensão terminal
\bar{V}_{tDQ}	vetor de componentes “D” e “Q” da tensão terminal
V_{tq}	componente de eixo “q” da tensão terminal do gerador
V_{tQ}	componente imaginária da tensão terminal do gerador
ω_i	freqüência do i-ésimo autovalor em rd/s
ω_r	velocidade de rotor do gerador
ω'_r	velocidade do rotor do gerador em pu
ω_s	velocidade síncrona
x	vetor de variáveis de estado
x_1, \dots, x_{12}	variáveis de estado de alguns controladores
X_d	reatância síncrona de eixo direto
X'_d	reatância transitória de eixo direto

X_d''	reatância sub-transitória de eixo direto
X_L	reatância de dispersão de armadura do gerador
X_q	reatância síncrona de eixo de quadratura
X_q''	reatância sub-transitória de eixo de quadratura
X_{th}	reatância equivalente de Thevenin
X_{SL}	Estatismo (<i>slope</i>) do CER
y	vetor de variáveis algébricas

1 INTRODUÇÃO

1.1- Histórico

Em sistemas elétricos de potência é comum que os centros de geração estejam afastados dos centros de carga e conectados a estes últimos por meio de longas linhas de transmissão em alta tensão. Além disso, como uma das formas de atender à crescente demanda de energia elétrica, sistemas separados estão sendo interligados. Estes dois fatores, associados à operação do sistema de transmissão com elevado carregamento, algumas vezes próximo dos limites de estabilidade, contribuem para o surgimento de oscilações eletromecânicas inter-áreas, de baixa frequência, fracamente amortecidas ou até mesmo não amortecidas.

As oscilações inter-áreas podem restringir sensivelmente a operação de sistemas, tendo em vista que podem provocar desligamentos em cascata de linhas de transmissão e de blocos de geração, levando até mesmo a um colapso do sistema. A importância do amortecimento destas oscilações não está restrita apenas à melhora da qualidade do serviço elétrico, por meio da redução das flutuações das variáveis controladas, mas também ao aumento dos limites de estabilidade do sistema de transmissão, permitindo algumas vezes o adiamento da expansão do mesmo, o que representa uma economia significativa.

Uma forma eficiente de acrescentar amortecimento às oscilações inter-áreas é a utilização de compensadores estáticos de reativo (CERs).

Compensadores estáticos de reativo (CERs) foram utilizados inicialmente em indústrias para controle de *flicker* (oscilações rápidas de tensão), causadas por cargas como fornos a arco, bem como para regulação da tensão resultante da partida de motores, dentre outras. O primeiro CER de porte com tiristores foi colocado em serviço, para esta função, em 1972 por uma empresa européia.

Posteriormente, CERs começaram a ser aplicados também em sistemas de potência. Atualmente, existem cerca de doze compensadores estáticos de reativo no

sistema interligado brasileiro, com maior concentração no sistema Norte/Nordeste que conta com sete destes compensadores, sendo o CER de Bom Jesus da Lapa aquele que possui a maior disponibilidade de potência reativa (-250 a 250Mvar). Em sistemas elétricos de potência onde existe a necessidade de variações rápidas e contínuas de potência reativa, os CERs permitem que sejam atingidos os seguintes objetivos:

- Controlar sobretensões temporárias à frequência industrial;
- Prevenir colapsos de tensão;
- Melhorar a estabilidade em regime permanente e a estabilidade dinâmica do sistema elétrico de potência ao qual está conectado;
- Amortecer oscilações subsíncronas;
- Reduzir desbalanços de corrente ou tensão.

Um CER com controle puro de tensão melhora apenas a sincronização, mas não é capaz de promover amortecimento adequado às oscilações de baixa frequência. Para este fim, certas variações de tensão devem ser permitidas e pode ser aplicado um sinal adicional no regulador de tensão do CER, o qual funciona de maneira semelhante ao sinal adicional utilizado em reguladores de tensão de geradores síncronos.

Os efeitos da aplicação de compensadores estáticos de reativo em sistemas elétricos de potência vêm sendo investigados ao longo das últimas décadas, não só no aspecto teórico, mas também através da observação do desempenho de CERs que já estão em operação em sistemas reais. Os artigos referidos a seguir, descritos na bibliografia são alguns resultados destes estudos.

Na referência [1] ABOYTES *et al.* tratam da aplicação de um CER em um sistema de potência radial e apresentam uma análise técnica sobre o efeito deste equipamento sobre a operação do sistema. São apresentados no artigo, os resultados do estudo para definição de nova política de operação devido à integração de um CER no sistema mexicano, o qual é fracamente interconectado e seus centros de carga e geração são localizados distantes entre si. A análise em regime permanente é baseada na combinação das características do CER e do sistema para diferentes condições operativas. A partir dessa abordagem, alterações nas condições de carregamento e nos parâmetros de ajuste do CER foram analisadas. Resultados de simulações realizadas

mostraram o efeito do suporte de potência reativa do CER sobre o desempenho transitório do sistema, aumentando o limite de estabilidade transitória de transmissão, o limite de transferência e o controle de tensão e de potência. O artigo conclui que:

- Ajustes nos parâmetros do CER podem ser feitos para reduzir o carregamento do CER e corrigir a tensão do sistema;
- Que mudanças no estatismo e na tensão do CER podem ser coordenadas com ajustes de outras fontes de reativo;
- Que um CER operando com folga adequada antes de uma perturbação é essencial para obtenção de um melhor desempenho transitório na maioria das condições operativas;
- Finalmente, ressalta a importância de controles suplementares para proteção do sistema contra perda do CER.

OOI *et al.* [2] analisam a capacidade dos CERs de usarem sinais adicionais para melhorar o amortecimento de sistemas elétricos. Mostra-se que o amortecimento é função do carregamento do sistema de transmissão e do CER. O artigo oferece uma alternativa para coordenação de CERs com o sistema de transmissão. A tecnologia estudada é baseada em reatores controlados a tiristores e capacitores chaveados. Os resultados do estudo mostram ainda, onde pode ser encontrado amortecimento positivo e como prevenir o risco de amortecimento negativo elevado para certas condições operativas.

RAMOS *et al.* [3] descrevem em seu artigo alguns aspectos da aplicação de um CER do tipo reator controlado a tiristor (RCT) na extremidade de um sistema de potência radial e passivo. Para esta análise, são realizadas simulações com o modelo do CER de Fortaleza e do sistema ao qual está conectado. Este CER possui duas malhas de controle, uma de controle básico (BCL) e outra de controle rápido (FCL), esta última só devendo atuar para grandes perturbações. O CER de Fortaleza possui ainda um esquema de bloqueio para subtensão (UBS) que força o CER a 0Mvar durante subtensões. É feita uma investigação do desempenho dinâmico adequado do CER para atender aos requisitos de desempenho do sistema e para redução do problema mais significativo para o sistema em questão, que é a ocorrência de sobretensões transitórias. Ressalta-se que a seleção da melhor estratégia para o controle do CER deve ser obtida após a identificação do problema mais relevante para o sistema no qual será instalado, tendo

em vista as peculiaridades de cada caso. Destacou-se que o CER é um meio de controle de tensão atrativo, especialmente para sistemas radiais com problemas de sobretensões, apresentando desempenho dinâmico superior aos tradicionais compensadores síncronos. Verificou-se que a malha FCL reduz o tempo de resposta do CER, principalmente nos casos de sobretensões transitórias. Entretanto deve ser feita uma coordenação adequada entre esta malha e a malha BCL a fim de que sejam evitadas oscilações de controle para o sistema. Outra conclusão importante é que o esquema UBS melhora significativamente o desempenho do CER, embora seja essencial para sua eficácia que o CER opere com reserva de potência reativa a fim de preservar seu desempenho transitório adequado.

Na referência [4], RAMOS e TYLL, fazem uma análise do desempenho dinâmico do sistema nordeste do Brasil entre Paulo Afonso e Fortaleza, que na época era um sistema radial fraco, com três CERs, Fortaleza, Banabuiú e Milagres, todos com ampla faixa nominal e instalados próximos um do outro. Os dois últimos CERs ainda estavam em fase de comissionamento na época do artigo. Interações dinâmicas entre os sistemas de controle dos CERs e entre estes últimos e a rede elétrica são analisadas através de técnicas de autovalores e resposta em frequência. Foram utilizadas as formulações: Modo Instantâneo (MI) e Modo Fasorial (MF). Os resultados das análises efetuadas mostraram que a operação de CERs com baixos valores de RECC (razão efetiva de curto-circuito) pode exibir frequências e modo de oscilação superiores a 5Hz, dependendo substancialmente do ganho do regulador do CER. Nestes casos, a representação da dinâmica da rede e do atraso de disparo do tiristor é essencial na análise dos limites de estabilidade do regulador do CER. Verificou-se que a operação com duas seções ou com uma seção pode apresentar diferenças no comportamento dinâmico, inclusive quando o mesmo ganho, em pu, da malha de controle é utilizado. Esta diferença é mais evidente onde a RECC é baixa e aumenta com o ganho do regulador. Também foi verificado, para o sistema estudado que, para um dado ganho de regulador, a operação na faixa indutiva é mais amortecida do que a operação na faixa capacitiva. Similarmente este efeito é mais pronunciado para os casos de baixa RECC. Não foram observadas oscilações entre os CERs. Finalmente, o artigo ressalta que as análises foram baseadas na representação do RCT (reator controlado a tiristor) como uma admitância variável. A frequência máxima para a qual essa consideração é válida deverá ser considerada para estudos detalhados.

A referência [5] apresenta os resultados dos estudos de simulação efetuados durante a fase de projeto do CER instalado na subestação 345kV de Chester, da Companhia de Potência Elétrica de Maine, com o objetivo de verificar e otimizar o desempenho dinâmico e em regime permanente do sistema de controle do CER em questão. Este CER é importante para o controle de tensão durante grandes perturbações na sua área de influência e, por este motivo, foi projetado para atender a exigências severas de desempenho e utiliza algumas estratégias de controle únicas que ainda não haviam sido aplicadas em CERs. Os estudos mostraram que os requisitos de regime permanente, de comportamento dinâmico e de interação subsíncrona torsional para o CER de Chester foram alcançados adequadamente e todas as funções do CER operaram como esperado. O comportamento em regime permanente e a estabilidade foram verificados testando-se o controle sob uma variedade de condições de desbalanço e de ressonância do sistema. O desempenho transitório do controle foi testado com e sem as funções suplementares de controle para uma variedade de configurações da rede e de casos de faltas. Uma margem de ganho adequada foi obtida e o ganho transitório do Controle de Modulação Suplementar (CMS) contribuiu para a velocidade de resposta do CER sem comprometer o ganho de margem. O projeto final do sistema de controle, com estabilização de tensão, não introduziu amortecimento negativo na faixa de frequência torsional das máquinas próximas.

Em [6], LARSEN *et al.* descrevem um CER que foi instalado na subestação de Chester em Maine, Canadá, na interligação em 345kV entre Maine e New Brunswick. A função primária deste CER era garantir a operação segura do sistema, fornecendo suporte adequado de potência reativa durante as perturbações mais severas. O segundo objetivo de projeto era beneficiar o amortecimento das oscilações de potência na região. O objetivo final era minimizar os possíveis efeitos adversos, tais como vibrações torsionais nos geradores, tendências para instabilidade local e possível influência negativa no amortecimento dos modos de oscilação de potência da região. Durante a fase de projeto, o objetivo era fazer o regulador de tensão o mais rápido possível mantendo as margens de estabilidade no pior caso, o que era um desafio. Por isso, o controle suplementar de modulação (CSM) se tornou uma parte importante do projeto do CER. A modulação suplementar é um importante aspecto, pois permite alcançar o objetivo primário de desempenho transitório, dentro das limitações associadas ao

equipamento e ao sistema de potência. Verificou-se que a natureza dos efeitos do CER varia com o tipo de carga e a direção do fluxo de potência. Há um grande benefício ao amortecimento dos modos inter-áreas quando as cargas são do tipo impedância constante. Se as cargas forem do tipo potência constante o efeito do CER é primeiramente aumentar a frequência, beneficiando o sincronismo entre as duas áreas. O CSM tem impacto substancial sobre a interação subsíncrona torsional e por isto, o ganho deve ser mantido dentro da faixa de frequência torsional para minimizar esta interação. Estudos mostraram que com o ganho selecionado e o uso de filtro passa-baixa no controle, existe um risco mínimo de interações adversas.

WANG [7] apresenta os resultados de um estudo comparativo sobre a aplicação de três diferentes recursos para melhorar o amortecimento de oscilações de geradores em um sistema de potência: sinal adicional estabilizador (SAE), compensador estático de reativo (CER), e o retificador regulador de corrente (RRC). A fim de melhorar o amortecimento de ambos os modos mecânico e da excitatriz no sistema estudado, uma aproximação unificada baseada na teoria de controle modal é proposta para o projeto do SAE, do CER e do RRC. Um tipo de controlador proporcional-integral-derivativo (PID) usando o desvio de velocidade do gerador como um sinal modulado para gerar o amortecimento desejado é proposto no estudo, de forma que os modos do sistema afetado, modo mecânico e modo da excitatriz, podem ser exatamente localizados em locais pré-especificados do plano complexo por esquemas amortecedores propostos. Para demonstrar a efetividade dos controladores PID propostos e seus méritos relativos, é feita uma aproximação no domínio da frequência baseada na análise de autovalores sob diferentes condições de operação, e também, são realizadas simulações no domínio do tempo com modelos não-lineares, sob condições de perturbações.

Dos resultados obtidos, verificou-se que ambos os modos de oscilação, mecânico e da excitatriz, podem ser efetivamente amortecidos pelos controladores PID propostos. Os autovalores para os modos mecânico e da excitatriz, podem ser facilmente movidos para locais pré-definidos do plano complexo usando a teoria de controle modal e os parâmetros do PID propostos podem ser simultaneamente determinados pelo algoritmo. De acordo com a análise de autovalores, o RRC proposto pode garantir operação estável para o modo mecânico, enquanto que o CER pode oferecer melhor amortecimento para o modo da excitatriz sob condições críticas de operação. Do teste

de modo mecânico e das simulações de resposta dinâmica, ambos CER e RRC podem promover melhores características de amortecimento para o sistema estudado. Mas o teste do modo da excitatriz mostrou que o CER pode oferecer a menor variação de tensão terminal e da tensão da excitatriz, enquanto que o RRC tem um efeito prejudicial sobre o perfil de tensão do sistema estudado.

SONG *et al.* [8] sugerem um método de realimentação não-linear baseado na teoria de geometria diferencial para produzir um novo controle para CERs, que considera o fato de que sistemas de potência são de natureza não-linear. Primeiramente é construído um modelo não-linear para o sistema de potência com o controle do CER. São verificadas as condições para transformar algebricamente o modelo não-linear em um sistema linear. O modelo linearizado é então obtido por linearização de realimentação, e leis de controle ótimo para o CER são derivadas para melhorar a estabilidade do sistema de potência. A fim de investigar o desempenho do controlador proposto, foram realizadas simulações de diversas faltas que mostraram que com o modelo proposto o sistema é estável. Com o controle convencional no CER o sistema também é estável, mas apresenta oscilações de maiores amplitudes. Sem o CER, o sistema perde sua estabilidade transitória.

A referência [9] apresenta uma análise detalhada de dois tipos de controladores não-lineares de CERs. Os controladores não-lineares são projetados empregando-se a teoria de Linearização por Realimentação Direta. Eles ressaltam que um CER com controle apenas de tensão é capaz de manter a tensão no local, mas não pode produzir torque de amortecimento adicional, fato que é provado através de simulações digitais. Pelo aprimoramento do controlador de tensão não-linear, um novo sinal de modulação do tipo controlador sintético não-linear do CER foi desenvolvido. O controlador sintético não-linear é capaz de produzir torque de amortecimento adicional obviamente tão bem quanto mantém a tensão no ponto de localização do CER. O processo de projeto é direto e muito fácil de ser entendido do ponto de vista físico. Ambos os tipos de controladores são robustos e usam somente variáveis medidas localmente no ponto de localização do CER. Estas características os tornam praticáveis na engenharia.

A modulação do tipo controlador sintético não-linear projetada no artigo pode melhorar o amortecimento de forma proeminente e, ainda manter o nível de tensão no

ponto de localização do CER. A robustez do controlador assegura que isso é válido para uma ampla faixa. Portanto, este é um tipo avançado de controlador não-linear de CER.

Segundo a referência [10], a modelagem de sistemas estáticos de reativo é importante para simulações de fluxo de potência, de estabilidade transitória e de longo termo. Com o objetivo de promover melhor modelagem, recomenda-se que sejam usados os modelos e parâmetros padronizados para troca de dados. Para simulação de fluxo de potência, recomenda-se que sejam usados modelos melhorados com representação apropriada dos limites e com a representação do estatismo do CER. É proposta uma estrutura modular para modelos dinâmicos e são recomendados dois modelos básicos com diferentes métodos de representação do estatismo. O artigo fornece orientação para ajuste inicial dos parâmetros. Outras funções do CER, incluindo funções para dinâmica de longo termo, são descritas. Quando necessário, estas funções podem ser implementadas por meio de modelagem definida pelo usuário. Os modelos, em geral, são válidos para sistemas fortes. Para sistemas fracos, estudos complementares do tipo EMTP incluindo a dinâmica da rede são necessários.

MANSOUR, *et al.* [11] afirmam que a localização do CER (Compensador Estático de Reativo) e outros tipos de equipamentos de compensação em paralelo para suporte de tensão é uma questão prática importante. O artigo considera uma ferramenta baseada na determinação de modos críticos. Modos críticos são computados pelo estudo dos modos do sistema na vizinhança do ponto de colapso. Fatores de participação no sistema para o modo crítico são usados para determinar os pontos do sistema mais adequados para reforço. Em virtude do método não considerar linearizações no caso base, o método é capaz de propriamente considerar todos os limites do sistema e efeitos não-lineares. O artigo testa o método proposto fazendo uma avaliação do impacto da adição de CER a uma barra modelo 1380 do sistema BC Hydro. O artigo conclui que se algum cuidado for tomado, programas de fluxo de potência e pacotes de análise de autovalores podem ser usados para estudar o sistema na vizinhança do ponto de colapso do sistema. O artigo descreve uma metodologia compreensível para identificação do ponto fraco do sistema de uma maneira sistemática que é teórica e validada com a experiência prática em projeto.

Em [12], Parniani e Iravani fazem uma investigação, do ponto de vista de pequenos sinais para altas frequências (acima de 4Hz), das interações dinâmicas das malhas de controle de tensão de múltiplos CERs, do fenômeno das interações entre o CER e a rede e das interações torsionais com o CER. Estas investigações conduziram às seguintes conclusões:

- As malhas de controle de tensão de CERs eletricamente próximos são passíveis de interações entre si. Em virtude destas interações, em geral, o modo de controle do CER com baixo nível de curto-circuito tende a experimentar instabilidade. As interações são mais pronunciadas para valores mais elevados de ganhos.
- Para aplicações com muitos CERs, a coordenação dos parâmetros dos CERs é necessária.
- Compensação dinâmica em derivação de redes de transmissão fracas, onde a primeira frequência ressonante da rede é baixa, pode causar interação entre os modos do controle do CER e a primeira frequência de ressonância. Isto acontece no caso de ganho elevado do controlador do CER.
- Podem existir interações torsionais de CERs com unidades turbo-geradoras sob condições específicas do sistema. A severidade do fenômeno da interação torsional depende das condições de operação e do ganho do controle do CER. O fenômeno de interação entre os modos torsionais com CERs em geral não é tão severo quanto às interações dos modos torsionais com linhas com compensação série e sistemas CCAT.
- A aplicação de um CER a um sistema com compensação série aumenta uma séria preocupação em relação à estabilidade da ressonância de um reator em derivação. Este modo é sensível ao ponto de operação do reator controlado a tiristor (RCT) e ao ganho do controle do CER. Deve ser assumido um compromisso entre o desempenho do CER e a estabilidade deste modo ressonante.
- Ressonância série e o fenômeno da ressonância subsíncrona são afetados pelos CERs e suas malhas de controle de tensão associadas.
- Apesar da frequência de ressonância do reator em derivação estar na faixa da frequência subsíncrona, é pouco provável interagir com os modos torsionais do conjunto turbina-gerador.

Através da escolha de configurações típicas de sistemas e da investigação de várias condições de sistema, é feita uma tentativa para a obtenção de conclusões gerais. Entretanto, para uma aplicação específica, os resultados podem ser diferentes dos apresentados acima.

PARNIANI e IRAVANI [13] introduzem uma abordagem para formulação computadorizada das equações de estado linearizadas do sistema de potência incluindo a rede de transmissão e equipamentos associados. As características mais relevantes dessa abordagem são: ela fornece um método direto para representação dos componentes do sistema de potência na referência global do eixo d-q, e fornece uma característica de modularidade para a construção da matriz do sistema. A modularidade torna o método muito flexível para implementação computacional e adição e retirada de modelos de componentes. Uma ferramenta computacional para análise de pequenos sinais baseada em autovalores é desenvolvida, utilizando a formulação proposta de espaço de estados. A aplicação destes pacotes é primeiramente para análise dinâmica de pequenos sinais do sistema de potência para uma faixa de alta frequência (superior a 5Hz), envolvendo, por exemplo, interações entre equipamentos eletrônicos tais como múltiplos CERs. Um exemplo de aplicação do programa é apresentado.

HAMMAD [14] explica o fenômeno da estabilidade transitória de tensão. Um método genérico é usado para examinar as dinâmicas de estabilização por influência de capacitores em derivação chaveados ou de CERs. Também é feita uma comparação do desempenho de estabilização de tensão de diferentes configurações de CERs. A utilização bem sucedida de capacitores chaveados para agir contra as instabilidades de tensão é altamente dependente da dinâmica transitória da carga. Podem ser estabelecidas estratégias de chaveamento por um método genérico, tal como uma curva inversa de tensão/corrente. CERs com RCT para controle *vernier* podem resolver problemas de estabilidade transitória de tensão onde CCM não podem. Um CER permite operação estável de tensão para níveis mais elevados de carga somente quando está operando dentro da faixa de controle dinâmico. Um controlador especial ativado próximo ao limite de susceptância pode fornecer operação estável onde controles convencionais de tensão são inócuos. Para esquemas RCT/CCT o controle de tensão pode não ser um critério suficiente para evitar instabilidade transitória de tensão. CERs com conversores baseados em fonte de tensão possuem características especiais de corrente que são

efetivas durante os períodos transitórios de baixa tensão observados após perturbações no sistema. Tais características podem ser usadas para otimizar a faixa nominal e, portanto, o custo do esquema de compensação. Capacitores série controlados por tiristores (TCSC) podem ser usados para controle de tensão em terminais de carga, além do controle de fluxo de potência, se providos do um controlador hierárquico adequado. O TCSC pode usar sua capacidade de sobrecarga transitória para fornecer considerável ampliação das regiões estáveis, mesmo para tensões de carga baixas.

A referência [15] analisa a resposta de um CER típico permitindo que o erro em regime permanente e a resposta ao degrau sejam identificados. Observou-se que o erro em regime permanente depende apenas dos erros de medição da corrente de fase, se uma construção com realimentação for utilizada. O fator de potência de cada linha é então o cosseno deste erro de fase. Também verificou-se que caso o erro exceda 45° , o sistema entra em um estado saturado que tende a um curto-circuito. A resposta a uma variação em degrau na carga é examinada e mostra ter seu crescimento exponencialmente dependente do ganho do sistema. As análises apresentadas neste artigo podem ser usadas em projetos de estratégias de controle de compensação reativa. A construção com realimentação implicitamente permite à rede CA variação de impedância, de forma que a técnica adaptativa estudada fornece uma resposta mais rápida às mudanças de carga e ainda é efetiva na limitação de ruídos em regime permanente. Adicionalmente, a disponibilidade da TRF (Transformada Rápida de Fourier) on-line pode melhorar o desempenho do controlador fornecendo os meios para as técnicas de eliminação harmônica. Estas técnicas de projeto são adequadas para qualquer aplicação onde CERs sejam necessários com bom desempenho dinâmico e poluição reduzida, por harmônicos injetados na rede.

Na referência [16] é desenvolvida uma fórmula para o torque eletromagnético, mostrando o efeito da susceptância do CER sobre o coeficiente de torque sincronizante. Adicionalmente, o fator de efetividade, que representa o grau no qual a mudança na susceptância pode provocar uma aceleração relativa das máquinas, é introduzido. Esta fórmula permite uma visão do efeito da compensação com CER sobre o comportamento dinâmico do sistema. O método proposto usando o CER modifica os parâmetros da máquina de forma que o coeficiente de torque sincronizante e o coeficiente de efetividade sejam positivos para garantir a estabilidade. Os parâmetros modificados da

máquina são função da susceptância e do controlador do CER, e dos parâmetros da excitatriz. Verificou-se que pode ser obtida melhora significativa de amortecimento com um fator de efetividade mais alto e um coeficiente de torque sincronizante mais positivo.

Foram feitos testes em dois sistemas, o primeiro era um sistema gerador - barra infinita com um CER no barramento terminal do gerador e o segundo, foi o sistema do Egito. Análises dos resultados dos testes mostraram que o método proposto no artigo utilizando o CER é capaz de melhorar o amortecimento da oscilação da máquina e o controle da tensão do sistema sob condições operativas anormais.

A referência [17] trata do efeito de um SAE e de um CER sobre o amortecimento de um sistema de potência longitudinal. O sistema analisado no trabalho foi o sistema de potência de Taiwan, que possui elevado montante de geração por usinas nucleares. Uma abordagem sistemática baseada na teoria modal de controle, utilizando autovalores, é apresentada para projetar um SAE. A resposta dinâmica do sistema, quando sujeito a grandes perturbações, com o SAE projetado em operação, é verificada através de simulações no domínio do tempo, considerando as não-linearidades do sistema e dos equipamentos. Verificou-se que o amortecimento do sistema pode ser ampliado até um certo ponto por um SAE, quando os parâmetros do mesmo estão adequadamente ajustados. Observou-se também que um CER pode melhorar o desempenho dinâmico do sistema. Ressalta-se que foi empregada uma combinação entre um SAE e um CER, tendo em vista que não havia disponibilidade de uma unidade geradora adequada para instalação de um SAE adicional, na área central do sistema sob estudo. Foi analisado o efeito do CER instalado em diferentes pontos do sistema e o local mais adequado foi determinado como sendo na área central do sistema, próximo ao centro de carga.

CHUNG *et al.* [18] propõem uma abordagem sistemática para selecionar a localização, o sinal de amortecimento e os ajustes dos controles do CER. Este projeto é implementado usando: (a) análise modal do relacionamento dos modos das máquinas para selecionar a localização e o sinal de amortecimento do CER, e (b) análise de sensibilidade dos autovalores para otimizar os parâmetros do controle de amortecimento. O critério de otimização é maximizar o amortecimento do modo inter-

área mantendo uma margem de ganho constante de 9,5dB para o modo do CER. Pela consideração do efeito do controlador sobre o mesmo modo ao mesmo tempo, um coeficiente combinado de sensibilidade (CCS) é calculado, a partir do qual a direção desejada de mudança de cada ajuste do controlador pode ser inferida. O ajuste do controlador é ótimo quando o CCS de todos os parâmetros do CER se aproxima de zero, para uma ampla faixa de parâmetros. Como o CCS do ganho constante do controlador é sempre zero e a constante de tempo do “washout” é invariavelmente pequena, os únicos parâmetros ajustáveis do controlador são as constantes de tempo do “lead-lag”. Ao longo do projeto de otimização, o ganho do controle é continuamente ajustado para garantir a estabilidade do modo do CER. Os resultados mostram que os métodos convencionais correm o risco de compensação incorreta se o modo do CER não for considerado.

Na referência [19], WANG estuda a interação entre o controle de tensão e o controle de amortecimento de um CER. Através de análises, verificou-se que há conflito entre estes dois controles e que, uma função é desempenhada sempre em detrimento à outra função. A incompatibilidade do controle de tensão e do controle de amortecimento do CER não somente existe, mas é inerente. Para cuidar da interação contrária entre as duas diferentes funções de controle do CER, um esquema de coordenação é proposto no artigo. O esquema é baseado na busca ótima da programação não-linear. São apresentados resultados dos testes em um sistema de potência exemplo, com um CER cujo sinal de realimentação é o fluxo de potência ativa na linha de transmissão, os quais confirmam os estudos analíticos e demonstram o sucesso do esquema de coordenação proposto.

MESSINA *et al.* [20] elaboraram um artigo com resultados de estudos analíticos realizados para examinar a aplicação de extensivo suporte de tensão para amortecimento de oscilações de potência no sistema interligado mexicano (SIM), representado no estudo através de seis áreas, 130 geradores e 8 CERs de porte significativo. São examinados vários procedimentos analíticos para quantificar a influência do suporte dinâmico do CER sobre o amortecimento de três modos inter-áreas críticos no SIM que envolvem a interação entre máquinas do norte e do sul do sistema. Para este fim, uma abordagem sistemática baseada na análise modal e na teoria de controle descentralizada é proposta para analisar e projetar os controladores FACTs. Os resultados do estudo

incluíram a identificação dos modos inter-áreas críticos controláveis pela existência dos CERs e o uso de controles suplementares de modulação para aumentar o amortecimento dos modos críticos do sistema. Os estudos realizados mostraram que os CERs existentes no SIM podem ser efetivamente usados para adicionar estabilidade ao sistema, especialmente sob as mais severas condições operativas. Verificou-se que a seleção dos sinais suplementares é crucial para contribuir para o amortecimento e garantir interação mínima entre os controladores. Finalmente, análises no domínio do tempo foram feitas para estimar o impacto do suporte dinâmico de tensão no comportamento transitório do sistema e validaram as análises para pequenos sinais.

A referência [21] apresenta um procedimento sistemático para o projeto de controladores robustos para amortecimento a serem utilizados em CERs instalados em sistemas de potência multimáquinas. No trabalho utiliza-se uma minimização do valor estruturado singular (VES ou μ) como um critério de desempenho, em cada passo. Esta metodologia foi escolhida a fim de que fossem consideradas as incertezas de parâmetros do sistema, principalmente de valores como fluxo de potência nas linhas, potência ativa gerada, que são significativos em relação à estabilidade robusta em sistemas de potência. As diretrizes para seleção da melhor localização do CER e seus sinais de controle são fornecidas. Foram feitas simulações com programas dos pacotes EPRIs MASS e ETMSP em um sistema teste de quatro máquinas e também em um sistema teste IEEE de 50 geradores. Os resultados numéricos obtidos com os pacotes de programas EPRIs MASS e ETMSP para pequenas e grandes perturbações, selecionadas para serem diferentes quanto à natureza e localização, mostraram que o controlador suplementar para amortecimento projetado com a técnica μ , efetivamente amortece a oscilação inter-área para uma vasta gama de condições operativas.

Em seu artigo, HAMMAD [22] apresenta as configurações possíveis para um CER e os fatores que influenciam os custos de cada configuração. Ele menciona que a localização mais adequada para o CER é determinada por alguns fatores, tais como: O ponto de maior variação de tensão ou de máximo amortecimento para um CER com uma dada faixa de controle dinâmico; a existência de transformador abaixador no sistema com tensão secundária ou terciária adequada; localização de cargas sensíveis a variações de tensão ou terminais de CCAT. A seleção da faixa dinâmica do CER pode ser influenciada pela estratégia de controle adotada. Ele mostra os principais benefícios

advindos da utilização de CERs:

- Alta capacidade de transmissão de potência com segurança, preservando a estabilidade do sistema em termos de aumentar a potência sincronizante do sistema sob condições normais e durante grandes perturbações;
- Limitar sobretensões dinâmicas em sistemas de transmissão e em terminais CCAT e evitar o risco de colapso devido à instabilidade de tensão;
- Complementar a compensação série de linhas para estabilização e amortecimento do sistema;
- Atuar contra interações torsionais subsíncronas e ressonância harmônica de baixa ordem;
- Regular o perfil de tensão e gerenciar potência reativa ao longo do sistema de transmissão.

O artigo destaca que uma estratégia de controle de tensão constante limita a inerente capacidade do CER de melhorar o desempenho do sistema, privando-o de considerável potência sincronizante e amortecedora. Um esquema de controle compreendendo várias malhas de controle e usando micro-processadores otimiza a utilização do CER e o habilita a executar diversas tarefas em um intervalo de tempo prático sem a necessidade de aumento da sua faixa nominal.

MARTIN [23] apresenta os resultados da análise de um sistema composto por três áreas interligadas, a área 1 ligada à área 3 através de três circuitos e área 3 ligada à área 2 através de dois circuitos. Nos circuitos entre as áreas 1 e 3 existe um barramento no qual foi colocado um CER. Através de simulações dinâmicas foram demonstrados os benefícios da aplicação de um CER para prover amortecimento ao sistema, bem como melhorar a estabilidade do mesmo. Para as diferentes condições analisadas, foi simulada a perda de um circuito entre as áreas 1 e 3, contingência que provoca oscilações não amortecidas. Os resultados mostraram que pode ser obtido um aumento significativo na potência transferida em um sistema através do uso adequado e do controle de um CER. Foram considerados dois tipos de CERs diferentes nas simulações, um com CCTs e outro com CCTs associados a RCTs e os resultados foram comparados. O CER com CCTs para melhorar o amortecimento do sistema permitiu um aumento na transferência de potência equivalente a 2MW para cada Mvar da capacidade instalada do CER. Para aumentar o limite de estabilidade transitória do sistema e seu amortecimento, O CER

com CCTs e RCTs permitiu um aumento de quase 1MW para cada Mvar da capacidade do CER. O estudo demonstrou ainda a efetividade do uso de um sistema de controle adicional para amortecimento das oscilações de potência do sistema juntamente com as funções de controle de tensão normais do CER.

A referência [24] descreve alguns avanços obtidos em um projeto de pesquisa cujo objetivo era avaliar a aplicação de CERs e SAEs no alívio de oscilações inter-áreas. O escopo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia baseada em auto-valores para identificar a natureza dos modos de um sistema de potência longitudinal e de medidas para melhorar o amortecimento do sistema. Um sistema equivalente do sistema interligado mexicano (SIM) foi utilizado para a avaliar a estabilização do sistema através de CERs e de SAEs.

As características de amortecimento do SIM apareceram primeiramente relacionadas às características inerentes de sistemas longitudinais, tais como a natureza das interligações entre grupos de máquinas e estrutura e robustez do sistema. O controle de tensão através de CER em pontos críticos do sistema é vital para a operação do sistema. Vários estudos sugeriram que o uso de circuitos estabilizadores suplementares no CER na SE TMD poderia também contribuir para um amortecimento positivo.

A redução do ganho e a aplicação de CERs em máquinas dominantes mostraram ser alternativas úteis para aumentar o amortecimento do sistema, embora uma aplicação coordenada seja necessária quando diversas máquinas possuem SAE. Os resultados obtidos foram bastante coincidentes com o comportamento do sistema.

WONG [25] afirma que a tensão em sistemas de potência é mantida tipicamente na faixa entre $\pm 5\%$ da tensão nominal para transmissão de potência e algumas vezes uma faixa maior de operação é permitida para a distribuição. Em geral os equipamentos são capazes de operar corretamente dentro de uma faixa de $\pm 10\%$. Ele destaca que é fundamental que a tensão não atinja valores muito abaixo desses limites inferiores por um período de tempo significativo porque, em geral, a demanda de corrente reativa aumenta com a queda da tensão, o que provoca maior queda da tensão e o sistema tende a colapsar completamente. Cargas com baixo fator de potência, motores de indução operando com alto escorregamento após um distúrbio e mudanças automáticas de tape

de transformadores para elevar a tensão secundária podem inadvertidamente aumentar a absorção de potência reativa, precipitando condições operativas instáveis. O artigo mostra através de uma análise das curvas P_xV para diferentes condições operativas de fator de potência a contribuição no sentido de protelar colapsos de tensão melhorando a rigidez da tensão para um nível de potência determinado ou permitindo que mais potência seja transmitida sem aumento do risco de colapso.

A referência [26] trata fundamentalmente do aumento da capacidade de transmissão através de interligações de sistemas de potência e do acréscimo de amortecimento dos modos eletromecânicos de oscilações inter-áreas por meio da aplicação de CERs. O artigo destaca que os CERs por si só não têm a habilidade de produzir quantidade significativa de amortecimento, e que para esse fim deve ser utilizados sinais adicionais estabilizantes aplicados na malha de controle dos CERs. O efeito de CERs sobre a estabilidade de regime permanente é analisado através do cálculo de coeficientes de torque sincronizante (T_s) e de torque amortecedor (T_a) para um sistema com dados típicos de um sistema de transmissão em 500kV (circuito duplo) com 800km, com um gerador ligado radialmente a um sistema de potência bem maior, na condição operativa de indisponibilidade de um circuito de uma das duas seções de transmissão. Valores de T_a e T_s foram calculados considerando o CER operando flat e não-flat. Os efeitos do valor de potência transferida, da demanda de potência reativa, da frequência de oscilação e da faixa nominal do CER também são estudados no artigo em questão. Verificou-se que a demanda de potência reativa pelo CER e seu controle automático de tensão contribuem para o aumento de T_s , o que indica possibilidade de aumento da estabilidade em regime permanente de sistemas de potência. Os resultados apresentados mostraram que CERs contribuem em algumas situações para redução da magnitude do amortecimento negativo produzido pela ação rápida dos sistemas de excitação, embora a solução efetiva para esse problema seja a aplicação de sinal adicional estabilizador (SAE) através da malha de controle do CER. Este fato também é observado quando se tem SAE no sistema de excitação do gerador. Outra questão importante é relativa à definição do sinal de estabilidade de fase e às características de amplitude a fim de efetivamente aumentar o torque amortecedor com pequenas mudanças do torque sincronizante e da frequência de oscilação.

OLIVEIRA *et al.* [27] discutem o efeito de CERs e de SAEs aplicados através da malha de controle de tensão do compensador sobre a estabilidade de regime permanente de uma estação geradora conectada a um sistema radial de EAT, a partir do cálculo de autovalores da matriz de estado deste sistema, verificando também a deterioração do amortecimento das oscilações eletromecânicas associada ao efeito dos RATs de ação rápida e dos CERs. Os resultados mostraram que CERs podem contribuir para aumento da estabilidade de regime permanente de sistemas elétricos, de forma semelhante aos sistemas rápidos de excitação, através do aumento do torque sincronizante associado às oscilações eletromecânicas, podendo ser até mais efetivos que estes últimos, caso o CER esteja apropriadamente localizado. Entretanto, a característica de ação rápida dos sistemas de excitação e dos CERs pode contribuir para deterioração do amortecimento das oscilações eletromecânicas, podendo inclusive provocar amortecimento negativo. O CER isoladamente não resolve problemas de amortecimento negativo ou reduzido. Uma solução para estes problemas é a utilização de sinal adicional estabilizador atuando através da malha de controle de tensão do CER.

1.2- Objetivo

O presente trabalho de tese apresenta a metodologia de cálculo de autovalores para análise da estabilidade em regime permanente de sistemas elétricos de potência. Para este fim são apresentados os conceitos básicos de estabilidade sob pequenos desvios, os quais são aplicados a um sistema fictício de potência, com compensação reativa estática. As equações não-lineares que descrevem o comportamento dinâmico de todos os elementos componentes do sistema fictício (gerador síncrono, sistema de excitação, compensador estático de reativo (CER) e sinais adicionais estabilizadores) são linearizadas, utilizando-se as referências das variáveis tensões e correntes presentes nas equações do gerador síncrono, eixos direto “d” e de quadratura “q” e do sistema elétrico, desta forma permitindo a montagem da matriz de estado do sistema global.

O objetivo principal deste trabalho é demonstrar a influência da utilização de CERs sobre o desempenho dinâmico de sistemas de potência. Por este motivo, um capítulo deste trabalho é dedicado integralmente à descrição deste equipamento, destacando seus principais tipos, aplicações, sua interação com o sistema elétrico e

representação para estudos elétricos.

Para análise quantitativa da influência do CER sobre o desempenho dinâmico do sistema elétrico, foram criadas rotinas computacionais com as funções de determinar as condições de regime permanente, de formar a matriz de estado do sistema global e finalmente, de calcular os autovalores.

O trabalho enfatiza o efeito do CER sobre o modo natural de estabilidade eletromecânica. Para este fim, é apresentada a excursão deste modo no plano complexo em função da variação da condição operativa (transferência de potência, operação “flat” e “não-flat” do CER, tensão da barra controlada pelo CER).

