



Universidade Federal de Itajubá
UNIFEI

INSTITUTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – IEE

DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA - DET

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Influência do *STATCOM* na Estabilidade de
Sistemas Elétricos de Potência**

Carlos Henrique Rennó Ribeiro Santos

Dissertação Submetida ao
INSTITUTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIFEI
Como requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica

Orientador: Pedro Paulo de Carvalho Mendes (UNIFEI)
Co-Orientador: Cláudio Ferreira (UNIFEI)

Novembro de 2003

Itajubá - MG

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pelas oportunidades obtidas durante minha vida.

Meus pais, pelo amor, confiança, respeito e dedicação incansável despendida a mim e pelo apoio durante toda a minha caminhada.

Ao meu irmão, que torce por mim em todas as situações.

Aos Profs. Pedro Paulo, Cláudio Ferreira, Marangon, Robson e Hermeto pelos ensinamentos, confiança e oportunidade de aprendizado junto ao Grupo de Engenharia de Sistemas (GESis).

Aos colegas de trabalho e estudo do grupo GESis ao longo do tempo em que estive no grupo.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Dedico este trabalho aos meus amados pais José Henrique e Regina Lúcia.

Sumário

Prefácio	1
Simbologia.....	2
Capítulo 1 – Introdução	5
Capítulo 2 – Teoria da Compensação Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência	8
2.1 – Necessidades Fundamentais para a Transmissão de Potência ca.....	9
2.2 – A Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência.....	11
2.3 – A Necessidade da Compensação de Potência Reativa	12
2.4 – Caracterização do Período Transitório	13
2.5 – O Efeito de Compensadores Estáticos <i>Shunt</i> na Estabilidade Transitória	15
2.6 – Teoria da Melhora na Estabilidade Transitória	18
2.7 – Estado da Arte	19
Capítulo 3 – Análise dos SVC na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência	23
3.1 – Princípio de Funcionamento	24
3.2 – Equipamentos de Compensação.....	28
3.2.1 – Reator Controlado por Tiristor (<i>TCR</i>)	28
3.2.2 – Capacitor Chaveado por Tiristor (<i>TSC</i>).....	31
3.3 – Arranjos dos SVC	34
3.3.1 – SVC Constituído por <i>TCR-FC</i>	34
3.3.2 – SVC Constituído por <i>TCR-TSC</i>	35
3.3.3 – SVC Constituído por <i>TCR-MS</i>	37
3.4 – Modelo do SVC para Estudos de Estabilidade.....	37
Capítulo 4 – O <i>STATCOM</i>	40
4.1 – Princípio de Funcionamento	41
4.2 – Esquema de Compensação de Potência Reativa	42
4.3 – Melhoria na Estabilidade Transitória	44
4.4 – Aumento na Margem de Estabilidade.....	46
4.5 – Esquema Básico de Controle do <i>STATCOM</i>	47
Capítulo 5 – Modelo Linearizado do <i>STATCOM</i> em Sistemas Elétricos de Potência.....	50
5.1 – Sistema Elétrico de Potência Analisado	50
5.2 – Equacionamento do Modelo Linearizado	51
5.3 – Diagrama de Blocos do Modelo Linearizado do <i>STATCOM</i>	56
5.4 – Resultados Obtidos.....	58
Capítulo 6 – Modelo Não-Linear do <i>STATCOM</i> em Sistemas Elétricos de Potência.....	64
6.1 – Diagrama de Blocos do Modelo Não-Linear do <i>STATCOM</i>	65
6.2 – Bloco do Regulador de Tensão	66
6.3 – Bloco de Limites de Corrente.....	67

6.4 – Bloco do Circuito Compensador	67
Capítulo 7 – Simulações com o <i>STATCOM</i> e Análise Comparativa	69
7.1 – Sistema de Potência Teste 1	70
7.2 – Sistema de Potência Teste 2	71
7.3 – Simulações Com e Sem o <i>STATCOM</i> no Sistema Teste 1	73
7.3.1 – Curto-Circuito Trifásico Franco.....	74
7.3.1.1 – Com <i>ESP</i>	74
a) Tempo de Eliminação do Defeito de 100 ms	74
b) Tempo de Eliminação do Defeito de 178 ms	77
c) Tempo de Eliminação do Defeito de 188 ms	80
7.3.1.2 – Sem <i>ESP</i>	82
a) Tempo de Eliminação do Defeito de 50 ms	82
b) Tempo de Eliminação do Defeito de 150 ms	85
c) Tempo de Eliminação do Defeito de 153 ms	88
7.3.2 – Variação na Potência Mecânica	91
7.3.2.1 – Com <i>ESP</i>	91
7.3.2.2 – Sem <i>ESP</i>	93
7.4 – Simulações com o <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i> no Sistema Teste 1	95
7.4.1 – Curto-Circuito Trifásico Franco.....	96
a) Tempo de Eliminação do Defeito de 100 ms	96
b) Tempo de Eliminação do Defeito de 183 ms	97
7.4.2 – Variação na Potência Mecânica.....	100
7.5 – Simulações Com e Sem o <i>STATCOM</i> no Sistema Teste 2	102
7.5.1 – Curto-Circuito Trifásico Franco na <i>LT 230 kV</i> Tucano – Gavião	102
a) Tempo de Eliminação do Defeito de 100 ms	102
b) Tempo de Eliminação do Defeito de 170 ms	106
c) Tempo de Eliminação do Defeito de 272 ms	109
7.5.2 – Curto-Circuito Trifásico Franco na <i>LT 440 kV</i> Arara – Curió	112
a) Tempo de Eliminação do Defeito de 100 ms	112
b) Tempo de Eliminação do Defeito de 128 ms	115
c) Tempo de Eliminação do Defeito de 476 ms	118
Capítulo 8 – Conclusões	121
Referências Bibliográficas	123
Apêndice A1	I
Apêndice A2	VII

Índice de Figuras

Figura 1 – Características dos Períodos de Tempo.....	13
Figura 2 – Sistema de Potência com Compensador do Tipo <i>STATCOM</i>	16
Figura 3 – Característica $P - \delta$ com e sem Compensador.....	17
Figura 4 – Característica $V - I$ Ideal de um Compensador.....	18
Figura 5 – Método da Igualdade de Áreas Aplicado à Estabilidade Transitória.....	18
Figura 6 – Compensador Estático Ideal.....	24
Figura 7 – Característica $V - I$ de um <i>SVC</i> Ideal.....	25
Figura 8 – Característica Composta de um <i>SVC</i>	25
Figura 9 – Interação do <i>SVC</i> com o Sistema de Potência.....	27
Figura 10 – Reator Controlado por Tiristor (<i>TCR</i>).....	28
Figura 11 – Característica $V - I$ do <i>TCR</i>	30
Figura 12 – Chaveamento do <i>TSC</i>	32
Figura 13 – Característica $V - I$ do <i>TSC</i> e do Sistema de Potência.....	33
Figura 14 – <i>SVC</i> Composto por um <i>TCR</i> e por um <i>FC</i>	35
Figura 15 – <i>SVC</i> Composto por um <i>TCR</i> e por um <i>TSC</i>	35
Figura 16 – Curva Característica do <i>SVC</i>	36
Figura 17 – <i>SVC</i> Composto por um <i>TCR</i> e por um <i>MSC</i>	37
Figura 18 – Diagrama de Blocos do <i>SVC</i> e do Sistema de Potência.....	38
Figura 19 – Forma de Onda de Tensão e Corrente de Saída do <i>STATCOM</i>	41
Figura 20 – Característica $V - I$ do <i>STATCOM</i>	42
Figura 21 – Modelo Esquemático do <i>STATCOM</i> e Modos de Operação.....	42
Figura 22 – Sistema Elétrico de Potência Compensado por <i>STATCOM</i>	44
Figura 23 – Característica $P - \delta$ do Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	44
Figura 24 – Característica $P - \delta$ do Sistema Compensado por <i>SVC</i>	45
Figura 25 – Aumento da Margem de Estabilidade Através de um <i>STATCOM</i> e de um <i>SVC</i>	47
Figura 26 – Esquema Funcional de Controle de um <i>STATCOM</i> (Gyugyi, 1994).....	48
Figura 27 – Modelo do Sistema Elétrico de Potência e do <i>STATCOM</i>	51
Figura 28 – Diagrama de Blocos do Sistema de Potência Compensado por um <i>STATCOM</i>	57
Figura 29 – Diagrama de Blocos do <i>STATCOM</i>	57
Figura 30 – Deslocamento Angular para o Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	58
Figura 31 – Potência Acelerante para o Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	59
Figura 32 – Velocidade Angular para o Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	59
Figura 33 – Subespaço de Estados para o Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	60
Figura 34 – Deslocamento Angular para o Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	61
Figura 35 – Potência Acelerante para o Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	61

Figura 36 – Velocidade Angular para o Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	62
Figura 37 – Subespaço de Estados para o Sistema Compensado por <i>STATCOM</i>	62
Figura 38 – Modelo Não-Linear do <i>STATCOM</i>	65
Figura 39 – Regulador de Tensão do <i>STATCOM</i>	66
Figura 40 – Limites para a Corrente de Saída do <i>STATCOM</i>	67
Figura 41 – Circuito Compensador do <i>STATCOM</i>	68
Figura 42 – Sistema Elétrico de Potência Teste 1.....	70
Figura 43 – Sistema Elétrico de Potência Teste 2.....	72
Figura 44 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	74
Figura 45 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	75
Figura 46 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	75
Figura 47 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	76
Figura 48 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	76
Figura 49 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	77
Figura 50 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	78
Figura 51 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	78
Figura 52 – Tensão de Campo para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	79
Figura 53 – Tensão E'_q para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	79
Figura 54 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	80
Figura 55 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com o <i>STATCOM</i>	81
Figura 56 – Corrente I_d para o Sistema Teste 1 com o <i>STATCOM</i>	81
Figura 57 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com o <i>STATCOM</i>	82
Figura 58 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com o <i>STATCOM</i>	82
Figura 59 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	83
Figura 60 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	83
Figura 61 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	84
Figura 62 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	84
Figura 63 – Relações para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	85
Figura 64 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	86
Figura 65 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	86
Figura 66 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	87
Figura 67 – Tensão de Campo para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	87
Figura 68 – Relações para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	88
Figura 69 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	89
Figura 70 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com o <i>STATCOM</i>	89
Figura 71 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com o <i>STATCOM</i>	90
Figura 72 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com o <i>STATCOM</i>	90
Figura 73 – Relações para o Sistema Teste 1 com o <i>STATCOM</i>	91
Figura 74 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	92