A identificação dos modos de resposta natural de sistemas de potência pode indicar uma eventual necessidade de otimização destes modos, contribuindo positivamente para o desempenho dinâmico do sistema de transmissão, principalmente em situações pós contingências. O desempenho adequado do sistema de potência diante de pequenas perturbações é tão importante quanto o desempenho para perturbações severas. Ambos são essenciais para a garantia da confiabilidade e qualidade do suprimento de energia elétrica.

1.3- Estrutura da Tese

Para cobrir todos os tópicos apresentados, o relatório do trabalho de tese foi dividido em 7(sete) capítulos e 2(dois) anexos.

O capítulo 1 apresenta informações de caráter geral a respeito da utilização de compensadores estáticos de reativo em sistemas elétricos de potência, destacando os principais benefícios fornecidos por tais equipamentos.

O capítulo 2 apresenta as definições básicas associadas aos sistemas de compensação reativa, os fundamentos da interação entre sistemas estáticos de reativo e o sistema elétrico, os principais tipos de compensadores estáticos de reativo e orientações para modelagem dos mesmos em estudos de sistemas de potência (regime permanente, desempenho dinâmico e pequenas perturbações).

No capítulo 3, são apresentados os conceitos de estabilidade transitória e de regime permanente, é analisada a influência do suporte de tensão sobre a estabilidade transitória, bem como sobre a estabilidade de regime permanente de sistemas de potência.

O capítulo 4 é reservado para uma apresentação dos principais conceitos relacionados à estabilidade sob pequenos desvios (estabilidade de regime permanente), tais como: matrizes de estado, autovalores e autovetores, modos de oscilações, conceitos de observabilidade e controlabilidade, dentre outros.

No capítulo 5 é descrito o sistema elétrico exemplo que será utilizado nas simulações efetuadas para análise do desempenho, com o detalhamento dos equipamentos e sistemas de controle conectados ao mesmo. É apresentado o conjunto de equações linearizadas que descrevem o comportamento do sistema para pequenas perturbações. É formada a matriz de estado do sistema dinâmico incorporando a representação do efeito dos geradores síncronos, sistema de excitação, compensador estático de reativo e seus respectivos sinais adicionais estabilizantes e finalmente, do sistema de transmissão CA.

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações. Os resultados compreendem os autovalores da matriz de estado que foram calculados para diferentes configurações do sistema. Foram analisadas sete diferentes configurações:

- Apenas gerador;
- Gerador e sistema de excitação;
- Gerador, sistema de excitação e sinal adicional estabilizador;
- Gerador, sistema de excitação, sinal adicional estabilizador e CER;
- Gerador, sistema de excitação, CER e respectivos sinais adicionais estabilizadores.
- Gerador, sistema de excitação e CER;
- Gerador, sistema de excitação, CER e sinal adicional estabilizador associado a este último;

Para cada uma das configurações acima, foram calculados autovalores para

diferentes níveis de carregamento do sistema e diferentes perfis de tensão. Os resultados são apresentados numericamente e graficamente a fim de permitir a visualização da excursão do modo eletromecânico no plano complexo para as diferentes condições operativas.

O capítulo 7 é reservado para a apresentação das conclusões da tese e, sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros são também indicadas.

O Anexo I apresenta o desenvolvimento da expressão para o valor do coeficiente de potência sincronizante do sistema elétrico apresentado na Figura 3.2.

O Anexo II apresenta tabelas com os resultados numéricos dos autovalores obtidos a partir do programa computacional desenvolvido para este fim e apresentados graficamente no Capítulo 6.

Finalmente, as referências bibliográficas utilizadas são apresentadas.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVO

2.1- Definições Básicas

2.1.1- Compensador Estático de Reativo (CER)

Compensador Estático de Reativo (CER) é um equipamento sem partes girantes capaz de gerar e/ou absorver potência reativa, cuja finalidade é controlar parâmetros específicos do sistema elétrico de potência ao qual está conectado.

2.1.2- Gerador e/ou Receptor Estático de Reativo

Dispositivo, equipamento ou sistema elétrico estático que é capaz de solicitar corrente capacitiva e/ou indutiva controlada de um sistema elétrico de potência, e desta forma gerar ou absorver energia reativa. É parte integrante de um Compensador Estático de Reativo.

2.1.3- Sistema Estático de Reativo (SER)

Combinação de Compensadores Estáticos e Compensadores chaveados mecanicamente, diferentes, cujas saídas são coordenadas.

2.1.4- Sistema de Compensação de Reativo

Combinação de Sistemas Estáticos e Compensadores de reativo girantes, cujas saídas são coordenadas.

2.2- Objetivos da Utilização de CERs

Compensadores estáticos de reativo (CERs) foram utilizados inicialmente em indústrias para controle de *flicker* (oscilações rápidas de tensão), causadas por cargas como fornos a arco, bem como para regulação da tensão resultante da

partida de motores, dentre outras.

Posteriormente, CERs começaram a ser aplicados também em sistemas de potência, nos quais existe a necessidade de variações rápidas e contínuas de potência reativa a fim de que sejam atingidos os seguintes objetivos, conforme a referência [28]:

- Controlar sobretensões temporárias à frequência industrial;
- Prevenir colapsos de tensão;
- Melhorar a estabilidade em regime permanente e a estabilidade dinâmica do sistema elétrico de potência ao qual está conectado;
- Amortecer oscilações subsíncronas;
- Reduzir desbalanços de corrente ou tensão.

2.3- Interação SER x Sistema Elétrico

Um SER ideal é equivalente a conjunto conectado em derivação ao sistema elétrico de potência, composto por um reator ajustável com capacidade de absorção ilimitada, em paralelo com um capacitor também ajustável e com fornecimento ilimitado de potência reativa, como ilustra a Figura 2.1.

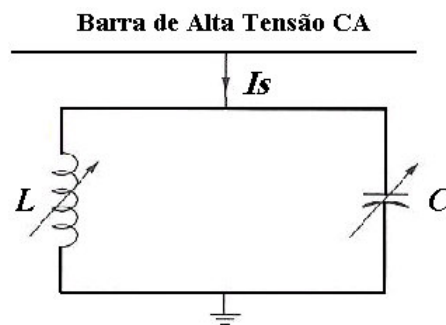


Figura 2.1 – Sistema Estático de Reativo Ideal

Um SER real deve manter a tensão do barramento controlado constante e responder instantaneamente às solicitações de potência reativa do sistema, sem apresentar perda de potência ativa ou reativa. A Figura 2.2 apresenta a curva característica V/I do SER ideal.

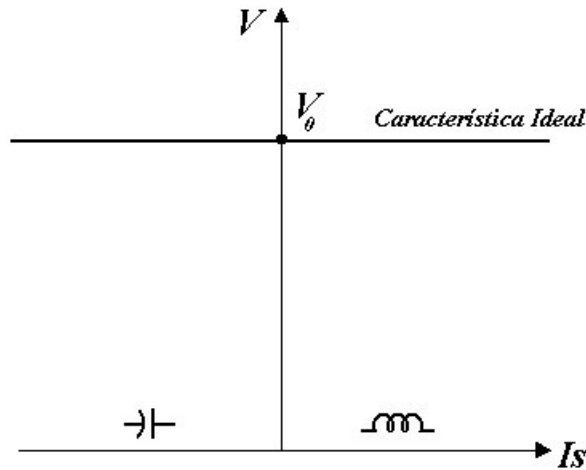


Figura 2.2 – Característica V/I de um SER ideal

Na prática os reatores e indutores, ainda que controláveis, não têm capacidade ilimitada de absorver e fornecer, respectivamente, potência reativa. Desta forma, o SER na prática mantém a tensão da barra controlada dentro de uma determinada faixa. Para exemplificar, será apresentado um SER composto por um reator controlável em paralelo com um capacitor fixo. A curva V/I característica do SER neste caso é obtida fazendo-se a composição das curvas características individuais do reator e do capacitor, como mostra a Figura 2.3.

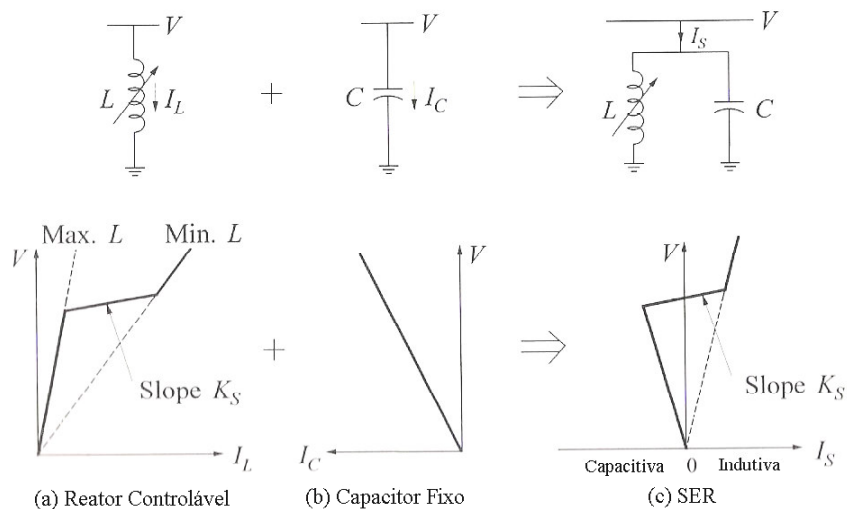


Figura 2.3 – Característica V/I de um SER real

A curva apresentada na Figura 2.3(c), para valores de tensão dentro da faixa de operação desejada, é dada pela Equação 2.1, onde X_{SL} é o estatismo (*slope*).

$$V = V_0 - X_{SL} I_s \quad (2.1)$$

Para tensões fora da faixa de controle do SER, a razão V/I_s é dada pelas inclinações das duas retas extremas, que são determinadas pelos valores nominais do indutor e do capacitor.

A característica V/I do sistema elétrico pode ser obtida representando o sistema por meio de um circuito equivalente de Thevenin visto dos terminais do barramento cuja tensão está sendo controlada pelo SER, conforme a Figura 2.4.

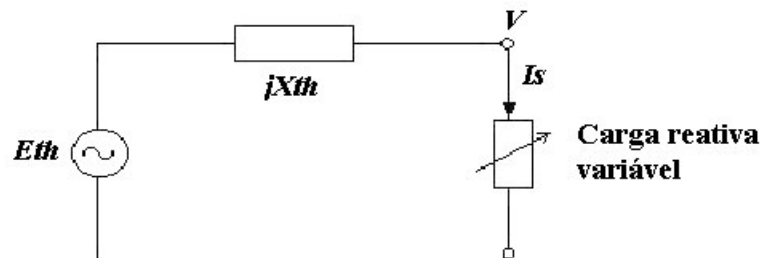


Figura 2.4 – Circuito Equivalente de Thevenin para o Sistema Elétrico

A curva apresentada na Figura 2.5 apresenta a relação Corrente x Tensão do sistema elétrico a qual é dada pela Equação 2.2.

$$V = E_{th} - X_{th} I_s \quad (2.2)$$

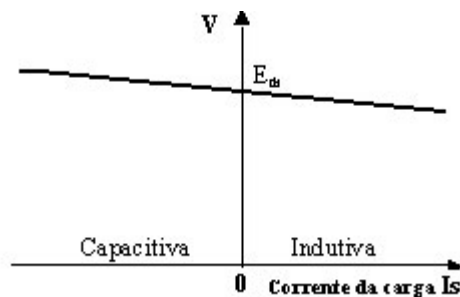


Figura 2.5 – Característica V/I do Sistema Elétrico

O processo de interação entre o sistema elétrico e o SER, pode ser explicado simplificadamente a partir da Figura 2.6, que apresenta as curvas V/I características do sistema para três diferentes valores de tensão e do SER. A curva A representa o sistema operando em suas condições nominais, o ponto de operação do sistema é o ponto de interseção com a curva do SER, onde se observa que a corrente I_s é nula e a tensão $V=V_0$. Em caso de aumento, por algum motivo, da tensão do sistema, a curva V/I do sistema passaria a ser a curva B e na ausência do SER o sistema ficaria com tensão igual a V_1 , no entanto, com o SER o novo ponto de interseção entre as curvas é o ponto B, onde a tensão seria igual a V_3 , ou seja, teria uma menor elevação. O processo seria similar em caso de redução da tensão do sistema, onde a nova curva V/I seria representada pela curva C.

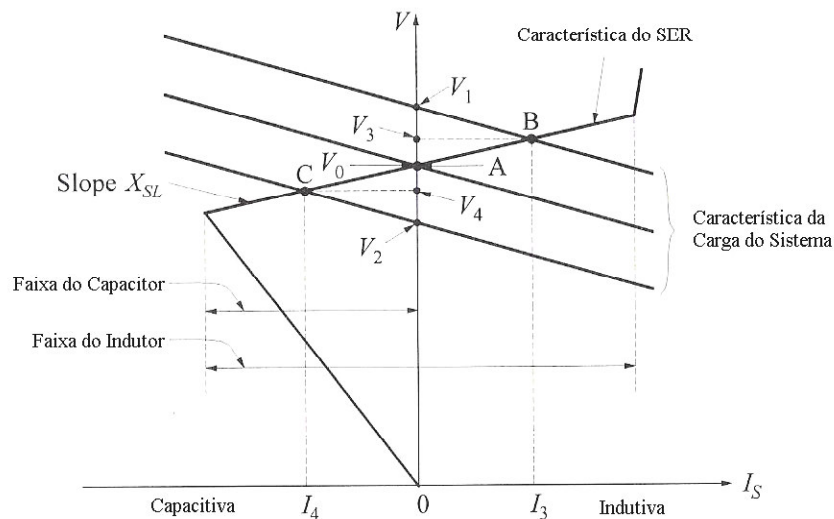


Figura 2.6 – Curvas V/I Características do SER e do Sistema Elétrico

Ao contrário do Compensador Síncrono, o Compensador Estático de Reativo não é uma fonte de tensão, ele funciona como uma carga reativa que é ajustada para manter a tensão CA praticamente constante. Esta ação sobre a tensão do sistema é realizada através da variação da corrente reativa que é injetada no sistema ou recebida do mesmo. Comumente, o princípio de controle do SER é o de susceptância ajustável, que será visto mais detalhadamente adiante.

2.4- Principais Tipos de CERs

De uma maneira abrangente, podem ser classificados como Compensadores Estáticos de Reativo, de acordo com a definição apresentada no item 2.1, os seguintes equipamentos:

2.4.1- Capacitores fixos

São os compensadores mais simples e econômicos. Ficam permanentemente conectados ao sistema fornecendo potência reativa. São utilizados principalmente para correção de fator de potência ou associados a compensadores variáveis [29].

2.4.2- Reatores fixos

Ficam permanentemente conectados ao sistema absorvendo potência reativa. São menos utilizados que os capacitores e são indicados para eliminação do *efeito ferranti* em linhas de transmissão [29].

2.4.3- Compensadores com Chaveamento mecânico [29]

São bancos de capacitores ou reatores conectados em paralelo ao sistema através de disjuntores que operam abertos ou fechados conforme a necessidade do sistema elétrico de potência ao qual estão conectados.

Algumas das desvantagens destes compensadores são: o longo tempo de resposta e a impossibilidade de uma variação contínua da potência reativa fornecida/absorvida. Em algumas situações pode não ser possível gerar/absorver toda a solicitação de potência reativa e em outras, a geração/absorção pode ser superior à necessária, como se verifica na Figura 2.7.

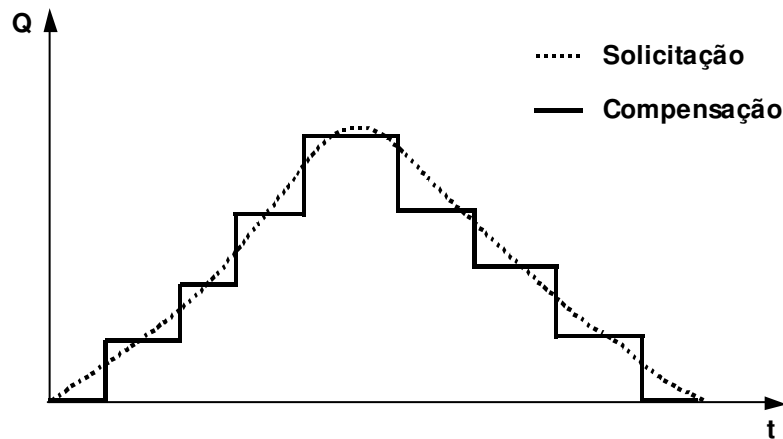


Figura 2.7 – Variação da compensação com chaveamento mecânico e da solicitação de potência reativa pelo sistema ao longo do tempo [29]

2.4.4- Capacitores Chaveados por Tiristores (CCT)

Este tipo de compensador estático consiste em um banco de capacitores dividido em uma determinada quantidade de unidades dimensionadas adequadamente. Cada uma dessas unidades é chaveada individualmente por válvulas tiristorizadas.

A Figura 2.8 apresenta o esquema típico de um CCT. Neste esquema observa-se que cada unidade do banco é formada pela conexão em série de um pequeno reator, uma válvula tiristorizada bidirecional e um capacitor. O reator tem por finalidade limitar os transitórios provocados pelos chaveamentos em virtude de possíveis diferenças entre a tensão do sistema e a tensão no capacitor, amortecer correntes de “inrush”, bem como prevenir o surgimento de ressonância com o sistema.

Em geral, a válvula tiristorizada é colocada entre o reator e o capacitor, a fim de que a corrente através da mesma seja limitada no caso de ocorrência de um curto-circuito no capacitor [29].

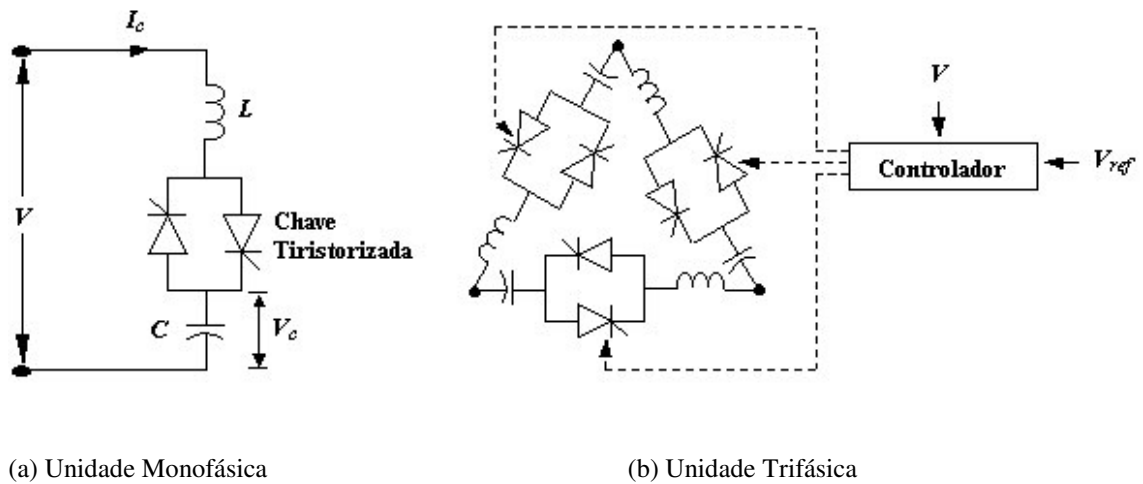


Figura 2.8 Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT)

O chaveamento dos capacitores provoca transitórios que podem ser grandes ou pequenos, dependendo da frequência de ressonância dos capacitores com o sistema externo. O controle de disparo dos tiristores deve então ser ajustado de forma a minimizar estes transitórios.

O momento ideal, ilustrado na Figura 2.9, para inserção do capacitor é quando a tensão do sistema V é igual à tensão residual do capacitor V_c , ou seja, quando a tensão sobre a válvula tiristorizada é zero. No instante t_1 , o conjunto de tiristores que conduz no semiciclo positivo de corrente é disparado, e conduz até o tempo t_2 , quando o outro grupo de tiristores recebe o sinal de disparo. Em geral, o acionamento é feito por um trem de pulsos. Quando o controle detecta que o banco de capacitor deve ser desligado do sistema, então o trem de pulsos é cessado e a válvula tiristorizada conduzirá até que a corrente se torne inferior à corrente mínima de condução. A válvula é então desligada e o capacitor permanece carregado [29].

Se a válvula tiristorizada for religada quando a tensão residual do capacitor V_c for menor ou maior do que a tensão do sistema V , surgirão correntes transitórias até que as duas tensões se igualem.

O princípio de controle da susceptância usado em um CCT é conhecido como

Controle de Ciclo Integral. A susceptância é dividida entre várias unidades paralelas e é variada controlando o número de unidades em condução. Uma mudança pode ser feita a cada meio-ciclo, sem a geração de harmônicos [30].

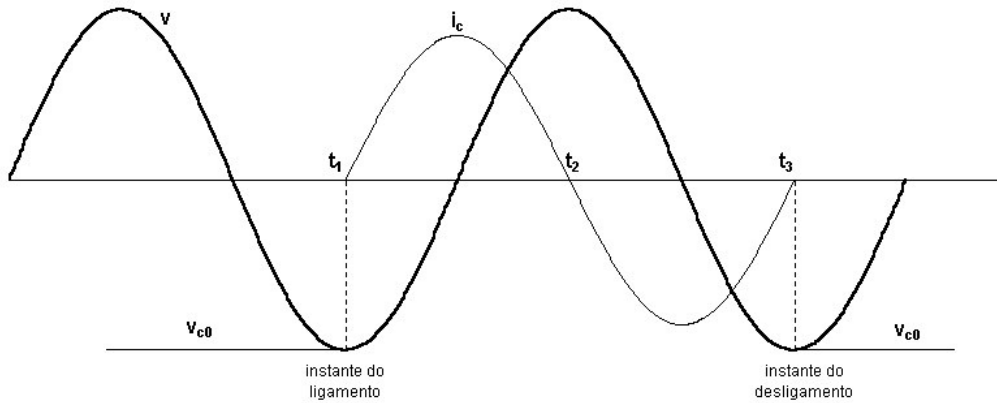


Figura 2.9 – Situação ideal para operação do CCT

A Figura 2.10 mostra o esquema básico de um CCT conectado a um sistema. Quando a tensão da barra controlada se torna diferente da tensão de referência e fica fora da banda morta, o controle insere ou retira a quantidade de bancos de capacitores necessária para que a tensão retorne a um valor interno à banda morta.

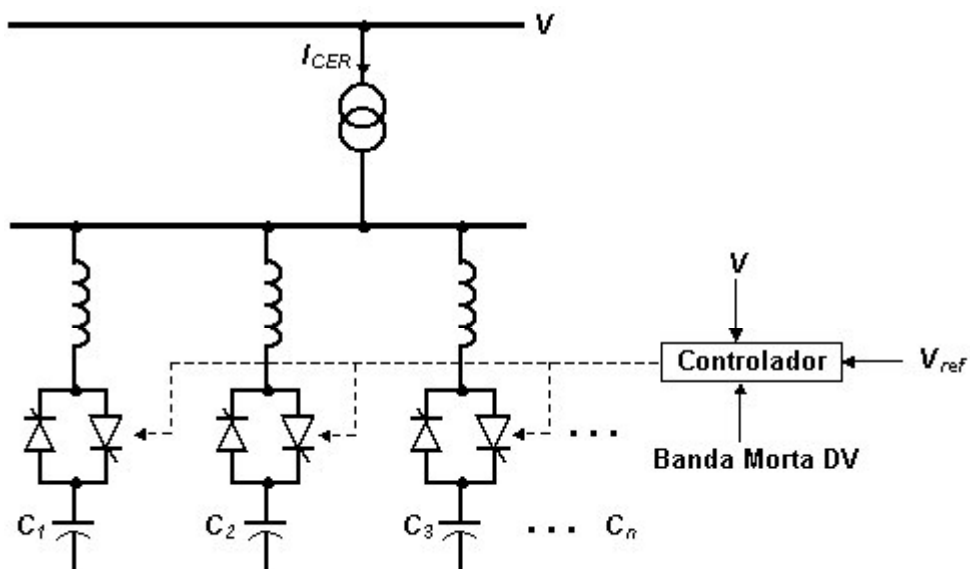


Figura 2.10 – Esquema de um CCT

Apesar de seu arranjo ser teoricamente simples, o CCT vem sendo menos utilizado devido às seguintes desvantagens [29]:

- A compensação reativa é descontínua;
- Cada banco de capacitores requer uma chave tiristorizada, o que pode ser antieconômico para sistemas que necessitam de ajuste fino de reativo;
- A tensão através dos tiristores que não estão conduzindo pode chegar até o dobro do valor de pico da tensão de linha.

(a) Desempenho Dinâmico

O controle de tensão permitido pelo CCT é descontínuo e depende da capacidade e do número de unidades conectadas em paralelo, como se verifica na sua característica V/I apresentada na Figura 2.11.

A característica V/I do sistema intercepta a característica do CCT em pontos discretos. O controle atua de forma a manter a tensão da barra controlada dentro da faixa $V_{ref} \pm DV/2$.

Quando o sistema está operando de forma que a sua característica V/I seja dada pela curva S_1 , o capacitor C_1 é chaveado e o ponto **A** passa a ser o ponto de operação. Se por algum motivo, a curva característica do sistema passa a ser a curva S_2 , apenas o capacitor não é suficiente para manter a tensão da barra dentro da faixa DV , como se verifica no ponto de operação **B**. O controle então promove a inserção do capacitor C_2 , com o qual obtém-se o novo ponto de operação **C** cuja tensão está dentro da faixa DV , como desejado.

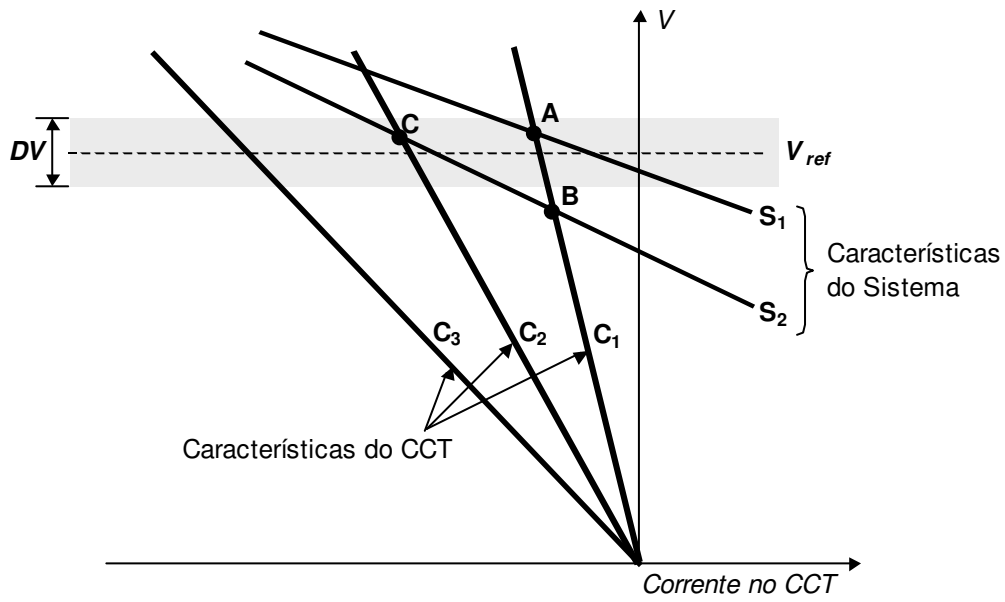


Figura 2.11 – Características V/I de um CCT e do Sistema de Potência

2.4.5- Reatores Controlados a Tiristores (RCT)

Os elementos básicos de um reator controlado a tiristor (RCT) são: um reator em série com uma chave tiristorizada bidirecional, como mostra a Figura 2.12.

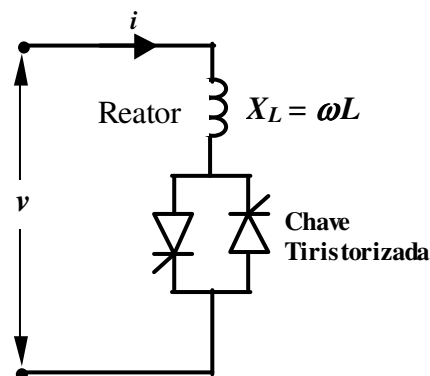


Figura 2.12 – Elementos básicos do RCT

Cada tiristor conduz alternadamente a cada meio ciclo da frequência fornecida, conforme o ângulo de disparo (α), o qual é medido a partir do momento em que a

tensão v é zero. Os tiristores são disparados quando apresentam tensão máxima, o que ocorre para $\alpha=90^\circ$, desta maneira obtém-se condução completa e a corrente é essencialmente senoidal e reativa. Para ângulos de disparo entre 90° e 180° obtém-se condução parcial. A Figura 2.13 , mostra as formas de onda da corrente para três diferentes valores de α . O aumento do valor do ângulo de disparo reduz a componente harmônica fundamental da corrente, o que equivale a aumentar a indutância efetiva do reator, reduzindo a potência reativa e a corrente. Desta forma, o reator controlado a tiristor é uma susceptância controlável. Ângulos de disparo entre 0° e 90° não são permitidos por produzirem correntes assimétricas com uma componente CC.

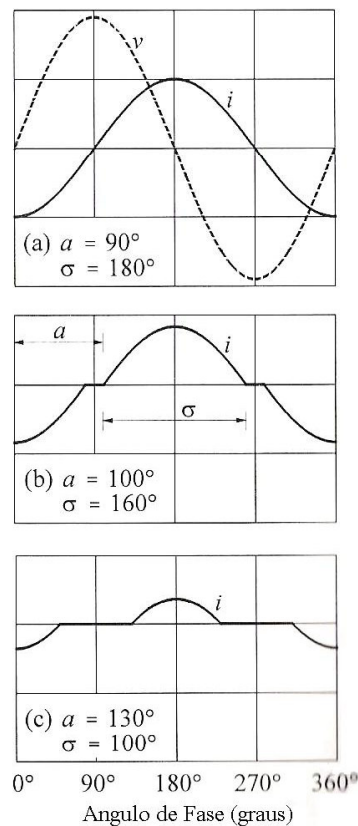


Figura 2.13 – Formas de Onda da Corrente em um RCT

A corrente instantânea i é dada pela Equação 2.3 a seguir:

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t), & \text{para } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0, & \text{para } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (2.3)$$

Onde V é a tensão eficaz, X_L é a reatância (em ohms) do reator à frequência fundamental, σ é o ângulo de condução que pode ser escrito em função de α , conforme a Equação 2.4.

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (2.4)$$

A componente fundamental da corrente obtida através da análise de Fourier é dada por:

$$I_1 = B_L(\sigma) \cdot V \quad (2.5)$$

Onde $B_L(\sigma)$ é uma susceptância à frequência fundamental ajustável, controlada pelo ângulo de condução de acordo com a Equação 2.6.

$$B_L(\sigma) = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \text{sen } \sigma}{\pi \cdot X_L} \quad (2.6)$$

Este princípio de controle da susceptância é chamado de controle de fase. A variação da susceptância é contínua e regular. Esta lei de controle do RCT elementar é apresentada na Figura 2.14.

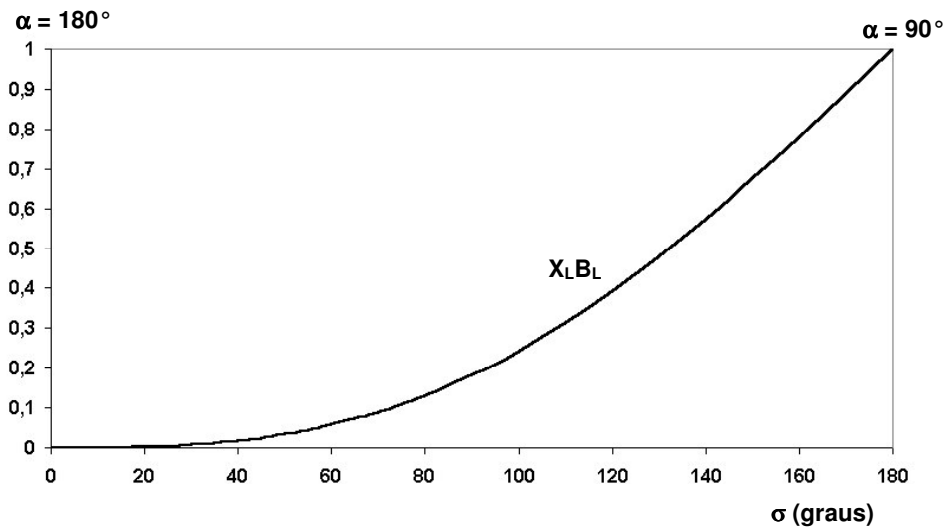


Figura 2.14 – Lei de Controle do RCT Elementar

O RCT necessita de um controle que determine o instante de disparo dos tiristores (α), medido a partir do último zero de tensão. Este controle pode usar como referência um valor absoluto de susceptância desejado ou um sinal de erro, como desvio de tensão, sinal de um estabilizador auxiliar, etc. Independente da referência utilizada pelo controle, a curva V/I de regime permanente característica é conforme a Figura 2.15. A característica de controle de tensão do RCT pode ser entendida para região capacitiva através da associação em paralelo de bancos de capacitores fixos ou chaveados.

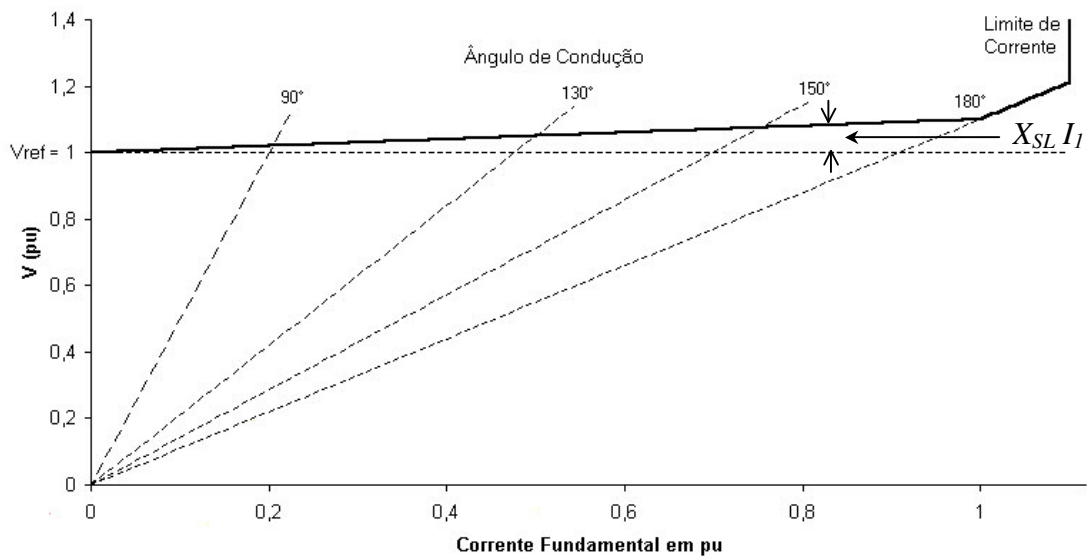


Figura 2.15 – Característica Fundamental Tensão-Corrente do RCT

O aumento do ângulo de disparo α a partir de 90° até 180° , torna a forma de onda da corrente menos senoidal e, portanto gera mais harmônicos. Para o RCT monofásico analisado anteriormente, se os ângulos de disparo forem balanceados (iguais para ambos os tiristores), apenas harmônicos de ordem ímpar são gerados.

O arranjo preferencial para sistemas trifásicos é apresentado na Figura 2.16, onde se tem três RCTs conectados em delta. Desta forma, para sistemas balanceados, todos os harmônicos triplos, circulam no interior do delta fechado e não são transferidos para as correntes de linha. Os demais harmônicos estão presentes na corrente de linha e são utilizados filtros.

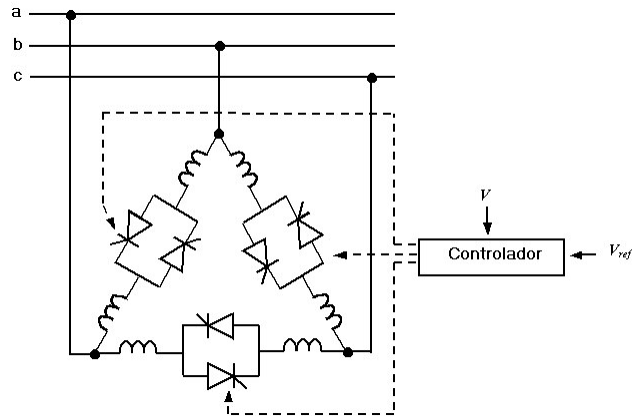


Figura 2.16 – RCT de 6 pulsos

Os harmônicos de ordem 5 e 7, podem ser eliminados utilizando-se dois RCTs de 6 pulsos de mesmo valor nominal, alimentados a partir de dois enrolamentos secundários e transformadores abaixadores, um conectado em Y e outro em Δ , como apresenta a Figura 2.17. Desta forma as tensões aplicadas sobre os RCTs ficam defasadas de 30° , eliminando o 5º e o 7º harmônico da corrente de linha primária. Este tipo de arranjo é chamado de 12 pulsos, devido à existência de 12 disparos de tiristores a cada meio ciclo da tensão de linha trifásica. Com este arranjo, os harmônicos característicos de ordem mais baixa são os 11º e 13º, que podem ser filtrados com um simples banco de capacitores.

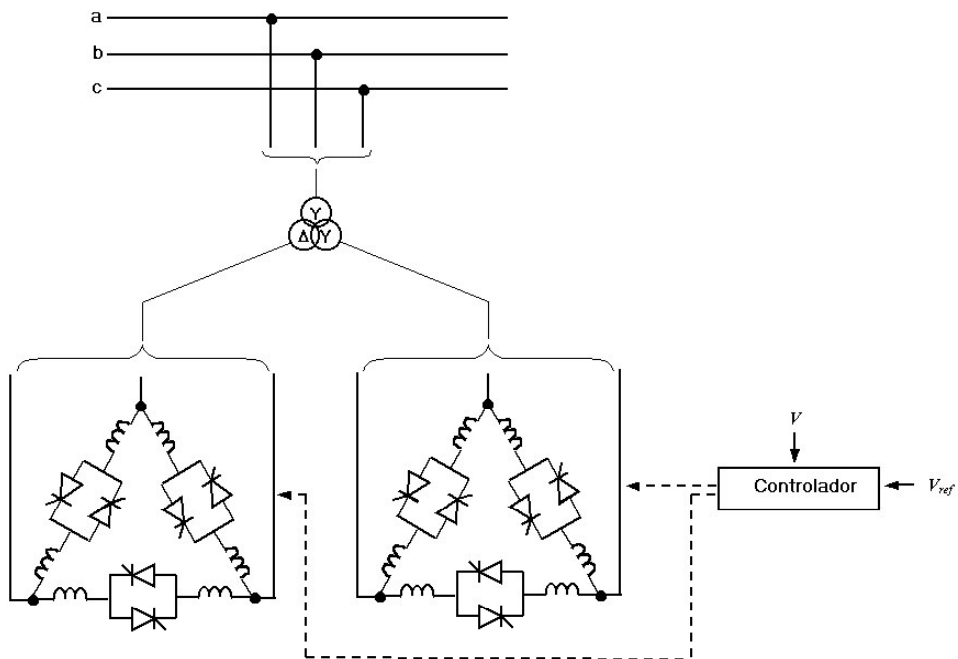


Figura 2.17 – RCT de 12 pulsos

O RCT tem um tempo de resposta entre 5 e 10ms, no entanto, atrasos são introduzidos pelos circuitos de medição e controle. A taxa de resposta deve ser limitada para garantir estabilidade em malha fechada. Por estes motivos, os tempos de resposta típicos se situam entre 1 e 5 ciclos da frequência de fornecimento.

2.4.6- Transformador Controlado a Tiristor (TCT)

O Transformador Controlado a Tiristor (TCT) é uma variante do Reator controlado a tiristor. A diferença consiste na substituição do transformador abaixador e do reator linear, por um transformador com elevada reatância de dispersão, além disso, seus enrolamentos secundários são curto-circuitados através de tiristores em antiparalelo. Uma abertura no núcleo é necessária para obter alta reatância de dispersão, que auxilia na proteção do transformador contra curto-circuitos durante faltas no secundário.