Figura 75 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	92
Figura 76 – Tensão E'_q para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	93
Figura 77 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	94
Figura 78 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	94
Figura 79 – Relações para o Sistema Teste 1 com e sem o <i>STATCOM</i>	95
Figura 80 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	96
Figura 81 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	97
Figura 82 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	97
Figura 83 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	98
Figura 84 – Tensão E'_q para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	99
Figura 85 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	99
Figura 86 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	100
Figura 87 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	101
Figura 88 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com <i>STATCOM</i> x <i>SVC</i>	101
Figura 89 – Frequência em Garça 230 kV para o Sistema Teste 2.....	103
Figura 90 – Ângulo Delta de Gavião – Canário para o Sistema Teste 2.....	103
Figura 91 – Tensão em Garça 230 kV para o Sistema Teste 2.....	104
Figura 92 – Potência Elétrica em Gavião para o Sistema Teste 2.....	105
Figura 93 – Tensão E'_q em Tucano para o Sistema Teste 2.....	105
Figura 94 – Ângulo Delta de Gavião – Sabiá para o Sistema Teste 2.....	106
Figura 95 – Frequência em Gavião 230 kV para o Sistema Teste 2.....	107
Figura 96 – Fluxo de Potência Ativa na LT 230 kV Pelicano – Coruja para o Sistema Teste 2.....	107
Figura 97 – Tensão em Urubu 230 kV para o Sistema Teste 2.....	108
Figura 98 – Tensão de Campo de Gavião para o Sistema Teste 2.....	108
Figura 99 – Ângulo Delta de Tucano – Gavião para o Sistema Teste 2.....	109
Figura 100 – Potência Acelerante de Canário para o Sistema Teste 2.....	110
Figura 101 – Tensão em Gavião 230 kV para o Sistema Teste 2.....	110
Figura 102 – Potência Reativa de Saída do <i>STATCOM</i> para o Sistema Teste 2.....	111
Figura 103 – Frequência em Urubu 230 kV para o Sistema Teste 2.....	111
Figura 104 – Frequência na Máquina de Canário para o Sistema Teste 2.....	112
Figura 105 – Tensão em Chopim 440 kV para o Sistema Teste 2.....	113
Figura 106 – Ângulo Delta de Tucano – Sabiá para o Sistema Teste 2.....	113
Figura 107 – Corrente I_q em Gavião para o Sistema Teste 2.....	114
Figura 108 – Tensão E'_q em Tucano para o Sistema Teste 2.....	114
Figura 109 – Ângulo Delta de Gavião – Sabiá para o Sistema Teste 2.....	115
Figura 110 – Frequência em Arara 230 kV para o Sistema Teste 2.....	116
Figura 111 – Tensão em Pelicano 230 kV para o Sistema Teste 2.....	116

Figura 112 – Tensão de Campo de Tucano para o Sistema Teste 2.....	117
Figura 113 – Fluxo de Potência Ativa na LT 230 kV Pelicano – Arara para o Sistema Teste 2.	117
Figura 114 – Ângulo Delta de Tucano – Sabiá para o Sistema Teste 2.....	118
Figura 115 – Freqüência em Tiziu 230 kV para o Sistema Teste 2.....	119
Figura 116 – Tensão em Arara 440 kV para o Sistema Teste 2.....	119
Figura 117 – Corrente I_q em Tucano para o Sistema Teste 2.....	120
Figura 118 – Potência Reativa de Saída do STATCOM para o Sistema Teste 2.	120

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Dados do SEP Teste 1.....	VII
Tabela 2 – Dados da Máquina Síncrona para o SEP Teste 1.....	VII
Tabela 3 – Parâmetros de Seqüência Positiva das Linhas de Transmissão do SEP Teste 2.	VII
Tabela 4 – Parâmetros das Linhas de Transmissão do SEP Teste 2.	VIII
Tabela 5 – Dados dos Transformadores de Dois Enrolamentos do SEP Teste 2.....	IX
Tabela 6 – Dados dos Transformadores de Três Enrolamentos do SEP Teste 2.....	IX
Tabela 7 – Dados das Cargas do SEP Teste 2.	X
Tabela 8 – Dados das Máquinas Síncronas (Regime Permanente) do SEP Teste 2.	X
Tabela 9 – Dados das Máquinas Síncronas (Regime Transitório) do SEP Teste 2.....	X
Tabela 10 – Dados do STATCOM para Estudos de Transitório Eletromecânico.....	XI

Prefácio

A utilização de equipamentos *FACTS* com o objetivo de aumentar a estabilidade e melhorar a dinâmica de sistemas elétricos de potência é apresentada em diversas fontes bibliográficas. Isto pode ser feito através de vários dispositivos com diversos tipos de controle empregados.

Os primeiros dispositivos *FACTS* usados em sistemas elétricos de potência com o objetivo de compensar dinamicamente as linhas de transmissão e aumentar a estabilidade de sistemas elétricos de potência foram os compensadores estáticos (*SVC*). Estes dispositivos tinham como princípio elementar de funcionamento a utilização de reatores e capacitores controlados ou chaveados através de tiristores.

O objetivo central deste trabalho consiste no estudo do dispositivo *FACTS* chamado de *STATCOM* no que se refere a sua influência no aumento da estabilidade de sistemas elétricos de potência através da melhoria das características transitórias e de amortecimento.

O trabalho ainda apresenta o desenvolvimento de um modelo linearizado do *STATCOM* para estudos de pequenas perturbações e o desenvolvimento de um modelo não-linear deste equipamento para estudos de grandes perturbações.

Simbologia

B_C	= susceptância capacitiva total do <i>TSC</i> e dos filtros;
$B_{C_{m\acute{a}x}}$	= susceptância máxima do <i>SVC</i> ;
B_{LMX}	= susceptância máxima do <i>TCR</i> ;
$B(\alpha)$	= susceptância controlada do <i>TCR</i> ;
c	= razão entre a tensão do lado <i>ca</i> e do lado <i>cc</i> do inversor;
C_{dc}	= capacitância do capacitor <i>dc</i> ;
DV	= faixa de tensão controlável do <i>TSC</i> ;
E'	= força eletromotriz da máquina síncrona;
E_{fd}	= tensão de campo da máquina síncrona;
E_q	= tensão de eixo em quadratura;
E'_q	= tensão transitória de eixo em quadratura;
E_{th}	= tensão equivalente do sistema;
i	= corrente instantânea do <i>TCR</i> ;
I_1	= corrente do sistema de potência;
I_2	= corrente do sistema de potência;
I_3	= corrente através do <i>STATCOM</i> ;
$I_{C_{m\acute{a}x}}$	= corrente capacitiva de saída máxima do <i>STATCOM</i> ;
I_d	= corrente de eixo direto;
I_{dc}	= corrente do capacitor <i>dc</i> ;
$I_{Lm\acute{a}x}$	= corrente indutiva de saída máxima do <i>STATCOM</i> ;
I_q	= corrente de eixo em quadratura;
I_{qr}	= sinal de referência para a corrente reativa de saída do <i>STATCOM</i> ;
I_S	= corrente controlada do <i>SVC</i> ;
I_{stat}	= corrente reativa de saída do <i>STATCOM</i> ;

K_A	= ganho do sistema de regulação de tensão;
M	= constante de tempo de inércia da máquina síncrona;
P	= potência transmitida pelo sistema;
P_d	= potência relacionada ao torque de amortecimento;
P_e	= potência relacionada ao torque elétrico;
P_m	= potência relacionada ao torque mecânico;
T_A	= constante de tempo do sistema de regulação de tensão;
T'_{d0}	= constante de tempo transitória de eixo direto;
V_0	= tensão inicial do SVC;
V_∞	= tensão do barramento infinito;
V_C	= tensão no ponto de conexão com o sistema de potência;
V_{dc}	= tensão do capacitor <i>dc</i> ;
V_{ref}	= tensão de referência;
V_S	= tensão controlada do <i>STATCOM</i> ;
V_t	= tensão terminal da máquina síncrona;
X_1	= reatância série da linha de transmissão até o <i>STATCOM</i> ;
X_2	= reatância série da linha de transmissão até o barramento infinito;
X'_d	= reatância transitória de eixo direto;
X_L	= reatância do <i>TCR</i> na frequência fundamental;
X_l	= reatância série da linha de transmissão;
X_q	= reatância síncrona de eixo em quadratura;
X_{SL}	= rampa de reatância do compensador;
X_{th}	= reatância equivalente do sistema;
X_{TRAF0}	= reatância do transformador;
α	= ângulo de disparo do tiristor;
δ	= deslocamento angular do rotor da máquina síncrona;

ΔV = sinal de erro da tensão;

ψ = ângulo da tensão de saída do *STATCOM*;

ω = velocidade angular;

σ = ângulo de condução do tiristor.

Capítulo 1 – Introdução

A necessidade crescente por energia elétrica em centros cada vez mais distantes das unidades geradoras de energia e o novo cenário dos sistemas elétricos, que insere a competição nas atividades de geração e comercialização de energia elétrica, têm levado os sistemas a níveis de transmissão de energia cada vez mais elevados.

Neste contexto, os equipamentos chamados de *FACTS (Flexible ac Transmission System)* podem ser usados com eficiência. Especificamente no que se refere à estabilidade de sistemas elétricos de potência (*SEP*), o *STATCOM (Static Synchronous Compensator)* pode ser usado para melhorar as características transitórias e de amortecimento.

O *STATCOM* é um dispositivo inversor que usa o *gate turn-off* do tiristor *GTO* e a energia *cc* armazenada em um capacitor para gerar uma tensão síncrona trifásica nos seus terminais de saída. O *STATCOM* opera como uma fonte de potência reativa com conexão *shunt* acoplada à linha de transmissão através de um transformador. Isto é análogo ao compensador síncrono, quando a tensão do capacitor é comparada ao efeito da tensão de campo deste compensador. Se a tensão do capacitor é incrementada a partir de seu valor nominal, o *STATCOM* está “sobrecitado” e gera potência reativa. Se a tensão do capacitor é decrementada abaixo de seu valor nominal, o *STATCOM* está “subexcitado” e absorve potência reativa do sistema.

O presente trabalho apresenta a implementação dos modelos (linearizado e não-linear), bem como a representação dos diversos dispositivos que compõem o *STATCOM* e várias simulações obtidas com estes modelos.

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo apresenta uma introdução geral sobre o equipamento estudado (*STATCOM*) e o objetivo traçado (observar sua influência na estabilidade de *SEP*).

Capítulo 2 – Teoria da Compensação Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência

Neste capítulo é mostrado, em linhas gerais, o princípio básico de compensação de linhas de transmissão. É dada também ênfase à compensação dinâmica, pois esta é a classe de compensação na qual se enquadra o *STATCOM*.

Capítulo 3 – Análise dos SVC na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência

O referido capítulo apresenta o princípio de funcionamento dos *SVC* (*Static Var Compensator*) aplicado na estabilidade e dinâmica de *SEP*. São apresentados também os principais arranjos que formam estes equipamentos, bem como o equacionamento de alguns deles. Torna-se importante a análise desses controladores devido aos mesmos serem amplamente utilizados em sistemas como o Sistema Interligado Nacional (*SIN*).

Capítulo 4 – O STATCOM

Neste capítulo é mostrado o equipamento que é o objeto central deste estudo. São apresentadas sua descrição teórica, seu princípio de funcionamento, o esquema básico de compensação de potência reativa e as malhas de controle do equipamento.

Capítulo 5 – Modelo Linearizado do STATCOM em Sistemas Elétricos de Potência

O capítulo mostra a análise matemática de um sistema composto por uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão e o desenvolvimento de um modelo linearizado do *STATCOM* conectado num ponto intermediário qualquer deste sistema. É mostrada através de simulações computacionais a influência do equipamento na melhoria da estabilidade e da dinâmica com relação ao mesmo sistema operado sem a presença do *STATCOM*. São apresentadas ainda as simulações realizadas para pequenas perturbações.

Capítulo 6 – Modelo Não-Linear do STATCOM em Sistemas Elétricos de Potência

Neste capítulo é desenvolvido o modelo matemático do *STATCOM* para estudos que consideram grandes perturbações. Estes estudos vão desde a perda de grandes blocos de geração de potência e rejeição de carga até a ocorrência de faltas (curtos-circuitos). Também é mostrado o sistema básico de controle do equipamento.

Capítulo 7 – Simulações com o STATCOM e Análise Comparativa

Neste capítulo são apresentadas as principais simulações que mostram a influência do *STATCOM* na melhoria da estabilidade e do amortecimento de *SEP*. São realizados estudos comparativos para o sistema com e sem o *STATCOM*. É mostrada também uma análise comparativa em relação a compensadores do tipo SVC.

Capítulo 8 – Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas dos estudos e das implementações computacionais realizadas. É dada uma justificativa quanto aos benefícios de implantação do *STATCOM* em *SEP*.

Capítulo 2 – Teoria da Compensação Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência

Fatores econômicos têm levado os sistemas de transmissão de potência a níveis de carregamento cada vez mais elevados. Estes mesmos fatores têm impedido a ampliação e reforço destes sistemas de modo a aumentar, de uma maneira natural, sua capacidade de transmissão e por conseqüência a estabilidade de *SEP*.

Além disso, a necessidade crescente de exploração de fontes hidroelétricas cada vez mais distantes dos centros consumidores é caracterizada pela utilização de linhas de transmissão longas e por grandes blocos de potência transmitida. Como exemplo pode-se citar a interligação Norte/Sul entre Imperatriz e Serra da Mesa e a interligação Sudeste/Nordeste entre Serra da Mesa e Sapeaçu. Estas duas interligações estão presentes no *S/N* e são muito importantes para o intercâmbio de potência entre os subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste, mostrando claramente as características acima.

Estes fatores econômicos e de estabilidade levam à utilização de esquemas de compensação de potência reativa com o objetivo de aumentar a estabilidade e a capacidade de transmissão de potência, sem a necessidade de ampliação da rede de transmissão existente (Okuno, 1999).

2.1 – Necessidades Fundamentais para a Transmissão de Potência ca

A capacidade de transmissão em corrente alternada é possível somente se duas necessidades básicas forem satisfeitas.

A primeira, é que todas as máquinas síncronas do *SEP* (geradores e compensadores síncronos) devam ter a capacidade de manter o sincronismo entre si. O conceito central relativo à manutenção do sincronismo é a estabilidade. Estabilidade é a capacidade de um *SEP* operar de uma maneira contínua e de um modo aceitável após um distúrbio. Modo aceitável é quando as variáveis de interesse apresentam-se numa faixa restrita de operação.

A estabilidade também pode ser medida pela capacidade inerente do sistema de restabelecer-se na ocorrência de um distúrbio programado (manutenção de linhas de transmissão, transformadores ou unidade geradora) ou não programado (ocorrência de faltas, perdas de grandes blocos de geração ou uma repentina variação de carga).

A estabilidade de *SEP* tende a se degradar à medida que a potência transmitida entre sistemas ou áreas aumenta. Considerando um aumento lento da carga, será alcançado um ponto no qual o sistema torna-se repentinamente instável. Este nível de transmissão de potência é chamado de limite de estabilidade em regime permanente. O limite de estabilidade em regime permanente é influenciado por diversos fatores, dentre os mais relevantes pode-se mencionar, a excitação das máquinas síncronas, interligações fracas entre sistemas, o fluxo de potência ativa e reativa e as características dos equipamentos de compensação presentes no *SEP*. Não é adequado operar o sistema de transmissão muito próximo de seu limite em regime permanente, a não ser que se deseje correr riscos baseados nos esquemas de proteção. Deve-se manter uma margem adequada na transferência de potência de tal modo que a ocorrência de um distúrbio não cause perda de sincronismo entre as máquinas síncronas do sistema.

Para a determinação de uma margem segura e adequada na operação de um *SEP* os conceitos de estabilidade dinâmica e transitória são considerados. Um *SEP* é dito dinamicamente estável se este restabelece a operação a níveis adequados após a ocorrência de um distúrbio. O grau de estabilidade dinâmica pode ser observado em função do amortecimento de diversas grandezas do sistema, como o ângulo do rotor das máquinas síncronas e a velocidade angular, dentre outros. O valor do amortecimento tem seu interesse focado em estudos de estabilidade dinâmica.

Um outro ponto a ser observado na estabilidade de *SEP* é se o sistema pode suportar e recuperar sua operação normal na ocorrência de um grande distúrbio, que é geralmente uma falta severa com posterior abertura de circuito ou a falha em uma unidade geradora relevante para o sistema. A suportabilidade a este tipo de distúrbio, por sua vez, está ligada à estabilidade transitória.

O *SEP* tem estabilidade transitória e dinâmica se o mesmo apresenta a capacidade de suportar e recuperar uma condição operativa normal na ocorrência de grande distúrbio. Esta capacidade de recuperação depende de uma série de fatores como o nível de transmissão de potência na ocorrência do defeito. O limite de estabilidade transitória é o mais alto nível de potência transmitida para que na ocorrência do distúrbio mais severo o sistema não perca o sincronismo entre as máquinas síncronas (Miller, 1982).

A segunda necessidade fundamental na transmissão de potência *ca* é a manutenção da tensão em níveis aceitáveis. Na atualidade, *SEP* apresentam faixas restritas de operação. Subtensões, que são geralmente associadas com a elevação do nível de carga, podem causar problemas na operação de *SEP*. Em sistemas com carga pesada, subtensões podem indicar que o sistema está se aproximando do limite de estabilidade de regime permanente. Subtensões repentinas podem surgir devido a conexões de cargas de valor muito elevado ou perda de geração.

Da mesma forma, sobretensões são indesejáveis e em alguns casos perigosas devido ao risco de colapso no isolamento. Sobretensões podem ter sua origem em diversas causas, como a diminuição da carga durante certos períodos do dia que

levam a um lento, porém constante, aumento da tensão. Sem controle, esta sobretensão pode causar uma diminuição na vida útil da isolação nos equipamentos de *SEP*. Sobretensões repentinas podem resultar de operações de chaveamento de equipamentos, na desconexão de cargas ou devido a distúrbios atmosféricos.

2.2 – A Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência

Em *SEP*, um ponto de equilíbrio não é mantido por muito tempo, devido a distúrbios que vão desde as mudanças naturais no perfil de carga até distúrbios severos como a perda de grandes blocos de geração ou faltas. Estes distúrbios naturais causam mudanças sistemáticas nas condições de equilíbrio dos sistemas.

Neste regime (transitório) existe uma necessidade real de controlar grandezas específicas dos *SEP* de modo a evitar grandes excursões nas diversas grandezas que caracterizam tais sistemas e que resultam de faltas, operações de chaveamento de linhas de transmissão e unidades geradoras e mudanças nas condições de carga. Estas grandezas são: o ângulo do rotor das máquinas síncronas, potência reativa em compensadores síncronos e estáticos, tensão nos diversos barramentos do sistema, dentre outros. O controle deve ser o mais rápido possível e sua operação também deve ser precisa, caso contrário, a estabilidade do sistema pode ser perdida, tanto localmente quanto de uma maneira sistêmica.

Dispositivos de compensação *shunt*, como o *SVC* e o *STATCOM*, podem melhorar a estabilidade e a dinâmica de *SEP*. Através destes dispositivos, pode-se não apenas controlar oscilações na tensão e potência, mas também reduzir os altos custos de investimentos em novos empreendimentos nos sistemas de transmissão já que possibilitam o aumento da capacidade de transferência de potência sem a necessidade de construção de novas linhas.

2.3 – A Necessidade da Compensação de Potência Reativa

Uma correta e precisa compensação de potência reativa pode ser classificada em três níveis básicos.