A variação da reatância equivalente do TCT é feita através do controle do chaveamento dos tiristores instalados no secundário, os quais podem estar conectados em Y ou Δ . A Figura 2.18 mostra alguns arranjos possíveis com o TCT.

Em um TCT, o transformador utilizado tem, em geral, característica de saturação mais linear do que um transformador comum. Isso agrega ao TCT uma capacidade consideravelmente maior de suportar sobrecargas do que o RCT tradicional, cujos reatores possuem núcleos de ar.

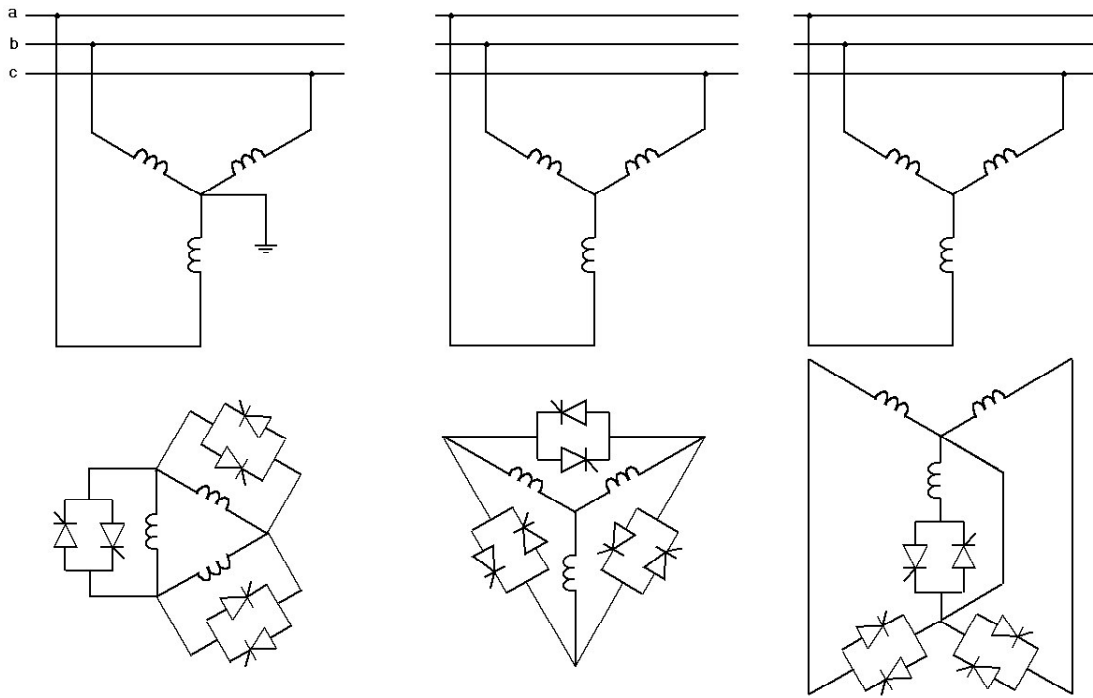


Figura 2.18 – Arranjos usados para o TCT [3]

2.4.7- RCT com capacitores em paralelo (fixos e chaveados)

Um RCT tem a capacidade apenas de absorver potência reativa, mas em algumas aplicações pode ser desejável maior flexibilidade, ou seja, que o compensador além de absorver também possa fornecer potência reativa ao sistema ao qual está conectado. Isto pode ser obtido através da instalação de capacitores fixos ou chaveados (mecanicamente ou por tiristores) em paralelo com o RCT.

A Figura 2.19 apresenta o efeito da instalação de capacitores fixos em paralelo ao RCT. Para operação com potência reativa nula, o RCT deve absorver toda a potência reativa gerada pelos capacitores. Aumento do fornecimento de potência reativa para o sistema é obtido aumentando-se o valor do ângulo de disparo dos tiristores, pois desta forma o reator absorve menor quantidade de reativo e os capacitores injetam mais potência reativa.

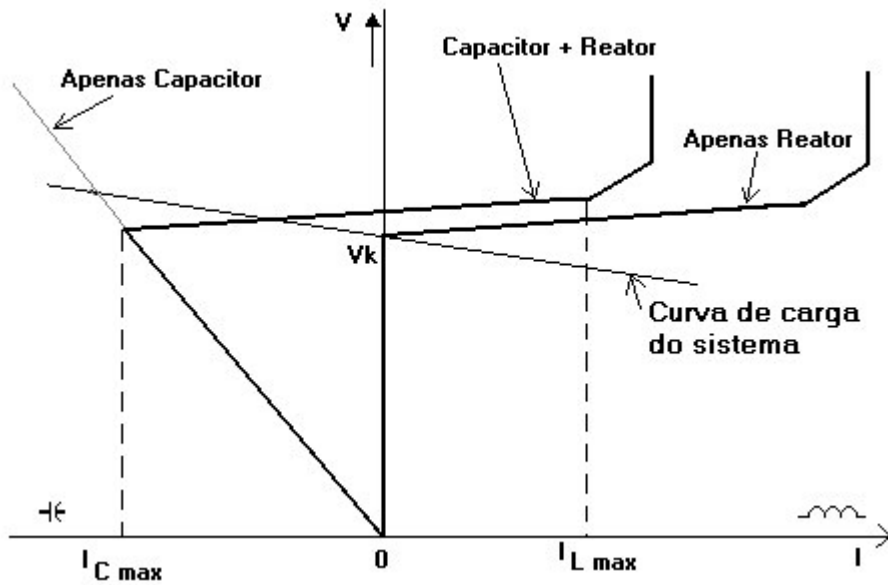


Figura 2.19 – Característica V/I de um RCT com capacitores fixos

A Figura 2.20 apresenta o arranjo mais flexível possível com um RCT e capacitores fixos, chaveados mecanicamente e chaveados por tiristores. Desta forma são possíveis diversas combinações dos equipamentos de compensação reativa. Maior flexibilidade ainda pode ser obtida, subdividindo-se os capacitores em bancos menores. Podem ser conectados reatores em série aos capacitores fixos, sintonizados para as frequências harmônicas geradas pelo RCT.

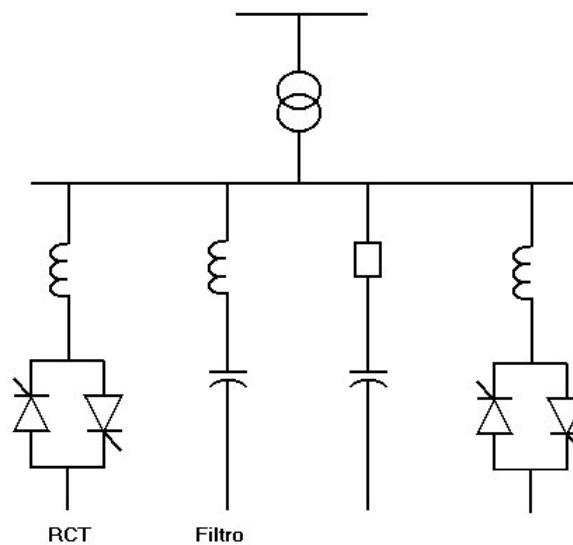


Figura 2.20 – Compensador estático combinado entre RCT e capacitores

A combinação do RCT e capacitores fixos perde em eficiência na situação em que a corrente resultante do arranjo é nula, pois nesse caso toda potência reativa produzida pelo RCT é absorvida pelos capacitores, sem qualquer função útil para o sistema. Se parte dos capacitores fixos forem substituídos por capacitores chaveados, a característica V/I passa a ser ajustada em degraus e o RCT pode ter sua potência reduzida em relação à característica apresentada na Figura 2.19.

Uma outra desvantagem da utilização de capacitores fixos é que na ocorrência de uma grande perturbação no sistema, onde a demanda de reativo ultrapassa a faixa de controle linear do compensador e ocorrem rápidas variações de tensão, o compensador é visto como um circuito LC e estabelecerá oscilações de potência com o sistema, as quais podem provocar elevados transitórios de tensão, principalmente se houver rejeição de carga, podendo ainda haver interferência no controle do compensador. A utilização de capacitores chaveados por tiristores (CCTs) com um RCT pode evitar as indesejáveis oscilações e conseqüentemente as elevadas tensões transitórias, tendo em vista que os capacitores podem ser chaveados rapidamente sem provocar distúrbio significativo ao sistema.

As perdas em um RCT com capacitor fixo aumentam conforme a corrente vai passando de capacitiva para indutiva e são significativas mesmo na condição de fornecimento nulo de reativo. No arranjo de RCT com CCT, nesta condição de 0Mvar, todos os capacitores e reatores podem ser desconectados do sistema e as perdas são mínimas. A Figura 2.21 mostra as perdas características para um RCT combinado com capacitores fixos ou com capacitores chaveados.

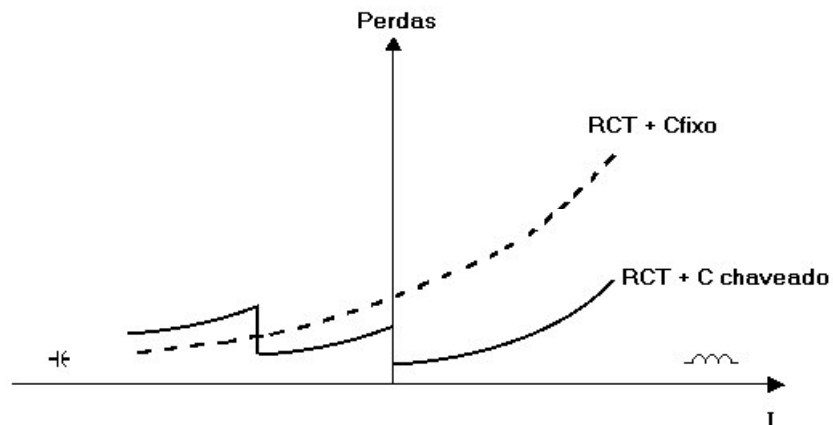


Figura 2.21 – Perdas características para RCT combinado com capacitores fixos e chaveados

Apesar das vantagens, é interessante manter pequenos capacitores fixos associados ao RCT, a fim de que funcionem como filtros para as correntes harmônicas produzidas pelo RCT.

Sintetizando, a combinação de RCT com CCT apresenta as seguintes vantagens:

- Controle contínuo;
- Baixos transitórios;
- Baixo conteúdo harmônico;
- Baixas perdas;
- Flexibilidade em operação.

A principal desvantagem do arranjo RCT + CCT é econômica, devido ao alto custo dos tiristores e o sofisticado controle envolvido com capacitores [31].

2.4.8- Reator Saturado

Este compensador estático não utiliza tiristores ou qualquer outro tipo de controle. Ele foi o primeiro compensador estático a ser desenvolvido e aplicado em sistemas de potência.

O reator saturado é do tipo não-linear e em condições normais, opera em sua faixa de saturação, mantendo desta forma a tensão do barramento em que se encontra dentro

de uma pequena faixa de operação.

É um reator multinúcleo, cujos enrolamentos são dispostos de forma a cancelar os principais harmônicos. Existem dois tipos de reatores saturados: twin-tripler e treble-tripler. O twin-tripler possui seis núcleos e cancela os harmônicos de corrente de ordem 3, 5, 7, 9, 15, 17, 19, 21, etc. O reator saturado do tipo treble-tripler possui nove núcleos e cancela os harmônicos de ordem 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15; 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, etc. Os harmônicos ímpares não cancelados de ambos os tipos de reatores saturados, são harmônicos característicos. O mais utilizado é o tipo treble-tripler, devido a sua capacidade adicional de cancelamento de harmônicos.

A Figura 2.22 apresenta o diagrama de um reator treble-tripler. Os ampéres-espiras dos nove núcleos ficam defasados de 20°. Cada núcleo é mantido saturado durante a maior parte do ciclo. Quando um núcleo se torna saturado, pulsos de tensão são induzidos nos enrolamentos do núcleo constituindo em cada fase uma força eletromotriz de amplitude constante em fase com a tensão aplicada. A reatância dos núcleos saturados remanescentes equivale à reatância interna do reator saturado. Desta forma, o reator saturado pode ser considerado como uma fonte de tensão constante atrás da reatância interna quando a tensão aplicada excede seu nível de saturação ou tensão nominal.

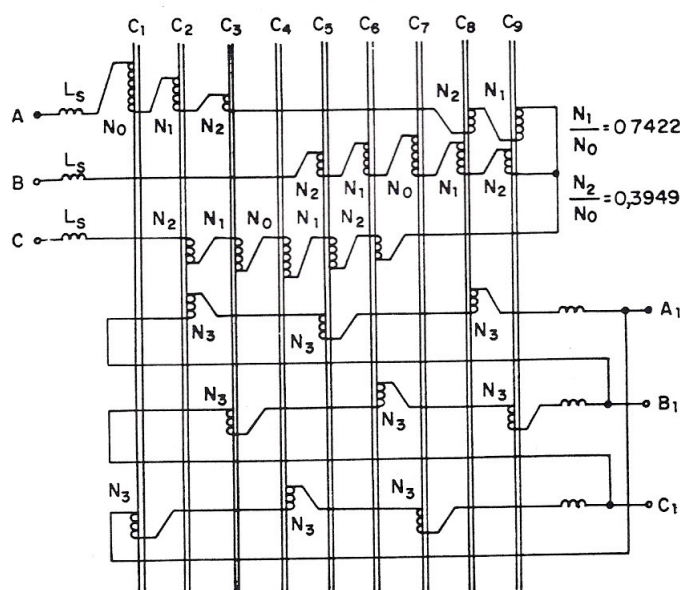


Figura 2.22 – Esquema do reator Treble-Tripler

Tendo em vista que o chaveamento magnético é relativamente rápido, os pulsos induzidos são pronunciados e, portanto, os harmônicos não compensados são altos. Para extinguir estes harmônicos, são utilizados enrolamentos em malha fechada, mas como isso não é efetivo para toda faixa de operação do treble-tripler, são utilizados, em complementação, reatores com função de alisamento.

Fisicamente, o reator saturado é semelhante a um transformador convencional, com enrolamentos imersos em tanque de óleo. Já no aspecto construtivo, o material do núcleo apresenta as seguintes características principais:

- Efeito desprezível da histerese;
- Elevada permeabilidade magnética na região não-saturada;
- Baixa e praticamente constante permeabilidade magnética na região saturada.

Um CER de reator saturado consiste basicamente de um reator saturado e um banco de capacitores fixo. A característica V/I do reator saturado tem inclinação entre 8 e 15%, que é em geral corrigida por meio de um capacitor série, o qual requer um circuito de amortecimento em paralelo para que não ocorra ressonância com o sistema e que cancela a reatância do transformador de acoplamento. A configuração típica de um compensador estático utilizando reator saturado é mostrada na Figura 2.23. A característica V/I do compensador passa então a ter uma inclinação da ordem de 2 a 5%, como se vê na Figura 2.24.

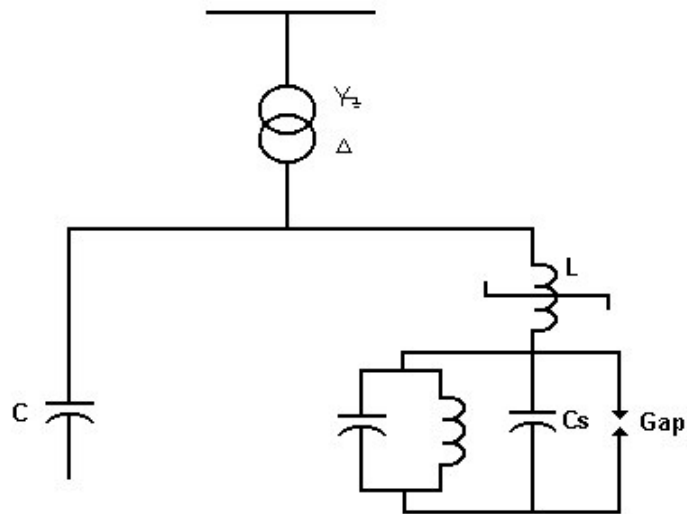


Figura 2.23 – Configuração típica de um compensador estático com reator saturado

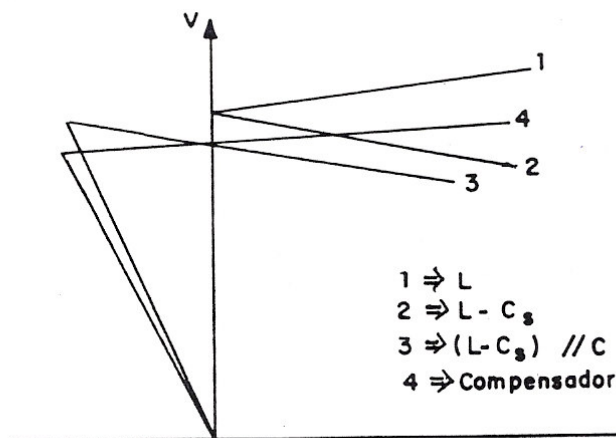


Figura 2.24 - Curva V/I do Compensador

A tensão de referência do compensador é definida pela tensão de saturação do reator saturado, mas pode ser alterada através da atuação de comutador de derivação em carga do transformador.

Este tipo de compensador tem rápido tempo de resposta, que pode, entretanto ser reduzido pelos circuitos amortecedores. O tempo de resposta total depende dos

parâmetros do sistema vistos pelo compensador.

O reator saturado é bastante eficiente para controlar sobretensões temporárias devido a sua capacidade de absorver reativo, até quatro vezes superior ao seu limite nominal. No entanto esta capacidade pode ser limitada pelos capacitores série que são protegidos por gaps em paralelo.

Assim como o RCT, o reator-saturado permite um controle contínuo, no entanto, as perdas são maiores do que no primeiro.

2.5- Modelagem de Compensadores Estáticos de Reativo para Estudos de Sistemas de Potência [10]

Atualmente, os Compensadores Estáticos de Reativo (CERs) são equipamentos amplamente utilizados para diversas aplicações de transmissão, principalmente para um rápido controle da tensão em pontos críticos do sistema. Tendo em vista a já freqüente utilização destes equipamentos, surge a importância de padronizar os modelos básicos de CERs pelas indústrias do setor elétrico. A representação adequada de um CER, com um nível mínimo de detalhamento, é necessária para que se obtenha nas simulações, o comportamento mais próximo do real. Vale ressaltar, que com os avanços na informática em termos de *hardware*, a representação detalhada de CERs é factível, sem perda de velocidade de processamento, precisão, etc.

Neste item serão apresentados modelos de representação de CERs à freqüência fundamental, para seqüência positiva, a serem implementados em programas de fluxo de potência e de estudos dinâmicos (autovalores, estabilidade transitória e dinâmica de longo termo). O estator do gerador e os elementos da rede são modelados em regime permanente senoidal.

O CIGRE [31,32] apresentou modelos para representação de CERs, entretanto, após a publicação destes modelos, já foi obtida experiência adicional em projetos e aplicações dos mesmos. Destaca-se o uso de controles microprocessados que permitem maior flexibilidade e novas funções.

2.5.1- Modelos para Estudos de Fluxo de Potência

Um estudo de fluxo de potência tem por objetivo determinar as tensões nodais, os fluxos de potências ativa e reativa nos diversos ramos do sistema, os valores de geração e as perdas. Para um estudo de fluxo de potência relacionado especificamente às aplicações de CERs, os objetivos são:

- Determinar a localização apropriada e a faixa preliminar do CER;
- Fornecer informação sobre os efeitos do CER sobre as tensões do sistema e fluxos de potência;
- Fornecer as condições iniciais para análise transitória do sistema.

Alguns programas de fluxo de potência não possuem modelos específicos para CER, os quais têm que ser modelados como barras PV (geradores) com limites de potência reativa, o que resulta em erros caso o CER esteja operando fora de sua faixa de controle, como capacitor ou indutor.

Em programas convencionais de fluxo de potência, um CER com regulador de susceptância pode ser representado por uma barra PQ (carga) com limites de tensão. O estatismo é representado conectando-se o CER a uma barra fictícia separada da barra de alta tensão do CER por uma reatância (em pu, na base do CER) igual ao estatismo. A barra fictícia é do tipo PV. Caso o transformador do CER seja representado, a reatância entra a barra de alta tensão e a barra auxiliar é uma parcela da reatância de dispersão do transformador; a barra de média tensão é do tipo PV com regulação da barra auxiliar. A Figura 2.25 mostra os conceitos para representação do estatismo do CER usando uma barra auxiliar.

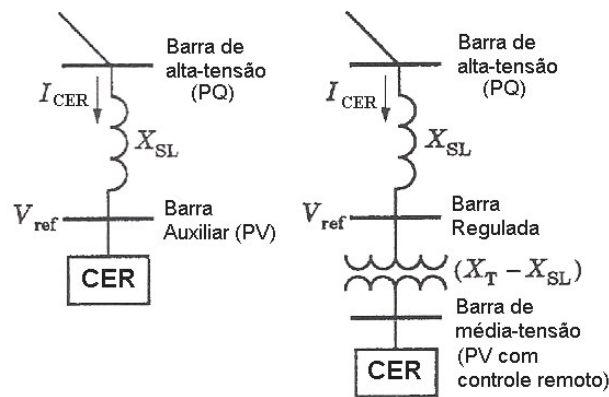


Figura 2.25 – Modelos de CERs com representação do estatismo usando barras PV.
(Modelos não recomendados para programas mais avançados)

Um modelo preciso pode ser implementado em um programa de fluxo de potência de diversas maneiras, dependendo da estrutura do programa, particularmente do modo como os dispositivos de controle são inseridos na matriz Jacobiana. Para CERs continuamente controlados (RCT-CF, RCT-CCT, RCT-CMC) não é necessária a representação explícita dos componentes individualmente.

Internamente à faixa de controle, o estatismo deve ser representado. Fora da faixa, a susceptância apropriada deve ser representada. O modelo deve ter uma interface com o programa de estudo dinâmico. O usuário deve especificar o estatismo desejado (pu, na base do CER), a faixa de controle, e os pontos de ajuste sem que seja necessária a utilização da barra auxiliar ou de uma reatância fictícia. Programas de fluxo de potência “compreensivos” requerem modelos descontínuos para RCT/CCT similares aos modelos para os compensadores contínuos.

No modo de regulação de tensão, a potência reativa de saída em regime permanente do CER depende do ajuste de tensão e da inclinação. Em caso de fluxo de potência, pode ser desejável especificar a potência reativa de saída, para que haja reserva dinâmica e para que as perdas do CER sejam minimizadas. Modelos de fluxo de potência devem ter provisão para o modo de regulação de potência reativa, com desligamento do modo de regulação de tensão, caso a tensão esteja fora da faixa.

O modelo de um sistema estático de reativo (SER) em um programa de fluxo de potência deve ter flexibilidade suficiente para permitir que o equipamento seja representado precisamente em vários instantes de tempo. Empresas do setor se utilizam de simulações de fluxo de potência para coordenação dos ajustes do CER, e ajustes de controle de tensão de CMC.

Os parâmetros necessários para os modelos básicos de CERs são:

- Faixa de potência reativa (capacitiva e indutiva) em pu na base da barra de alta tensão;
- Ajustes de tensão;
- Estatismo;
- Ajuste de potência reativa no lado de alta tensão;
- Banda morta de tensão para o modo de controle de potência reativa.

Parâmetros do SER representados em mais detalhes na barra de média tensão, incluem dados do transformador e dos CMCs ou dos RMCs da alta tensão a serem controlados. A faixa de potência reativa em pu na barra de média tensão é requerida.

2.5.2- Modelos básicos não-lineares para Simulação Dinâmica

Dois modelos básicos para programas de estabilidade transitória são recomendados como modelos industriais padrões. Estes modelos são baseados nos modelos CIGRE e demais referências. Modelos usados em vários programas em produção foram revisados. Módulos individuais de modelos básicos são construídos para modelos detalhados.

2.5.2.1 Modelos Básicos

Os modelos básicos 1 e 2 são bastante semelhantes, diferindo apenas no método de representação do estatismo, sendo o modelo 1 mais simples e similar aos modelos existentes em programas de estabilidade transitória. Ambos os modelos são adequados para CERs continuamente controlados e podem ser modificados para representar

compensadores do tipo CCT/RCT.

No modelo básico 1, apresentado na Figura 2.26, o regulador de velocidade é do tipo proporcional e o ganho K_r é o inverso do estatismo. Este modelo é freqüentemente utilizado em estudos preliminares.

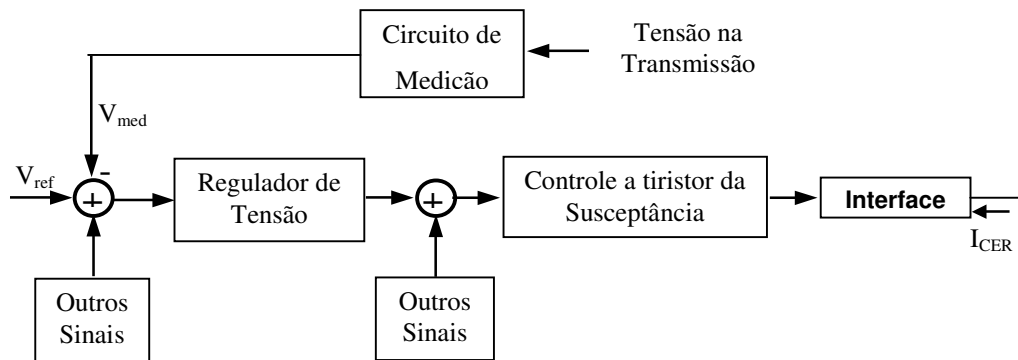


Figura 2.26 – Modelo Básico 1 – As funções de transferência para o circuito de medição e para o controle a tiristor da susceptância são normalmente unitárias.

No modelo básico 2, apresentado na Figura 2.27, o regulador de tensão é do tipo integral ou proporcional mais integral e o estatismo, K_{SL} , é representado através de uma realimentação de corrente. Os ajustes de ganho e de estatismo são independentes. Em alguns equipamentos, a corrente não é medida, mas sim a potência reativa. O controle permanente integral é o mais comum. O modelo básico 2 representa a estrutura física da maioria dos CERs instalados.

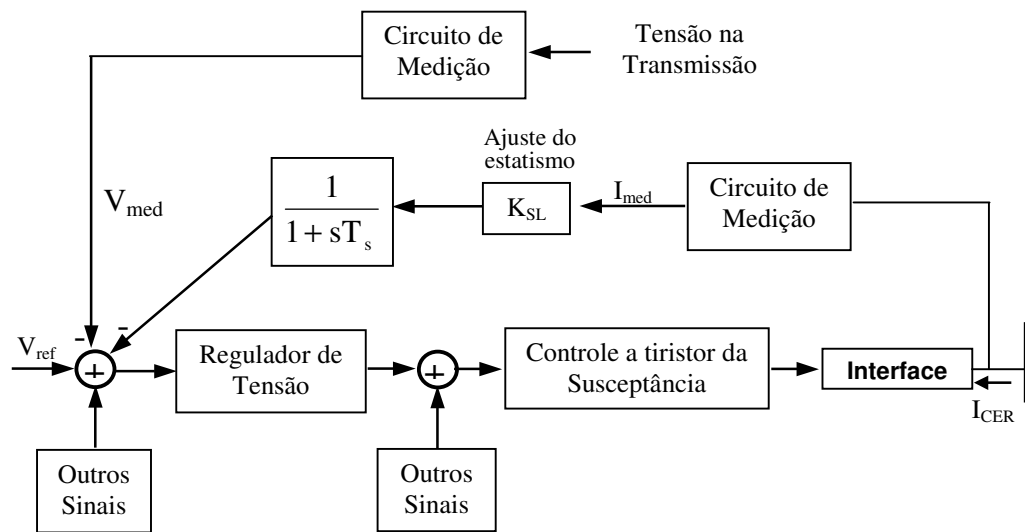


Figura 2.27 – Modelo básico 2 – As funções de transferência para os circuitos de medição e controle a tiristor da susceptância são normalmente unitárias

A principal diferença entre os modelos básicos 1 e 2 é no método de representação do estatismo. O modelo 1 fornece uma relação linear entre a tensão e a susceptância, enquanto que o modelo 2 fornece uma relação linear entre a tensão e a corrente, entretanto a diferença é pequena para tensões próximas a 1pu e para valores usuais de estatismo.

2.5.2.2 Módulos de Medição

Os módulos de medição convertem tensões e correntes trifásicas para um sinal de controle praticamente CC, que é proporcional à amplitude da componente de seqüência positiva e frequência fundamental da variável medida. Para simulação à frequência fundamental, o modelo é um filtro passa-baixa com constante de tempo, que depende do filtro utilizado, entre 1 e 8ms. Caso o sistema apresente alta ressonância próxima à frequência fundamental, filtros mais elaborados podem ser necessários para que a estabilidade do controle do CER seja mantida.

Os módulos de medição foram incluídos nas figuras 2.26 e 2.27, mas por terem pequenas constantes de tempo, não são considerados parte do modelo básico, podendo

não ser representados e podendo não ser compatíveis com os passos de integração geralmente usados em simulações de larga-escala.

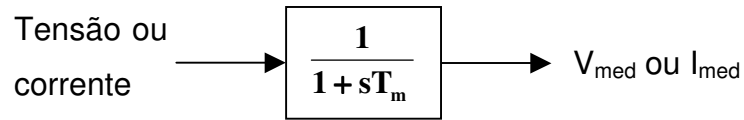


Figura 2.28 – Módulo de Medição

2.5.2.3 Módulo do Regulador de Tensão – Modelo Básico 1

A Figura 2.29 mostra o modelo do regulador de tensão do modelo básico 1. O ganho K_r é o recíproco do ajuste do estatismo e seu valor varia entre 20pu (5% de estatismo) e 100pu (1% de estatismo) na base do CER. A constante de tempo, T_r , normalmente varia entre 20 e 150ms. Os termos do lead-lag em geral são nulos, mas podem ser usados para adequar as margens de fase e de ganho quando se tem um elevado ganho de regime permanente.

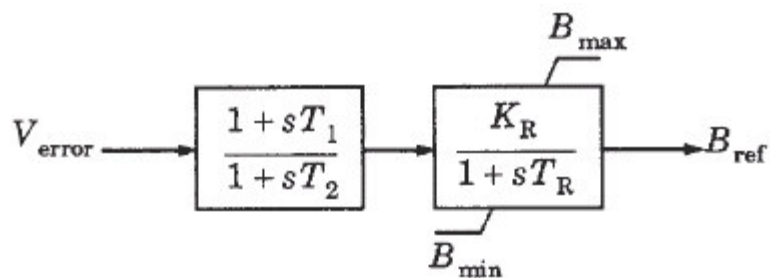


Figura 2.29 – Modelo do Regulador de Tensão do Modelo Básico 1

2.5.2.4 Módulo do Regulador de Tensão – Modelo Básico 2

A Figura 2.30 mostra o modelo de regulador de tensão do modelo básico 2. Neste modelo, o ganho proporcional quando usado, resulta em uma maior velocidade de

resposta. A constante de tempo T_p pode ser zero.

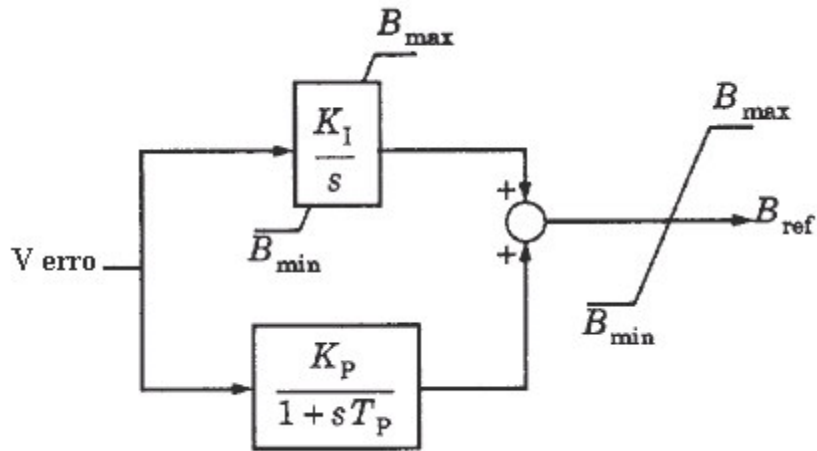


Figura 2.30 – Modelo do Regulador de Tensão do Modelo Básico 2

2.5.2.5 Módulo de controle a tiristor da susceptância

A Figura 2.31 mostra o modelo CIGRE para atrasos associados a disparo dos tiristores. T_d é o atraso de transporte com valor em torno de 1ms e T_b representa o efeito do controle da seqüência de disparo do tiristor e tem valor entre 3 e 6ms.

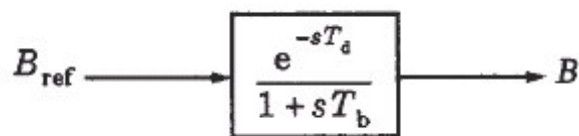


Figura 2.31 – Modelo do Controle de Susceptância a Tiristor

Esta função de transferência é incluída para complementação. É uma representação aproximada do sistema de controle e restrições físicas no momento em que a válvula é disparada podem ser feitas. Isto ilustra que o controle do CER tem características que quando combinadas com variações da capacidade de curto-circuito do sistema pode levar à instabilidade do controle.

Desde que a largura da banda de um programa de estabilidade é limitada, o controle a tiristor da susceptância normalmente não é representado.

As relações não lineares entre B_{ref} e o ângulo de disparo do RCT são compensadas por uma função de linearização do controle a tiristor da susceptância. Como o ângulo de disparo não é representado explicitamente nos modelos à frequência fundamental, a função de linearização não é representada explicitamente.

2.5.2.6 CERs do tipo CCT e RCT

O módulo de controle a tiristor da susceptância pode ser modificado para representar descontinuidades provocadas por chaveamentos de CERs do tipo CCT e RCT. Um modelo alternativo para a descontinuidade provocada pelo chaveamento é a aplicação de uma banda morta na frente do regulador de velocidade.

2.5.2.7 Módulo de interface com a rede

A interface do CER com a rede pode ser feita de duas maneiras: A susceptância variável B , pode ser utilizada para atualizar a matriz de admitância ou a susceptância pode ser multiplicada pela tensão para obter-se a corrente. A corrente do CER é uma injeção dentro da rede. A escolha por um dos métodos depende do método de solução da rede.

2.5.2.8 Relação entre parâmetros dos dois modelos básicos

Fazendo-se algumas simplificações ($T_m=T_1=T_2=T_p=T_d=T_s=K_p=0$), obtêm-se as seguintes equivalências entre os dois modelos: $K_R=1/K_{SL}$ e $T_R=1/(K_{SL}K_I)$.

2.5.2.9 *Dados para modelos básicos*

O ajuste mínimo de dados mínimo inclui:

1. Q_{\max} (indutivo) em Mvar para tensão igual a 1pu do lado de alta tensão. Este dado pode estar disponível a partir dos dados de fluxo de potência.
2. Q_{\min} (capacitivo) em Mvar para tensão igual a 1pu do lado de alta tensão. Este dado pode estar disponível a partir dos dados de fluxo de potência.
3. Base Mvar do CER: Em alguns casos, este dado é fornecido pelo fabricante como a faixa do RCT ou CCT ao invés da faixa total do CER.
4. Parâmetros do Regulador de Tensão: Para o modelo básico 1: K_R , K_p e T_p . Outros parâmetros são somente necessários se a estabilidade da malha de controle será estudada, o que é feito com modelos mais completos usando EMTP, TNA ou programas de análise de autovalores ou domínio da frequência.

2.5.3- Modelos Dinâmicos para outras Funções

Modelos Modulares para outras funções podem ter interfaces com os modelos básicos. Embora alguns modelos não devam ser incluídos em programas de simulação, o engenheiro deve estar atento aos mesmos. Alguns modelos podem ser mais importantes para simulações no EMTP do que para simulações à frequência fundamental. Alguns modelos são necessários apenas para simulações dinâmicas de longo termo.

2.5.3.1 *Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas*

As primeiras implementações seguiam o método do SAE de adicionar um sinal suplementar contínuo à entrada do regulador de tensão, estrutura que ainda é utilizada em algumas instalações novas.

Outra abordagem é adicionar um sinal de amortecimento descontínuo à saída o regulador de tensão. Uma lógica especial é utilizada para selecionar o modo de controle.

Para suporte de amortecimento após uma grande perturbação, a saída do regulador de tensão é congelada.

Também é possível adicionar um sinal contínuo para pequenos sinais de amortecimento da saída do regulador de tensão.

Vários sinais de entrada locais ou remotos (com compensação de fase apropriada) podem ser usados para amortecimento. Dentre as possibilidades, existem a potência ou corrente de linha, frequência ou tensão de barra, resistência aparente e velocidade ou diferenças de frequência entre localizações remotas.

Nas figuras 2.26 e 2.27, as duas localizações possíveis para os sinais de amortecimento aparecem como “outros sinais”.

O modelo básico para amortecimento descontínuo é similar aos blocos análogos do SAE.

2.5.3.2 Regulador de Susceptância (Potência reativa)

Muitos CERs possuem uma provisão para regular potência reativa sujeita a restrições de tensão. Em geral, controle do tipo integral lento, que demora dezenas de segundos ou minutos para fazer a potência reativa retornar ao valor pré-ajustado. Esta função deve ser modelada em estudos de controle de tensão, incluindo estudos de coordenação de potência reativa. O sinal é uma entrada no regulador de tensão. A Figura 2.32 mostra a estrutura geral e o modelo do regulador de susceptância. A susceptância é regulada para um valor B_{set} . Os limites do regulador de susceptância fornecem a zona morta de tensão. A saída do regulador de susceptância é algumas vezes congelada quando da ocorrência de uma grande perturbação a fim de permitir controle completo de tensão durante a recomposição do sistema.

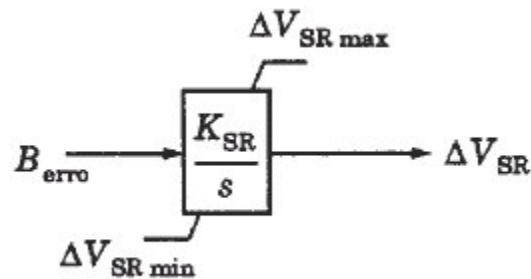


Figura 2.32 – Regulador de Susceptância

2.5.3.3 Controle de Capacitores e Reatores Chaveados Mecanicamente e Transformadores com mudança automática de tap

Em sistemas estáticos de reativo (SERs), equipamentos (reatores e/ou capacitores) mecanicamente chaveados são controlados.

Uma aproximação para aplicação em estabilidade transitória é chavear imediatamente os capacitores disponíveis após a detecção de um curto-circuito e usar um reator controlado a tiristor com capacidade de sobrecarga para regular a tensão. Os capacitores chaveados mecanicamente são desligados, conforme requerido, algumas dezenas de segundos após a energização. Este tipo de SER pode ser modelado usando um dos modelos básicos de CER.

Outra aplicação é o chaveamento do número apropriado de capacitores e reatores chaveados mecanicamente, de forma a fazer com que o CER recupere sua susceptância (potência reativa) ajustada. O controle é baseado na ordem de susceptância ou saída de potência reativa. Após uma perturbação, o chaveamento mecânico pode ser atrasado segundos ou dezenas de segundos de forma a permitir o religamento da LT ou outra ação de controle. O chaveamento normalmente ocorrerá antes da recomposição da carga pelos transformadores LTC ou reguladores de tensão da distribuição. Controle para desenergização rápida de capacitores chaveados mecanicamente pode ser fornecido para prevenir sobretensões temporárias. Um CER poderia controlar também a mudança de

tap em transformadores LTC.

2.5.3.4 Estratégias de subtensão

O controle previne temporariamente sobretensões posteriores à eliminação de curto-circuitos, particularmente de curto-circuitos trifásicos. O controle é importante em sistemas fracos onde a falta resulta em rejeição de carga. Para tensão abaixo de um valor ajustado (50 a 70% do valor normal), capacitores chaveados a tiristores (CCTs) podem ser bloqueados. A entrada do regulador de tensão pode ser congelada para prevenir uma saída capacitiva elevada após a eliminação da falta. Deve haver um atraso no desbloqueio do CCT após a recuperação da tensão para um valor superior a um segundo valor ajustado. O bloqueio de CCTs pode prevenir também a descarga de capacitores que conduz a elevados transitórios na reenergização.