Inicialmente, a necessidade de manter a estabilidade (sincronismo) das máquinas síncronas que são as unidades geradoras e os compensadores síncronos. Sabe-se que o correto controle da tensão, pela compensação de potência reativa, pode ter uma influência positiva em *SEP* durante os distúrbios que causam mudanças rápidas e com uma elevada variação no ângulo do rotor das máquinas (Yonezawa, 2000). Ambas, a estabilidade transitória e a estabilidade dinâmica, podem ser melhoradas. É possível através do controle dos compensadores de uma maneira geral, e do *STATCOM* de uma maneira particular, direcionar a tensão para um valor tal que seja possível melhorar a estabilidade e o comportamento dinâmico de *SEP* (Garcia, 2001). É interessante ressaltar que este valor de tensão pode ser até um valor não adequado para a operação em regime permanente.

Em segundo lugar, a necessidade de controlar a tensão dentro de certos limites adequados em torno de um ponto de operação ótimo de regime permanente com o objetivo de fornecer um serviço de qualidade para os consumidores finais. Na ocorrência de certas mudanças abruptas na carga (chaveamento) ou na mudança da configuração operativa de redes de transmissão, podem ser necessárias correções no perfil de tensão num curto espaço de tempo. Para outros distúrbios, a correção do perfil de tensão num espaço de tempo maior é suficiente. Desvios elevados na tensão, mesmo que temporários, podem levar a danos em diversos tipos de equipamentos utilizados nestes sistemas (Miller, 1982).

Finalmente, a necessidade de regular o perfil de tensão em sistemas de transmissão é realizada com objetivo de prevenir fluxos de potência reativa desnecessários nestes sistemas. Esta compensação de potência reativa pode ser usada para manter as perdas na transmissão em um valor mínimo. Desta forma pode-se aumentar a capacidade de transmissão de potência ativa e com isso aumentar a estabilidade do sistema (Rahim, 2001).

2.4 – Caracterização do Período Transitório

De uma forma geral, distúrbios que causam variações substanciais nas grandezas que medem a estabilidade de *SEP* podem ser separados em quatro períodos distintos. Estes períodos iniciam na ocorrência do distúrbio e tem seu término quando um novo regime permanente é alcançado. Três destes períodos estão caracterizados na Figura 1 para uma falta ocorrida em uma linha de transmissão. Estes períodos não são caracterizados apenas pela sua duração, mas também pela seqüência de eventos que ocorrem durante o defeito.

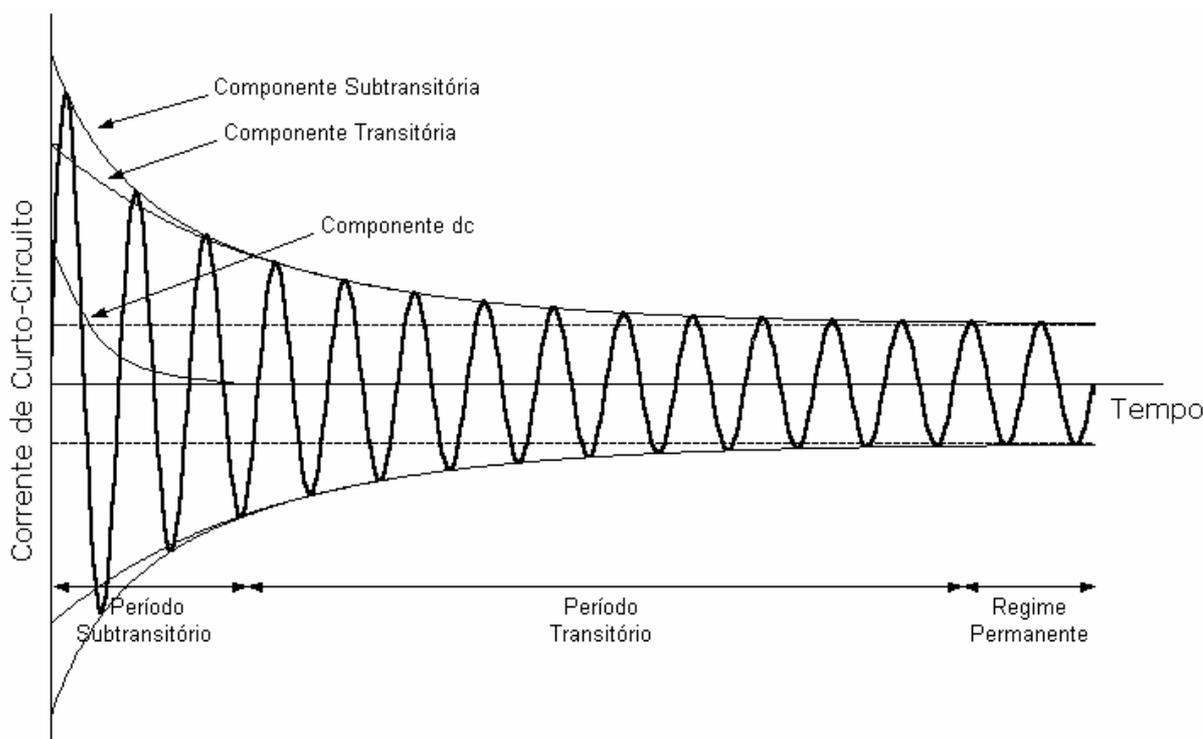


Figura 1 – Características dos Períodos de Tempo.

O primeiro período que ocorre após a falta é chamado de período subtransitório. Durante este período de tempo ocorre um rápido decaimento nas componentes cc e ca da corrente de falta. Estas componentes também podem incluir componentes com frequência elevada que apresentam um rápido amortecimento.

Em seqüência ocorre o período transitório. Como mostrado na Figura 1 este período permanece por um número maior de ciclos após o término do período subtransitório.

Durante este período, as máquinas síncronas podem, com uma precisão considerável, ser representadas por uma fonte de tensão acoplada à uma reatância constante, chamada de reatância transitória de eixo direto ou X_d' .

O período dinâmico segue após o período referido anteriormente. Durante este período ocorrem variações cíclicas em várias grandezas características, como a tensão, a corrente e as potências ativa e reativa. Estas oscilações são causadas por excursões do ângulo das máquinas síncronas e podem se estender até 20 segundos ou mais após uma falta severa. A duração exata e o controle destas oscilações dependem da contribuição do amortecimento que ocorre nos enrolamentos amortecedores das máquinas síncronas, controle dos reguladores de velocidade das turbinas e de diversos tipos de compensadores, dentre os quais o *STATCOM*.

O período quase estacionário é o período final que é alcançado quando não existe mais nenhum tipo de oscilação no rotor das máquinas síncronas. A caracterização deste período pode ser realizada através de estudos de regime permanente (Kundur, 1994 e Miller, 1982).

Para muitos distúrbios ocorridos em *SEP* as oscilações na velocidade angular ou no ângulo do rotor das máquinas síncronas são pequenas. Mudanças no ângulo do rotor das máquinas síncronas podem ser pequenas mesmo para grandes distúrbios se estes ocorrem muito distante (eletricamente) dos geradores. Para estes casos, os períodos de tempo descritos até este ponto são suficientes. Porém quando a oscilação do ângulo do rotor das máquinas síncronas é de uma ordem de grandeza mais elevada pode-se caracterizar um novo período de tempo entre o período subtransitório e o período transitório. Este período é conhecido como período da primeira oscilação (Miller, 1982).

O período da primeira oscilação representa o tempo que ocorre na primeira oscilação (ou meia oscilação) do ângulo do rotor das máquinas síncronas ou a potência sincronizante seguinte a um grande distúrbio, como uma falta ou a perda de grandes blocos de geração. Este período tipicamente tem seu tempo de duração

entre 0,5 e 1 segundo. Neste período também, as máquinas síncronas são aproximadamente representadas como no período transitório. Este período é muitas vezes o período crítico durante o qual a estabilidade transitória pode ser mantida ou perdida. Os compensadores de uma forma geral, e o *STATCOM* de uma maneira particular, podem atuar aumentando a margem de estabilidade transitória dos sistemas.

Porém inúmeros distúrbios em *SEP* de alta tensão ocorrem muito distante dos geradores para causar significantes variações no ângulo do rotor. Nestes casos, o período subtransitório e o período transitório constituem o período de transição total entre a ocorrência do defeito e o período quase estacionário sendo, portanto, desnecessário caracterizar o período da primeira oscilação.

2.5 – O Efeito de Compensadores Estáticos Shunt na Estabilidade Transitória

O tipo de compensação realizado pelos compensadores *shunt*, entre estes o *STATCOM*, é conhecido por compensação por seção, ou seja, o sistema de transmissão é seccionado em pontos intermediários por compensadores *shunt* que têm a capacidade inerente de manter a tensão do barramento no qual estão acoplados essencialmente constante ou dentro de uma faixa aceitável. Além disso, a capacidade de transferência de potência, em regime permanente, do sistema de transmissão pode ser aumentada pela inserção de um compensador *shunt* (*STATCOM*) no ponto médio (Larsen, 1992).

Para o *SEP* mostrado na Figura 2, o aumento na capacidade de potência transferida é determinado pelo aumento na característica $P - \delta$ da curva 1 para a curva 2, conforme mostra a Figura 3.

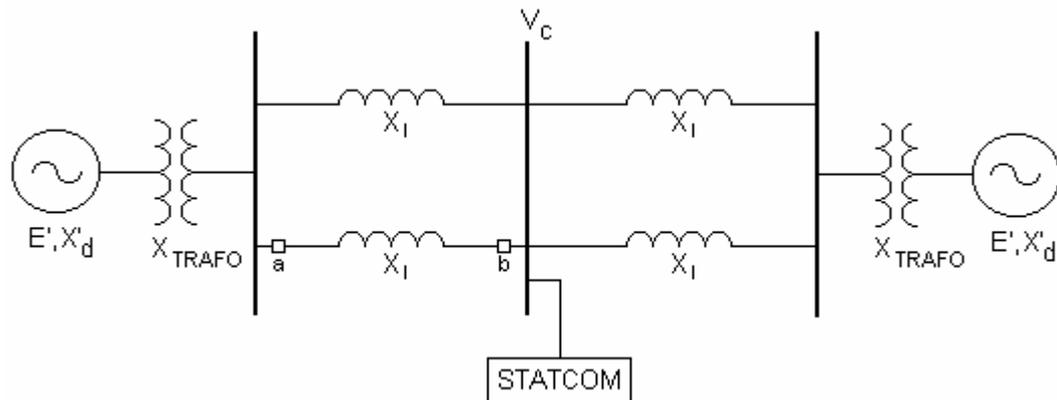


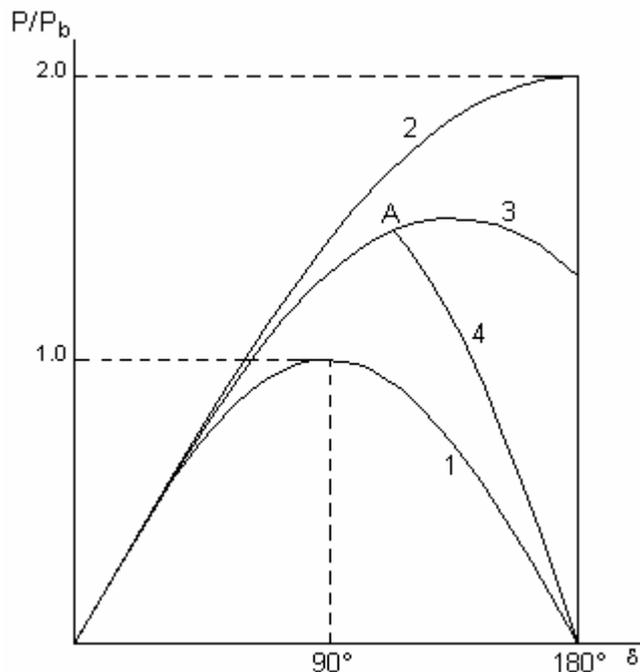
Figura 2 – Sistema de Potência com Compensador do Tipo STATCOM.

A potência transferida é dada pela equação (1) (Miller, 1982).

$$P = \frac{2.E'^2}{2.X'_d + X_{TRAFO} + X_l} .sen\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (1)$$

Onde tem-se que E' é a força eletromotriz atrás da reatância transitória de eixo direto de ambos os geradores, X_l é a reatância série das linhas de transmissão, X_{TRAFO} representa a reatância dos transformadores e δ é o deslocamento angular do rotor das máquinas síncronas.

Um compensador ideal, que mantém a tensão no ponto médio das linhas de transmissão (V_c) constante no valor E' , apresenta a característica $P - \delta$ mostrada na curva 2 da Figura 3.

Figura 3 – Característica $P-\delta$ com e sem Compensador.

A característica $P-\delta$ obtida pela curva 2 é possível somente se a característica $V-I$ do compensador for ideal, se o compensador responde instantaneamente, e se tem uma capacidade de geração de corrente reativa suficientemente elevada. Na prática nenhuma destas condições pode ser realizável. É inerente ao compensador uma pequena inclinação na característica $V-I$ (entre 1 e 5%), e um pequeno atraso na resposta do compensador, que combinados reduzem a característica $P-\delta$ da curva 2 para a curva 3. Por sua vez, a limitação da capacidade de geração de corrente reativa interrompe a curva 3 no ponto A, sendo que o compensador comporta-se como um capacitor fixo para ângulos de carga muito elevados passando a atuar sob a curva 4, no caso de compensadores do tipo SVC. No caso dos compensadores do tipo STATCOM, que têm a capacidade de sustentar a corrente máxima de saída, a mudança da curva 3 para a curva 4 no ponto A é evitada e consegue-se com isso uma maior capacidade de transmissão de potência e um aumento na margem de estabilidade dos sistemas (Gyugyi, 1994).

A característica $V-I$ ideal de um compensador está apresentada na Figura 4.

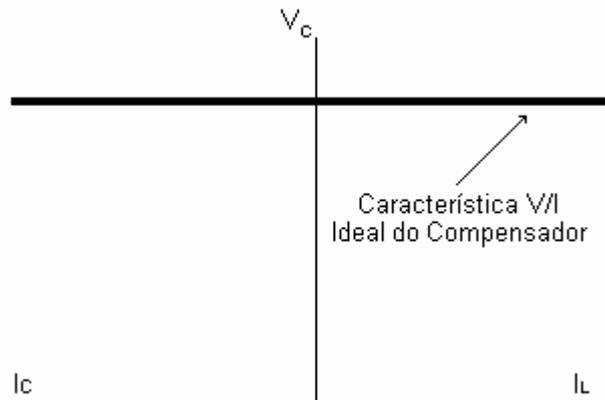


Figura 4 – Característica $V - I$ Ideal de um Compensador.

2.6 – Teoria da Melhora na Estabilidade Transitória

Para a representação teórica da melhora na estabilidade transitória pode-se utilizar o critério de igualdade de áreas para estabelecer uma comparação da estabilidade transitória de um *SEP* com a presença ou não de compensadores *shunt* como o *STATCOM*. Inicialmente considera-se o sistema sem compensação. Seja então a ocorrência de uma falta entre os disjuntores *a* e *b* na Figura 2, sendo eliminada pela posterior abertura destes disjuntores. A curva 1 na Figura 5 mostra a característica $P - \delta$ para a condição pré-defeito.

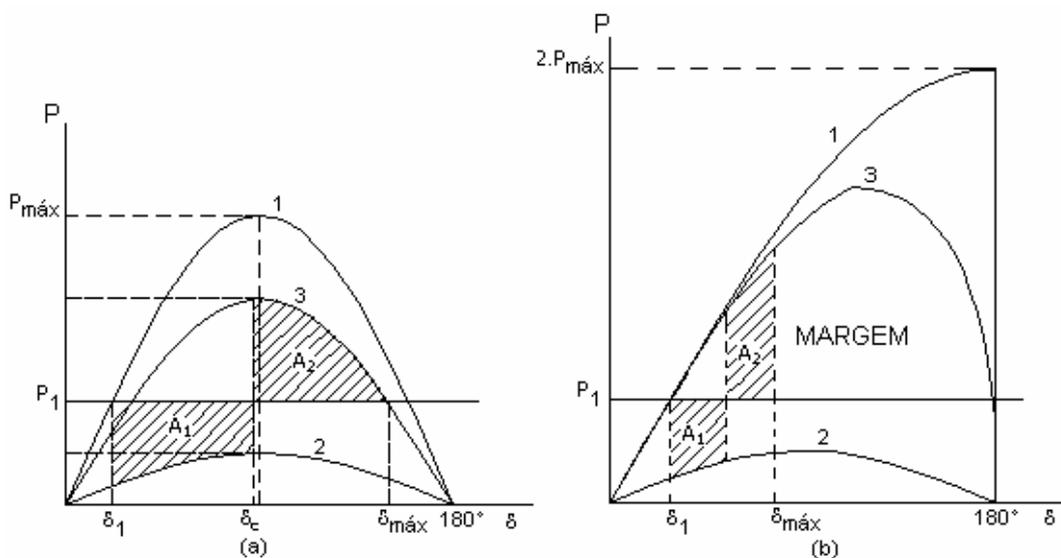


Figura 5 – Método da Igualdade de Áreas Aplicado à Estabilidade Transitória.

A curva 2 representa a condição do sistema durante a falta. A curva 3 mostra a capacidade de transmissão de potência após a abertura da linha de transmissão em que ocorreu a falta e difere da curva 1 basicamente pela mudança na reatância equivalente do sistema. A tensão é assumida constante durante todo o processo. Na ocorrência do defeito, as máquinas do sistema tendem a acelerar devido à diferença entre a potência mecânica e a potência elétrica. Este fenômeno continuará a ocorrer até que o defeito seja eliminado da forma descrita acima. O critério de igualdade de áreas diz que o limite de estabilidade ocorre quando a área de aceleração A_1 iguale-se a área de desaceleração A_2 . Na Figura 5 (a) o sistema está no limite de estabilidade para a transmissão da potência pré-defeito P_1 . Com isso, o nível de transmissão para a condição pré-defeito deve ser um pouco menor para a obtenção de uma margem de estabilidade.

O efeito de um compensador *shunt* do tipo *STATCOM*, conectado no ponto médio do sistema está mostrado na Figura 5 (b). Nesta figura observa-se que para a mesma potência pré-falta P_1 e o mesmo tempo de duração do defeito, a área de desaceleração disponível para o sistema com compensador é substancialmente maior e é parcialmente usada, deixando ainda uma elevada margem de estabilidade. Em outras palavras, o limite para a estabilidade transitória é aumentado e a potência transferida pode ser elevada para um nível tal que não seria possível para o sistema sem compensação (Miller, 1982).

2.7 – Estado da Arte

O *STATCOM* é um dispositivo *FACTS* de conexão *shunt* que opera como uma fonte de potência reativa capaz de fornecer uma tensão controlada em fase com a tensão do *SEP* no qual este está conectado. Ainda, o *STATCOM*, teoricamente, pode ser considerado como uma fonte de tensão alternada conectada em série a uma reatância de transferência representada pelo transformador de acoplamento (Gyugyi, 1994).

O *STATCOM*, em sua estrutura construtiva, é formado por um capacitor *cc*, um inversor multi-pulso e pelo transformador de acoplamento. Com isso, o *STATCOM* pode trocar potência reativa com o *SEP* e melhorar a estabilidade e a dinâmica deste (Chun, 2000.2).

Além disto, o *STATCOM*, pode atuar em ambas as faixas operativas (capacitiva e indutiva), além de ser capaz de fornecer a corrente capacitiva total, diferentemente dos compensadores do tipo *SVC*, conforme foi apresentado na Figura 3. Isto faz com que o *STATCOM* seja mais eficiente do que o *SVC* no suporte de tensão, além de realizar uma melhor compensação dinâmica (Larsen, 1992).

A capacidade inerente do *STATCOM* de gerar e sustentar a corrente máxima de saída, aliada com outras características, causam uma melhora considerável na estabilidade transitória e no amortecimento do *SEP* compensado por este dispositivo *FACTS* (Gyugyi, 1994).