Caso um modelo específico detalhado não seja usado, recomenda-se o uso de um modelo padrão simples. O modelo aproximado deve congelar a entrada e a saída do regulador de tensão sempre que a tensão cair a baixo de um valor especificado. O CER deve ser liberado quando a tensão retornar para um valor superior a um valor também especificado ou após um período de tempo.

Resposta para defeitos monofásicos pode não ser corretamente representada em programas de estabilidade típicos.

2.5.3.5 Limitador de sobrecorrente e sobrecarga de reatores controlados a tiristor (RCTs)

Para alta tensão, como em situações de rejeição de carga, a corrente do RCT é limitada, após um pequeno período de tempo.

Em alguns projetos (particularmente em conjunção com bancos de capacitores mecanicamente chaveados), a capacidade de sobrecarga de curta duração é muito importante.

2.5.3.6 Ganho supervisor e ganho otimizador

O ganho permitido para o CER está relacionado à capacidade de curto-circuito do sistema e da sua localização. Pode ocorrer instabilidade do CER caso o sistema seja enfraquecido por desligamentos. A frequência de estabilidade é em geral superior à faixa de simulações de estabilidade transitória.

Muitos CERs possuem controles que detectam oscilações e ajustam o ganho do regulador de tensão ou as constantes de tempo para melhorar o desempenho. A necessidade pode ser devida a requisitos para resposta rápida durante várias condições sistêmicas. Após redução automática do ganho, o mesmo pode ser elevado lentamente para um valor ótimo seguro. O CER pode avaliar o sistema de potência e monitorar a resposta a passos de potência reativa ou pulsos.

Em geral não é prático e nem necessário modelar estes controles em programas de estabilidade. O valor apropriado do ganho é, no entanto, importante. O engenheiro deve assegurar que os parâmetros e a resposta estejam apropriados para as condições estudadas.

Em alguns estudos é necessário variar o ganho em função do tempo. Os valores de ganho são determinados por simulações complementares no EMTP ou TNA nos quais o controle supervisor do ganho é propriamente modelado.

2.5.4- Modelos para Programas de Pequenas Perturbações

Para pequena perturbação ou estudos de autovalores, os modelos mencionados podem ser linearizados. Consideração especial é necessária para tipos descontínuos de CERs (CCT e RCT). Uma aproximação é executar uma simulação com o CER com saída fixa (CCT ou RCT interna a banda morta), e executar uma segunda simulação assumindo controle contínuo.

3 INFLUÊNCIA DO SUPORTE DE TENSÃO SOBRE A ESTABILIDADE DO SISTEMA

3.1- Conceitos de Estabilidade

3.1.1- Estabilidade Transitória

Este tipo de estabilidade está associado à resposta de um sistema elétrico de potência a uma grande perturbação. Para uma grande perturbação, o comportamento dinâmico do sistema elétrico não pode ser descrito por equações linearizadas, mas sim pelas equações diferenciais e algébricas não-lineares que representam cada componente do sistema (geradores e seus reguladores, motores, etc).

Um sistema elétrico de potência é considerado estável transitoriamente para uma determinada condição de operação, se após a ocorrência de uma grande perturbação (perda de montantes de geração ou carga, curto-circuito, abertura de linhas de transmissão importantes, etc), o sistema conseguir atingir uma condição operativa aceitável em regime permanente.

3.1.2- Estabilidade de Regime Permanente (ou Estabilidade a Pequenos Sinais ou Desvios)

Este tipo de estabilidade está associado à resposta de um sistema elétrico a pequenas perturbações. Entende-se por pequena perturbação aquela para a qual a resposta dinâmica do sistema pode ser obtida através de equações linearizadas. Na prática, os sistemas elétricos estão sujeitos continuamente a pequenas perturbações, dentre elas, variações de carga.

Um sistema elétrico de potência é considerado estável em regime permanente para uma determinada condição de operação, se após a ocorrência de uma pequena perturbação, o sistema conseguir recuperar uma condição operativa idêntica ou próxima à condição anterior à perturbação.

3.2- Influência do Suporte de Tensão sobre a Estabilidade Transitória [33]

A influência da aplicação de um suporte de potência reativa em um sistema sobre a estabilidade transitória de um sistema elétrico, será definida a partir do sistema equivalente simplificado constituído por um gerador ligado a uma barra infinita através e uma linha de transmissão puramente reativa, apresentado na Figura 3.1.

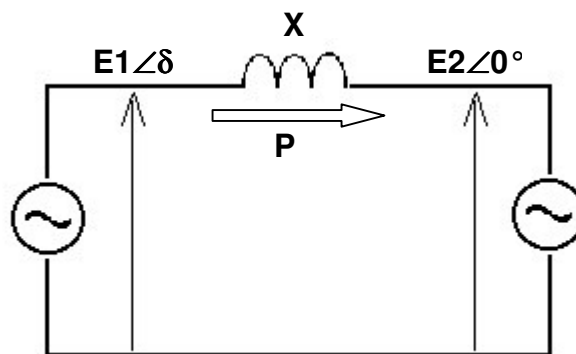


Figura 3.1 – Sistema Simplificado composto por um gerador, uma barra infinita ligado por meio de uma LT

Para o sistema da Figura 3.1, a potência transferida através da LT é definida pela

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{X} \cdot \sin \delta \quad (3.1)$$

Para a condição específica de tensão igual ao longo do sistema, ou seja $E_1 = E_2$, a potência máxima que pode ser transferida, é obtida quando o ângulo de defasagem δ é 90° , e vale:

$$P_{\max} = \frac{E_1 \cdot E_2}{X} \quad (3.2)$$

Considere-se agora o mesmo sistema com a aplicação de um equipamento de suporte de potência reativa para controle de tensão, em derivação, na LT entre o gerador e a barra infinita, conforme a Figura 3.2

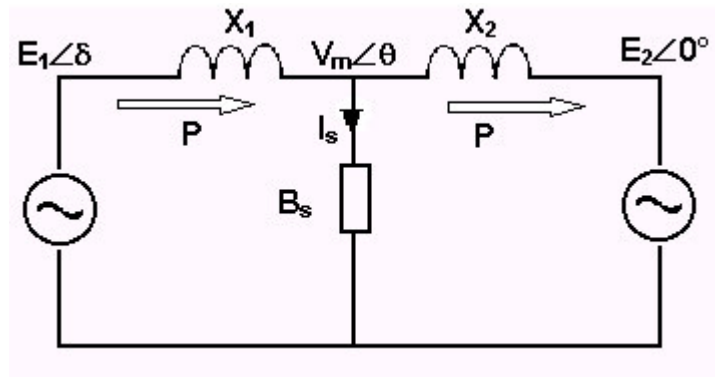


Figura 3.2 - Sistema Simplificado composto por um gerador, uma barra infinita ligado por meio de uma LT com suporte de potência reativa em derivação

Para o sistema elétrico apresentado na Figura 3.2, a potência ativa transferida através da LT poder ser expressa por qualquer uma das seguintes equações:

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{X_{eq}} \cdot \sin \delta \quad \text{ou,} \quad (3.3)$$

$$P = \frac{E_1 \cdot V_m}{X_1} \cdot \sin(\delta - \theta) \quad \text{ou,} \quad (3.4)$$

$$P = \frac{V_m \cdot E_2}{X_2} \cdot \sin \theta \quad (3.5)$$

A reatância equivalente X_{eq} pode ser determinada fazendo-se uma transformação estrela-triângulo, que leva a seguinte expressão:

$$X_{eq} = -X_1 \cdot X_2 \cdot B_s + X_1 + X_2 \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 indica que para uma mesma localização do suporte de tensão, qualquer variação da susceptância B_s , implica em variação da reatância equivalente a fim de manter V_m constante, e conseqüentemente em variação no valor da potência reativa transferida.

Para o sistema da Figura 3.2, são obtidas as seguintes relações:

$$\overline{V}_m = \frac{\overline{I}_s}{jB_s} \quad (3.7)$$

$$\overline{I}_s = \frac{jB_s}{X_{eq}} (\overline{E}_1 X_2 + \overline{E}_2 X_1) \quad (3.8)$$

$$\overline{V}_m = \frac{1}{X_{eq}} (\overline{E}_1 X_2 + \overline{E}_2 X_1) \quad (3.9)$$

$$\overline{V}_m = \frac{1}{X_{eq}} [(E_1 \cdot X_2 \cdot \cos \delta + E_2 \cdot X_1) + j(E_1 \cdot X_2 \cdot \sin \delta)] \quad (3.10)$$

A Equação 3.10 mostra que a tensão na barra de aplicação do suporte de reativo, é função da defasagem angular δ entre as tensões do gerador e da barra infinita, bem como da reatância equivalente X_{eq} . Desta forma, conclui-se qualitativamente, que distúrbios eletromecânicos que provoquem alteração na defasagem angular ($\Delta\delta$) são observáveis na tensão V_m dando origem à seguinte cadeia de ações:

$$\Delta\delta \Rightarrow \Delta V_m \Rightarrow \Delta B_s \Rightarrow \Delta P$$

Conforme desenvolvimento apresentado no Anexo I, o controle da tensão V_m origina uma parcela extra de potência sincronizante entre as fontes do sistema em questão. O valor do coeficiente de potência sincronizante é dado pela expressão a seguir:

$$K = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \delta_0}{X_{eq_0}} + \frac{X_1 \cdot X_2 \cdot P_{e0}^2}{X_{eq_0} \cdot V_{m0}^2} \quad (3.11)$$

$X_{eq_0} \rightarrow$ Reatância Equivalente Inicial

$\delta_0 \rightarrow$ Ângulo de defasagem inicial

$P_0 \rightarrow$ Potência elétrica inicial

$V_{m0} \rightarrow$ Tensão inicial no ponto intermediário

A primeira parcela da Equação 3.11 é o coeficiente de potência sincronizante quando não há controle de tensão, ou seja, X_{eq} é constante. A segunda parcela da mesma equação é referente ao controle de tensão aplicado pelo suporte de potência

reativa em derivação.

As análises qualitativas e quantitativas feitas anteriormente podem ser complementadas pela análise da resposta dinâmica dos sistemas elétricos apresentados na Figura 3.1 e na Figura 3.2, após a ocorrência da mesma perturbação. A Figura 3.3 apresenta as curvas de Potência x Ângulo para o sistema com e sem o suporte de tensão na LT.

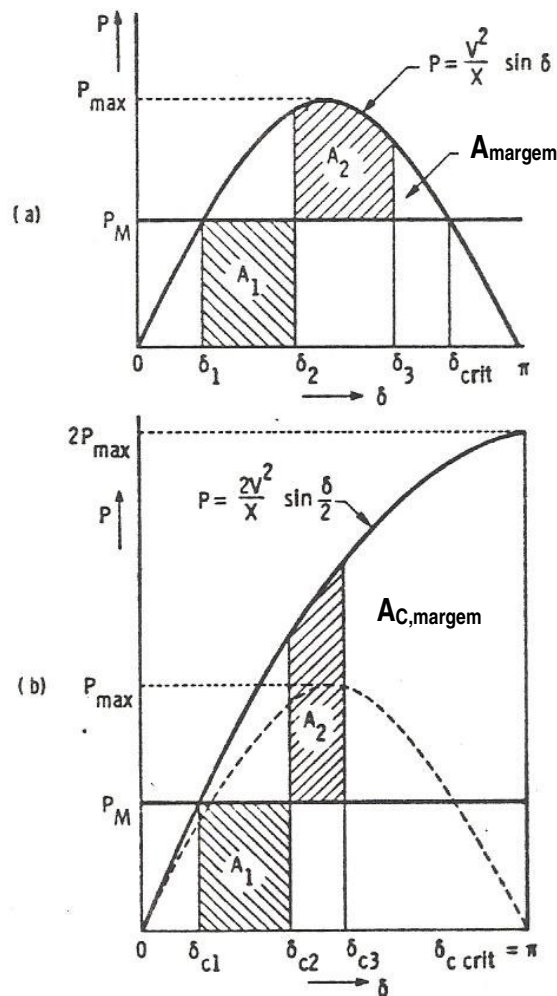


Figura 3.3 – Curva Potência x Ângulo

(a) Sem suporte de tensão e (b) Com suporte de tensão

Antes da ocorrência da perturbação, ambos os sistemas transmitiam a potência P_M com ângulos δ_1 e δ_{c1} , para os casos sem suporte de tensão e com suporte de tensão,

respectivamente. Durante o período de duração da falta, a potência elétrica transmitida se torna zero, porém a potência mecânica de entrada dos geradores permanece constante, o que provoca aceleração dos geradores com aumento dos ângulos δ_1 e δ_{c1} para δ_2 e δ_{c2} respectivamente, até o momento em que a falta é eliminada. As energias de aceleração são representadas pelas áreas A_1 e A_{c1} . Após a eliminação da falta, a potência elétrica transmitida é maior do que a potência mecânica de entrada o que provoca a desaceleração dos geradores. Entretanto, devido à energia cinética acumulada no rotor, os ângulos de defasagem continuam aumentando até que as energias de desaceleração definidas pelas áreas A_2 e A_{c2} se igualem às áreas A_1 e A_{c1} respectivamente.

O sistema será estável transitoriamente se os ângulos máximos atingidos δ_3 e δ_{c3} forem inferiores aos ângulos críticos δ_{crit} e δ_{ccr} respectivamente, pois a partir dos ângulos críticos, o rotor não é capaz de manter sua desaceleração.

A diferença entre o ângulo máximo e o ângulo crítico determina a margem de estabilidade transitória, ou seja, a energia de desaceleração ainda disponível representada pelas áreas A_{margem} e $A_{C,margem}$. A análise da Figura 3.3 comprova claramente que a utilização de suporte de tensão em derivação em um ponto intermediário do sistema, aumenta a margem de estabilidade transitória do sistema e conseqüentemente sua capacidade de transferência de potência, tendo em vista que no caso com suporte de tensão, a área $A_{C,margem}$ é maior do que a área A_{margem} do caso sem suporte.

A efetividade da aplicação de um equipamento de suporte de potência reativa em derivação no sistema depende do ponto em que o mesmo está localizado. Esta afirmação pode ser demonstrada fazendo-se uma análise da sensibilidade da reatância equivalente X_{eq} para variações da susceptância B_s , a partir da Equação 3.6.

$$\Delta X_{eq} = -X_1 \cdot X_2 \cdot \Delta B_s \quad (3.12)$$

$$S = \frac{\Delta X_{eq}}{\Delta B_s} = -X_1 \cdot X_2 \quad (3.13)$$

$$X_1 + X_2 = X \quad (3.14)$$

$$S = (X_1)^2 - X \cdot X_1 \quad (3.15)$$

$$S_{\max} \Rightarrow X_1 = X/2 \quad (3.16)$$

Onde S é o coeficiente de sensibilidade de Xeq em relação a B_s

Verificou-se que o coeficiente de sensibilidade S é máximo quando o suporte de potência reativa é aplicado no meio da linha de transmissão, indicando maior efetividade nesta situação.

Na Figura 3.3(b) observa-se que a potência máxima para o caso com suporte de tensão era o dobro do valor máximo de potência transferida no caso sem o suporte de tensão e que ocorre para um ângulo de defasagem δ igual a 180°. Este valor foi obtido para a situação particular em que a tensão era igual ao longo do sistema (E₁=E₂=V_m=E) e que o suporte estava colocado no meio da LT (X₁=X₂=X/2), desta forma, a potência transmitida é dada por:

$$P = \frac{2E^2}{X} \cdot \sin(\delta/2) = 2P_{\max} \cdot \sin(\delta/2) \quad (3.17)$$

Vale ressaltar que para obtenção de controle ilimitado de tensão, os valores nominais do equipamento para suporte de tensão seriam elevados e anti-econômicos, conforme demonstração a seguir:

$$X_{eq} = -X_1 \cdot X_2 \cdot B_s + X_1 + X_2 \quad (3.18)$$

$$X_1 = X_2 = X \quad e \quad E_1 = E_2 = V_m = E \quad (3.19)$$

$$X_{eq} = X \cdot \frac{X^2}{4} \cdot B_s \quad (3.20)$$

$$Q_C = B_s \cdot E^2 \quad (3.21)$$

$$X_{eq} = X \cdot \frac{X^2}{4} \cdot \frac{Q_C}{E^2} \quad (3.22)$$

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{X_{eq}} \cdot \sin \delta = \frac{E^2}{\left(X - \frac{X^2}{4} \cdot \frac{Q_C}{E^2} \right)} \quad \sin \delta = \frac{E^2 / X}{\left(1 - \frac{X}{E^2} \cdot \frac{Q_C}{4} \right)} \sin \delta \quad (3.23)$$

$$P = \frac{P_{max}}{\left(1 - \frac{Q_C}{4 \cdot P_{max}} \right)} \sin \delta \quad (3.24)$$

Da Equação 3.24, verifica-se que o controle ilimitado de tensão, é obtido para Q_C igual a $4 \cdot P_{max}$. Na prática, o suporte de reativo é definido baseado nas necessidades reais do sistema elétrico de transmissão, onde se permite que a tensão varie dentro de uma faixa especificada.

3.3- Influência do Suporte de Tensão sobre a Estabilidade de Regime Permanente

De acordo com o item 3.1.2, um sistema elétrico é dito estável em regime permanente quando após a ocorrência de uma pequena perturbação ele consegue retornar para uma condição operativa idêntica ou semelhante à condição anterior à perturbação. Isto só é possível quando o sistema apresenta amortecimento positivo das oscilações eletromecânicas, caso contrário, ocorrerão oscilações de tensão e potência sustentadas ou crescentes que poderão resultar em perda de sincronismo entre os geradores do sistema.

No item 3.2, foi visto que a aplicação de suporte de tensão em um sistema de potência é capaz de controlar a tensão em um barramento especificado e influenciar sua característica de transferência, será demonstrado neste item que com a utilização de controles apropriados, a aplicação de um equipamento para suporte de tensão pode também fornecer amortecimento para as oscilações.

Para as análises subseqüentes foi novamente utilizado o sistema apresentado na Figura 3.2. Como suporte de tensão foi considerado um compensador ideal, localizado no meio da LT, controlando a tensão no ponto central (V_m), com uma defasagem

angular de $\delta/2$ em relação à barra infinita. O comportamento dinâmico do sistema pode ser escrito pela “equação de balanço” a seguir:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_M - P_E \quad (3.25)$$

Onde:

$M \rightarrow$ Momento Angular

$P_M \rightarrow$ Potência Mecânica aplicada ao gerador

$P_E \rightarrow$ Potência Elétrica transferida para a barra infinita

$\delta \rightarrow$ Posição angular do rotor em relação ao eixo de rotação síncrona

Na análise de estabilidade em regime permanente, a análise é baseada em pequenas perturbações e a equação 3.25, pode ser reescrita da forma a seguir:

$$M \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} = \Delta P_M - \Delta P_E \quad (3.26)$$

A potência mecânica, para esta situação não varia, portanto $\Delta P_M = 0$.

A potência elétrica já foi definida pela equação 3.4, e fazendo as considerações mencionadas fica:

$$P_E = \frac{E_1 \cdot V_m}{X/2} \cdot \sin(\delta/2) \quad (3.27)$$

A variação da potência elétrica decorrente de uma pequena perturbação é determinada pela expressão seguinte:

$$\Delta P_E = \frac{\partial P_E}{\partial E_1} \Delta E_1 + \frac{\partial P_E}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (3.28)$$

Tendo em vista que a tensão E_1 ($\Delta E_1 = 0$) é constante e que a tensão V_m é mantida constante ($\Delta V_m = 0$) pelo compensador ideal, a variação de potência elétrica fica da forma a seguir:

$$\Delta P_E = \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (3.29)$$

Substituindo a Equação 3.29 na Equação 3.26, a equação de balanço para o sistema em questão fica:

$$M \frac{d^2(\Delta \delta)}{dt^2} + \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (3.30)$$

A equação característica do sistema é da forma:

$$s^2 + \frac{1}{M} \left. \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \right|_0 = 0 \quad (3.31)$$

Analisando a equação característica do sistema, verifica-se que as raízes estão sob o eixo imaginário e, portanto, o sistema apresenta oscilações não amortecidas de frequência ω_0 de valor:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{M} \left. \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \right|_0} \quad (3.32)$$

Ao contrário da situação anterior, considere-se agora que a tensão V_m controlada pelo compensador possa variar e seja proporcional à variação angular, conforme a equação a seguir:

$$\Delta V_m = K \frac{d(\Delta \delta)}{dt} \quad (3.33)$$

Onde K é uma constante

A variação da potência elétrica decorrente de uma pequena perturbação passa então a ser determinada pela expressão seguinte:

$$\Delta P_E = \frac{\partial P_E}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (3.34)$$

$$\Delta P_E = \frac{\partial P_E}{\partial V_m} K \frac{d(\Delta \delta)}{dt} + \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (3.35)$$

Substituindo a Equação 3.35 na Equação 3.26, a equação de balanço para o sistema em questão fica:

$$M \frac{d^2(\Delta \delta)}{dt^2} + \frac{\partial P_E}{\partial V_m} \Big|_0 K \frac{d(\Delta \delta)}{dt} + \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Big|_0 \Delta \delta = 0 \quad (3.36)$$

A equação característica do sistema é da forma:

$$s^2 + 2\zeta s + \omega_0^2 = 0 \quad (3.37)$$

onde:

$$2\zeta = \frac{K}{M} \frac{\partial P_E}{\partial V_m} \Big|_0 \quad \text{e} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{M} \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Big|_0}$$

As raízes da equação 3.37 estão do lado esquerdo do plano “s”, portanto as oscilações decaem ao longo do tempo, ou seja, são amortecidas.

4 ESTABILIDADE SOB PEQUENOS DESVIOS

4.1- Matriz de Estado

Um sistema elétrico de potência pode ter seu comportamento dinâmico representado matematicamente por um conjunto de equações diferenciais associadas às máquinas síncronas, sistema de excitação, reguladores de velocidade, compensadores estáticos de reativo, elos de corrente contínua, motores de indução, etc, bem como por equações algébricas não-lineares que representam a rede de transmissão CA, através de sua formulação por matriz de admitância nodal, e as interfaces rede elétrica - geradores, rede elétrica - elos de corrente contínua, etc. Desta forma, obtém-se a seguinte formulação para representação do comportamento dinâmico de um sistema elétrico de potência:

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (4.1)$$

$$0 = g(x, y) \quad (4.2)$$

onde,

$x \rightarrow$ Vetor de variáveis de estado.

$y \rightarrow$ Vetor de variáveis algébricas.

$0 \rightarrow$ Vetor de elementos nulos.

O estudo da estabilidade de um sistema elétrico de potência descrito por estas equações, quando submetido a uma pequena perturbação, pode ser feito através da análise dos autovalores associados à matriz de estado do sistema em questão. A matriz de estado pode ser obtida através da linearização em torno de um determinado ponto de operação (x_0, y_0) , como segue:

$$\Delta \dot{x} = A_1 \cdot \Delta x + A_2 \cdot \Delta y + B \cdot \Delta u \quad (4.3)$$

$$0 = A_3 \cdot \Delta x + A_4 \cdot \Delta y \quad (4.4)$$

onde:

$$A_1 = \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right]_{x_0, y_0} \quad (4.5)$$

$$A_2 = \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right]_{x_0, y_0} \quad (4.6)$$

$$A_3 = \left[\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right]_{x_0, y_0} \quad (4.7)$$

$$A_4 = \left[\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right]_{x_0, y_0} \quad (4.8)$$

$$B = \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial u} \right]_{x_0, y_0} \quad (4.9)$$

As matrizes A_1 , A_2 , A_3 e A_4 , constituem a matriz Jacobiana do sistema elétrico de potência. Manipulando algebricamente as equações 4.3 e 4.4, obtêm-se as seguintes igualdades:

$$\Delta y = -A_4^{-1} \cdot A_3 \cdot \Delta x \quad (4.10)$$

$$\Delta \dot{x} = A \cdot \Delta x + B \cdot \Delta u \quad (4.11)$$

A matriz A é chamada matriz de estado do sistema e é obtida a partir das submatrizes da matriz Jacobiana do sistema.

$$A = A_1 - A_2 \cdot A_4^{-1} \cdot A_3 \quad (4.12)$$

Após a linearização das equações 4.1 e 4.2, o comportamento do sistema elétrico, quando da ocorrência de pequenas perturbações, pode ser representado pelas equações de estado de um sistema linear invariante no tempo, que têm a seguinte forma geral:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (4.13)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) \quad (4.14)$$

onde,

$x(t)$ → vetor de variáveis de estado, dimensão $(n \times 1)$

$y(t)$ → vetor de variáveis algébricas (dimensão $m \times 1$)

$u(t)$ → vetor de variáveis de entrada (dimensão $s \times 1$)

A → matriz de estado (dimensão $n \times n$), obtida a partir da Equação 4.12

B → matriz de coeficientes de entrada (dimensão $n \times s$)

C → matriz de coeficientes de saída (dimensão $m \times n$), obtida a partir da equação a seguir:

$$C = -A_4^{-1} \cdot A_3 \quad (4.15)$$

4.2- Autovalores

Definem-se como **autovalores** de uma matriz $A_{n \times n}$, os números complexos $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ que satisfazem a equação:

$$\det|\lambda I - A| = 0 \quad (4.16)$$

Ao conjunto de autovalores da matriz A é dado o nome de espectro da matriz A .

$$P_A(A) = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad (4.17)$$

4.3- Autovetores

O vetor $\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$ que atende à equação a seguir, é denominado autovetor à direita da matriz A associado a λ .

$$Av = \lambda v \quad (4.18)$$

De forma análoga, existe o autovetor $w \neq 0$ à esquerda da matriz A associado a λ , que satisfaz à relação:

$$wA = w\lambda \quad (4.19)$$

A matriz P não-singular, formada pelo conjunto de autovetores linearmente independentes $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ pode ser utilizada para colocar a matriz A na forma de Jordan (forma diagonal), onde os elementos da diagonal principal são os autovalores da matriz A .

$$\hat{A} = P^{-1}AP = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$P^{-1} = W \rightarrow \text{autovetor à esquerda de } A \quad (4.21)$$

4.4- Equivalência de Equações Dinâmicas

Seja o sistema representado pelas equações:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + b \cdot u(t) \quad (4.22)$$

$$x(0) = x_0 \quad (4.23)$$

$$y(t) = c \cdot x(t) \quad (4.24)$$

Substituindo nas equações 4.22, 4.23 e 4.24, $x(t)$ por $P \cdot \hat{x}(t)$, as equações ficam:

$$P \cdot \dot{\hat{x}}(t) = A \cdot P \cdot \hat{x}(t) + b \cdot u(t) \quad (4.25)$$

$$x(0) = x_0 = P \cdot \hat{x}(0) \quad (4.26)$$

$$y(t) = c \cdot P \cdot \hat{x}(t) \quad (4.27)$$

E finalmente:

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{A} \cdot \hat{x}(t) + \hat{b} \cdot u(t) \quad (4.28)$$

$$y(t) = \hat{c} \cdot \hat{x}(t) \quad (4.29)$$

As equações dinâmicas apresentadas acima representadas pelas matrizes A, b, c e $\hat{A}, \hat{b}, \hat{c}$ são equivalentes se P for uma matriz não singular que permita as seguintes igualdades:

$$\hat{A} = P^{-1} \cdot A \cdot P \quad (4.30)$$

$$\hat{b} = P^{-1} \cdot b \quad (4.31)$$

$$\hat{c} = c \cdot P \quad (4.32)$$

Neste caso a matriz P é chamada de transformação de similaridade.

4.5- Resíduo da Função de Transferência

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação 4.22, para a condição específica $x(0)=0$, obtém-se:

$$s \cdot X(s) = A \cdot X(s) + b \cdot u(s) \quad (4.33)$$

$$[sI - A] \cdot X(s) = b \cdot U(s) \quad (4.34)$$

$$X(s) = [sI - A]^{-1} \cdot b \cdot U(s) \quad (4.35)$$

$$Y(s) = c \cdot X(s) \quad (4.36)$$

$$Y(s) = [c \cdot [sI - A]^{-1} \cdot b] \cdot U(s) \quad (4.37)$$

Desta forma, a função de transferência $G(s)$ para um sistema invariável no tempo é dada por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = c \cdot [sI - A]^{-1} \cdot b \quad (4.38)$$

$$G(s) = \hat{c} \cdot [sI - \hat{A}]^{-1} \cdot \hat{b} \quad (4.39)$$

Ou ainda, por:

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\hat{b}_i \cdot \hat{c}_i}{s - \lambda_i} \quad (4.40)$$

Onde R_i é uma matriz resíduo de elementos complexos associada ao autovalor λ_i . O resíduo é uma medida de da sensibilidade do autovalor λ_i a uma realimentação adicionada à função de malha aberta entre $U(s)$ e $Y(s)$.

4.6- Observabilidade

A cada autovalor do sistema descrito pelas equações 4.1 e 4.2, corresponde um modo de oscilação. Desta forma, é possível medir a participação de cada modo de oscilação na saída em estudo, que para um sistema elétrico de potência pode ser potência ativa e reativa do gerador, frequência, tensões em barras, velocidade angular, fluxo de potência em linhas de transmissão, etc. O conceito de observabilidade está associado a esta análise, que indica o quão observável é cada modo de oscilação em cada variável de saída verificada.

Índices de observabilidade podem ser obtidos a partir da matriz $\hat{\mathbf{c}}$, chamada de vetor de observabilidade de modo, onde cada elementos $\hat{\mathbf{c}}_i$ é o fator de observabilidade de modo. A matriz $\hat{\mathbf{c}}$ é obtida fazendo-se:

$$\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{c} \cdot \mathbf{P} \quad (4.41)$$

Onde \mathbf{P} é uma matriz formada pelos autovetores à direita de \mathbf{A} e \mathbf{c} é a matriz de coeficientes de saída do sistema. Cada elemento da matriz $\hat{\mathbf{c}}$ é um número complexo, o qual pode ser representado por um vetor a partir do módulo e ângulo, os quais podem ser normalizados para fornecer o mode-shape (visualização da amplitude e fase de um determinado modo de oscilação) de uma determinada variável de saída associada a um autovalor específico.

4.7- Controlabilidade

Um sistema é controlável quando é possível encontrar um vetor de controle $\mathbf{u}(\mathbf{t})$ que em um tempo específico finito \mathbf{t}_f , transferirá o sistema entre dois estados específicos finitos e arbitrários, ou seja, de um estado inicial \mathbf{x}_0 para um estado final \mathbf{x}_f .

A controlabilidade de um sistema pode ser determinada a partir da matriz $\hat{\mathbf{b}}$, apresentada na equação 4.31, chamada de vetor de controlabilidade de modo, onde cada elemento $\hat{\mathbf{b}}_i$ é chamado de fator de controlabilidade do modo.

Um sistema é completamente controlável quando a matriz $\hat{\mathbf{b}}$ não possui linhas zeradas. As variáveis de estado correspondentes às linhas zeradas são não controláveis, ou seja, não é possível influenciá-las através das variáveis de controle.

Os índices de controlabilidade e observabilidade podem ser utilizados para a determinação dos locais mais indicados para instalação de equipamentos como estabilizadores de sistemas de potência, capacitores série controlados e compensadores estáticos de reativo.

4.8- Solução das Equações de Estado

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação homogênea 4.28, para a condição específica $u(t)=0$, obtém-se:

$$s \cdot \hat{X}(s) - \hat{x}(0) = \hat{A} \cdot \hat{X}(s) \quad (4.41)$$

$$[sI - \hat{A}] \cdot \hat{X}(s) = \hat{x}(0) \quad (4.42)$$

$$\hat{X}(s) = [sI - \hat{A}]^{-1} \cdot \hat{x}(0) \quad (4.43)$$

Foi visto na equação 4.20 que a matriz \hat{A} é diagonal, cujos elementos são os autovalores da matriz A . Logo, a resposta natural do sistema linear sob análise, será:

$$\hat{X}_i(s) = \frac{\hat{x}_i(0)}{sI - \lambda_i} \quad (4.44)$$

Reescrevendo a equação 4.44 em função do tempo:

$$\hat{x}_i(t) = \hat{x}_i(0) \cdot e^{\lambda_i t} \quad (4.45)$$

Conclui-se a partir da equação 4.45 que a resposta modal para cada componente do vetor $\hat{x}_i(t)$ é independente das outras componentes modais, dependendo apenas de seu valor inicial $\hat{x}_i(0)$ e sua taxa de decaimento com o tempo é dada pelo autovalor λ_i . Outra conclusão importante é que, para que o sistema linear (ou linearizado) seja estável, todos os autovalores devem ser reais negativos ou complexos com parte real negativa.

No caso específico de autovalor complexo, existem na verdade dois autovalores complexos conjugados, como segue:

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \text{ e } \lambda_{i+1} = \lambda_i^* = \sigma_i - j\omega_i \quad (4.46)$$

A resposta modal no tempo para autovalores reais é dada pela equação 4.45, entretanto para autovalores complexos, esta resposta é dada pela equação 4.48.

$$\hat{x}_i(t) + \hat{x}_{i+1}(t) = \hat{x}_i(0) \cdot e^{\lambda_i t} + \hat{x}_i(0)^* \cdot e^{\lambda_i^* t} \quad (4.47)$$

$$\hat{x}_i(t) + \hat{x}_{i+1}(t) = K_{i,i+1} \cdot e^{\sigma_i t} \cdot \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (4.48)$$

Para cada par de autovalores complexos conjugados, existe um modo de resposta no tempo senoidal de frequência f_i determinada pela parte imaginária do autovalor associado.

$$f_i = \omega_i / 2\pi \quad (4.49)$$

4.9- Modos de Oscilação Eletromecânicos

4.9.1- Modo Local ou Modo Máquina-Sistema

Este modo de oscilação está associado às oscilações de unidades de uma mesma usina em relação ao restante do sistema ao qual está conectada.

4.9.2- Modo Inter-área

Associado às oscilações de um grupo de geradores de uma mesma área elétrica ou geográfica em relação a geradores localizados em outras áreas. Isto ocorre quando existem dois ou mais grupos de máquinas fortemente acopladas, conectados entre si por meio de fracos elos de transmissão em corrente alternada.

4.9.3- Modos dos Controles

Associados aos controles de unidades geradoras e outros controles, tais como:

excitatrizes, reguladores de velocidade, conversores CCAT, compensadores estáticos de reativo, etc. Ao contrário dos modos anteriores, este modo não está vinculado explicitamente ao comportamento das oscilações angulares de rotor das unidades geradoras.

4.9.4- Modos Torsionais

Associados às vibrações do eixo dos turbo e hidro-geradores, que através de interações danosas com o controle de excitação, controles de conversores CCAT e compensação série aplicada a redes de transmissão CA, podem ser amplificadas. Estes modos também não possuem vínculo explícito com as oscilações angulares de rotor dos geradores.

5 MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE

Com o intuito de analisar o efeito da utilização de compensadores estáticos de reativo (CERs) com sinal adicional estabilizador (SAE) aplicado à malha de regulação de tensão dos mesmos, sobre a estabilidade de regime permanente de sistemas de potência, será considerado nas simulações, o sistema exemplo apresentado na Figura 5.1. Este sistema é constituído por uma estação geradora com potência nominal de 1200MVA conectada a uma barra infinita por meio de um sistema de transmissão, cuja reatância total na base do gerador foi considerada como sendo igual a 0,8pu. A susceptância da linha de transmissão foi desprezada. No ponto intermediário deste sistema de transmissão, está conectado por meio de um transformador de 0,07pu (base do CER), um compensador estático de reativo com potência nominal de 480MVA, cuja faixa operativa varia entre $-0,2$ e $0,8$ pu (base do CER).

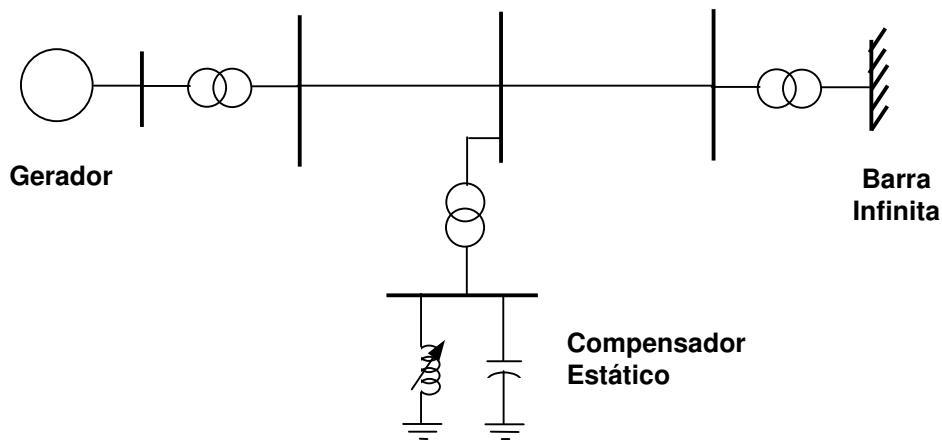


Figura 5.1 – Estação geradora ligada a uma barra infinita por meio de um sistema de transmissão com compensação estática de potência reativa.

5.1- Representação de Geradores Síncronos

Em estudos de estabilidade de sistemas de potência, a compreensão das características das máquinas síncronas e a modelagem adequada do desempenho

dinâmico das mesmas, são de fundamental importância, tendo em vista que nesse tipo de estudo, o interesse principal recai sobre a manutenção do sincronismo entre as diversas unidades geradoras síncronas interligadas.

Neste trabalho, para representação do gerador síncrono será adotada a modelagem convencional para representação de máquinas de pólos salientes, com um enrolamento amortecedor em cada eixo do rotor, sendo um no eixo direto e outro do eixo em quadratura, no referencial dq0.

5.1.1- Equações de Eixo em Quadratura

A Figura 5.2 apresenta um diagrama de blocos que representa as equações de eixo em quadratura que estão listadas logo em seguida.

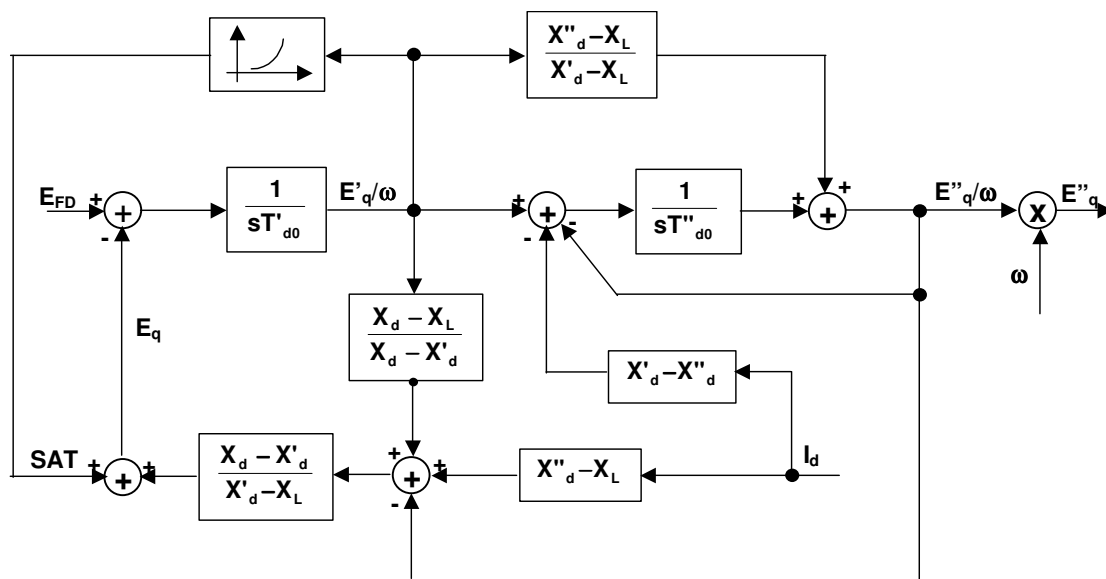


Figura 5.2 – Diagrama de blocos das equações de eixo em quadratura do gerador

$$\begin{aligned}
 s \frac{E'_q}{\omega} = & -\frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot \frac{E'_q}{\omega} + \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_L} \right) \cdot \frac{E''_q}{\omega} \\
 & + \frac{1}{T''_{d0}} \cdot E_{fd} - \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_L} \right) \cdot (X''_d - X_L) \cdot I_d - SAT \cdot \frac{1}{T'_{d0}}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

$$\begin{aligned}
 s \frac{E''_q}{\omega} &= \frac{1}{T''_{d0}} - \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot \left(\frac{X_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot \frac{E'_q}{\omega} + \\
 &\left[-\frac{1}{T''_{d0}} + \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_L} \right) \right] \cdot \frac{E''_q}{\omega} + \\
 &\left[\frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \right] \cdot E_{fd} + \\
 &\left[-\frac{1}{T''_{d0}} \cdot (X'_d - X''_d) - \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot (X_d - X'_d) \right] \cdot I_d + \\
 &\left[-\frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \right] \cdot SAT
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

SAT representa os efeitos da saturação e é dado pela equação não linear a seguir:

$$SAT = A \cdot e^{B(E'_q - d)} \tag{5.3}$$

Para análise da estabilidade a pequenas perturbações estas equações são linearizadas e ficam da forma apresentada a seguir. As variáveis de estado que aparecem são as componentes de eixo em quadratura das tensões atrás das reatâncias de eixo direto subtransitória X''_d e transitória X'_d , definidas respectivamente como E''_q e E'_q .

$$\Delta \dot{E}'_q = A_{11} \cdot \Delta E'_q + A_{12} \cdot \Delta E''_q + B_{11} \cdot \Delta E_{fd} + B_{12} \cdot \Delta I_d \tag{5.4}$$

$$\Delta \dot{E}''_q = A_{21} \cdot \Delta E'_q + A_{22} \cdot \Delta E''_q + B_{21} \cdot \Delta E_{fd} + B_{22} \cdot \Delta I_d \tag{5.5}$$

onde:

$$A_{11} = -\frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) - \frac{1}{T'_{d0}} \cdot (SAT_0 \cdot B) \tag{5.6}$$

$$A_{12} = \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_L} \right) \tag{5.7}$$

$$A_{21} = \frac{1}{T''_{d0}} - \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot \left(\frac{X_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) - \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot (SAT_0 \cdot B) \tag{5.8}$$

$$A_{22} = -\frac{1}{T''_{d0}} + \frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_L} \right) \quad (5.9)$$

$$B_{11} = -\frac{1}{T''_{d0}} \quad (5.10)$$

$$B_{12} = -\frac{1}{T'_{d0}} \cdot \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_L} \right) \cdot (X''_d - X_L) \quad (5.11)$$

$$B_{21} = \frac{1}{T''_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \quad (5.12)$$

$$B_{22} = -\frac{1}{T''_{d0}} \cdot (X'_d - X''_d) - \frac{1}{T''_{d0}} \cdot \left(\frac{X''_d - X_L}{X'_d - X_L} \right) \cdot \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_L} \right) \cdot (X'_d - X_L) \quad (5.13)$$

SAT_0 é o valor em regime permanente da variável SAT.