A melhora na estabilidade transitória de *SEP* compensado por *STATCOM* permite, por conseqüência, um aumento na margem de estabilidade destes sistemas, conforme já mostrado na Figura 5. Na prática, este aumento da margem de estabilidade do sistema permite o aumento do tempo crítico de eliminação do defeito, além de aumentar a capacidade de transferência de potência ativa em regime permanente.

A modelagem matemática do *STATCOM* é apresentada em diversas publicações. As publicações, no entanto, apresentam duas linhas distintas. Uma primeira linha propõe um tipo de modelagem linearizada para estudos que consideram pequenos impactos e que tem como objetivo investigar sua influência na melhoria da estabilidade e do amortecimento do sistema compensado. Estes impactos são geralmente considerados como uma variação na potência mecânica.

Wang et al. (1997) apresentam uma modelagem linearizada de dispositivos *FACTS* de conexão série e conexão *shunt* introduzido num sistema radial onde uma

máquina síncrona é conectada a um barramento infinito. Dentre os dispositivos *FACTS* de primeira geração modelados neste artigo, destaca-se o *SVC*.

Chun et al. (1998) mostram uma estratégia de controle para o *STATCOM* com o objetivo de fornecer um rápido suporte de tensão para o *SEP* e com isso aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema. Para isto foi utilizado o mesmo sistema teste trabalhado por **Wang (1997)**.

Finalmente **Wang (1999.2)** descreve o *STATCOM* através de um modelo matemático linearizado, incorporado em um sistema radial composto de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão. O modelo deste sistema considera a metodologia de **Heffron-Phillips (1952)**. Através deste modelo matemático o autor mostra a influência do *STATCOM* na melhoria da estabilidade e da dinâmica de *SEP* para pequenos impactos.

A segunda linha de artigos considera o desenvolvimento de modelos matemáticos do *STATCOM* para aplicação com distúrbios severos (não-lineares). Estes distúrbios são geralmente representados através de faltas ou perdas de grandes blocos de geração. O objetivo do desenvolvimento de uma modelagem não-linear é observar a influência deste equipamento de compensação *shunt* no que se refere a melhora da estabilidade e da dinâmica de *SEP*.

Petitclair et al. (1997.2) apresentam o *STATCOM* com base em um modelo não-linear, onde é representada a característica $V - I$ deste equipamento, bem como seu regulador de tensão e um circuito compensador que representa a dinâmica dos tiristores *GTO*. Este modelo permite representar adequadamente a influência deste equipamento para distúrbios severos.

Já **Cañizares (2000)** também apresenta um modelo não-linear deste dispositivo *FACTS* semelhante ao desenvolvido por **Petitclair (1997.2)**, porém podendo ser utilizado em estudos de estabilidade angular e de estabilidade de tensão.

Finalmente **Mithulananthan et al. (2002)** mostram um estudo comparativo entre o estabilizador do sistema de potência (*ESP*), o *SVC* e o *STATCOM* no que se refere a melhora da estabilidade e da dinâmica de *SEP* considerando distúrbios severos (não-lineares).

O trabalho tem por objetivo avaliar e implementar um modelo linearizado e um modelo não-linear para o *STATCOM*, de modo a investigar sua influência no aumento da estabilidade e na melhoria da dinâmica de *SEP*. Isto é feito através de diversas simulações computacionais realizadas para diferentes sistemas testes.

Capítulo 3 – Análise dos SVC na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência

Os compensadores estáticos (SVC) são dispositivos *FACTS*, com conexão *shunt*, capazes de trocar (gerar ou absorver) potência reativa com o *SEP* no qual estão conectados. Os SVC têm a capacidade de variar e controlar grandezas, como a tensão, do sistema no qual estão conectados. O termo “estático” é utilizado para indicar que os SVC, diferentemente dos compensadores síncronos, não apresentam rotação de seus componentes. Os SVC também apresentam dispositivos de controle.

Os sistemas de compensação baseados na utilização de SVC também podem utilizar bancos de capacitores chaveados (*MSC*) ou de reatores (*MSR*) cujas saídas são coordenadas para controlar o nível de tensão do barramento onde estão conectados.

A compensação de potência reativa auxilia na solução de problemas em sistemas de transmissão. Este tipo de compensação nas proximidades dos centros consumidores é vantajoso, pois reduz as perdas na transmissão pela limitação do fluxo de potência reativa, apresentando um baixo custo na capacidade de transmissão de potência e produção de energia. Técnicas de compensação de potência reativa utilizando capacitores e reatores chaveados por tiristores e reatores controlados através de tiristores podem adequar a tensão a níveis desejados (Kundur, 1994). Atualmente este controle da tensão pode ser realizado também com a utilização do *STATCOM*.

Os tipos básicos de elementos que controlam a potência reativa e fazem parte dos SVC são o reator controlado por tiristor (*TCR*), o capacitor chaveado por tiristor (*TSC*) e o reator chaveado por tiristor (*TSR*). Um grande número de configurações de SVC pode ser formado pela combinação dos vários tipos básicos mencionados anteriormente.

3.1 – Princípio de Funcionamento

De uma maneira ideal, um SVC é equivalente ao conjunto formado por um capacitor *shunt* e por um reator *shunt*, ambos sendo capazes de controlar a tensão e a potência reativa no barramento no qual estão conectados. Esta característica está mostrada na Figura 6.

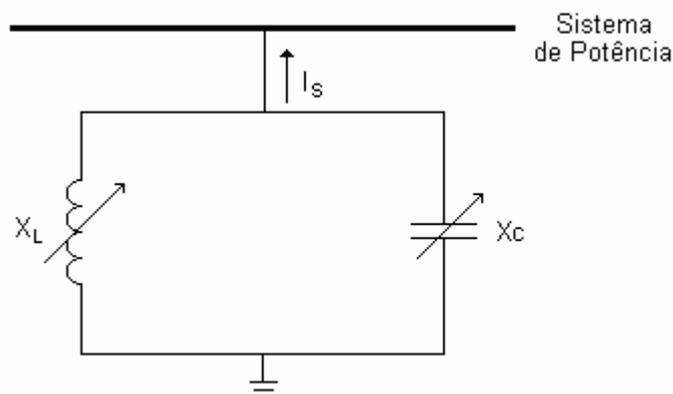


Figura 6 – Compensador Estático Ideal.

Desta forma o SVC pode manter a tensão do barramento em que está conectado constante, possuindo uma capacidade ilimitada de troca de potência reativa com uma resposta instantânea. A capacidade deste SVC ideal pode ser visualizada através de sua característica $V - I$, como mostrado na Figura 7.

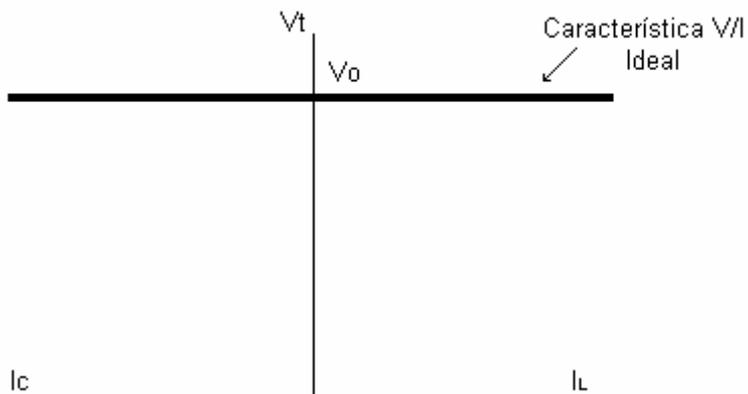


Figura 7 – Característica $V - I$ de um SVC Ideal.

Já para a definição da característica real de um SVC, considera-se este composto por um reator controlado e por um capacitor fixo. Esta configuração apresenta resultados que são aplicados a um grande número de configurações de SVC.

A Figura 8 mostra a característica de um SVC constituído por um reator controlado e por um capacitor fixo. Esta característica é obtida pela soma das características isoladas de seus componentes.

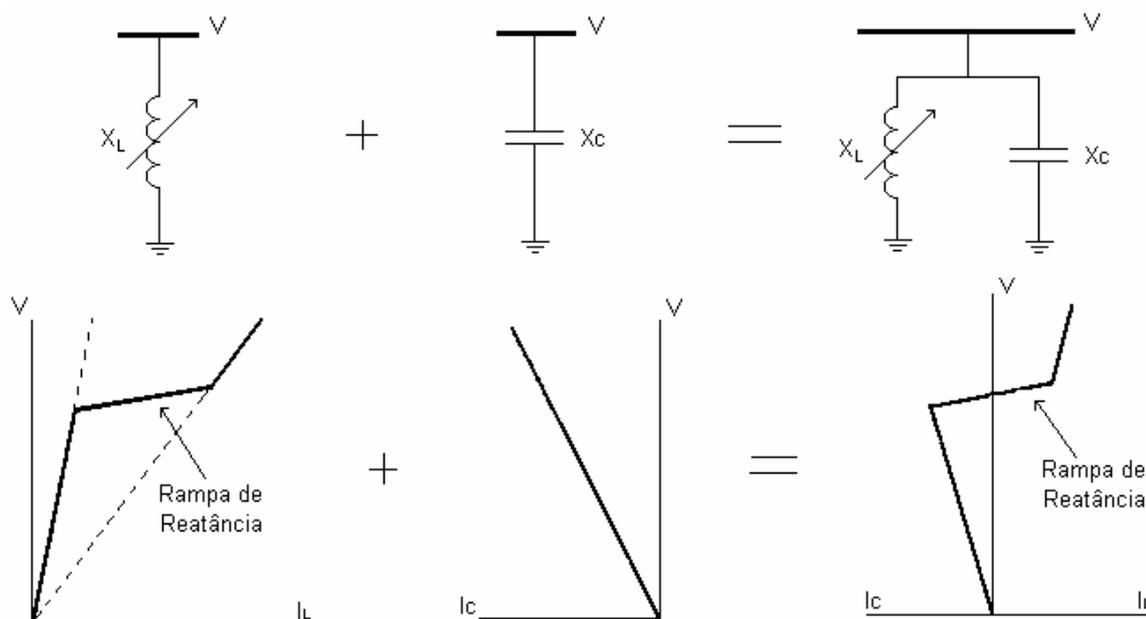


Figura 8 – Característica Composta de um SVC.