ΔE_{fd} é a variação na tensão de campo

ΔI_d e ΔI_q são as variações nas componentes de eixo direto e quadratura da corrente de armadura.

5.1.2- Equação de Eixo Direto

A Figura 5.3 apresenta um diagrama de blocos que representa as equações de eixo direto e estão listadas logo em seguida.

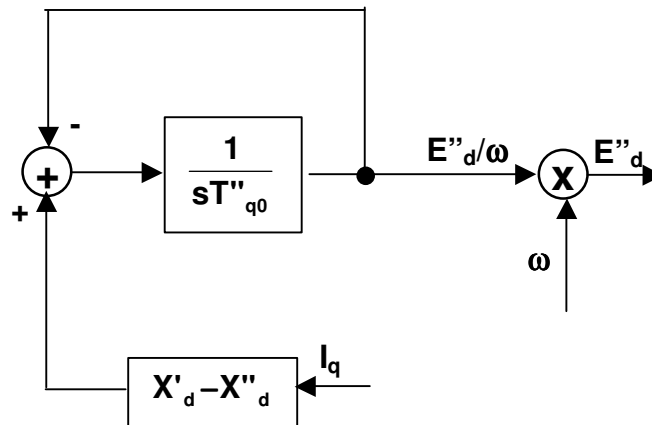


Figura 5.3 – Diagrama de bloco da equação de eixo direto do gerador

$$s \frac{E''_d}{\omega} = -\frac{1}{T''_{q0}} \cdot \frac{E''_d}{\omega} + \left[\frac{1}{T''_{q0}} \cdot (X_q - X''_q) \right] \cdot I_q \quad (5.14)$$

Linearizando esta equação para análise da estabilidade a pequenas perturbações, verifica-se como variável de estado a componente de eixo direto da tensão atrás da reatância de eixo direto subtransitória X''_d , definida como E''_d e obtém-se:

$$\Delta \dot{E}''_d = A_{33} \cdot \Delta E''_d + B_{33} \cdot \Delta I_q \quad (5.15)$$

onde:

$$A_{33} = -\frac{1}{T''_{q0}} \quad (5.16)$$

$$B_{33} = +\frac{1}{T''_{q0}} \cdot (X_q - X''_q) \quad (5.17)$$

As equações 5.4, 5.5 e 5.15 representam a modelagem do gerador síncrono para representação do seu comportamento quando submetido a uma pequena perturbação, no que se refere às relações corrente x fluxo produzidos por seus enrolamentos de rotor (campo e enrolamentos amortecedores) e enrolamento de armadura. Sendo conhecidas as componentes E''_d e E''_q , as correntes I_d e I_q e as direções dos eixos d e q, a tensão terminal atrás da reatância subsíncrona de eixo direto pode ser obtida a partir da relação fasorial abaixo, que representa o circuito equivalente da Figura 5.4.

$$\bar{E}'' = \bar{V}_t + jX''_d \cdot \bar{I} \quad (5.18)$$

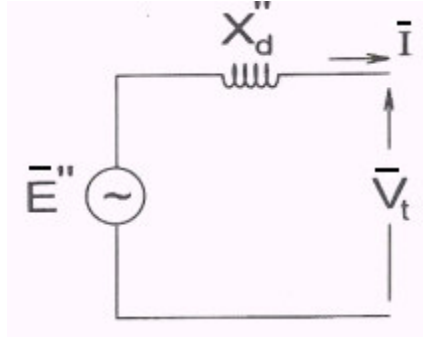


Figura 5.4 – Circuito equivalente da Máquina Síncrona

$$\bar{E}''_{dq} = \bar{V}_{tdq} + jX''_d \cdot \bar{I}_{dq} \quad (5.19)$$

$$\bar{V}_t = V_{tD} + jV_{tQ} = V_{tD} \angle 0^\circ + V_{tQ} \angle 90^\circ = V_{td} \angle (\delta - 90^\circ) + V_{tq} \angle \delta \quad (5.20)$$

$$\bar{V}_t = V_{td} \cdot \sin \delta - jV_{td} \cdot \cos \delta + V_{tq} \cdot \cos \delta + jV_{tq} \cdot \sin \delta \quad (5.21)$$

$$\bar{V}_{tDQ} = \begin{bmatrix} V_{tD} \\ V_{tQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} = \tilde{T} \cdot \bar{V}_{tqd} \quad (5.22)$$

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$\bar{V}_{tqd} = \tilde{T}^{-1} \cdot \bar{V}_{tDQ} \quad (5.24)$$

$$\tilde{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$\bar{E}''_{dq} = \tilde{T}^{-1} \cdot \bar{V}_{tDQ} + jX''_d \cdot \bar{I}_{dq} \quad (5.26)$$

$$E''_d = \sin \delta \cdot V_{tD} - \cos \delta \cdot V_{tQ} + X''_d \cdot I_q \quad (5.27)$$

$$E''_q = \cos \delta \cdot V_{tD} + \sin \delta \cdot V_{tQ} + X''_d \cdot I_d \quad (5.28)$$

Estas equações devem então ser linearizadas a fim de que sejam incluídas na formulação matricial de espaços de estado.

$$\Delta E''_d = \sin \delta_0 \cdot \Delta V_{tD} - \cos \delta_0 \cdot \Delta V_{tQ} + V_{tq0} \cdot \Delta \delta - X''_d \cdot \Delta I_q \quad (5.29)$$

$$\Delta E''_q = \cos \delta_0 \cdot \Delta V_{tD} + \sin \delta_0 \cdot \Delta V_{tQ} - V_{td0} \cdot \Delta \delta + V_{td0} + X''_d \cdot \Delta I_d \quad (5.30)$$

5.1.3- Equações mecânicas dos geradores síncronos

A variação de ângulo de carga do rotor pode ser obtida através da equação seguinte:

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_s = \omega_s \cdot (\omega'_r - 1) = \omega_s \cdot \Delta\omega'_r \quad (5.31)$$

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_s \cdot \Delta\omega'_r \quad (5.32)$$

onde:

$\Delta\delta = \delta - \delta_0 \rightarrow$ desvio do ângulo de carga

$\omega'_r = \omega_r / \omega_s \rightarrow$ velocidade do rotor expressa em pu

$\Delta\omega'_r = \omega'_r - 1 \rightarrow$ desvio de velocidade do rotor expresso em pu

A equação para balanço de potência é representada pela equação:

$$s\omega'_r = -\frac{D}{M} \cdot \omega'_r + \frac{1}{M} \cdot P_m - \frac{1}{M} \cdot P_e \quad (5.33)$$

Para representação do comportamento sob pequenos desvios, esta equação pode ser linearizada e fica da forma:

$$\frac{d\omega'_r}{dt} = \frac{d\Delta\omega'_r}{dt} = -\frac{D}{M} \cdot \Delta\omega'_r + \frac{1}{M} \cdot \Delta P_m - \frac{1}{M} \cdot \Delta P_e \quad (5.34)$$

onde:

$M = 2H \rightarrow$ H é a constante de inércia

D \rightarrow coeficiente de amortecimento, relativo aos efeitos mecânicos de atrito e ventilação da máquina.

$\Delta P_m \rightarrow$ desvio de potência mecânica imposta pela turbina

$\Delta P_e \rightarrow$ desvio de potência elétrica fornecida ao sistema pelo gerador

Assim como a saturação magnética SAT, a relação entre potência elétrica e o ângulo de carga e os efeitos de variação de velocidade do rotor sobre as tensões induzidas, são não lineares. A equação de potência elétrica do gerador é:

$$P_e = (E''_d \cdot I_d + E''_q \cdot I_q) \cdot \omega'_r \quad (5.35)$$

Linearizando esta equação, obtém-se:

$$\Delta P_e = P_{e0} \cdot \Delta \omega'_r + \omega'_{r0} (E''_{d0} \cdot \Delta I_d + E''_{q0} \cdot \Delta I_q + I_{d0} \cdot \Delta E''_d + I_{q0} \cdot \Delta E''_q) \quad (5.36)$$

Esta equação deverá substituir o termo ΔP_e na expressão para a derivada do desvio de velocidade, e para $\omega'_{r0} = \omega_s = 1,0$ pu, obtém-se:

$$\Delta \dot{\omega}'_r = A_{52} \cdot \Delta E''_q + A_{53} \cdot \Delta E''_d + A_{55} \cdot \Delta \omega'_r + B_{52} \cdot \Delta I_d + B_{53} \cdot \Delta I_q + \frac{1}{M} \cdot \Delta P_m \quad (5.36)$$

onde:

$$A_{52} = -I_{q0} / M \quad (5.37)$$

$$A_{53} = -I_{d0} / M \quad (5.38)$$

$$A_{55} = -(D + P_{e0}) / M \quad (5.39)$$

$$B_{52} = -E''_{d0} / M \quad (5.40)$$

$$B_{53} = -E''_{q0} / M \quad (5.41)$$

Para situações em que os efeitos da variação de velocidade sobre os desvios de potência elétrica puderem ser desprezados, P_{e0} pode ser considerado igual a zero. Esta consideração é frequentemente feita e é compatível com a não correção dos parâmetros da rede com a mudança da frequência.

Para análise de pequenas perturbações as expressões linearizadas podem ser colocadas na forma matricial para variações, obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}''_q \\ \Delta \dot{E}''_d \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega}'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{45} \\ 0 & A_{52} & A_{53} & 0 & A_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta E''_q \\ \Delta E''_d \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega'_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 & 0 \\ B_{21} & B_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{52} & B_{53} & B_{54} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta E_{fd} \\ \Delta I_d \\ \Delta I_q \\ \Delta P_m \end{bmatrix} \quad (5.42)$$

A Tabela 5.1 seguir apresenta os valores dos parâmetros do gerador síncrono na base nominal, utilizados nas simulações.

Tabela 5.1 – Parâmetros do gerador síncrono

X_d	X'_d	X''_d	T'_{d0}	T''_{d0}	X_q	X''_q	T''_{q0}	X_l	H	MVA
0,91	0,30	0,24	7,92s	0,08s	0,68	0,24	0,181s	0,12	4,37s	1200

5.2- Modelagem do Sistema de Excitação ou Regulador Automático de Tensão (RAT)

O sistema de excitação tem o objetivo de fornecer corrente contínua para o campo da máquina síncrona, bem como de realizar diversas funções de controle e proteção. O sistema de excitação deve manter automaticamente a tensão terminal do gerador constante, através do ajuste da corrente de campo do gerador, mantendo a máquina dentro dos seus limites de capacidade. Adicionalmente, o sistema de excitação deve contribuir para a melhoria da estabilidade do sistema de potência e do controle de tensão do mesmo.

Neste trabalho, o sistema de excitação do gerador será modelado conforme o diagrama de blocos da Figura 5.5, onde a alimentação da tensão de campo é feita através de uma ponte conversora com controle rápido da tensão através do ajuste do ângulo de disparo. A alimentação CA da ponte conversora foi considerada como sendo feita por uma fonte de tensão independente, embora pudesse ser feita através da tensão terminal do gerador. Desta forma, o desempenho transitório do controle de excitação pode ser obtido a partir das expressões:

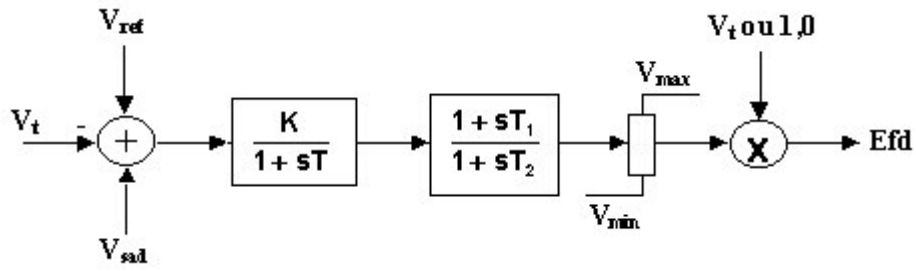


Figura 5.5 – Diagrama de Blocos do Sistema Estático de Excitação

$$\dot{x}_1(t) = \frac{K}{T} (V_{ref} + V_{sad} - V_t) - \frac{1}{T} x_1(t) \quad (5.43)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{T_1 - T_2}{T_2} x_1(t) - \frac{1}{T_2} x_2(t) \quad (5.44)$$

Para análise de pequenas perturbações estas expressões podem ser colocadas na forma matricial para variações, onde x_2 é igual a E_{fd} , obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1 \\ \Delta \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{sad} \\ \Delta V_t \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

onde,

$$C_{11} = -1/T \quad (5.46)$$

$$C_{21} = (T_1 - T_2)/T_2 \quad (5.47)$$

$$C_{22} = -1/T_2 \quad (5.48)$$

$$D_{11} = K/T \quad (5.49)$$

$$D_{12} = -K/T \quad (5.50)$$

$$D_{13} = K/T \quad (5.51)$$

Entretanto,

$$|V_t|^2 = V_{tD}^2 + V_{tQ}^2 \quad (5.52)$$

Linearizando a equação 5.52 obtém-se:

$$2 \cdot V_{tD} \cdot \Delta V_t = 2 \cdot V_{tD0} \cdot \Delta V_{tD} + 2 \cdot V_{tQ0} \cdot \Delta V_{tQ} \quad (5.53)$$

$$\Delta V_t = e'_D \cdot \Delta V_{tD} + e'_Q \cdot \Delta V_{tQ} \quad (5.54)$$

$$e'_D = V_{tD0} / |V_{t0}| \quad (5.55)$$

$$e'_Q = V_{tQ0} / |V_{t0}| \quad (5.56)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1 \\ \Delta \dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D'_{11} & D'_{12} & D'_{13} & D'_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{sad} \\ \Delta V_{tD} \\ \Delta V_{tQ} \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

$$D'_{11} = D_{11} \quad (5.58)$$

$$D'_{12} = D_{12} \cdot e'_D \quad (5.59)$$

$$D'_{13} = D_{12} \cdot e'_Q \quad (5.60)$$

$$D'_{14} = D_{13} \quad (5.61)$$

A Tabela 5.2 a seguir apresenta os valores dos parâmetros do sistema de excitação do gerador na base nominal do mesmo, utilizados nas simulações.

Tabela 5.2 – Parâmetros do RAT

<i>K</i>	<i>T</i>	<i>T₁</i>	<i>T₂</i>
150pu/pu	0,05s	1s	4s

5.3- Modelagem do Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) ou Sinal Adicional Estabilizador (SAE)

A modelagem adotada neste trabalho para representação do estabilizador de sistema de potência (ESP) ou sinal adicional estabilizador (SAE) é apresentada através do diagrama de blocos da Figura 5.6. Este ESP tem como sinal de entrada, o desvio de

velocidade $\Delta\omega'_r$ e produz como saída um sinal adicional estabilizador V_{sad} que é aplicado ao sistema de excitação do gerador.

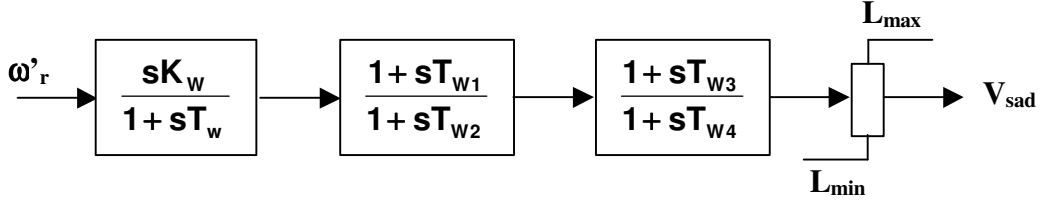


Figura 5.6 – Diagrama de Blocos do Estabilizador de Sistema de Potência

Para análise de pequenas perturbações, foram identificadas as variáveis de estado Δx_3 , Δx_4 e Δx_5 . Portanto, o sinal de saída do ESP pode ser expresso por:

$$\Delta V_{sad} = S1 \cdot \Delta x_3 + S2 \cdot \Delta x_4 + S3 \cdot \Delta x_5 + SW \cdot \Delta \omega'_r \quad (5.62)$$

onde:

$$S1 = -\frac{1}{T_\omega} \cdot \frac{T_{\omega 1}}{T_{\omega 2}} \cdot \frac{T_{\omega 3}}{T_{\omega 4}} \quad (5.63)$$

$$S2 = -\frac{T_{\omega 3}}{T_{\omega 2} \cdot T_{\omega 4}} \quad (5.64)$$

$$S3 = -\frac{1}{T_{\omega 4}} \quad (5.65)$$

$$SW = \frac{K_\omega}{T_\omega} \cdot \frac{T_{\omega 1}}{T_{\omega 2}} \cdot \frac{T_{\omega 3}}{T_{\omega 4}} \quad (5.66)$$

As equações de estado do ESP na forma matricial ficam:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_3 \\ \Delta \dot{x}_4 \\ \Delta \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & 0 & 0 \\ E_{21} & E_{22} & 0 \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \\ \Delta x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \cdot [\Delta \omega'_r] \quad (5.67)$$

$$E_{11} = -\frac{1}{T_\omega} \quad (5.68)$$

$$E_{21} = \frac{T_{\omega 2} - T_{\omega 1}}{T_{\omega} \cdot T_{\omega 2}} \quad (5.69)$$

$$E_{22} = -\frac{1}{T_{\omega 2}} \quad (5.70)$$

$$E_{31} = -\frac{T_{\omega 1}}{T_{\omega} \cdot T_{\omega 2}} \left(\frac{T_{\omega 3} - T_{\omega 4}}{T_{\omega 4}} \right) \quad (5.71)$$

$$E_{32} = \frac{T_{\omega 4} - T_{\omega 3}}{T_{\omega 4} \cdot T_{\omega 2}} \quad (5.78)$$

$$E_{33} = -\frac{1}{T_{\omega 4}} \quad (5.79)$$

$$F_{11} = K_{\omega} / T_{\omega} \quad (5.80)$$

$$F_{21} = K_{\omega} \cdot \frac{T_{\omega 1} - T_{\omega 2}}{T_{\omega} \cdot T_{\omega 2}} \quad (5.81)$$

$$F_{31} = \frac{K_{\omega}}{T_{\omega}} \cdot \frac{T_{\omega 1}}{T_{\omega 2}} \left(\frac{T_{\omega 3} - T_{\omega 4}}{T_{\omega 4}} \right) \quad (5.82)$$

A Tabela 5.3 a seguir apresenta os valores dos parâmetros do sinal adicional estabilizador associado ao RAT na base nominal do mesmo, utilizados nas simulações.

Tabela 5.3 – Parâmetros do SAE

K_{ω}	T_{ω}	$T_{\omega 1}$	$T_{\omega 2}$	$T_{\omega 3}$	$T_{\omega 4}$
45,6pu/pu	3s	0,39209s	0,12533s	0,39209s	0,12533s

5.4- Modelagem do Compensador Estático de Reativo (CER)

Para este estudo foi selecionado um compensador estático de reativo constituído por um capacitor fixo + reator controlado a tiristor, cujo diagrama de blocos está apresentado na Figura 5.7

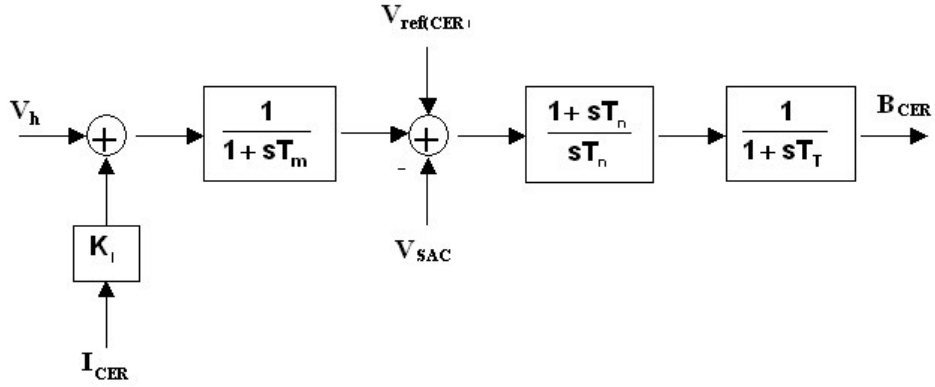


Figura 5.7 – Diagrama de Blocos do Compensador Estático de Reativo

Para análise de pequenas perturbações, foram identificadas as variáveis de estado Δx_6 , Δx_7 , e B_{CER} que obedecem as seguintes relações:

$$\Delta \dot{x}_6 = G_{11} \cdot x_6 + \Delta H_{11} \cdot \Delta V_h + H_{12} \cdot \Delta I_{CER} \quad (5.83)$$

$$\Delta \dot{x}_7 = G_{21} \cdot \Delta x_6 + H_{23} \cdot \Delta V_{SAC} + H_{24} \cdot \Delta V_{ref(CER)} \quad (5.84)$$

$$\Delta \dot{B}_{CER} = G_{31} \cdot \Delta x_6 + G_{32} \cdot \Delta x_7 + G_{33} \cdot \Delta B_{SVC} + H_{33} \cdot \Delta V_{sac} + H_{34} \cdot \Delta V_{ref(CER)} \quad (5.85)$$

Ou na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_6 \\ \Delta \dot{x}_7 \\ \Delta \dot{B}_{CER} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 & 0 \\ G_{21} & 0 & 0 \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_6 \\ \Delta x_7 \\ \Delta B_{CER} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{23} & H_{24} \\ 0 & 0 & H_{33} & H_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_h \\ \Delta I_{CER} \\ \Delta V_{SAC} \\ \Delta V_{ref(CER)} \end{bmatrix} \quad (5.86)$$

onde,

$$G_{11} = -1/T_m \quad (5.87)$$

$$G_{21} = -K_p/T_n \quad (5.88)$$

$$G_{31} = -K_p/T_T \quad (5.89)$$

$$G_{32} = 1/T_T \quad (5.90)$$

$$G_{33} = -1/T_T \quad (5.91)$$

$$H_{11} = 1/T_m \quad (5.92)$$

$$H_{12} = K_l / T_m \quad (5.93)$$

$$H_{23} = K_p / T_n \quad (5.94)$$

$$H_{33} = K_p / T_T \quad (5.95)$$

$$H_{24} = K_p / T_n \quad (5.96)$$

$$H_{34} = K_p / T_T \quad (5.97)$$

Entretanto, sabe-se que:

$$|\bar{V}_h|^2 = V_{hD}^2 + V_{hQ}^2 \quad (5.98)$$

Linearizando a equação 5.98 obtém-se:

$$\Delta V_h = e'_{hD} \cdot \Delta V_{hD} + e'_{hQ} \cdot \Delta V_{hQ} \quad (5.99)$$

$$e'_{hD} = V_{hD0} / |\bar{V}_{h0}| \quad (5.100)$$

$$e'_{hQ} = V_{hQ0} / |\bar{V}_{h0}| \quad (5.101)$$

Da mesma forma,

$$|\bar{l}_{CER}|^2 = l_{CER,D}^2 + l_{CER,Q}^2 \quad (5.102)$$

Linearizando a equação 5.102 obtém-se:

$$\Delta l_{CER} = i'_D \cdot \Delta l_{CER,D} + i'_Q \cdot \Delta l_{CER,Q} \quad (5.103)$$

$$i'_D = l_{CER,D0} / |\bar{l}_{CER0}| \quad (5.104)$$

$$i'_Q = l_{CER,Q0} / |\bar{l}_{CER0}| \quad (5.105)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_6 \\ \Delta \dot{x}_7 \\ \Delta \dot{\mathbf{B}}_{\text{CER}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11} & 0 & 0 \\ \mathbf{G}_{21} & 0 & 0 \\ \mathbf{G}_{31} & \mathbf{G}_{32} & \mathbf{G}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_6 \\ \Delta x_7 \\ \Delta \mathbf{B}_{\text{CER}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{H}'_{11} & \mathbf{H}'_{12} & \mathbf{H}'_{13} & \mathbf{H}'_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}'_{25} & \mathbf{H}'_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}'_{35} & \mathbf{H}'_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{hD} \\ \Delta V_{hQ} \\ \Delta I_{\text{CER},D} \\ \Delta I_{\text{CER},Q} \\ \Delta V_{\text{SAC}} \\ \Delta V_{\text{ref}(\text{CER})} \end{bmatrix} \quad (5.106)$$

$$\mathbf{H}'_{11} = \mathbf{H}_{11} \cdot \mathbf{e}'_{hD} \quad (5.107)$$

$$\mathbf{H}'_{12} = \mathbf{H}_{11} \cdot \mathbf{e}'_{hQ} \quad (5.108)$$

$$\mathbf{H}'_{13} = \mathbf{H}_{12} \cdot \mathbf{i}'_D \quad (5.109)$$

$$\mathbf{H}'_{14} = \mathbf{H}_{12} \cdot \mathbf{i}'_Q \quad (5.110)$$

$$\mathbf{H}'_{25} = \mathbf{H}_{23} \quad (5.111)$$

$$\mathbf{H}'_{26} = \mathbf{H}_{24} \quad (5.112)$$

$$\mathbf{H}'_{35} = \mathbf{H}_{33} \quad (5.113)$$

$$\mathbf{H}'_{36} = \mathbf{H}_{34} \quad (5.114)$$

As seguintes equações algébricas também descrevem o comportamento do CER.

$$\bar{\mathbf{I}}_{\text{CER}} = \mathbf{jB}_{\text{eqv}} \cdot \bar{\mathbf{V}}_h \quad (5.115)$$

$$\bar{\mathbf{I}}_{\text{CER}} = \mathbf{jB}_{\text{eqv}} \cdot (\mathbf{V}_{hD} + \mathbf{jV}_{hQ}) \quad (5.116)$$

Após algumas manipulações algébricas e linearizações, são obtidas as duas equações algébricas a serem incorporadas na matriz de estado do sistema.

$$\Delta I_{\text{CERD}} = -\mathbf{B}_{\text{eqv}0} \cdot \Delta V_{hQ0} - \mathbf{V}_{hQ0} \cdot \Delta \mathbf{B}_{\text{eqv}} \quad (5.117)$$

$$\Delta I_{\text{CERQ}} = -\mathbf{B}_{\text{eqv}0} \cdot \Delta V_{hD} + \mathbf{V}_{hD0} \cdot \Delta \mathbf{B}_{\text{eqv}} \quad (5.118)$$

A última equação algébrica, relativa ao CER, a ser incluída na matriz de estado é:

$$\Delta \mathbf{B}_{\text{CER}} = \mathbf{K}_0 \cdot \Delta \mathbf{B}_{\text{eqv}} \quad (5.119)$$

Onde:

$$K_0 = \frac{B_t^2}{B_t + B_{\text{eqv}0}} \quad (5.120)$$

A

Tabela 5.4 a seguir apresenta os valores dos parâmetros do compensador estático de reativo em sua base nominal, utilizados nas simulações.

Tabela 5.4 – Parâmetros do Compensador Estático de Reativo

K_I	K_P	T_m	T_n	T_t	MVA
0,1pu/pu	0,7	0,03s	0,01s	0,005s	480

5.5- Modelagem do Sinal de Modulação ou Sinal Adicional Estabilizador do Compensador Estático de Reativo (CER)

O sinal de modulação ou sinal adicional estabilizador aplicado ao compensador estático de reativo é derivado da potência elétrica despachada pelo gerador, que pode ser obtida a partir da potência transferida pela linha de transmissão, conforme mostra a Figura 5.8.

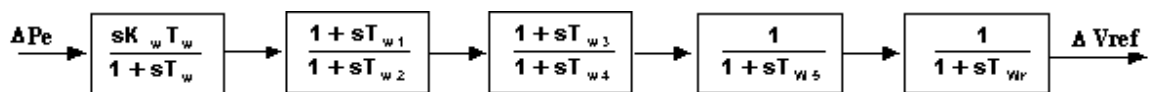


Figura 5.8 – Diagrama de blocos do sinal de modulação do CER

Para análise de pequenas perturbações, as seguintes equações lineares podem ser escritas para o sinal de modulação do compensador estático de reativo.

$$\Delta \dot{x}_8 = I_{11} \cdot \Delta x_8 + J_{11} \cdot \Delta P_e \quad (5.121)$$

$$\Delta \dot{x}_9 = l_{21} \cdot \Delta x_8 + l_{22} \cdot \Delta x_9 + J_{21} \cdot \Delta P_e \quad (5.122)$$

$$\Delta \dot{x}_{10} = l_{31} \cdot \Delta x_8 + l_{32} \cdot \Delta x_9 + l_{33} \cdot \Delta x_{10} + J_{31} \cdot \Delta P_e \quad (5.123)$$

$$\Delta \dot{x}_{11} = l_{41} \cdot \Delta x_8 + l_{42} \cdot \Delta x_9 + l_{43} \cdot \Delta x_{10} + l_{44} \cdot \Delta x_{11} + J_{41} \cdot \Delta P_e \quad (5.124)$$

$$\Delta \dot{x}_{12} = l_{54} \cdot \Delta x_{11} + l_{55} \cdot \Delta x_{12} + J_{51} \cdot \Delta P_e \quad (5.125)$$

ou na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_8 \\ \Delta \dot{x}_9 \\ \Delta \dot{x}_{10} \\ \Delta \dot{x}_{11} \\ \Delta \dot{x}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 & 0 & 0 \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} & 0 & 0 \\ l_{41} & l_{42} & l_{43} & l_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_{54} & l_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_8 \\ \Delta x_9 \\ \Delta x_{10} \\ \Delta x_{11} \\ \Delta x_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{11} \\ J_{21} \\ J_{31} \\ J_{41} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta P_e \quad (5.126)$$

$$l_{11} = -1/T_w \quad (5.127)$$

$$l_{21} = -\frac{1}{T_w} \cdot \left(\frac{T_{w1} - T_{w2}}{T_{w2}} \right) \quad (5.128)$$

$$l_{22} = -\frac{1}{T_{w2}} \quad (5.129)$$

$$l_{31} = -\frac{1}{T_w} \cdot \frac{T_{w1}}{T_{w2}} \cdot \left(\frac{T_{w3} - T_{w4}}{T_{w4}} \right) \quad (5.130)$$

$$l_{32} = -\frac{1}{T_{w2}} \cdot \left(\frac{T_{w3} - T_{w4}}{T_{w4}} \right) \quad (5.131)$$

$$l_{33} = -\frac{1}{T_{w4}} \quad (5.132)$$

$$l_{41} = -\frac{1}{T_w} \cdot \frac{T_{w1}}{T_{w2}} \cdot \frac{T_{w3}}{T_{w4}} \cdot \frac{1}{T_{w5}} \quad (5.133)$$

$$l_{42} = -\frac{1}{T_{w2}} \cdot \frac{T_{w3}}{T_{w4}} \cdot \frac{1}{T_{w5}} \quad (5.134)$$

$$l_{43} = -\frac{1}{T_{w4}} \cdot \frac{1}{T_{w5}} \quad (5.135)$$

$$l_{44} = -\frac{1}{T_{w5}} \quad (5.136)$$

$$I_{54} = \frac{1}{T_{wr}} \quad (5.137)$$

$$I_{55} = -\frac{1}{T_{wr}} \quad (5.138)$$

$$J_{11} = K_w \quad (5.139)$$

$$J_{21} = K_w \cdot \left(\frac{T_{w1} - T_{w2}}{T_{w2}} \right) \quad (5.140)$$

$$J_{31} = K_w \cdot \frac{T_{w1}}{T_{w2}} \cdot \left(\frac{T_{w3} - T_{w4}}{T_{w4}} \right) \quad (5.141)$$

$$J_{41} = \frac{K_w}{T_{w5}} \cdot \frac{T_{w1}}{T_{w2}} \cdot \frac{T_{w3}}{T_{w4}} \quad (5.142)$$

A Tabela 5.5 a seguir apresentam os valores dos parâmetros do sinal adicional estabilizador associado ao CER na base nominal do mesmo, utilizados nas simulações.

Tabela 5.5 – Parâmetros do Sinal Adicional de Modulação do CER

K_ω	T_ω	$T_{\omega 1}$	$T_{\omega 2}$	$T_{\omega 3}$	$T_{\omega 4}$	$T_{\omega 5}$	$T_{\omega 6}$
10pu/pu	5s	0,01s	1,5s	0,01s	1,5s	0,032s	0,015s

5.6- Representação do Sistema Elétrico de Potência

A representação do sistema elétrico de potência ao qual o compensador estático está conectado, é feita através de equações algébricas relacionando as correntes injetadas nos barramentos às tensões do mesmo, por meio da matriz de admitância nodal. Para o sistema sob análise, as equações algébricas correspondentes na forma matricial são:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_g \\ -\bar{I}_{CER} \\ \bar{I}_{inf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & 0 \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} \\ 0 & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_t \\ \bar{V}_h \\ \bar{V}_{inf} \end{bmatrix} \quad (5.143)$$

Após a linearização obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_{gDQ} \\ -\Delta \bar{I}_{CERDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{V}_{tDQ} \\ \Delta \bar{V}_{hDQ} \end{bmatrix} \quad (5.144)$$

$$\bar{Y}_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad (5.145)$$

$$\bar{Y}_{12} = G_{12} + jB_{12} \quad (5.146)$$

$$\bar{Y}_{21} = G_{21} + jB_{21} \quad (5.147)$$

$$\bar{Y}_{22} = G_{22} + jB_{22} \quad (5.148)$$

$$\Delta \bar{I}_{DQ} = (G_{11} + jB_{11}) \cdot (\Delta V_{tD} + j\Delta V_{tQ}) + (G_{12} + jB_{12}) \cdot (\Delta V_{hD} + j\Delta V_{hQ}) \quad (5.149)$$

$$\Delta \bar{I}_{CERDQ} = (G_{21} + jB_{21}) \cdot (\Delta V_{tD} + j\Delta V_{tQ}) + (G_{22} + jB_{22}) \cdot (\Delta V_{hD} + j\Delta V_{hQ}) \quad (5.150)$$

$$\bar{I}_{bQ} = \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (5.151)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_D \\ \Delta I_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_0 & \cos \delta_0 \\ -\cos \delta_0 & \sin \delta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \delta_0 & -\sin \delta_0 \\ \sin \delta_0 & \cos \delta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{d0} \\ I_{q0} \end{bmatrix} \cdot [\Delta \delta] \quad (5.152)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_D \\ \Delta I_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_0 & \cos \delta_0 \\ -\cos \delta_0 & \sin \delta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I_{Q0} \\ I_{D0} \end{bmatrix} \cdot [\Delta \delta] \quad (5.153)$$

$$\Delta I_D = G_{11} \cdot \Delta V_{tD} - B_{11} \cdot \Delta V_{tQ} + G_{12} \cdot \Delta V_{hD} - B_{12} \cdot \Delta V_{hQ} - \sin \delta_0 \cdot \Delta I_d - \cos \delta_0 \cdot \Delta I_q + I_{Q0} \cdot \Delta \delta \quad (5.154)$$

$$\Delta I_Q = B_{11} \cdot \Delta V_{tD} + G_{11} \cdot \Delta V_{tQ} + B_{12} \cdot \Delta V_{hD} + G_{12} \cdot \Delta V_{hQ} + \cos \delta_0 \cdot \Delta I_d - \sin \delta_0 \cdot \Delta I_q + I_{D0} \cdot \Delta \delta \quad (5.155)$$

$$\Delta I_{CERD} = G_{21} \cdot \Delta V_{tD} - B_{21} \cdot \Delta V_{tQ} + G_{22} \cdot \Delta V_{hD} - B_{22} \cdot \Delta V_{hQ} \quad (5.156)$$

$$\Delta I_{CERQ} = B_{21} \cdot \Delta V_{tD} + G_{21} \cdot \Delta V_{tQ} + B_{22} \cdot \Delta V_{hD} + G_{22} \cdot \Delta V_{hQ} \quad (5.157)$$

5.7- Montagem das Submatrizes do Sistema Global

As equações de estado do sistema global constituído pelo gerador síncrono, sistema de transmissão CA, compensador estático e controle associados serão colocadas

sob forma matricial dando origem as matrizes A1, A2, A3, A4 e B, conforme equações 4.3 e 4.4 apresentadas no Capítulo 4 deste trabalho.

O vetor $\Delta \mathbf{x}$ do sistema global possui dezoito variáveis de estado, as quais estão apresentadas a seguir:

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta E'_q, \Delta E''_q, \Delta E''_d, \Delta \delta, \Delta \omega_r, \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4, \Delta x_5, \Delta x_8, \Delta x_9, \Delta x_{10}, \Delta x_{11}, \Delta x_{12}, \Delta x_6, \\ \Delta x_7, \Delta B_{CER} \end{bmatrix}$$

O vetor $\Delta \mathbf{y}$, com todas as variáveis algébricas do sistema global, está apresentado a seguir:

$$\Delta \mathbf{y} = [\Delta E_{fd}, \Delta V_{SAD}, \Delta V_{SAC}, \Delta I_d, \Delta I_q, \Delta V_{HD}, \Delta V_{HQ}, \Delta V_{tD}, \Delta V_{tQ}, \Delta I_{CERD}, \Delta I_{CERQ}, \Delta B_{eqv}, \Delta y_1, \Delta P_e]$$

Finalmente, o vetor $\Delta \mathbf{u}$ de desvios das variáveis de entrada, fica da seguinte forma:

$$\Delta \mathbf{u} = [\Delta P_m, \Delta V_{ref}, \Delta V'_{ref}], \text{ onde } \Delta V'_{ref} = \Delta V_{ref(CER)}$$

As submatrizes A1, A2, A3, A4 e B caracterizando o comportamento do sistema global com todos os equipamentos e controles representados, estão apresentadas nas figuras a seguir e possuem respectivamente as seguintes dimensões (18x18), (18x14), (14x18), (14x14) e (18x3).