Nesta figura, a rampa de reatância é obtida através da característica isolada do reator controlado. Já o capacitor fixo tem a capacidade de deslocar a característica do SVC para a região capacitiva.

Para determinar a característica funcional dos SVC quando aplicados em SEP, é necessário que sua característica seja examinada juntamente com a característica do sistema. A característica $V - I$ do sistema pode ser determinada por seu equivalente a partir do barramento cuja tensão deseja-se controlar através do SVC, sendo que a impedância equivalente em SEP é normalmente indutiva. A tensão do sistema tende a aumentar com a corrente de carga capacitiva e, de maneira contrária, diminuir com a corrente de carga indutiva.

Para cada condição operativa do SEP, um novo equivalente é definido e sua característica é afetada pelas mudanças na tensão e na reatância equivalentes. A característica do sistema pode ser mostrada pela equação (2), onde E_{th} e X_{th} representam respectivamente a tensão equivalente e a reatância equivalente do sistema no ponto de conexão do SVC.

$$V = E_{th} - X_{th} I_S \quad (2)$$

A característica do SVC, dentro da faixa de tensão controlada, pode ser expressa por sua característica X_{SL} , onde esta representa a rampa de reatância. Isto está mostrado na equação (3), onde V_0 é a tensão inicial do SVC.

$$V = V_0 + X_{SL} I_S \quad (3)$$

Para tensões exteriores à faixa controlada, a relação $V - I$ é dada pelas rampas nos dois extremos mostrados na Figura 8, sendo que seus valores são determinados pelo indutor e pelo capacitor.

A solução gráfica para as equações características do SVC e do SEP está mostrada na Figura 9. Algumas características do sistema (carga) são consideradas nesta figura, correspondendo a três valores distintos para a tensão equivalente.

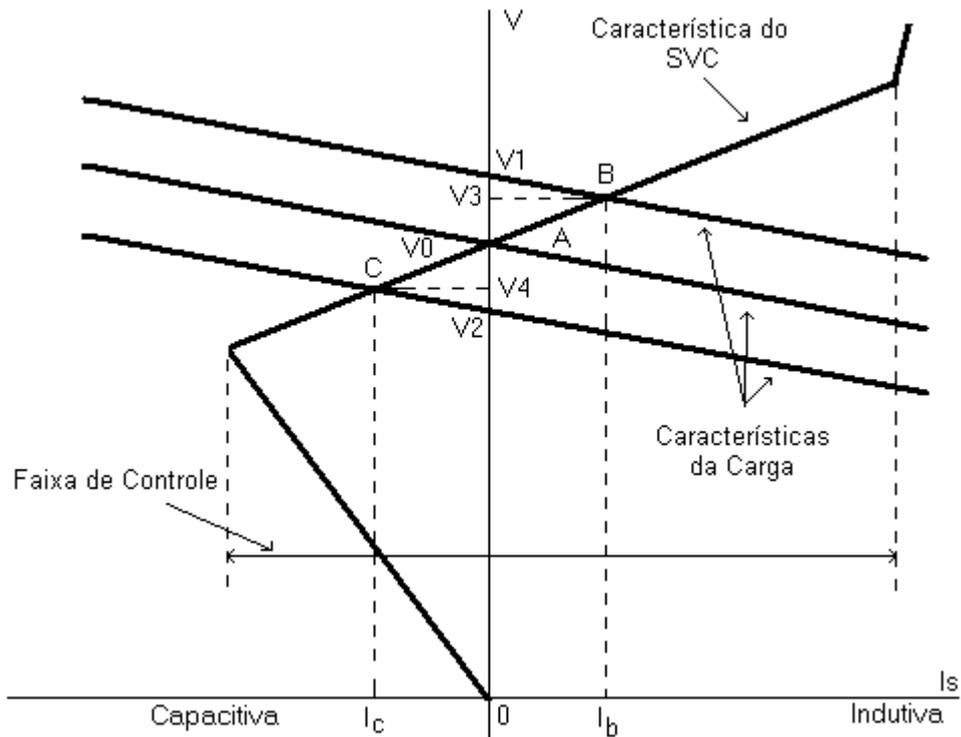


Figura 9 – Interação do SVC com o Sistema de Potência.

A característica central representa a condição nominal do sistema, e é assumida sua interseção com a característica do SVC no ponto A, onde $V = V_0$ e $I_s = 0$. Se a tensão do sistema apresentar um incremento de ΔE_{th} , por exemplo pela redução na carga, a tensão V será incrementada para V_1 , exteriormente ao SVC. O equipamento irá operar e mover o ponto de operação do sistema para o ponto B, absorvendo a corrente indutiva I_b e sustentando a tensão no SVC em V_3 . De maneira contrária, se a tensão do sistema apresentar um decremento, causado por exemplo por um aumento de carga, a tensão será reduzida para V_2 , exteriormente ao SVC. O equipamento novamente irá operar e mover o ponto de operação para o ponto C, injetando a corrente capacitiva I_c e sustentando a tensão do SVC em V_4 . Se a rampa característica do SVC apresentar uma inclinação igual a zero (condição

ideal), a tensão teria sido sustentada em V_0 em ambos os casos considerados anteriormente (Kundur, 1994).

3.2 – Equipamentos de Compensação

Os elementos básicos que constituem o SVC são, como já mencionado anteriormente, o reator controlado por tiristor (*TCR*) e o capacitor chaveado por tiristor (*TSC*). Na seqüência estes equipamentos são analisados mais detalhadamente no que se refere a sua constituição e funcionamento.

3.2.1 – Reator Controlado por Tiristor (*TCR*)

Os elementos básicos que constituem o *TCR* são o reator em série com um tiristor bidimensional conforme mostrado na Figura 10. Os tiristores têm a capacidade de conduzir alternadamente a cada meio-ciclo da freqüência fundamental e dependem do ângulo de disparo α , que é medido a partir do cruzamento com o zero da tensão.

A condução máxima do *TCR* é obtida com o ângulo de disparo igual a 90° . A corrente, para esta condição, é essencialmente indutiva e senoidal. Porém, conduções parciais são obtidas variando o ângulo de disparo entre 90° e 180° . Ângulos de disparo entre 0° e 90° não são viáveis pois produzem correntes assimétricas.

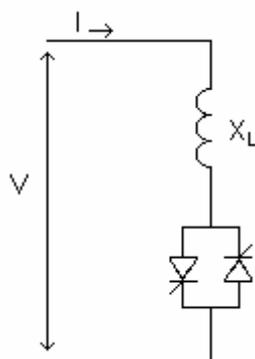


Figura 10 – Reator Controlado por Tiristor (*TCR*).

Considerando σ o ângulo de condução, sua relação com α está mostrada na equação (4).

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (4)$$

A corrente instantânea i , por sua vez, pode ser determinada pela relação mostrada na equação (5).

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L}(\cos \alpha - \cos \omega t), & \text{para } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0, & \text{para } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (5)$$

Também a componente fundamental desta corrente pode ser obtida através da equação (6).

$$I_f = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \text{sen} \sigma}{\pi} \quad (6)$$

Onde I_f e V são valores eficazes, e X_L representa a reatância na frequência fundamental. O efeito de se incrementar α (equivalente a decrementar σ) está na redução da componente fundamental de I_f . Isto é o mesmo que aumentar o efeito na indutância do reator. O efeito do *TCR* é como de uma susceptância controlada, onde esta é obtida em função do ângulo de disparo α dos tiristores. O valor numérico desta susceptância pode ser determinado pela equação (7).

$$B(\alpha) = \frac{I_f}{V} = \frac{\sigma - \text{sen} \sigma}{\pi \cdot X_L} = \frac{2(\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha)}{\pi \cdot X_L} \quad (7)$$

O valor máximo do efeito da susceptância controlável do *TCR* está na condução máxima ($\alpha = 90^\circ, \sigma = 180^\circ$), e é equivalente a $1/X_L$. O valor mínimo, por sua vez, é zero, obtido com o ajuste de $\alpha = 180^\circ$ ou $\sigma = 0^\circ$.

O *TCR* necessita de um sistema de controle que determine o instante exato do disparo (ângulo α) medido a partir do último cruzamento com o zero da tensão (sincronismo do ângulo de disparo). Em alguns arranjos o sistema de controle responde a um sinal que representa diretamente a susceptância desejada. Em outros, o controle responde a um sinal que representa o desvio de tensão, sinais auxiliares estabilizantes, etc. O resultado da característica $V - I$ está mostrado na Figura 11. A característica de controle de tensão pode ser estendida para dentro da região capacitiva pela adição em paralelo de bancos de capacitores fixos ou chaveados.

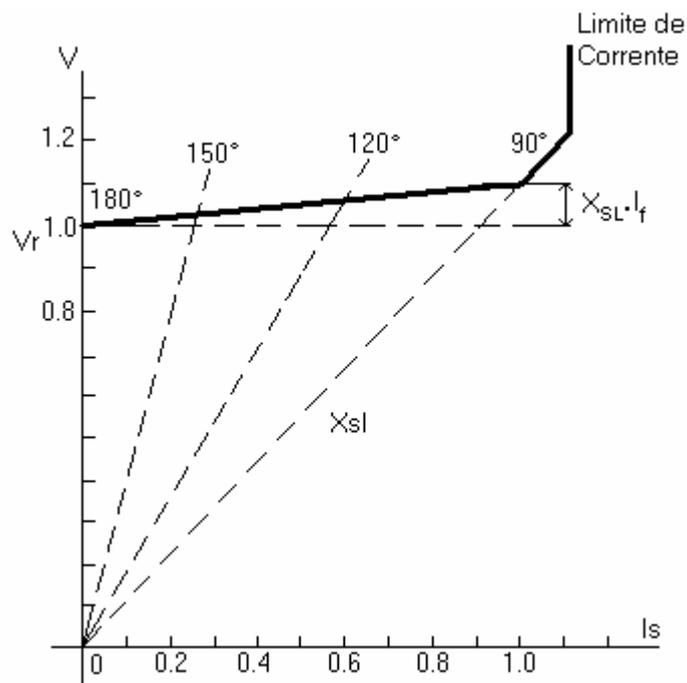


Figura 11 – Característica $V - I$ do *TCR*.