$\Delta E'q$	$\Delta E''q$	$\Delta E''d$	$\Delta \delta$	Δwr	$\Delta x1$	$\Delta x2$	$\Delta x3$	$\Delta x4$	$\Delta x5$	$\Delta x8$	$\Delta x9$	$\Delta x10$	$\Delta x11$	$\Delta x12$	$\Delta x6$	$\Delta x7$	ΔB_{CER}
A11	A12																
A21	A22																
		A33															
				A45													
	A52	A53		A55													
					C11												
					C21	C22											
				F11			E11										
				F21			E21	E22									
				F31			E31	E32	E33								
										I11							
										I21	I22						
										I31	I32	I33					
										I41	I42	I43	I44				
													I54	I55			
															G11		
															G21		
															G31	G32	G33

Figura 5.9 - Matriz A1 (18 x 18) do Sistema Global

ΔEfd	$\Delta Vsad$	$\Delta Vsac$	ΔId	ΔIq	ΔVhD	ΔVhQ	ΔVtD	$\Delta VtqQ$	ΔI_{CERD}	ΔI_{CERQ}	$\Delta Beqv$	$\Delta Y1$	ΔPe
B11			B12										
B21			B22										
				B33									
			B52	B53									
	D11'						D12'	D13'					
													J11
													J21
													J31
													J41
						H11	H12		H13	H14			
		H25											
		H35											

Figura 5.10 – Matriz A2 (18x14)

-1													
	-1												
		-1											
			X_d''				$\cos\delta_0$	$\sin\delta_0$					
				$-X_d''$			$\sin\delta_0$	$-\cos\delta_0$					
					Y_{22}		Y_{21}			1			
						$-Y_{22}$		$-Y_{21}$		1			
			$\cos\delta_0$	$-\sin\delta_0$	Y_{12}		Y_{11}						
			$-\sin\delta_0$	$-\cos\delta_0$		$-Y_{12}$		$-Y_{11}$					
						$-\text{Beqv}_0$				-1		$-\text{VhQ}_0$	
					Beqv_0					-1		VhD_0	
												-1	
													-1
			$-E''_d$	$-E''_q$									1

Figura 5.13 – Matriz A4 (14x14)

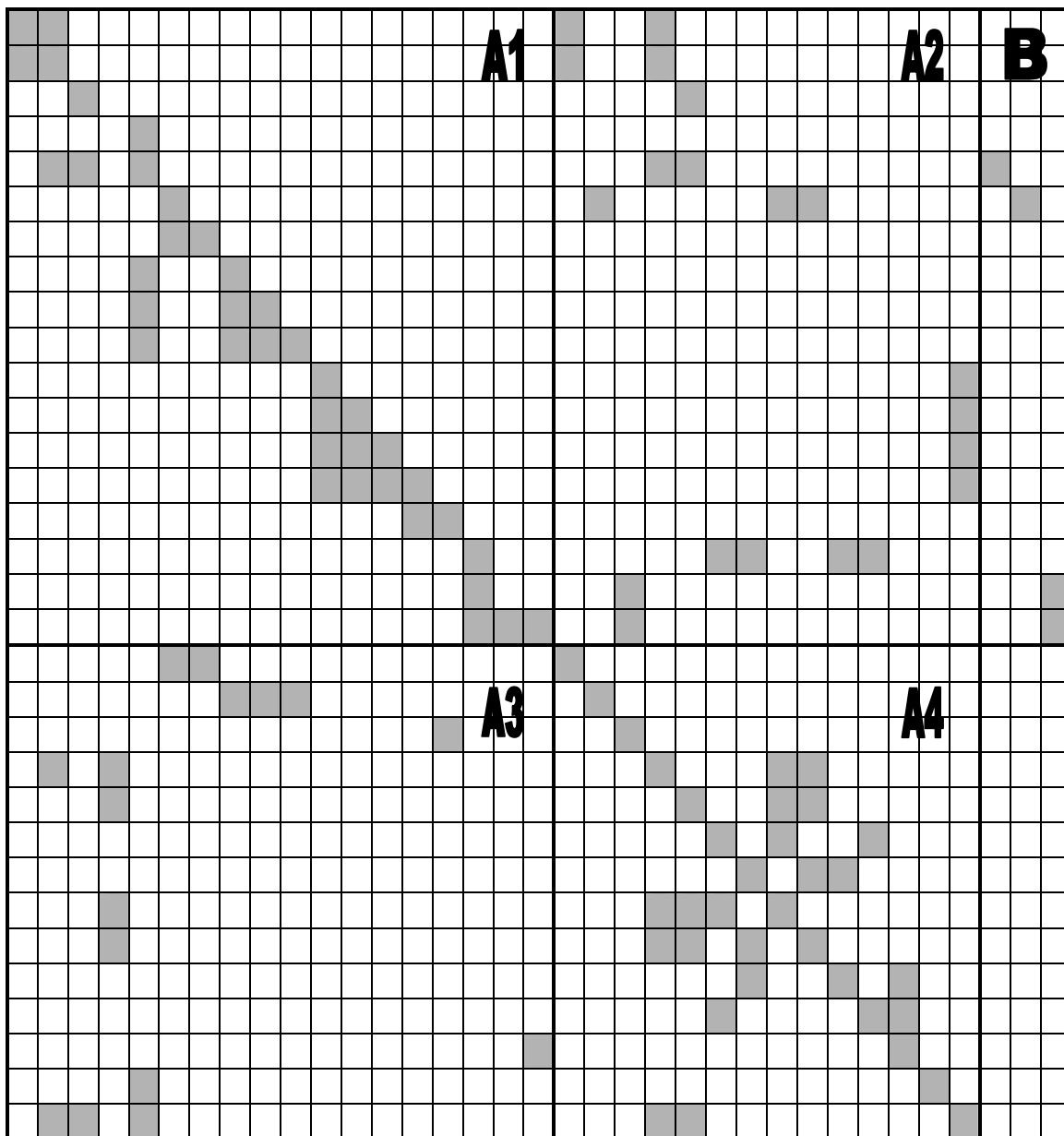


Figura 5.14 – Matriz Global do Sistemas e respectivas Submatrizes associadas

6 ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DO SISTEMA

Toda a análise apresentada neste capítulo se refere ao sistema elétrico de potência apresentado na Figura 5.1 do Capítulo 5 e reproduzido neste capítulo na Figura 6.1 para melhor referência.

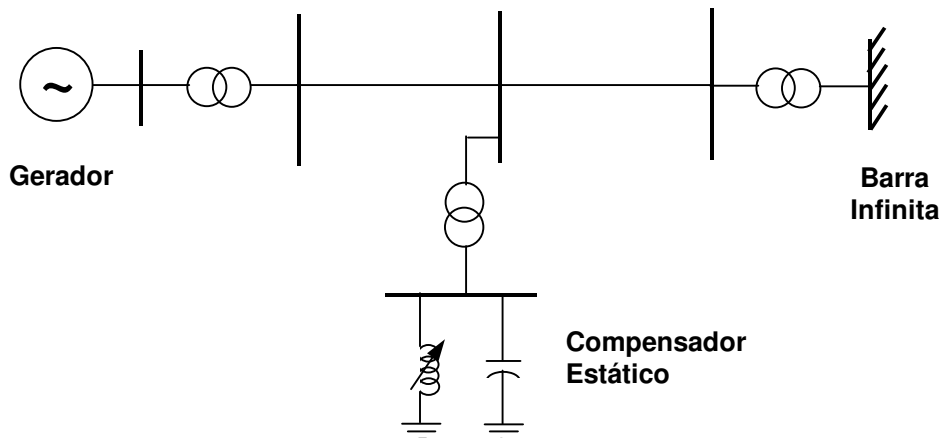


Figura 6.1 - Estação geradora ligada a uma barra infinita por meio de um sistema de transmissão com compensação estática de potência reativa.

O sistema da Figura 6.1 composto por uma estação geradora ligada a uma barra infinita por meio de um linha de transmissão com compensação estática, foi descrito detalhadamente no Capítulo 5. A fim de caracterizar a operação deste sistema para diferentes cenários de geração e conseqüentemente de transferência de potência, estão apresentadas na Figura 6.2 as curvas da tensão na barra de alta do CER e da defasagem angular do gerador, ambas em função da potência ativa despachada na estação geradora, obtidas para a condição em que o CER está desligado e a tensão terminal do gerador é igual a 1pu.

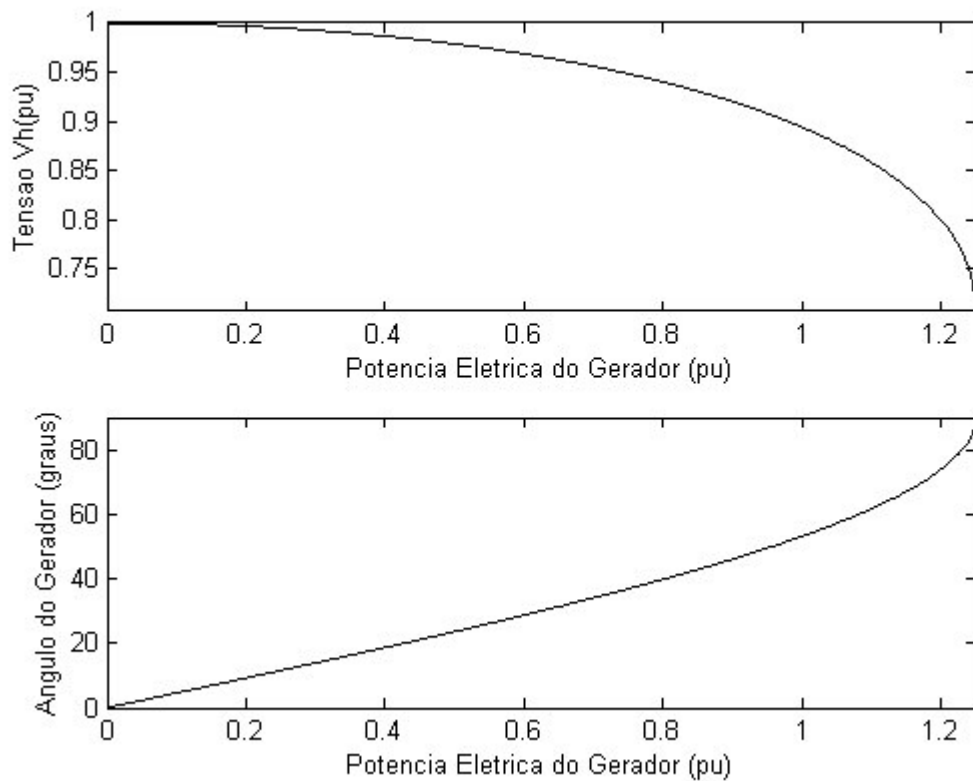


Figura 6.2 - Curva de Tensão na barra de alta tensão do CER em função da Potência Elétrica despachada no gerador e Curva da defasagem angular do gerador também em função da Potência Elétrica despachada no gerador

Através da Figura 6.2 verifica-se que na ausência de compensação estática no sistema de transmissão, é possível manter tensões superiores a 0,9pu para valores de transferência de potência de aproximadamente 1pu. Para valores de transferência superiores a 1pu, observa-se dificuldade de manutenção do perfil de tensão em valores adequados e também elevados valores de ângulo de carga, o qual chega a 90° quando o despacho é igual a 1,25pu.

De forma análoga ao que foi feito para o caso sem CER, com objetivo de caracterizar a operação do sistema também com o CER em operação, estão apresentadas na Figura 6.3, as curvas de potência reativa gerada/absorvida pelo gerador e pelo CER e a variação da defasagem angular do gerador, todas em função da tensão na barra de alta tensão do CER, quando a transferência de potência através do sistema de transmissão é

igual a 1pu.

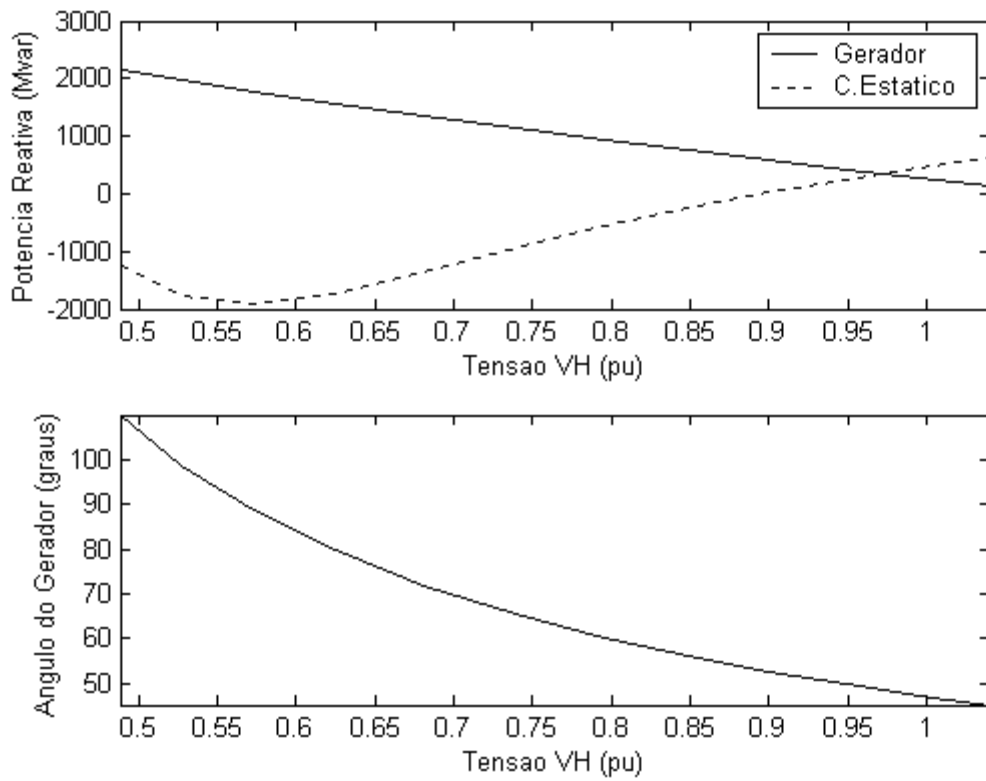


Figura 6.3 – Curva de potência reativa gerada/absorvida no gerador e no CER em função da tensão na barra de alta tensão do CER e defasagem angular do gerador também em função da tensão na barra de alta tensão do CER

As curvas da Figura 6.3 foram obtidas para a situação de capacidades de absorção e de geração ilimitadas para o gerador e para o CER. Entretanto vale ressaltar que o CER deve operar na faixa entre -96Mvar a 384Mvar .

6.1- Determinação dos Autovalores

Neste item são apresentados resultados da avaliação dos autovalores da matriz de estado do sistema global, com representação da dinâmica dos seguintes componentes do sistema: gerador síncrono, sistema de excitação, sinal adicional estabilizador, sistema de transmissão CA, compensador estático de reativo e seu sinal adicional de modulação.

6.1.1- Procedimento Computacional

Para determinação dos autovalores do sistema em questão foram aplicados os fundamentos teóricos para avaliação da estabilidade sob pequenos desvios apresentados no Capítulo 4.

Foram modelados os componentes do sistema elétrico da Figura 6.1 para execução de estudos de estabilidade de pequenos desvios, a partir da linearização das equações diferenciais que representam o comportamento dinâmico de cada um. Esta etapa foi apresentada no Capítulo 5.

Vale ressaltar que anteriormente ao processo de determinação de autovalores, o sinal adicional estabilizador do regulador de tensão do gerador e a modulação do CER tiveram seus parâmetros reajustados através do método do lugar das raízes.

Foi então elaborado um programa computacional que executa as seguintes tarefas em ordem seqüencial:

- 1) Recebimento da informação do modo de operação do CER, modo flat (0Mvar) ou não-flat, controlando a tensão do barramento de alta tensão.
- 2) Leitura dos dados do sistema elétrico e de seus componentes, tais como: tensão, potência gerada, parâmetros do gerador, do CER e de seus controles, etc. A base de referência utilizada no programa foi a potência nominal do gerador (1200MVA). Embora o programa permita a consideração da susceptância da linha de transmissão, a mesma não foi considerada, sem prejuízo para a análise da estabilidade em regime permanente do sistema em questão.
- 3) Solução do fluxo de potência, determinando os valores de tensão, correntes, fluxos de potência, potências ativa e reativa geradas, necessárias para a determinação das matrizes de estado do sistema.
- 4) Construção das matrizes de estado **A1**, **A2**, **B**, **A3** e **A4** do sistema elétrico, a partir do cálculo de cada termo.
- 5) Determinação da matriz de estado **A**, a partir da igualdade $\mathbf{A} = \mathbf{A1} - \mathbf{A2} \cdot \mathbf{A4}^{-1} \cdot \mathbf{A3}$. São determinadas também as matrizes **B** e **C** das equações 4.13 e 4.14.

- 6) Determinação dos autovalores da matriz de estado **A**.

6.1.2- Cenários Analisados

A fim de avaliar a estabilidade para pequenos desvios do sistema elétrico da Figura 6.1, foram analisadas diversas configurações desde o sistema com o gerador apenas, até o sistema completo com todos os seus equipamentos e respectivos controles. Para cada uma dessas configurações foram determinados os autovalores para diferentes valores de transferência de potência quando não há suporte de reativo do compensador estático (operação flat) e para diferentes valores de compensação reativa por parte do CER (operação não-flat) quando a transferência de potência é de 1pu. A Tabela 6.1 apresenta todos os cenários analisados.

Tabela 6.1 – Casos para os quais foram determinados os autovalores

Caso	Gerador	RAT	SAE_RAT	CER	SAE_CER	Operação	Variação
1	SIM	-	-	-	-	FLAT	$0 < P_g < 1,0\text{pu}$
2	SIM	-	-	-	-	NÃO-FLAT	$-0,2 < Q_{\text{CER}} < 0,8\text{pu}$
3	SIM	SIM	-	-	-	FLAT	$0 < P_g < 1,0\text{pu}$
4	SIM	SIM	-	-	-	NÃO-FLAT	$-0,2 < Q_{\text{CER}} < 0,8\text{pu}$
5	SIM	SIM	SIM	-	-	FLAT	$0 < P_g < 1,0\text{pu}$
6	SIM	SIM	SIM	-	-	NÃO-FLAT	$-0,2 < Q_{\text{CER}} < 0,8\text{pu}$
7	SIM	SIM	SIM	SIM	-	FLAT	$0 < P_g < 1,0\text{pu}$
8	SIM	SIM	SIM	SIM	-	NÃO-FLAT	$-0,2 < Q_{\text{CER}} < 0,8\text{pu}$
9	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	FLAT	$0 < P_g < 1,0\text{pu}$
10	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO-FLAT	$-0,2 < Q_{\text{CER}} < 0,8\text{pu}$
11	SIM	SIM		SIM		FLAT	$0 < P_g < 1,0\text{pu}$
12	SIM	SIM		SIM		NÃO-FLAT	$-0,2 < Q_{\text{CER}} < 0,8\text{pu}$
13	SIM	SIM		SIM	SIM	FLAT	$0 < P_g < 1,0\text{pu}$
14	SIM	SIM		SIM	SIM	NÃO-FLAT	$-0,2 < Q_{\text{CER}} < 0,8\text{pu}$

Todos os autovalores calculados estão apresentados numericamente no Anexo 2.

6.1.3- Resultados e Análises

6.1.3.1 *Caso 1 – Operação do gerador sob controle manual do sistema de excitação e sem CER*

A Figura 6.1 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle manual do sistema de excitação e o CER está desligado do sistema.

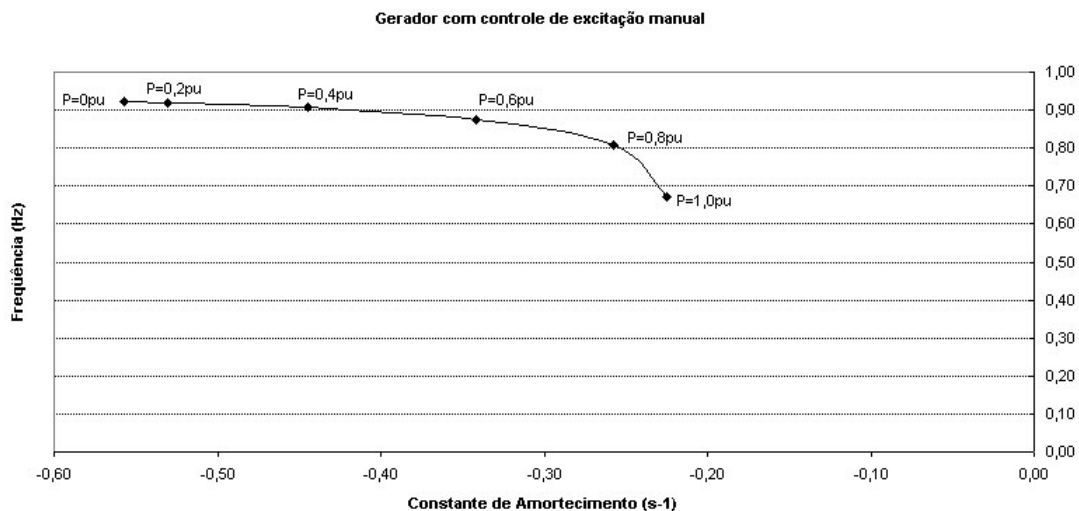


Figura 6.4 – Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle manual do sistema de excitação e sem CER

Para esta condição operativa, observa-se que o modo eletromecânico é estável para a faixa de transferência de potência entre 0 e 1,0pu, e ressalta-se que o aumento da potência transferida contribui pra tornar o sistema mais instável, tendo em vista o descolamento para a direita do plano complexo.

6.1.3.2 *Caso 2 – Operação do gerador sob controle manual do sistema de excitação e com CER operando como uma compensação reativa fixa*

A Figura 6.5 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle manual do sistema de excitação e o CER está operando como uma compensação reativa fixa. A potência de transferência foi considerada como sendo igual a 1pu nesta análise e a tensão na barra de alta tensão do CER foi variada de forma a explorar toda a faixa operativa do mesmo (-0,2 a 0,8pu).

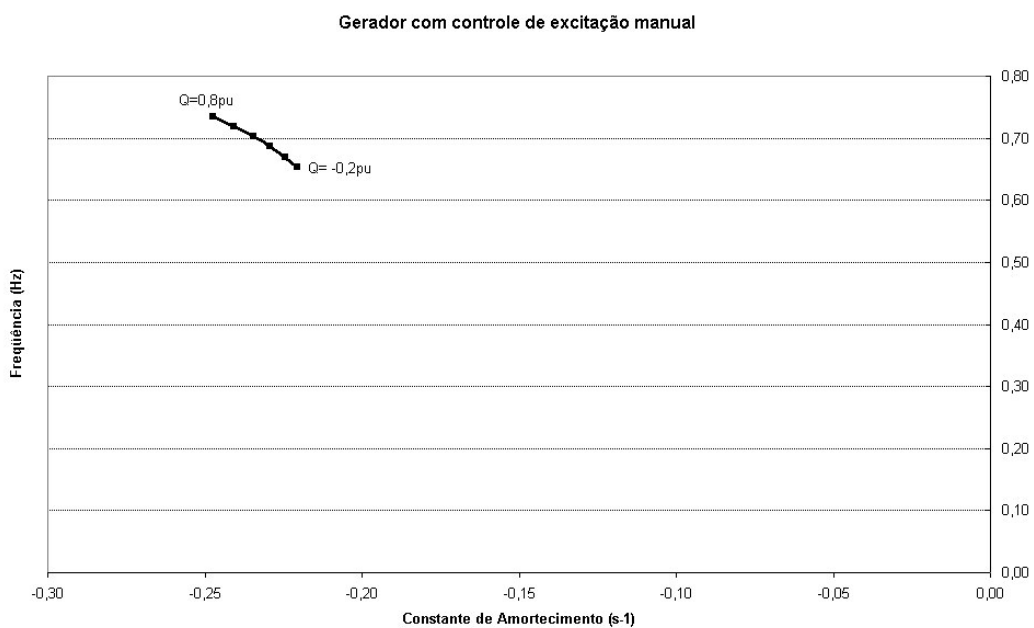


Figura 6.5 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle manual do sistema de excitação e com CER operando como uma compensação reativa fixa

A observação da Figura 6.5 leva à conclusão de que a operação do CER na faixa capacitiva torna o sistema mais estável, quanto maior for o Mvar fornecido pelo mesmo. Por outro lado, a operação do CER como reator, tende a deslocar o modo eletromecânico para o lado direito do plano complexo reduzindo sua estabilidade para pequenos desvios, ou seja, a redução da tensão de controle do CER apresenta uma tendência desestabilizante do modo eletromecânico. Apesar disto, na ausência do sistema de excitação, o modo eletromecânico é estável para toda a faixa operativa de potência reativa do CER.

6.1.3.3 Caso 3 – Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e sem CER

A Figura 6.6 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação e o CER está desligado. A tensão terminal no gerador e a tensão na barra infinita foram consideradas como sendo igual a 1pu nesta análise.

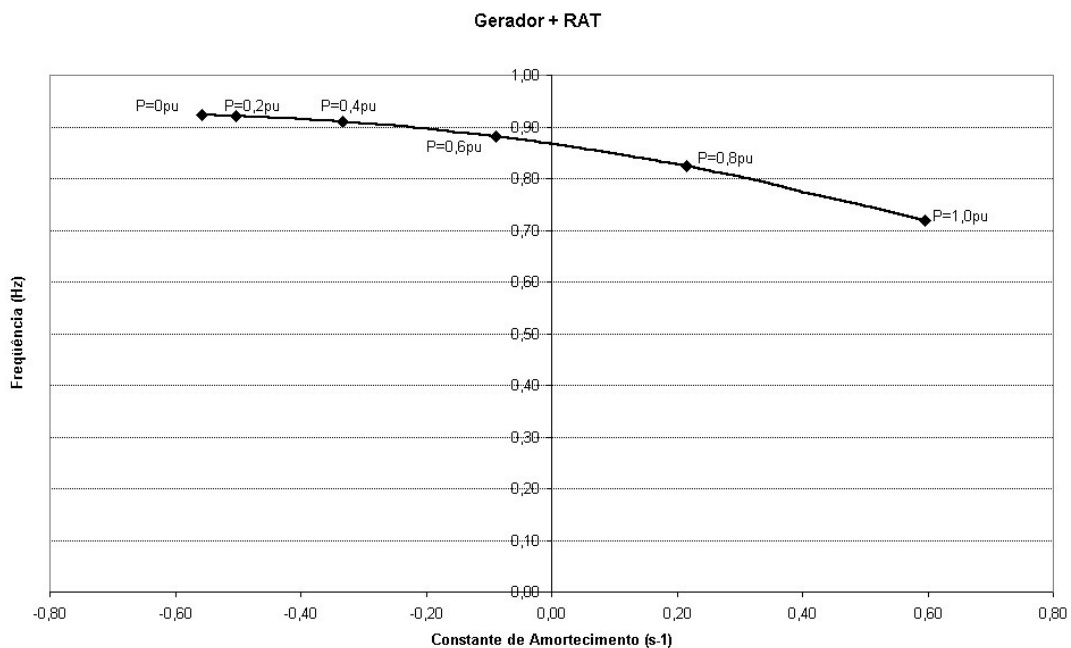


Figura 6.6 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e sem CER

A partir da Figura 6.6 observa-se a redução significativa de amortecimento do modo eletromecânico do sistema, inclusive com operação instável para valores de transferência de potência superiores a 0,66pu. A ação extremamente rápida do sistema de excitação no processo de controle de tensão contribui para a redução do amortecimento das oscilações eletromecânicas.

6.1.3.4 Caso 4 – Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e com CER operando como compensação reativa fixa

A Figura 6.7 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação e o CER está operando como uma compensação reativa fixa. A potência de transferência foi considerada como sendo igual a 1pu nesta análise e a tensão na barra de alta tensão do CER foi variada de forma a explorar toda a faixa operativa do mesmo (-0,2 a 0,8pu).

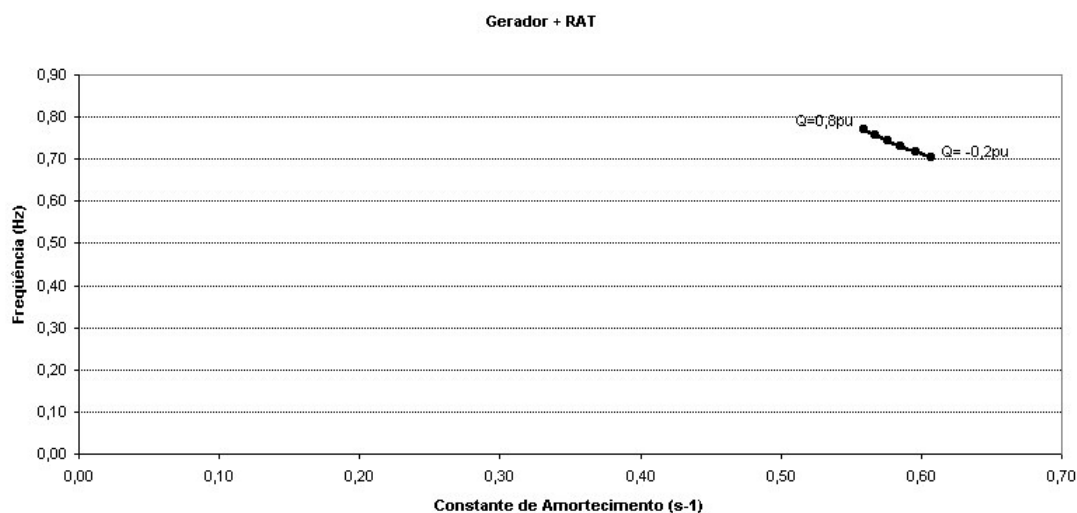


Figura 6.7 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e com CER operando como uma compensação fixa

Na Figura 6.6 observou-se que para potência de transferência igual a 1pu com o CER desligado o sistema era instável. Na Figura 6.7 observa-se que para este nível de transferência de potência, o modo eletromecânico é instável para qualquer valor de potência reativa fornecida/absorvida pelo CER e que o aumento da potência reativa no CER tende a estabilizar o sistema, deslocando o modo eletromecânico para a esquerda do plano complexo.

6.1.3.5 Caso 5 – Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com sinal adicional estabilizador ligado e sem CER

A Figura 6.8 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação com sinal adicional estabilizador (SAE) e o CER está desligado. A tensão terminal no gerador e a tensão na barra infinita foram consideradas como sendo igual a 1pu nesta análise.

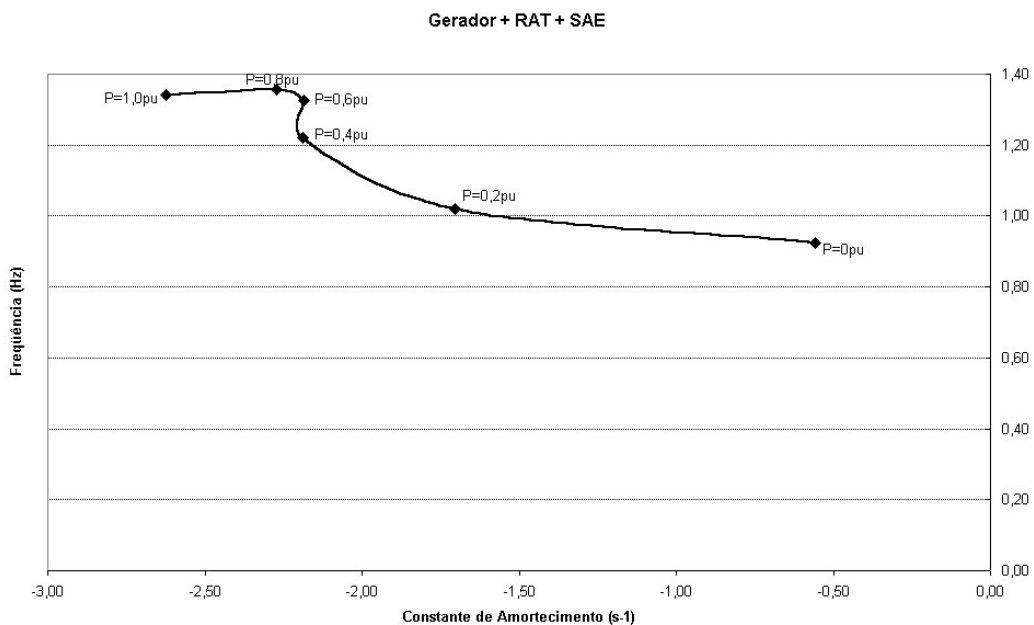


Figura 6.8 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com SAE ligado e sem CER

A partir da análise da Figura 6.8 observa-se claramente o acréscimo de amortecimento promovido pelo sinal adicional estabilizador (SAE). Com o SAE ligado, o modo eletromecânico é estável para valores de transferência de potência superiores a 0pu, com efeito positivo do aumento desta potência.

6.1.3.6 Caso 6 – Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com sinal adicional estabilizador ligado e com CER operando como uma compensação reativa fixa

A Figura 6.9 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação e o CER está operando como uma compensação reativa fixa. A potência de transferência foi considerada como sendo igual a 1pu nesta análise e a tensão na barra de alta tensão foi variada de forma a explorar toda a faixa operativa do CER (-0,2 a 0,8pu).

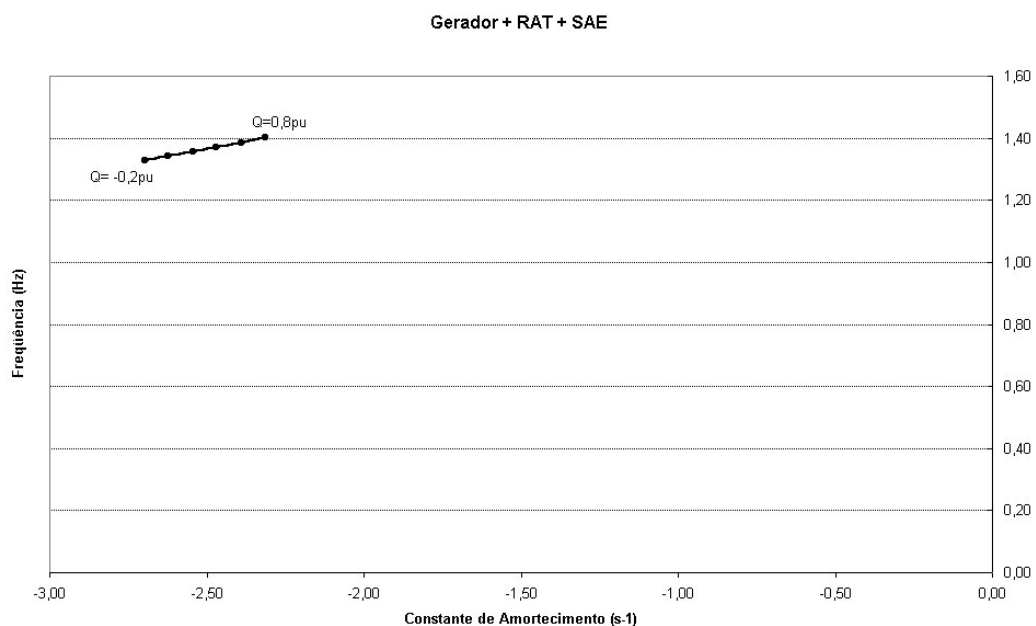


Figura 6.9 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com SAE ligado e sem CER

Ao contrário do caso sem o SAE (vide Figura 6.7), o aumento da tensão terminal da barra de alta tensão do CER e conseqüentemente da potência reativa do CER quando o SAE está em operação, tende a desestabilizar o modo eletromecânico.

6.1.3.7 Caso 7 – Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com sinal adicional estabilizador ligado e com CER ligado na operação “flat”

A Figura 6.10 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação com sinal adicional estabilizador (SAE) e o CER está ligado operando com 0Mvar (operação “flat”). A tensão terminal no gerador e a tensão na barra infinita foram consideradas como sendo igual a 1pu nesta análise.

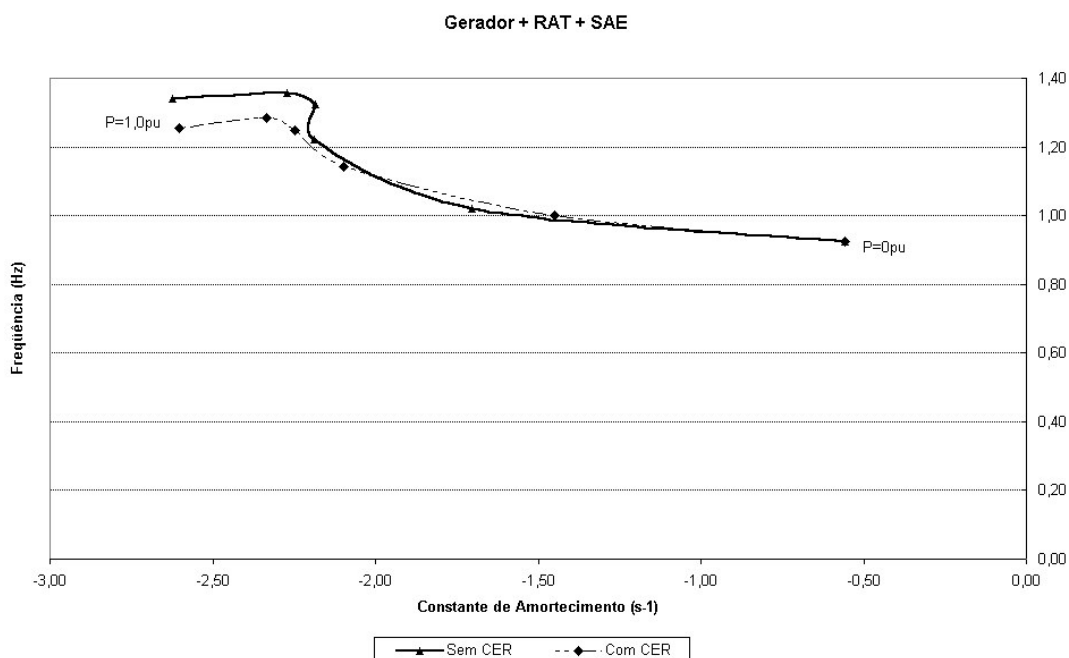


Figura 6.10 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com SAE ligado e com CER na operação “flat”

A partir da Figura 6.10 observa-se que o CER sem o sinal adicional de modulação provocou redução na frequência de oscilação do modo eletromecânico, para valores de potência transferida superiores a 0,2pu, sem alteração significativa no amortecimento.

6.1.3.8 Caso 8 – Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com sinal adicional estabilizador ligado e com CER ligado na operação “não-flat”

A Figura 6.11 apresenta os autovalores do sistema e a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação com SAE e o CER está operando com potência reativa diferente de zero. A potência de transferência foi considerada como sendo igual a 1pu nesta análise e a tensão na barra de alta tensão do CER foi variada de forma a explorar toda a faixa operativa do CER (-0,2 a 0,8pu).

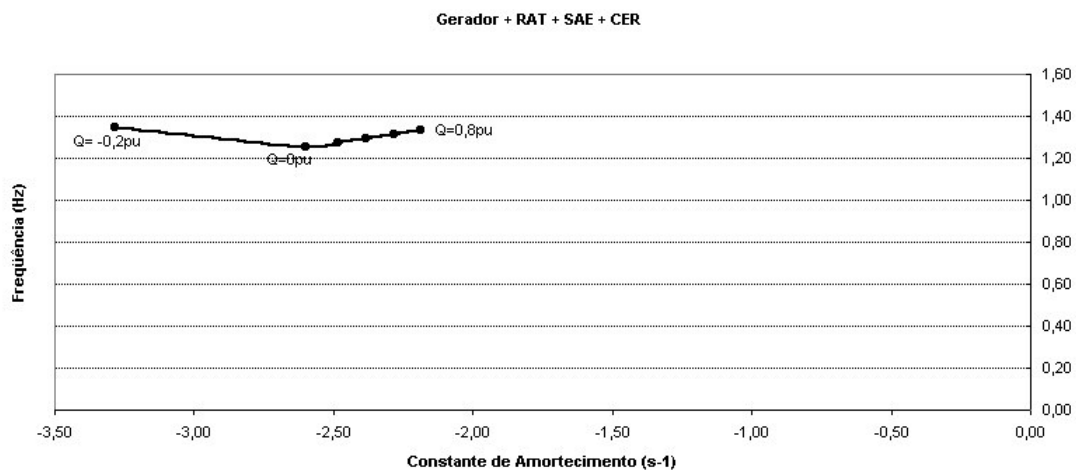


Figura 6.11 – Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com SAE ligado e com CER na operação “não-flat”

Para esta condição operativa, observou-se que a redução da tensão terminal da barra de alta tensão do CER e conseqüentemente da potência reativa do CER, tende a tornar mais estável o modo eletromecânico, deslocando-o para a esquerda do plano complexo. Outro efeito a ser mencionado é que na faixa de operação capacitiva, o aumento da tensão de controle do CER provoca aumento da frequência de oscilação do modo eletromecânico, enquanto que na faixa de operação indutiva, o efeito é inverso, a

elevação da tensão de controle provoca redução da frequência de oscilação. A frequência de oscilação mínima ocorre para operação do CER com 0Mvar.

6.1.3.9 Caso 9 – Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com CER ligado na operação “flat, ambos com sinal adicional estabilizador

A Figura 6.12 apresenta os autovalores do sistema e a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação com sinal adicional estabilizador (SAE), o CER está operando com 0Mvar (operação “flat”) e com sinal de modulação ligado. A tensão terminal no gerador e a tensão na barra infinita foram consideradas como sendo igual a 1pu nesta análise.

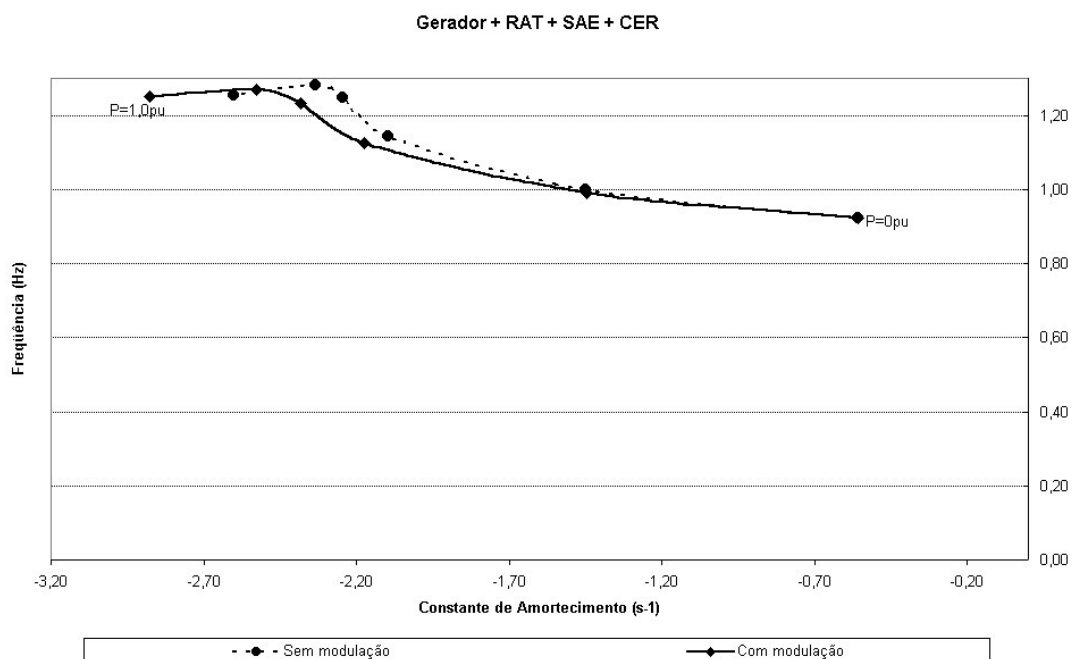


Figura 6.12 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e com CER na operação “flat” ambos com SAE

Na Figura 6.12 observa-se o deslocamento do modo eletromecânico para a esquerda do plano complexo com redução desprezível da frequência de oscilação, demonstrando o efeito da conexão de um sinal adicional de modulação ao compensador estático de reativo (CER) no sentido de contribuir positivamente para o acréscimo de amortecimento.

6.1.3.10 Caso 10 - Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com CER ligado na operação “não-flat”, ambos com sinal adicional estabilizador

A Figura 6.13 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação com SAE e o CER está operando com potência reativa diferente de zero e com sinal adicional de modulação ligado. A potência de transferência foi considerada como sendo igual a 1pu nesta análise e a tensão na barra de alta tensão do CER foi variada de forma a explorar toda a faixa operativa do CER (-0,2 a 0,8pu).

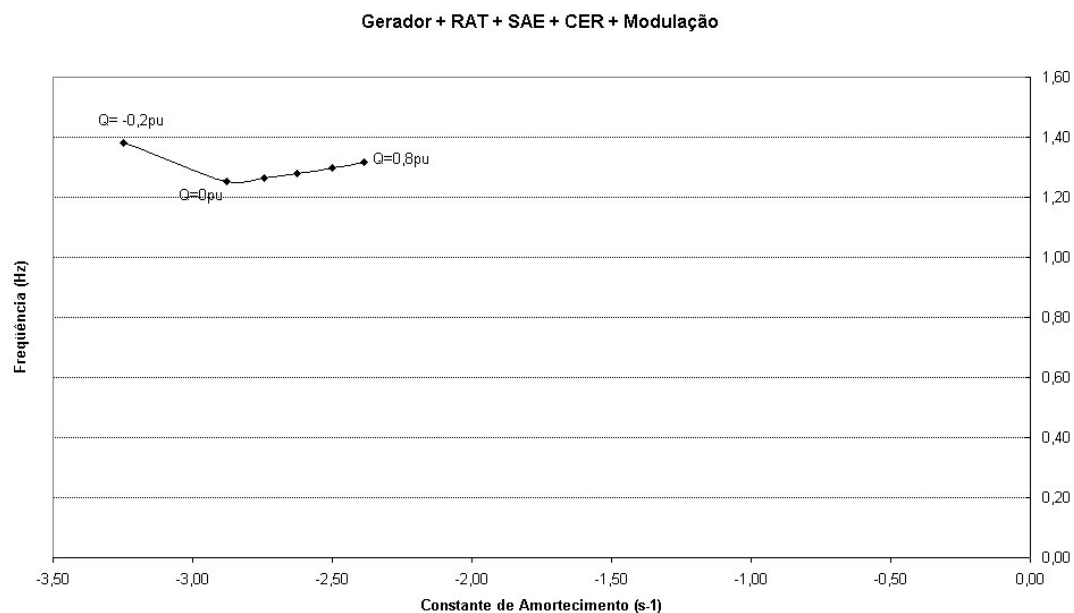


Figura 6.13 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e com CER na operação “não-flat” ambos com SAE

A conexão do sinal adicional de modulação ao CER não modificou o efeito da variação do suporte de potência reativa pelo CER. A redução da tensão terminal da barra de alta tensão do CER e conseqüentemente da potência reativa do CER, torna mais estável o modo eletromecânico, deslocando-o para a esquerda do plano complexo. Na faixa de operação capacitiva, o aumento da tensão de controle do CER provoca elevação da frequência de oscilação do modo eletromecânico, enquanto que na faixa de operação indutiva, o efeito é inverso. A elevação da tensão de controle provoca redução da frequência de oscilação. A frequência de oscilação mínima ocorre para operação do CER com 0Mvar.

6.1.3.11 Caso 11 - Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com CER ligado na operação “flat”, ambos sem sinal adicional estabilizador

A Figura 6.14 apresenta os autovalores do sistema e a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação sem sinal adicional estabilizador (SAE), o CER está operando com 0Mvar (operação “flat”), também sem sinal de modulação. A tensão terminal no gerador e a tensão na barra infinita foram consideradas como sendo igual a 1pu nesta análise.

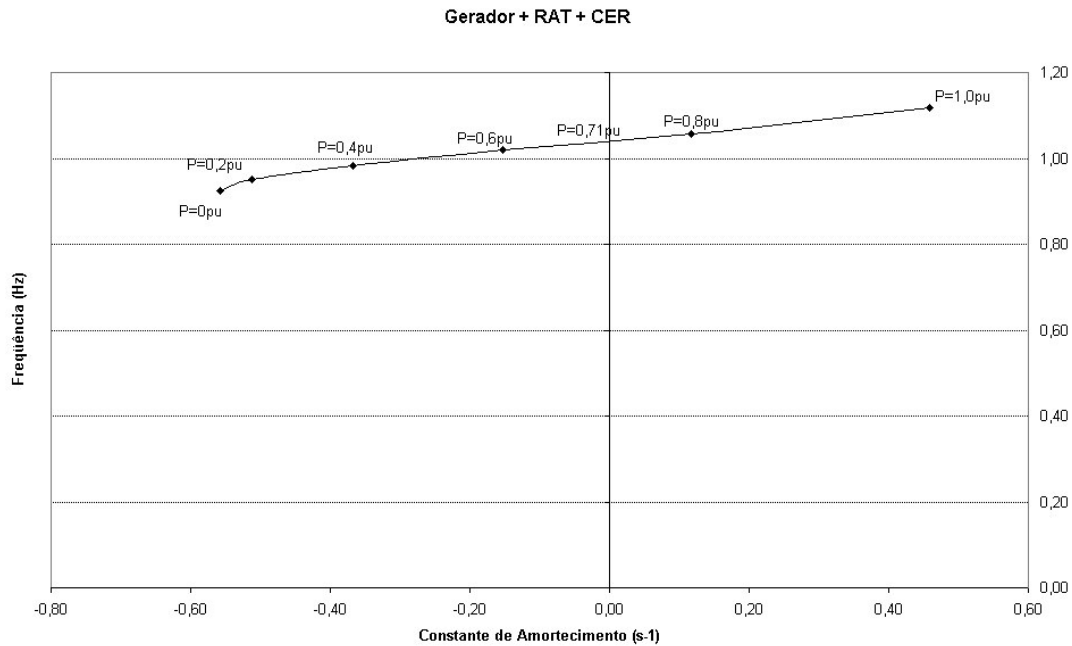


Figura 6.14 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e com CER na operação “flat”, ambos sem SAE

Embora tenha havido um pequeno deslocamento do modo eletromecânico para a esquerda do plano complexo, em relação ao caso sem o CER, o suporte de potência reativa fornecido pelo mesmo não foi suficiente para tornar o sistema estável para valores de potência transferida superiores a 0,71pu. Outra consequência advinda da conexão do CER ao sistema gerador + RAT, foi a elevação da frequência de oscilação do modo eletromecânico.

6.1.3.12 Caso 12 - Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com CER ligado na operação “não-flat”, ambos sem sinal adicional estabilizador

A Figura 6.15 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação e o CER está operando com potência reativa diferente de zero, ambos sem sinal adicional estabilizador. A potência de transferência foi considerada como sendo

igual a 1pu nesta análise e a tensão na barra de alta tensão do CER foi variada de forma a explorar toda a faixa operativa do CER (-0,2 a 0,8pu).

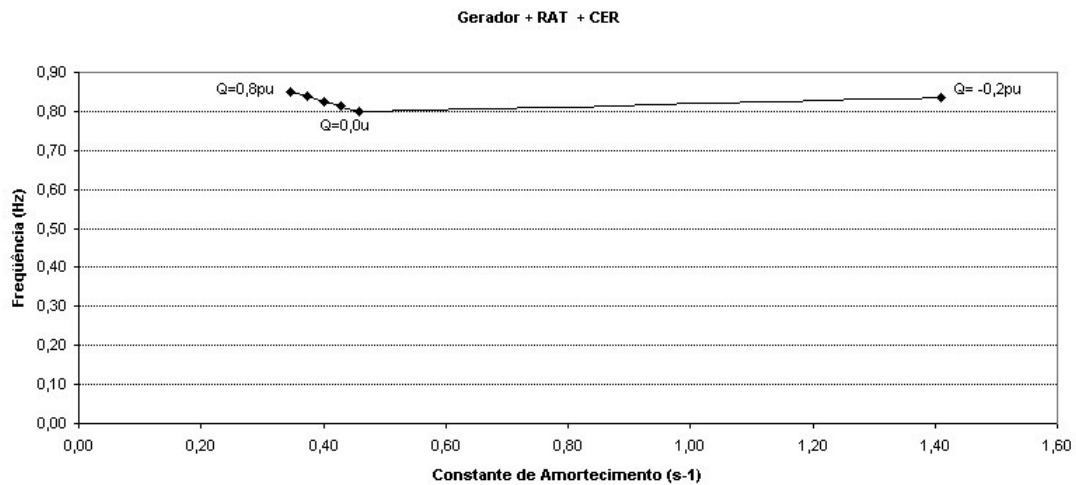


Figura 6.15 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e com CER na operação “não-flat” ambos sem SAE

Com o CER conectado, observa-se a mesma tendência no comportamento do modo eletromecânico que aquela observada para o caso apenas com o gerador + RAT, ou seja, o aumento da potência reativa fornecida pelo CER tende a deslocar o referido modo para a esquerda do plano complexo. Apesar disto, para a potência transferida de 1pu, o suporte de reativo pelo CER não foi capaz de tornar o modo eletromecânico estável. Na faixa de operação capacitiva, o aumento da tensão de controle do CER provoca elevação da frequência de oscilação do modo eletromecânico, enquanto que na faixa de operação indutiva, o efeito é inverso. A elevação da tensão de controle provoca redução da frequência de oscilação. A frequência de oscilação mínima ocorre para operação do CER com 0Mvar.

6.1.3.13 Caso 13 - Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com CER ligado na operação “flat”, apenas este último com sinal adicional estabilizador

A Figura 6.16 apresenta os autovalores do sistema e a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação sem sinal adicional estabilizador (SAE), o CER está operando com 0Mvar (operação “flat”) e com sinal de modulação ligado. A tensão terminal no gerador e a tensão na barra infinita foram consideradas como sendo igual a 1pu nesta análise.

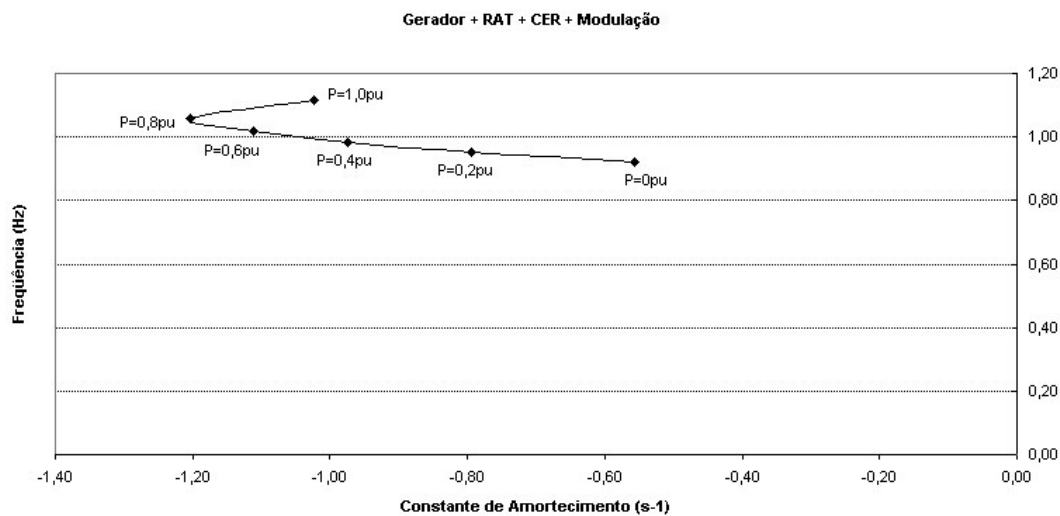


Figura 6.16 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e com CER na operação “flat”, apenas este último com SAE

De forma semelhante ao sinal adicional estabilizador conectado ao sistema de excitação do gerador, a conexão deste tipo de sinal à malha de controle do CER, forneceu amortecimento ao sistema, tornando o modo eletromecânico estável para valores de potência transferida entre 0 e 1pu, com efeito positivo do aumento desta potência até 0,8 pu, quando então o amortecimento começa a ser reduzido. O sinal adicional estabilizador associado ao CER não provocou variação significativa na frequência de oscilação do modo eletromecânico.

6.1.3.14 Caso 14 - Operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação, com CER ligado na operação “não-flat”, apenas este último com sinal adicional estabilizador

A Figura 6.17 apresenta a excursão do modo eletromecânico no plano complexo associado à resposta natural da usina geradora sob pequenos desvios, considerando a condição de operação em que o gerador está sob controle automático do sistema de excitação e o CER está operando com potência reativa diferente de zero, este último com sinal adicional de modulação ligado. A potência de transferência foi considerada como sendo igual a 1pu nesta análise e a tensão na barra de alta tensão do CER foi variada de forma a explorar toda a faixa operativa do CER (-0,2 a 0,8pu).

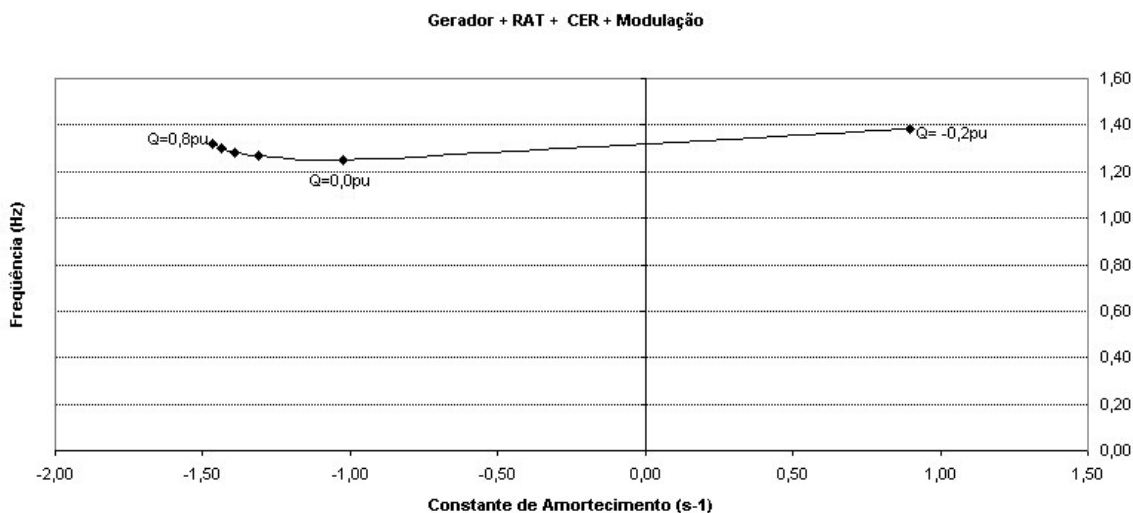


Figura 6.17 - Excursão do modo eletromecânico no plano complexo para o caso de operação do gerador sob controle automático do sistema de excitação e com CER na operação “não-flat” apenas este último com SAE

Ao contrário do que foi observado para o caso 1, onde o sinal adicional estabilizador estava ligado ao sistema automático de excitação do gerador, a conexão deste sinal à malha de controle do CER não foi capaz de manter o modo eletromecânico estável para toda a faixa nominal do CER, pois para o CER operando na região indutiva o modo eletromecânico se tornou instável.

Este tipo de restrição operativa observada poderia servir ao planejamento como forma de dimensionar a faixa operativa de um CER.

A Figura 6.18 e a Figura 6.19 a seguir apresentam a excursão do modo eletromecânico para todos os cenários analisados, considerando o compensador estático de reativo na operação “flat” e “não-flat”, respectivamente. Desta forma, é possível visualizar a influência de cada dispositivo sobre a frequência de oscilação e o amortecimento do modo eletromecânico.

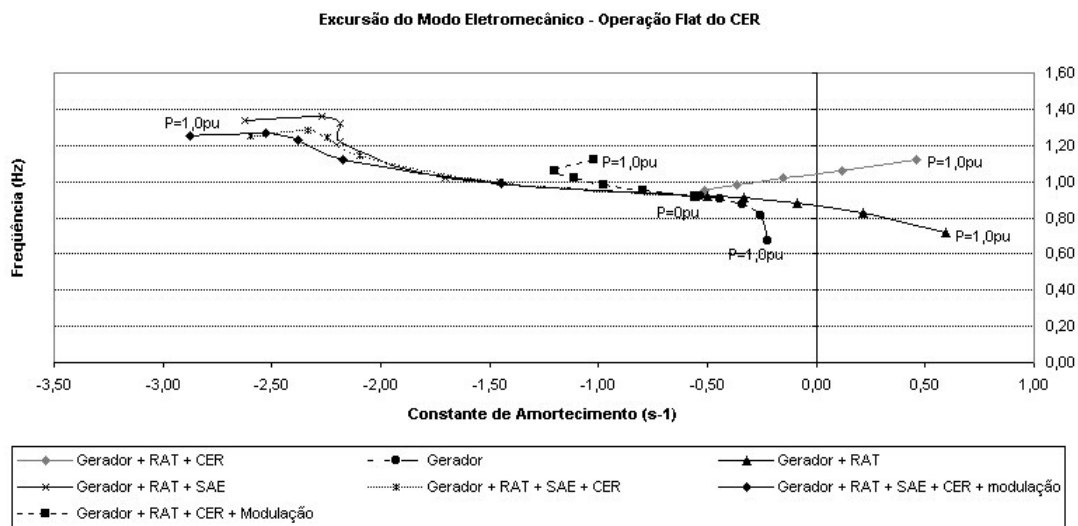


Figura 6.18 – Excursão do modo eletromecânico no plano complexo pra todos os cenários analisados quando o CER está na operação “flat”

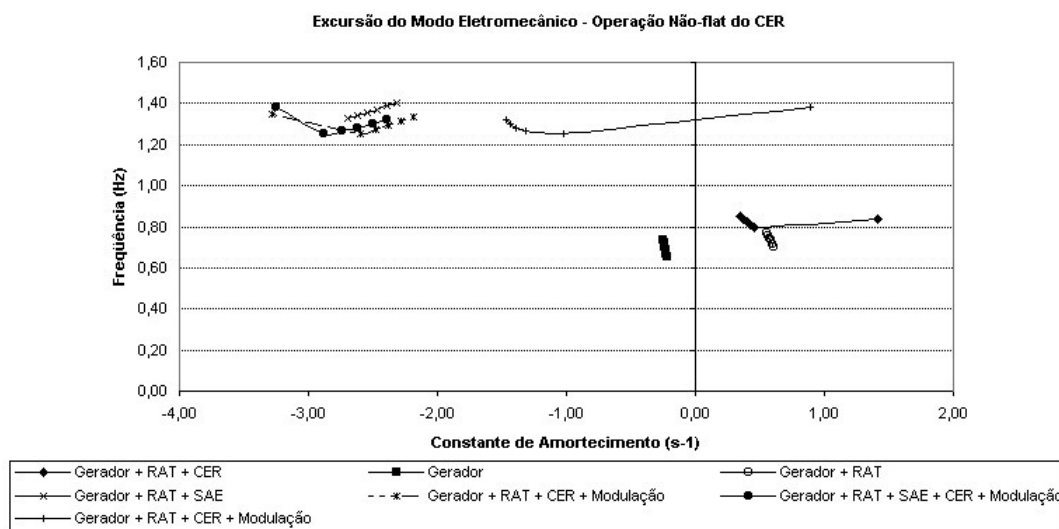


Figura 6.19– Excursão do modo eletromecânico no plano complexo pra todos os cenários analisados quando o CER está na operação “não-flat”

6.1.3.15 Análise do Desempenho Dinâmico do Sistema

Adicionalmente à análise dos autovalores do sistema elétrico de potência apresentado na Figura 6.1, foram realizadas simulações dinâmicas utilizando como ferramenta computacional o programa ANATEM desenvolvido pelo CEPTEL para análise de transitórios eletromecânicos. Nas simulações foram utilizados os modelos lineares apresentados no Capítulo 5 deste trabalho, para representação do gerador, do CER e seus respectivos controles.

Considerando o cenário em que está em operação apenas o gerador com sistema automático de excitação, foi simulada a aplicação de um curto-circuito monofásico durante 100ms na barra de alta tensão do CER quando este está operando com 0MVAR, a potência transferida pelo sistema é de 0,8pu e as tensões do gerador e da barra infinita estão ajustadas em 1pu. Na análise de estabilidade sob pequenos desvios, verificou-se que para esta condição operativa o sistema era instável, com autovalor no lado direito do plano complexo (parte real positiva). A operação estável do sistema foi obtida com a associação de um sinal adicional estabilizador ao sistema de excitação do gerador ou ao CER. Estes mesmos resultados foram verificados nas simulações dinâmicas realizadas

com o programa ANATEM, conforme observa-se nas Figuras 6.20, 6.21 e 6.22 a seguir. Para o sistema operando apenas com o gerador e com sistema de excitação automático, a perturbação provocou instabilidade. A utilização de um sinal adicional estabilizador associado ao sistema de excitação do gerador ou ao CER localizado no meio do sistema de transmissão, mostrou-se um recurso eficiente para fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas e tornar o sistema estável para a condição operativa analisada.

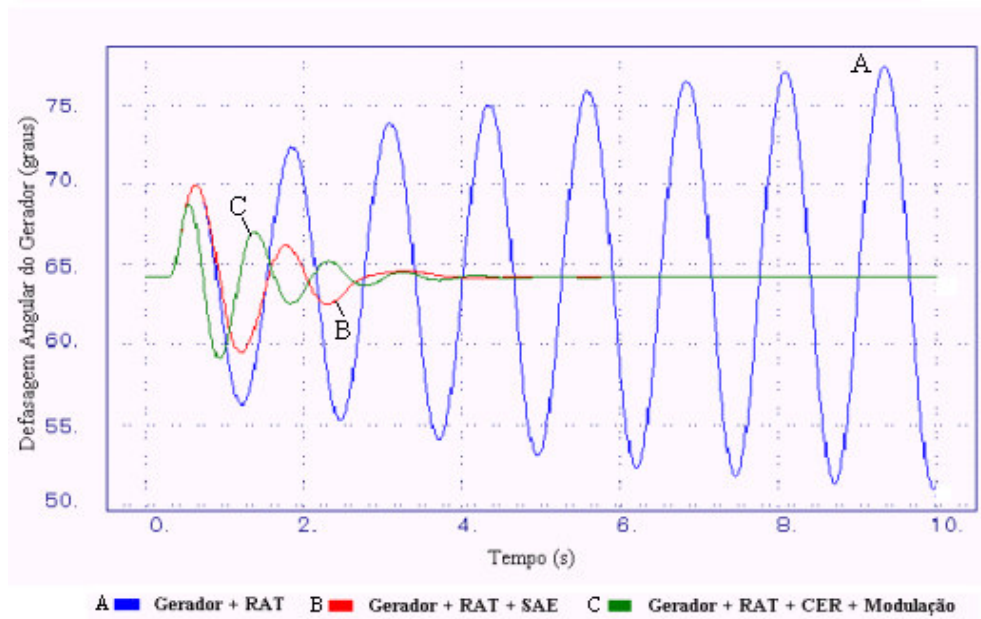


Figura 6.20 – Comportamento dinâmico da defasagem angular entre o gerador e a barra infinita

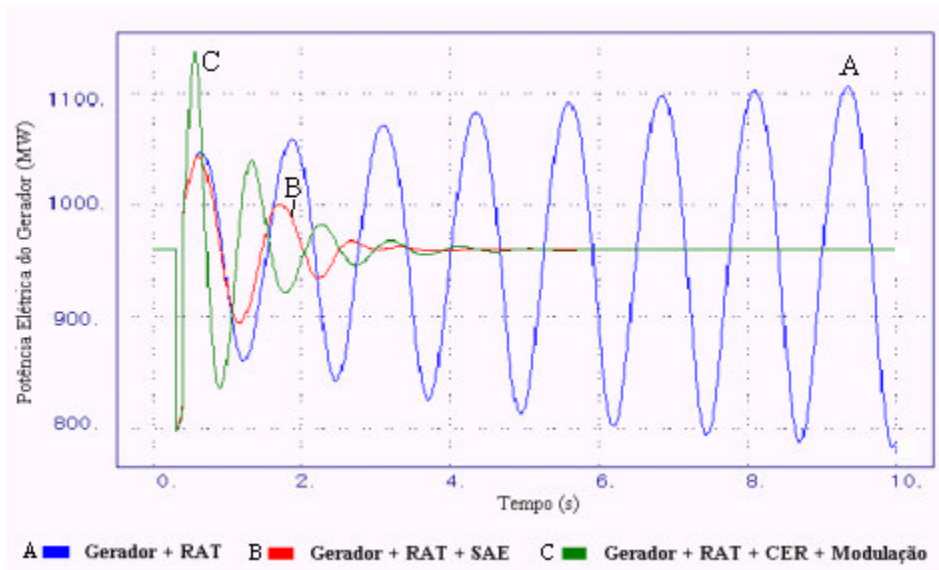


Figura 6.21 – Comportamento dinâmico da Potência Elétrica do Gerador

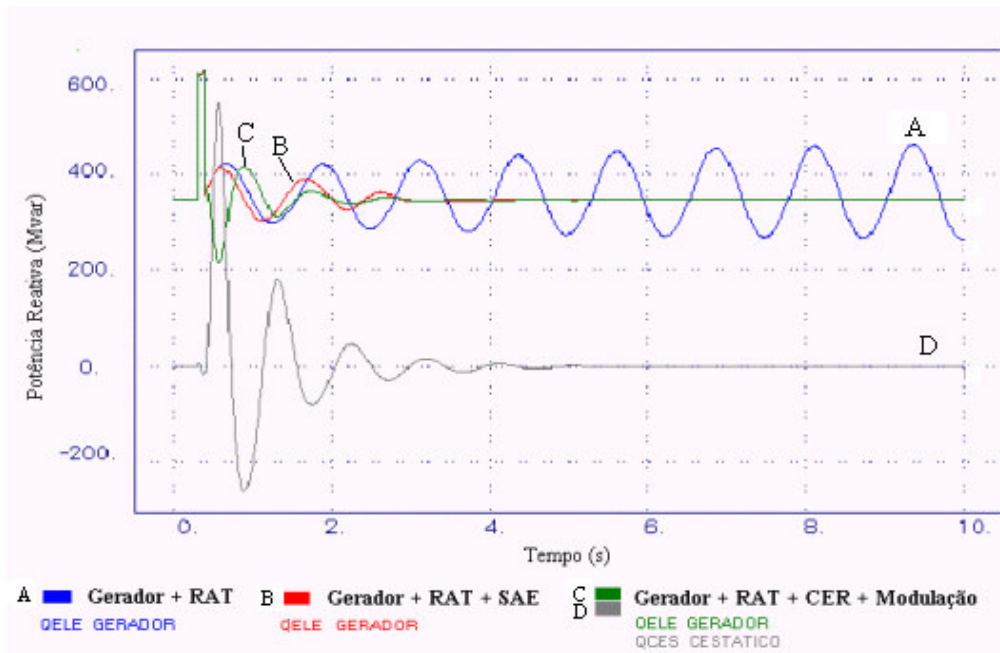


Figura 6.22 – Comportamento dinâmico da Potência Reativa do Gerador e do CER

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho de tese investigou o efeito da presença de compensadores estáticos de reativo, com e sem um sinal adicional estabilizador associado, sobre o desempenho dinâmico de um sistema de transmissão CA sob pequenos desvios, com o intuito de caracterizar a estabilidade em regime permanente do sistema global.

A partir da modelagem do sistema de transmissão CA, do gerador síncrono, de seu controle de excitação e seu sinal adicional estabilizador derivado da velocidade de rotor, do compensador estático de reativo e seu sinal adicional estabilizador (ou sinal de modulação) derivado da potência elétrica, as equações resultantes são determinadas e utilizadas para definir o conjunto de relações linearizadas a partir das quais a matriz de estado é determinada. As variáveis de estado que caracterizam a dinâmica de resposta natural do processo dinâmico sob pequenas perturbações e outras matrizes relacionando estas mesmas variáveis com outras variáveis algébricas de interesse e algumas variáveis de entrada são também explicitadas.

Utilizando um algoritmo para solução de fluxo de potência que considera a representação do compensador estático de reativo, foram definidas as condições iniciais para os estudos de estabilidade de regime permanente relativas a um conjunto de casos representando os cenários de interesse para o estudo.

O procedimento para construção da matriz de estado mencionada, também foi automatizado através de rotinas computacionais que, a partir dos dados de solução do fluxo de potência e de dados de outros componentes do sistema CA e seus controles citados anteriormente, determinam os elementos não nulos da matriz e em seguida definem os autovalores representativos de resposta natural de oscilação do sistema global.

Os autovalores que caracterizam a resposta natural do sistema global sob pequenos desvios e, portanto, sua estabilidade de regime permanente, são então posicionados no plano complexo de forma a estabelecer sua estabilidade relativa.

Com base nos casos simulados, merecem destaque as seguintes observações:

- A influência negativa sobre o amortecimento das oscilações eletromecânicas quando é utilizado um controle de excitação automático sem a presença de um sinal adicional estabilizador, com possibilidade de instabilidade com o aumento da potência elétrica transferida, mesmo para valores distantes do valor nominal. Este problema é solucionado com a utilização de sinal adicional estabilizador;
- A contribuição do compensador estático de reativo no acréscimo de torque sincronizante ao sistema, pela redução da frequência de oscilação do modo eletromecânico;
- A contribuição do sinal adicional estabilizador associado ao compensador estático de reativo no sentido de aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas, tornando o sistema mais estável em regime permanente, a partir do deslocamento dos autovalores para a esquerda do plano complexo.
- A capacidade do sinal adicional estabilizador associado à malha de controle do CER de estabilizar o modo eletromecânico para a maior parte das condições operativas, indicando sua importância na ausência de um sinal adicional estabilizador associado ao sistema de excitação do gerador.

Para futuros desenvolvimentos, sugere-se:

- Aplicação de técnicas de sistemas lineares para ajustes dos sistemas de controle e sinais suplementares de estabilização para a excitação e para o compensador estático de reativo;
- Análise dos demais modos do sistema (excitatriz, CER e controles);
- Comparação entre o desempenho do sinal adicional estabilizante do CER com diferentes variáveis de entrada (potência elétrica, corrente, velocidade ou ângulo do rotor, etc);
- Verificação dos efeitos dos ajustes para melhor desempenho de

- regime permanente sobre os limites de estabilidade transitória dos sistemas de potência contendo compensadores estáticos de reativo;
- Realização de simulações dinâmicas com modelos não-lineares para representação do gerador, do CER e seus respectivos sistemas de controle;
 - Aplicação das técnicas apresentadas em um sistema real multimáquinas, com exploração do efeito da modelagem de carga sobre a estabilidade de regime permanente.

ANEXO 1

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA
SINCRONIZANTE (K) [33]**

$$X_{eq} = \frac{1}{V_m} \cdot \sqrt{E_1^2 \cdot X_2^2 + E_2^2 \cdot X_1^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \cos \delta} \quad (A.1)$$

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{X_{eq}} \sin \delta \quad (A.2)$$

Derivando a equação A.2:

$$\Delta P = \left. \frac{dP}{d\delta} \right|_0 \cdot \Delta \delta \quad (A.3)$$

$$\left. \frac{dP}{d\delta} \right|_0 = \frac{E_1 \cdot E_2}{X_{eq}} \cos \delta_0 - E_1 \cdot E_2 \sin \delta_0 \cdot \frac{1}{X_{eq}^2} \cdot \frac{dX_{eq}}{d\delta} \quad (A.4)$$

$$\frac{dX_{eq}}{d\delta} = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sin \delta_0}{V_m \sqrt{E_1^2 \cdot X_2^2 + E_2^2 \cdot X_1^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \cos \delta}} \quad (A.5)$$

$$\frac{dX_{eq}}{d\delta} = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sin \delta_0}{V_m^2 \cdot X_{eq}} \quad (A.6)$$

Substituindo a equação A.6 na equação A.4, obtém-se:

$$\left. \frac{dP}{d\delta} \right|_0 = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \delta_0}{X_{eq0}} + \frac{E_1^2 \cdot E_2^2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sin^2 \delta_0}{V_{m0}^2 \cdot X_{eq0}^3} \quad (A.7)$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \delta_0}{X_{eq0}} + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{eq0}} \cdot \left(\frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \sin \delta_0}{V_{m0} \cdot X_{eq0}} \right)^2 \quad (A.8)$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \delta_0}{X_{eq0}} + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{eq0}} \cdot \left(\frac{P_{e0}}{V_{m0}} \right)^2$$

$$\Delta P = \left[\frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \delta_0}{X_{eq0}} + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{eq0}} \left(\frac{P_{e0}}{V_{m0}} \right)^2 \right] \Delta \delta \quad (A.9)$$

$$\Delta P = K \cdot \Delta \delta \quad (A.10)$$

$$K = \left[\frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \delta_0}{X_{eq0}} + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{eq0}} \left(\frac{P_{e0}}{V_{m0}} \right)^2 \right] \quad (A.11)$$

ANEXO 2

TABELAS DE AUTOVALORES OBTIDOS PARA TODAS OS CENÁRIOS ANALISADOS

(CASO 1 AO CASO14)

ANEXO 2-A – CASO 1 – Gerador com controle de excitação manual – Operação Flat

P=0,0pu			P=0,2pu			P=0,4pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,947E-01	0,000E+00	1,000E+00	-1,332E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,329E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,867E-01	0,000E+00	1,000E+00	-4,443E-01	9,076E-01	7,768E-02
-5,571E-01	9,232E-01	9,560E-02	-5,301E-01	9,202E-01	9,130E-02	-4,443E-01	-9,076E-01	7,768E-02
-5,571E-01	-9,232E-01	9,560E-02	-5,301E-01	-9,202E-01	9,130E-02	-1,664E-01	0,000E+00	1,000E+00
-6,748E+00	0,000E+00	1,000E+00	-6,843E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,086E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,389E-15	0,000E+00	1,000E+00	6,959E-18	0,000E+00	-1,000E+00	-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00	4,839E-18	0,000E+00	-1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-A – CASO 1 – Gerador com controle de excitação manual – Operação Flat

P=0,6pu			P=0,8pu			P=1,0pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,325E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,051E-01	0,000E+00	1,000E+00	-1,319E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,415E-01	8,758E-01	6,194E-02	-2,572E-01	8,089E-01	5,054E-02	-2,245E-01	6,702E-01	5,323E-02
-3,415E-01	-8,758E-01	6,194E-02	-2,572E-01	-8,089E-01	5,054E-02	-2,245E-01	-6,702E-01	5,323E-02
-1,393E-01	0,000E+00	1,000E+00	-1,322E+01	0,000E+00	1,000E+00	-4,199E-02	0,000E+00	1,000E+00
-7,378E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,641E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,824E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00	-1,847E-17	0,000E+00	1,000E+00	-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00
2,234E-17	0,000E+00	-1,000E+00	-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,088E-17	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-B – CASO 2 – Gerador com controle de excitação manual – Operação Não-flat

Q= -0,2pu			Q= 0pu			Q= 0,2pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,320E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,319E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,317E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,206E-01	6,532E-01	5,366E-02	-2,245E-01	6,702E-01	5,323E-02	-2,293E-01	6,875E-01	5,302E-02
-2,206E-01	-6,532E-01	5,366E-02	-2,245E-01	-6,702E-01	5,323E-02	-2,293E-01	-6,875E-01	5,302E-02
-4,056E-02	0,000E+00	1,000E+00	-4,199E-02	0,000E+00	1,000E+00	-4,265E-02	0,000E+00	1,000E+00
-7,857E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,824E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,787E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00	1,500E-14	0,000E+00	-1,000E+00	-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00
6,943E-18	0,000E+00	-1,000E+00	-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00	-1,553E-17	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-B – CASO 2 – Gerador com controle de excitação manual – Operação Não-flat

Q= 0,4pu			Q= 0,6pu			Q= 0,8pu		
AUTOVALOR			AUTOVALOR			AUTOVALOR		
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	Coef. de Amort.	Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	Coef. de Amort.	Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	Coef. de Amort.
-1,316E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,314E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,312E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,344E-01	7,029E-01	5,301E-02	-2,406E-01	7,192E-01	5,317E-02	-2,472E-01	7,346E-01	5,349E-02
-2,344E-01	-7,029E-01	5,301E-02	-2,406E-01	-7,192E-01	5,317E-02	-2,472E-01	-7,346E-01	5,349E-02
-4,255E-02	0,000E+00	1,000E+00	-4,167E-02	0,000E+00	1,000E+00	-4,006E-02	0,000E+00	1,000E+00
-7,751E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,709E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,667E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00	5,553E-15	0,000E+00	-1,000E+00	8,604E-16	0,000E+00	-1,000E+00
-1,122E-17	0,000E+00	1,000E+00	-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,500E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-C – CASO 3 – Gerador com controle de excitação automático – Operação Flat

P=0,0pu			P=0,2pu			P=0,4pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,966E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,966E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,966E+01	0,000E+00	1,000E+00
-5,571E-01	9,232E-01	9,560E-02	-5,023E-01	9,212E-01	8,646E-02	-3,335E-01	9,107E-01	5,819E-02
-5,571E-01	-9,232E-01	9,560E-02	-5,023E-01	-9,212E-01	8,646E-02	-3,335E-01	-9,107E-01	5,819E-02
-1,318E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,324E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,118E+00	1,136E-01	9,962E-01
-8,702E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,953E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,118E+00	-1,136E-01	9,962E-01
-4,097E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,199E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,783E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,748E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,519E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,331E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-1,982E-15	0,000E+00	1,000E+00	5,487E-15	0,000E+00	-1,000E+00	1,497E-15	0,000E+00	-1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-C – CASO 3 – Gerador com controle de excitação automático – Operação Flat

P=0,6pu			P=0,8pu			P=1,0pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,967E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,968E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,968E+01	0,000E+00	1,000E+00
-8,874E-02	8,817E-01	1,602E-02	2,146E-01	8,233E-01	-4,144E-02	5,962E-01	7,180E-01	-1,310E-01
-8,874E-02	-8,817E-01	1,602E-02	2,146E-01	-8,233E-01	-4,144E-02	5,962E-01	-7,180E-01	-1,310E-01
-1,317E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,272E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,198E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,872E+00	0,000E+00	1,000E+00	-4,364E+00	0,000E+00	1,000E+00	-5,562E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,334E+00	1,764E-01	9,913E-01	-8,421E+00	1,979E-01	9,893E-01	-8,251E+00	1,861E-01	9,901E-01
-8,334E+00	-1,764E-01	9,913E-01	-8,421E+00	-1,979E-01	9,893E-01	-8,251E+00	-1,861E-01	9,901E-01
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
1,081E-14	0,000E+00	-1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	6,378E-15	0,000E+00	-1,000E+00	-7,246E-15	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-D – CASO 4 – Gerador com controle de excitação automático – Operação Não-flat

Q= -0,2pu			Q= 0pu			Q= 0,2pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,968E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,968E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,968E+01	0,000E+00	1,000E+00
6,070E-01	7,043E-01	-1,359E-01	5,962E-01	7,180E-01	-1,310E-01	5,855E-01	7,320E-01	-1,263E-01
6,070E-01	-7,043E-01	-1,359E-01	5,962E-01	-7,180E-01	-1,310E-01	5,855E-01	-7,320E-01	-1,263E-01
-1,194E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,198E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,202E+00	0,000E+00	1,000E+00
-5,625E+00	0,000E+00	1,000E+00	-5,562E+00	0,000E+00	1,000E+00	-5,495E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,250E+00	1,770E-01	9,910E-01	-8,251E+00	1,861E-01	9,901E-01	-8,251E+00	1,956E-01	9,891E-01
-8,250E+00	-1,770E-01	9,910E-01	-8,251E+00	-1,861E-01	9,901E-01	-8,251E+00	-1,956E-01	9,891E-01
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	1,393E-15	0,000E+00	-1,000E+00	-3,294E-16	0,000E+00	1,000E+00
-9,277E-15	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-D – CASO 4 – Gerador com controle de excitação automático – Operação Não-flat

Q= 0,4pu			Q= 0,6pu			Q= 0,8pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,968E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,968E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,969E+01	0,000E+00	1,000E+00
5,763E-01	7,446E-01	-1,223E-01	5,672E-01	7,580E-01	-1,183E-01	5,593E-01	7,709E-01	-1,147E-01
5,763E-01	-7,446E-01	-1,223E-01	5,672E-01	-7,580E-01	-1,183E-01	5,593E-01	-7,709E-01	-1,147E-01
-1,206E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,210E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,214E+00	0,000E+00	1,000E+00
-5,431E+00	0,000E+00	1,000E+00	-5,360E+00	0,000E+00	1,000E+00	-5,288E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,251E+00	2,042E-01	9,881E-01	-8,252E+00	2,134E-01	9,871E-01	-8,253E+00	2,222E-01	9,860E-01
-8,251E+00	-2,042E-01	9,881E-01	-8,252E+00	-2,134E-01	9,871E-01	-8,253E+00	-2,222E-01	9,860E-01
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-5,041E-15	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
1,215E-20	0,000E+00	-1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-5,286E-15	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,113E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-E – CASO 5 – Gerador com controle de excitação automático e SAE – Operação Flat

P=0,0pu			P=0,2pu			P=0,4pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,966E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,984E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,007E+01	0,000E+00	1,000E+00
-5,576E-01	9,232E-01	9,568E-02	-1,403E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,541E+01	0,000E+00	1,000E+00
-5,576E-01	-9,232E-01	9,568E-02	-1,703E+00	1,021E+00	2,565E-01	-2,190E+00	1,221E+00	2,744E-01
-1,318E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,703E+00	-1,021E+00	2,565E-01	-2,190E+00	-1,221E+00	2,744E-01
-4,096E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,782E+00	6,169E-01	6,984E-01	-2,583E+00	5,617E-01	5,906E-01
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,782E+00	-6,169E-01	6,984E-01	-2,583E+00	-5,617E-01	5,906E-01
-8,779E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,862E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,862E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,787E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,572E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,404E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,921E+00	1,551E-02	9,999E-01	-1,334E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,350E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,921E+00	-1,551E-02	9,999E-01	-3,353E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,371E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-1,410E-16	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	7,553E-16	0,000E+00	-1,000E+00	2,298E-15	0,000E+00	-1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-E – CASO 5 – Gerador com controle de excitação automático e SAE – Operação Flat

P=0,6pu			P=0,8pu			P=1,0pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-2,030E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,050E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,065E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,617E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,661E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,686E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,186E+00	1,325E+00	2,541E-01	-2,272E+00	1,357E+00	2,575E-01	-2,622E+00	1,341E+00	2,972E-01
-2,186E+00	-1,325E+00	2,541E-01	-2,272E+00	-1,357E+00	2,575E-01	-2,622E+00	-1,341E+00	2,972E-01
-2,106E+00	5,329E-01	5,324E-01	-1,660E+00	5,301E-01	4,461E-01	-1,043E+00	5,252E-01	3,014E-01
-2,106E+00	-5,329E-01	5,324E-01	-1,660E+00	-5,301E-01	4,461E-01	-1,043E+00	-5,252E-01	3,014E-01
-7,862E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,862E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,782E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,405E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,549E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,862E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,341E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,294E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,215E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,385E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,396E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,410E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
1,146E-15	0,000E+00	-1,000E+00	1,564E-15	0,000E+00	-1,000E+00	7,743E-15	0,000E+00	-1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-F – CASO 6 – Gerador com controle de excitação automático e SAE – Operação Não-flat

Q= -0,2pu			Q= 0pu			Q= 0,2pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-2,063E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,065E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,067E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,684E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,686E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,689E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,698E+00	1,328E+00	3,077E-01	-2,622E+00	1,341E+00	2,972E-01	-2,542E+00	1,356E+00	2,860E-01
-2,698E+00	-1,328E+00	3,077E-01	-2,622E+00	-1,341E+00	2,972E-01	-2,542E+00	-1,356E+00	2,860E-01
-9,904E-01	5,224E-01	2,889E-01	-1,043E+00	5,252E-01	3,014E-01	-1,096E+00	5,274E-01	3,141E-01
-9,904E-01	-5,224E-01	2,889E-01	-1,043E+00	-5,252E-01	3,014E-01	-1,096E+00	-5,274E-01	3,141E-01
-3,790E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,782E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,831E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,890E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,862E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,772E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,211E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,215E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,219E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,412E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,410E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,409E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-2,952E-15	0,000E+00	1,000E+00	-1,203E-14	0,000E+00	1,000E+00	-6,482E-16	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-F – CASO 6 – Gerador com controle de excitação automático e SAE – Operação Não-flat

Q= 0,4pu			Q= 0,6pu			Q= 0,8pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-2,070E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,072E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,075E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,691E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,694E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,697E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,469E+00	1,370E+00	2,758E-01	-2,391E+00	1,386E+00	2,648E-01	-2,314E+00	1,402E+00	2,541E-01
-2,469E+00	-1,370E+00	2,758E-01	-2,391E+00	-1,386E+00	2,648E-01	-2,314E+00	-1,402E+00	2,541E-01
-1,143E+00	5,287E-01	3,254E-01	-1,192E+00	5,295E-01	3,372E-01	-1,237E+00	5,296E-01	3,484E-01
-1,143E+00	-5,287E-01	3,254E-01	-1,192E+00	-5,295E-01	3,372E-01	-1,237E+00	-5,296E-01	3,484E-01
-7,801E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,767E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,730E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,763E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,751E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,739E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,223E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,228E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,232E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,408E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,407E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,407E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	NaN
-6,139E-15	0,000E+00	1,000E+00	-5,665E-15	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-G – CASO 7 – Gerador com controle de excitação automático + SAE + CER – Operação Flat

P=0,0pu			P=0,2pu			P=0,4pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,972E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,972E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00
-1,746E+01	1,897E+00	8,259E-01	-1,752E+01	1,851E+00	8,331E-01	-1,756E+01	1,785E+00	8,428E-01
-1,746E+01	-1,897E+00	8,259E-01	-1,752E+01	-1,851E+00	8,331E-01	-1,756E+01	-1,785E+00	8,428E-01
-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,981E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,992E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,096E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,335E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,432E+01	0,000E+00	1,000E+00
-5,575E-01	9,232E-01	9,567E-02	-1,451E+00	1,000E+00	2,250E-01	-2,097E+00	1,142E+00	2,804E-01
-5,575E-01	-9,232E-01	9,567E-02	-1,451E+00	-1,000E+00	2,250E-01	-2,097E+00	-1,142E+00	2,804E-01
-8,112E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,296E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,357E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,822E+00	0,000E+00	1,000E+00	-4,542E+00	5,238E-01	8,098E-01	-3,320E+00	5,379E-01	7,008E-01
-6,769E+00	0,000E+00	1,000E+00	-4,542E+00	-5,238E-01	8,098E-01	-3,320E+00	-5,379E-01	7,008E-01
-2,874E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,777E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,644E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,423E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,457E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,508E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,354E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,372E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	6,498E-15	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	-6,498E-15	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-G – CASO 7 – Gerador com controle de excitação automático + SAE + CER – Operação Flat

P=0,6pu			P=0,8pu			P=1,0pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,974E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,975E+02	0,000E+00	1,000E+00
-1,760E+01	1,697E+00	8,554E-01	-1,766E+01	1,573E+00	8,726E-01	-1,781E+01	1,380E+00	8,991E-01
-1,760E+01	-1,697E+00	8,554E-01	-1,766E+01	-1,573E+00	8,726E-01	-1,781E+01	-1,380E+00	8,991E-01
-2,001E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,007E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,004E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,485E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,505E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,479E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,246E+00	1,247E+00	2,756E-01	-2,334E+00	1,283E+00	2,781E-01	-2,602E+00	1,255E+00	3,133E-01
-2,246E+00	-1,247E+00	2,756E-01	-2,334E+00	-1,283E+00	2,781E-01	-2,602E+00	-1,255E+00	3,133E-01
-9,423E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,529E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,754E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,774E+00	5,215E-01	6,461E-01	-2,357E+00	5,292E-01	5,784E-01	-1,813E+00	5,558E-01	4,608E-01
-2,774E+00	-5,215E-01	6,461E-01	-2,357E+00	-5,292E-01	5,784E-01	-1,813E+00	-5,558E-01	4,608E-01
-2,637E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,820E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,122E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,521E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,463E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,365E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,385E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,394E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,402E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	1,318E-15	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	-1,318E-15	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-H – CASO 8 – Gerador com controle de excitação automático + SAE + CER – Operação Não-flat

Q= -0,2pu			Q= 0pu			Q= 0,2pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,975E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00
-3,349E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,781E+01	1,380E+00	8,991E-01	-1,770E+01	1,633E+00	8,652E-01
-2,085E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,781E+01	-1,380E+00	8,991E-01	-1,770E+01	-1,633E+00	8,652E-01
-1,712E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,004E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,015E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,285E+00	1,347E+00	3,618E-01	-1,479E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,539E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,285E+00	-1,347E+00	3,618E-01	-2,602E+00	1,255E+00	3,133E-01	-2,484E+00	1,275E+00	2,962E-01
-1,507E-01	7,352E-01	3,261E-02	-2,602E+00	-1,255E+00	3,133E-01	-2,484E+00	-1,275E+00	2,962E-01
-1,507E-01	-7,352E-01	3,261E-02	-9,754E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,520E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,068E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,813E+00	5,558E-01	4,608E-01	-1,884E+00	5,464E-01	4,810E-01
-4,539E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,813E+00	-5,558E-01	4,608E-01	-1,884E+00	-5,464E-01	4,810E-01
-5,729E-01	3,901E-02	9,194E-01	-3,122E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,096E+00	0,000E+00	1,000E+00
-5,729E-01	-3,901E-02	9,194E-01	-1,365E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,376E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,015E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,402E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,402E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	2,737E-15	1,000E+00	-2,220E+00	2,068E-15	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	-2,737E-15	1,000E+00	-2,220E+00	-2,068E-15	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-H – CASO 8 – Gerador com controle de excitação automático + SAE + CER – Operação Não-flat

Q= 0,4pu			Q= 0,6pu			Q= 0,8pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,971E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,969E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,967E+02	0,000E+00	1,000E+00
-1,770E+01	1,852E+00	8,356E-01	-1,775E+01	2,081E+00	8,052E-01	-1,783E+01	2,300E+00	7,769E-01
-1,770E+01	-1,852E+00	8,356E-01	-1,775E+01	-2,081E+00	8,052E-01	-1,783E+01	-2,300E+00	7,769E-01
-2,022E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,029E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,035E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,571E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,596E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,613E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,383E+00	1,293E+00	2,814E-01	-2,282E+00	1,314E+00	2,663E-01	-2,189E+00	1,336E+00	2,523E-01
-2,383E+00	-1,293E+00	2,814E-01	-2,282E+00	-1,314E+00	2,663E-01	-2,189E+00	-1,336E+00	2,523E-01
-9,377E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,264E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,180E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,940E+00	5,374E-01	4,982E-01	-1,993E+00	5,271E-01	5,156E-01	-2,038E+00	5,167E-01	5,317E-01
-1,940E+00	-5,374E-01	4,982E-01	-1,993E+00	-5,271E-01	5,156E-01	-2,038E+00	-5,167E-01	5,317E-01
-3,067E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,032E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,991E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,387E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,400E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,415E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,402E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,403E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,403E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	4,523E-15	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,220E+00	-4,523E-15	1,000E+00	-2,220E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	2,923E-15	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,220E+00	-2,923E-15	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-I – CASO 9 – Gerador com controle de excitação automático + SAE + CER + Modulação – Operação Flat

P=0,0pu			P=0,2pu			P=0,4pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,972E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,972E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,746E+01	1,897E+00	8,259E-01	-1,750E+01	1,850E+00	8,330E-01	-1,753E+01	1,783E+00	8,426E-01
-1,746E+01	-1,897E+00	8,259E-01	-1,750E+01	-1,850E+00	8,330E-01	-1,753E+01	-1,783E+00	8,426E-01
-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,981E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,992E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,096E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,336E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,434E+01	0,000E+00	1,000E+00
-5,575E-01	9,232E-01	9,566E-02	-1,444E+00	9,894E-01	2,263E-01	-2,173E+00	1,125E+00	2,940E-01
-5,575E-01	-9,232E-01	9,566E-02	-1,444E+00	-9,894E-01	2,263E-01	-2,173E+00	-1,125E+00	2,940E-01
-8,112E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,297E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,358E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,822E+00	0,000E+00	1,000E+00	-4,518E+00	5,363E-01	8,016E-01	-3,196E+00	5,615E-01	6,714E-01
-6,769E+00	0,000E+00	1,000E+00	-4,518E+00	-5,363E-01	8,016E-01	-3,196E+00	-5,615E-01	6,714E-01
-2,874E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,937E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,930E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,423E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,387E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,361E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E-01	1,569E-04	1,000E+00	-6,675E-01	6,508E-03	9,981E-01	-6,710E-01	6,075E-03	9,984E-01
-6,667E-01	-1,569E-04	1,000E+00	-6,675E-01	-6,508E-03	9,981E-01	-6,710E-01	-6,075E-03	9,984E-01
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,354E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,371E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-1,999E-01	0,000E+00	1,000E+00	-1,999E-01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-I – CASO 9 – Gerador com controle de excitação automático + SAE + CER + Modulação – Operação Flat

P=0,6pu			P=0,8pu			P=1,0pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,974E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,975E+02	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,124E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,755E+01	1,692E+00	8,552E-01	-1,759E+01	1,567E+00	8,726E-01	-1,771E+01	1,369E+00	8,995E-01
-1,755E+01	-1,692E+00	8,552E-01	-1,759E+01	-1,567E+00	8,726E-01	-1,771E+01	-1,369E+00	8,995E-01
-2,002E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,007E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,005E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,488E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,510E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,487E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,381E+00	1,232E+00	2,941E-01	-2,528E+00	1,270E+00	3,020E-01	-2,878E+00	1,252E+00	3,437E-01
-2,381E+00	-1,232E+00	2,941E-01	-2,528E+00	-1,270E+00	3,020E-01	-2,878E+00	-1,252E+00	3,437E-01
-9,424E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,529E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,753E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,584E+00	5,461E-01	6,015E-01	-2,113E+00	5,532E-01	5,195E-01	-1,500E+00	5,704E-01	3,860E-01
-2,584E+00	-5,461E-01	6,015E-01	-2,113E+00	-5,532E-01	5,195E-01	-1,500E+00	-5,704E-01	3,860E-01
-2,999E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,177E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,423E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,315E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,236E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,083E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,278E-01	0,000E+00	1,000E+00	-8,059E-01	0,000E+00	1,000E+00	-9,514E-01	0,000E+00	1,000E+00
-6,310E-01	0,000E+00	1,000E+00	-5,862E-01	0,000E+00	1,000E+00	-5,417E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,385E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,395E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,408E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,004E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,011E-01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-J – CASO 10 – Gerador com controle de excitação automático + SAE + CER + Modulação – Operação Não-Flat

Q= -0,2pu			Q= 0pu			Q= 0,2pu		
AUTOVALOR			AUTOVALOR			AUTOVALOR		
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	Coef. de Amort.	Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	Coef. de Amort.	Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	Coef. de Amort.
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,975E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,350E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,124E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,124E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,127E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,771E+01	1,369E+00	8,995E-01	-1,762E+01	1,626E+00	8,651E-01
-2,084E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,771E+01	-1,369E+00	8,995E-01	-1,762E+01	-1,626E+00	8,651E-01
-1,710E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,005E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,016E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,246E+00	1,381E+00	3,503E-01	-1,487E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,545E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,246E+00	-1,381E+00	3,503E-01	-2,878E+00	1,252E+00	3,437E-01	-2,743E+00	1,266E+00	3,261E-01
-7,070E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,878E+00	-1,252E+00	3,437E-01	-2,743E+00	-1,266E+00	3,261E-01
-1,683E-01	6,578E-01	4,070E-02	-9,752E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,519E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,683E-01	-6,578E-01	4,070E-02	-1,500E+00	5,704E-01	3,860E-01	-1,590E+00	5,654E-01	4,084E-01
-4,358E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,500E+00	-5,704E-01	3,860E-01	-1,590E+00	-5,654E-01	4,084E-01
-1,363E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,423E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,402E+00	0,000E+00	1,000E+00
-5,372E-01	8,477E-02	7,101E-01	-1,083E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,110E+00	0,000E+00	1,000E+00
-5,372E-01	-8,477E-02	7,101E-01	-9,514E-01	0,000E+00	1,000E+00	-9,156E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,445E-01	0,000E+00	1,000E+00	-5,416E-01	0,000E+00	1,000E+00	-5,499E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,114E-01	9,643E-03	9,613E-01	-3,408E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,407E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,114E-01	-9,643E-03	9,613E-01	-2,011E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,009E-01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-J – CASO 10 – Gerador com controle de excitação automático + SAE + CER + Modulação – Operação Não-Flat

Q= 0,4pu			Q= 0,6pu			Q= 0,8pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,971E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,969E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,967E+02	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,124E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,124E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,124E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,762E+01	1,847E+00	8,351E-01	-1,768E+01	2,078E+00	8,044E-01	-1,776E+01	2,299E+00	7,759E-01
-1,762E+01	-1,847E+00	8,351E-01	-1,768E+01	-2,078E+00	8,044E-01	-1,776E+01	-2,299E+00	7,759E-01
-2,023E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,030E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,036E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,577E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,600E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,617E+01	0,000E+00	1,000E+00
-2,624E+00	1,281E+00	3,100E-01	-2,501E+00	1,299E+00	2,929E-01	-2,387E+00	1,319E+00	2,768E-01
-2,624E+00	-1,281E+00	3,100E-01	-2,501E+00	-1,299E+00	2,929E-01	-2,387E+00	-1,319E+00	2,768E-01
-9,376E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,264E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,179E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,665E+00	5,596E-01	4,280E-01	-1,739E+00	5,522E-01	4,480E-01	-1,803E+00	5,441E-01	4,664E-01
-1,665E+00	-5,596E-01	4,280E-01	-1,739E+00	-5,522E-01	4,480E-01	-1,803E+00	-5,441E-01	4,664E-01
-3,380E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,355E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,327E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,129E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,145E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,159E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,894E-01	0,000E+00	1,000E+00	-8,640E-01	0,000E+00	1,000E+00	-8,403E-01	0,000E+00	1,000E+00
-5,580E-01	0,000E+00	1,000E+00	-5,675E-01	0,000E+00	1,000E+00	-5,780E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,406E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,406E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,405E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,007E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,006E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,004E-01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-K – CASO 11 – Gerador com controle de excitação automático + CER – Operação Flat

P=0,0pu			P=0,2pu			P=0,4pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,972E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,972E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00
-1,746E+01	1,897E+00	8,259E-01	-1,745E+01	1,885E+00	8,274E-01	-1,743E+01	1,849E+00	8,321E-01
-1,746E+01	-1,897E+00	8,259E-01	-1,745E+01	-1,885E+00	8,274E-01	-1,743E+01	-1,849E+00	8,321E-01
-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,096E+01	0,000E+00	1,000E+00	-5,122E-01	9,234E-01	8,793E-02	-1,071E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,423E+00	0,000E+00	1,000E+00	-5,122E-01	-9,234E-01	8,793E-02	-3,677E-01	9,203E-01	6,346E-02
-2,874E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,439E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,677E-01	-9,203E-01	6,346E-02
-5,571E-01	9,232E-01	9,560E-02	-2,786E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,625E+00	0,000E+00	1,000E+00
-5,571E-01	-9,232E-01	9,560E-02	-1,090E+01	0,000E+00	1,000E+00	-2,646E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,748E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,001E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,469E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,409E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,409E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,409E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,409E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,409E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,409E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-K – CASO 11 – Gerador com controle de excitação automático + CER – Operação Flat

P=0,6pu			P=0,8pu			P=1,0pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,974E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,975E+02	0,000E+00	1,000E+00
-1,740E+01	1,786E+00	8,403E-01	-1,736E+01	1,689E+00	8,532E-01	-1,731E+01	1,529E+00	8,744E-01
-1,740E+01	-1,786E+00	8,403E-01	-1,736E+01	-1,689E+00	8,532E-01	-1,731E+01	-1,529E+00	8,744E-01
-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,972E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,972E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,529E-01	9,055E-01	2,687E-02	1,172E-01	8,700E-01	-2,144E-02	-9,764E+00	1,542E-01	9,951E-01
-1,529E-01	-9,055E-01	2,687E-02	1,172E-01	-8,700E-01	-2,144E-02	-9,764E+00	-1,542E-01	9,951E-01
-1,469E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,416E+00	0,000E+00	1,000E+00	4,580E-01	7,999E-01	-9,075E-02
-2,639E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,849E+00	0,000E+00	1,000E+00	4,580E-01	-7,999E-01	-9,075E-02
-1,038E+01	0,000E+00	1,000E+00	-9,605E+00	6,701E-02	9,990E-01	-3,281E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,431E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,605E+00	-6,701E-02	9,990E-01	-1,331E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,409E+01	2,625E-15	1,000E+00	-1,409E+01	6,129E-15	1,000E+00	-1,409E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,409E+01	-2,625E-15	1,000E+00	-1,409E+01	-6,129E-15	1,000E+00	-1,409E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-L – CASO 12 – Gerador com controle de excitação automático + CER – Operação Não-flat

Q= -0,2pu			Q= 0pu			Q= 0,2pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-2,000E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,975E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,973E+02	0,000E+00	1,000E+00
-3,358E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,731E+01	1,529E+00	8,744E-01	-1,746E+01	1,753E+00	8,458E-01
-1,967E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,731E+01	-1,529E+00	8,744E-01	-1,746E+01	-1,753E+00	8,458E-01
-8,694E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,972E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00
-7,439E+00	5,191E-01	9,158E-01	-9,764E+00	1,542E-01	9,951E-01	-9,677E+00	1,668E-01	9,942E-01
-7,439E+00	-5,191E-01	9,158E-01	-9,764E+00	-1,542E-01	9,951E-01	-9,677E+00	-1,668E-01	9,942E-01
1,410E+00	8,366E-01	-2,591E-01	4,580E-01	7,999E-01	-9,075E-02	4,284E-01	8,134E-01	-8,353E-02
1,410E+00	-8,366E-01	-2,591E-01	4,580E-01	-7,999E-01	-9,075E-02	4,284E-01	-8,134E-01	-8,353E-02
-5,448E-01	2,980E-02	9,457E-01	-3,281E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,241E+00	0,000E+00	1,000E+00
-5,448E-01	-2,980E-02	9,457E-01	-1,331E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,340E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,408E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,408E+01	3,757E-15	1,000E+00	-1,408E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,408E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,408E+01	-3,757E-15	1,000E+00	-1,408E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-L – CASO 12 – Gerador com controle de excitação automático + CER – Operação Não-flat

Q= 0,4pu			Q= 0,6pu			Q= 0,8pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,971E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,969E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,967E+02	0,000E+00	1,000E+00
-1,759E+01	1,951E+00	8,204E-01	-1,772E+01	2,162E+00	7,936E-01	-1,785E+01	2,367E+00	7,682E-01
-1,759E+01	-1,951E+00	8,204E-01	-1,772E+01	-2,162E+00	7,936E-01	-1,785E+01	-2,367E+00	7,682E-01
-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00
-9,618E+00	1,767E-01	9,934E-01	-9,568E+00	1,864E-01	9,926E-01	-9,532E+00	1,956E-01	9,918E-01
-9,618E+00	-1,767E-01	9,934E-01	-9,568E+00	-1,864E-01	9,926E-01	-9,532E+00	-1,956E-01	9,918E-01
4,015E-01	8,254E-01	-7,719E-02	3,728E-01	8,380E-01	-7,063E-02	3,453E-01	8,500E-01	-6,451E-02
4,015E-01	-8,254E-01	-7,719E-02	3,728E-01	-8,380E-01	-7,063E-02	3,453E-01	-8,500E-01	-6,451E-02
-3,199E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,146E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,086E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,349E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,360E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,372E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,408E+01	3,497E-15	1,000E+00	-1,408E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,408E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,408E+01	-3,497E-15	1,000E+00	-1,408E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,408E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-M – CASO 13 – Gerador com controle de excitação automático + CER+ Modulação – Operação Flat

P=0,0pu			P=0,2pu			P=0,4pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,972E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,969E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,965E+02	0,000E+00	1,000E+00
-6,667E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,444E+01	0,000E+00	1,000E+00	-6,121E+01	0,000E+00	1,000E+00
-3,125E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,227E+01	7,478E-01	9,896E-01	-3,702E+01	4,236E-01	9,974E-01
-1,746E+01	1,897E+00	8,260E-01	-3,227E+01	-7,478E-01	9,896E-01	-3,702E+01	-4,236E-01	9,974E-01
-1,746E+01	-1,897E+00	8,260E-01	-1,979E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,978E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,971E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,024E+01	1,717E+00	6,885E-01	-7,189E+00	1,727E+00	5,523E-01
-1,423E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,024E+01	-1,717E+00	6,885E-01	-7,189E+00	-1,727E+00	5,523E-01
-1,395E+01	0,000E+00	1,000E+00	-7,941E-01	9,501E-01	1,319E-01	-9,748E-01	9,823E-01	1,560E-01
-1,096E+01	0,000E+00	1,000E+00	-7,941E-01	-9,501E-01	1,319E-01	-9,748E-01	-9,823E-01	1,560E-01
-5,572E-01	9,232E-01	9,562E-02	-1,216E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,188E+01	0,000E+00	1,000E+00
-5,572E-01	-9,232E-01	9,562E-02	-2,849E+00	0,000E+00	1,000E+00	-2,758E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,874E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,434E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,459E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,423E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,957E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,543E+00	0,000E+00	1,000E+00
-6,748E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,000E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,603E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-M – CASO 13 – Gerador com controle de excitação automático + CER+ Modulação – Operação Flat

P=0,6pu			P=0,8pu			P=1,0pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,962E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,959E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,956E+02	0,000E+00	1,000E+00
-5,248E+01	5,020E-01	9,982E-01	-5,452E+01	1,705E+00	9,812E-01	-5,619E+01	2,258E+00	9,696E-01
-5,248E+01	-5,020E-01	9,982E-01	-5,452E+01	-1,705E+00	9,812E-01	-5,619E+01	-2,258E+00	9,696E-01
-3,466E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,412E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,387E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,977E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,976E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,975E+01	0,000E+00	1,000E+00
-4,985E+00	1,658E+00	4,316E-01	-3,159E+00	1,529E+00	3,124E-01	-1,760E+00	1,314E+00	2,086E-01
-4,985E+00	-1,658E+00	4,316E-01	-3,159E+00	-1,529E+00	3,124E-01	-1,760E+00	-1,314E+00	2,086E-01
-1,111E+00	1,019E+00	1,710E-01	-1,203E+00	1,058E+00	1,781E-01	-1,023E+00	1,118E+00	1,441E-01
-1,111E+00	-1,019E+00	1,710E-01	-1,203E+00	-1,058E+00	1,781E-01	-1,023E+00	-1,118E+00	1,441E-01
-1,149E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,051E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,321E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,793E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,403E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,551E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,455E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,082E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,024E+01	1,500E-01	9,958E-01
-9,336E+00	0,000E+00	1,000E+00	-9,656E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,024E+01	-1,500E-01	9,958E-01
-8,302E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,721E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,651E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-N – CASO 14 – Gerador com controle de excitação automático + CER+ Modulação – Operação Não-flat

Q= -0,2pu			Q= 0pu			Q= 0,2pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,983E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,956E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,953E+02	0,000E+00	1,000E+00
-5,809E+01	2,224E+00	9,723E-01	-5,619E+01	2,258E+00	9,696E-01	-5,638E+01	2,367E+00	9,669E-01
-5,809E+01	-2,224E+00	9,723E-01	-5,619E+01	-2,258E+00	9,696E-01	-5,638E+01	-2,367E+00	9,669E-01
-3,332E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,387E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,388E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,974E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,974E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,975E+01	0,000E+00	1,000E+00
3,978E+00	8,966E-01	-5,768E-01	-1,760E+00	1,313E+00	2,085E-01	-1,380E+00	1,443E+00	1,506E-01
3,978E+00	-8,966E-01	-5,768E-01	-1,760E+00	-1,313E+00	2,085E-01	-1,380E+00	-1,443E+00	1,506E-01
-1,060E+01	2,778E-01	9,867E-01	-1,023E+00	1,118E+00	1,441E-01	-1,311E+00	1,062E+00	1,928E-01
-1,060E+01	-2,778E-01	9,867E-01	-1,023E+00	-1,118E+00	1,441E-01	-1,311E+00	-1,062E+00	1,928E-01
-5,544E+00	5,750E-01	8,378E-01	-1,321E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,508E+00	0,000E+00	1,000E+00
-5,544E+00	-5,750E-01	8,378E-01	-3,550E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,330E+00	0,000E+00	1,000E+00
-8,261E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,023E+01	1,500E-01	9,958E-01	-1,025E+01	1,485E-01	9,959E-01
-5,500E-01	2,679E-02	9,562E-01	-1,023E+01	-1,500E-01	9,958E-01	-1,025E+01	-1,485E-01	9,959E-01
-5,500E-01	-2,679E-02	9,562E-01	-8,651E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,688E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,012E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00

ANEXO 2-N – CASO 14 – Gerador com controle de excitação automático + CER+ Modulação – Operação Não-flat

Q= 0,4pu			Q= 0,6pu			Q= 0,8pu		
AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.	AUTOVALOR		Coef. de Amort.
Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)		Cte. de Amort.	Freq. (Hz)	
-1,950E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,947E+02	0,000E+00	1,000E+00	-1,943E+02	0,000E+00	1,000E+00
-5,656E+01	2,468E+00	9,644E-01	-5,677E+01	2,580E+00	9,616E-01	-5,697E+01	2,691E+00	9,587E-01
-5,656E+01	-2,468E+00	9,644E-01	-5,677E+01	-2,580E+00	9,616E-01	-5,697E+01	-2,691E+00	9,587E-01
-3,390E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,391E+01	0,000E+00	1,000E+00	-3,393E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,975E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,976E+01	0,000E+00	1,000E+00	-1,976E+01	0,000E+00	1,000E+00
-1,221E+00	1,544E+00	1,249E-01	-1,095E+00	1,643E+00	1,054E-01	-9,947E-01	1,737E+00	9,078E-02
-1,221E+00	-1,544E+00	1,249E-01	-1,095E+00	-1,643E+00	1,054E-01	-9,947E-01	-1,737E+00	9,078E-02
-1,393E+00	1,030E+00	2,104E-01	-1,439E+00	1,007E+00	2,218E-01	-1,468E+00	9,911E-01	2,295E-01
-1,393E+00	-1,030E+00	2,104E-01	-1,439E+00	-1,007E+00	2,218E-01	-1,468E+00	-9,911E-01	2,295E-01
-1,026E+01	1,480E-01	9,959E-01	-1,028E+01	1,487E-01	9,959E-01	-3,346E+00	0,000E+00	1,000E+00
-1,026E+01	-1,480E-01	9,959E-01	-1,028E+01	-1,487E-01	9,959E-01	-1,359E+00	0,000E+00	1,000E+00
-3,463E+00	0,000E+00	1,000E+00	-3,408E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,029E+01	1,508E-01	9,958E-01
-1,338E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,766E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,029E+01	-1,508E-01	9,958E-01
-8,724E+00	0,000E+00	1,000E+00	-1,348E+00	0,000E+00	1,000E+00	-8,809E+00	0,000E+00	1,000E+00
-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00	-2,000E-01	0,000E+00	1,000E+00
-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00	-3,333E-01	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00
-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00	-7,979E+00	0,000E+00	1,000E+00

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABOYTES, F., ARROYO, G., VILLA, G., “Application of static var compensators in longitudinal power systems”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, No. 10, pp. 3460-3466, October 1983.

[2] OOI, B.T., BANAKAR, M. H. , “Co-ordination of static var compensators with long distance radial transmission system for damping improvement”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, No. 2, pp. 265-274, February 1984.

[3] RAMOS, A. J. P., TAVARES, C., LINS, L. R., “Application of static compensators in radial power systems”. *IFAC Electric Energy Systems*. Pp. 257-262, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.

[4] RAMOS, A. J. P., TYLL, H., “Dynamic performance of a radial weak power system with multiple static var compensator”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vl. 4, No. 4, October 1989.

[5] DICKMANDER, D., THORVALDSSON, B., STRÖMBERG *et al.*, “Control system design and performance verification for the Chester, Maine static var compensator”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, No. 3, pp. 1492-1502, July 1992.

[6] LARSEN, E., ROSTAMKOLAI, N. FISHER, D. *et al.*, “Design of a Supplementary Modulation Control Function for the Chester SVC”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, pp. 719-724, April 1993.

[7] WANG, L., “A Comparative Study of Damping Schemes on Damping Generator Oscillations”. *IEEE Transactions in Power Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 613-619, May 1993.

[8] SONG, Y. H., JOHNS, A. T., AGGARWAL, R. K., “Nonlinear Thyristor-Controller

Static Var Compensation”, European Power Electronics Association, 1993.

[9] MA, Y., SHEN, S., ZHANG, B, ”A Study on Non Linear SVC Control for Improving Power System Stability”. *IEEE TENCON 93*

[10] IEEE SPECIAL STABILITY CONTROLS WORKING GROUP, “Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 229-240, February 1994.

[11] MANSOUR, Y., XU, W., ALVARADO F. *et al.*, “SVC Placement Using Critical Modes of Voltage Instability”, *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 9, No. 2, pp 757-763, May 1994.

[12] PARNIANI, M., IRAVANI, M. R., “Voltage Control Stability and Dynamic Interaction Phenomena of Static VAR Compensators”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, August 1995.

[13] PARNIANI, M., IRAVANI, M. R., “Computer analysis of small-signal of power systems including network dynamics”. *IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, no. 6, pp. 613-617, November 1995.

[14] HAMMAD, A. E., “Comparing the Voltage Control Capabilities of Present and Future Var Compensating Techniques in Transmission Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 475-484, January 1996.

[15] BEST, R. A., LA PARRA, H. Z., Transient Response of a Static VAR Shunt Compensator”. *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 11, No. 3, pp. 489-494, May 1996.

[16] EL-EMARY, A. A., “Formula for the effect of a static var compensator on synchronising torque coefficient”. *IEE Proceeding Ger. Transm. Distrib* , Vol. 143, no. 6, pp. 582-586, november 1996.

[17] HSU, Y., LIU, C., LIN, C. J. *et al.*,”Application of Power System Stabilizers and

Static VAR Compensators on a Longitudinal Power System”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 4, pp 1464-1470.

[18] CHUNG, C. Y., TSE, C. T., CHEUNG, C. K. *et al.*, “New approach for static var compensator controller design”. *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000*, London, April 2000.

[19] WANG, H. F., “Interaction Analysis and co-ordination of svc voltage and damping control”. *Internacional Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000*, April 2000.

[20] MESSINA, A. R., OLGUIN, D. S., RIVERA C. A. S. *et al.*, “Analytical investigation of large-scale use of static var compensation to aid damping of inter-area oscillations”. *AC-DC Power Transmission*, Conference Publication no. 485, pp. 187-192, IEE 2001, November 2001.

[21] YU, X., KHAMMASH, M., VITTAL, V., “Robust design of a damping controller for static var compensators in power systems”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 456-462, august 2001.

[22] HAMMAD, A. E., “Application of static VAR compensators in utility power systems”, *Application of Static Var Systems for System Dynamic Performance, IEEE*, 877TH0187-5-PWR, pp. 28-35, 1987.

[23] MARTIN, D. E., “SVC considerations for system damping”, *Symposium on Static VAR Systems, IEEE/PES*, 1987.

[24] ROMÁN-MESSINA, A., “Application of SVCs and PSSs to mitigate inter-area oscillations in longitudinal systems”. *Electrical and Computer Engineering, 1994 Conference Proceedings*, vol. 1, pp. 9-13, Canada, September 1994.

[25] WONG, K. T. G., “The Role of Static Var Compensators in Staving Off Voltage Colapse”. *Voltage Collapse (Digest No: 1997/101), IEE Colloquium*, pp. 1-5, April 1997.

- [26] OLIVEIRA, S. E. M., “Synchronizing and Damping Torque Coefficients and Power System Steady-state Stability as Affected by Static Var Compensators”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 109-119, February 1994.
- [27] OLIVEIRA, S. E. M., GOMES, P., SANTOS, M. G., “Compensadores Estáticos para Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas”. *VI ERLAC, VI Encontro Latino Americano da CIGRÉ*, Foz do Iguaçu, Brasil, May 1995.
- [28] THE COMMITTEE ON STATIC COMPENSATION – ENGINEERING AND OPERATION DIVISION – CANADIAN ELECTRICAL ASSOCIATION (CEA), “Static Compensators for Reactive Power Control”, Montreal, Quebec, Canada, 1984.
- [29] UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Departamento de Engenharia Elétrica, “Apostila de Compensadores Estáticos”.
- [30] KUNDUR, Prabha, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [31] CIGRE Task Force 38-01, “Static Var Compensators”, 1986.
- [32] CIGRE Working Group 31-01, “Modelling of Static Var Systems (SVS) for System Analysis”, *Electra*, No. 51, March, 1977.
- [33] AZEVEDO, M. R. D., “Aplicação de Compensadores Estáticos com Sinal Adicional no Amortecimento das Oscilações Eletromecânicas – Um Caso Real”. Tese de M. Sc., Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil, 1989.