A medida que o ângulo α é incrementado de 90° para 180° , a forma de onda da corrente torna-se cada vez menos senoidal. Em outras palavras, o *TCR* passa a gerar harmônicos. Em sistemas trifásicos, o arranjo mais utilizado é a conexão de três dispositivos *TCR* monofásicos conectados em delta. Este arranjo é conhecido por *TCR* de seis pulsos. Para esta condição operativa, todos os harmônicos de terceira ordem circulam dentro dos enrolamentos conectados em delta, e com isso não estão presentes na corrente de linha.

Por sua vez a eliminação dos harmônicos de quinta e sétima ordem pode ser realizada pelo uso de *TCR* de seis pulsos de mesma relação, alimentados de dois enrolamentos secundários de transformadores abaixadores. Um destes enrolamentos secundários deve estar conectado em estrela e o outro conectado em delta. Desde que a tensão aplicada nos *TCR* tenha uma diferença de fase de 30° , os referidos harmônicos serão eliminados do lado primário da corrente de linha. Isto é conhecido como arranjo de doze pulsos. Com este arranjo, os harmônicos de ordem mais baixa são os de décima primeira e décima terceira ordem. Estes, por sua vez, podem ser filtrados através de bancos de capacitores.

A resposta do *TCR* é de cerca de dez milissegundos. Porém atrasos são introduzidos por circuitos de medição e por circuitos de controle. Para assegurar a estabilidade no controle em malha fechada a resposta medida deve ser limitada. Por esta razão, os tempos de resposta são tipicamente da ordem de cinco ciclos da frequência fundamental.

3.2.2 – Capacitor Chaveado por Tiristor (TSC)

A estrutura básica com o capacitor chaveado consiste de um banco de capacitores distribuídos de maneira adequada. Cada capacitor é conectado ou desconectado do sistema usando um tiristor como chave. Cada fase é composta por um capacitor em série com um tiristor bidimensional e um pequeno indutor. O indutor deve ser utilizado com o objetivo de limitar o transitório no chaveamento do *TSC*, amortecer possíveis correntes de magnetização e exercer uma proteção contra ressonância com o *SEP*. Para aplicações em sistemas trifásicos, as unidades básicas são conectadas em delta.

O chaveamento do capacitor gera transitórios que podem alcançar valores significativos, dependendo da frequência de ressonância dos capacitores com o *SEP*. O controle do ângulo de disparo dos tiristores deve ser selecionado de tal forma que minimize o transitório no chaveamento do *TSC*. Isto é feito escolhendo o instante de fechamento quando a tensão através do tiristor estiver em seu valor mínimo, de uma maneira ideal nula. A Figura 12 apresenta o princípio de

funcionamento. O instante de fechamento (t_1) é escolhido de tal forma que a tensão V esteja em seu valor máximo e com a mesma polaridade do capacitor, assegurando que o chaveamento esteja livre de transitórios. Da mesma forma, o instante para a abertura do tiristor (t_2) corresponde à condição na qual a corrente seja igual a zero. O capacitor, por sua vez tentará continuar carregado no pico de tensão.

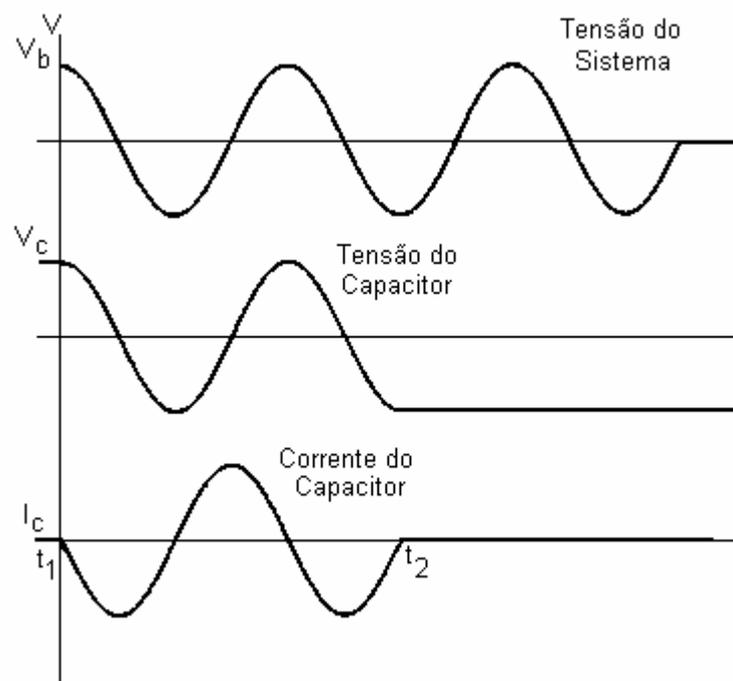


Figura 12 – Chaveamento do TSC.

O princípio de controle da susceptância utilizado no TSC é conhecido por controle de ciclo integral, pois a susceptância pode ser chaveada a cada meio ciclo exato da frequência fundamental. A susceptância pode ser constituída internamente em várias unidades fundamentais em paralelo e controlada pelo número total de unidades em condução. A mudança no número de unidades em condução pode ser realizada, como dito anteriormente, a cada meio ciclo. Desta forma o controle do TSC não gera harmônicos, diferentemente do TCR.

Quando a tensão do barramento controlado apresenta uma mudança em seu valor de referência (V_{ref}) além da faixa de controle em ambas as direções, o sistema de

controle insere no sistema um número adequado de bancos de capacitores até que a tensão retorne para dentro da faixa controlável, desde que nem todos os bancos tenham sido chaveados.

A característica $V - I$ do compensador do tipo *TSC* está mostrada na Figura 13. O controle de tensão é realizado em degraus. Em aplicações em alta tensão e extra alta tensão, o número de bancos de capacitores *shunt*, que constituem o *TSC*, é limitado pelo elevado custo dos tiristores. Devido à característica $V - I$ do *SEP* a inserção do *TSC* neste ocorre em pontos discretos. A tensão (V) do barramento é controlada dentro da faixa $V_{ref} \pm DV/2$, onde DV representa a faixa de tensão controlável. Quando o sistema está operando sob a característica representada pela curva S_a , o capacitor C_1 está chaveado e o ponto de operação é dado pelo ponto A . Se a característica do sistema muda rapidamente para a curva S_b , a tensão do barramento controlado reduz inicialmente para o valor representado pelo ponto B . O controle do *TSC* então insere o banco C_2 mudando o ponto de operação para C , conduzindo a tensão de volta para dentro da faixa controlada.

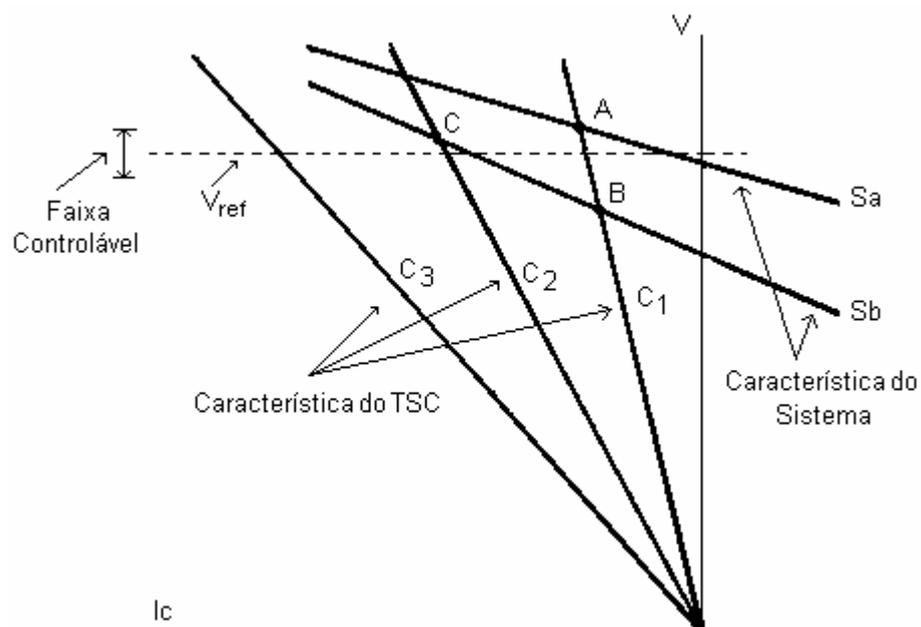


Figura 13 – Característica $V - I$ do *TSC* e do Sistema de Potência.

Desta maneira o compensador promove a mudança do ponto de operação em pontos discretos. O tempo de execução do comando do controle é da ordem de um ciclo da frequência fundamental.

3.3 – Arranjos dos SVC

Os arranjos dos SVC, que monitoram e controlam parâmetros de rede dos SEP numa área desejada, podem ser realizados pela combinação de vários elementos de compensação. Algumas configurações de SVC são definidas para atender diferentes necessidades do sistema na qual este está inserido. A velocidade da resposta, o tamanho da área de controle, a flexibilidade operativa, as perdas inerentes ao chaveamento dos tiristores e o custo do equipamento estão entre as considerações mais importantes na seleção e configuração dos SVC. Com base nestas premissas podem-se definir alguns arranjos para os SVC.

3.3.1 – SVC Constituído por TCR-FC

O diagrama esquemático de funcionamento do SVC utilizando o FC (capacitor fixo) e o TCR está mostrado na Figura 14. A corrente de saída do reator é controlada pela variação do ângulo de disparo dos tiristores. Deste modo, a potência reativa de saída é variada continuamente sob toda a extensão equivalente do reator controlado.

No máximo valor de absorção, o TCR está na máxima condução e a potência reativa de saída depende da malha formada pelo reator, capacitor e filtros. No máximo valor de injeção de potência reativa, o TCR está desconectado e a potência reativa de saída é determinada pelos capacitores e filtros. Num sistema trifásico equilibrado, onde as fases estão conectadas em delta (utilizando o TCR de seis pulsos), existem somente harmônicos de $6n \pm 1^a$ ordem.

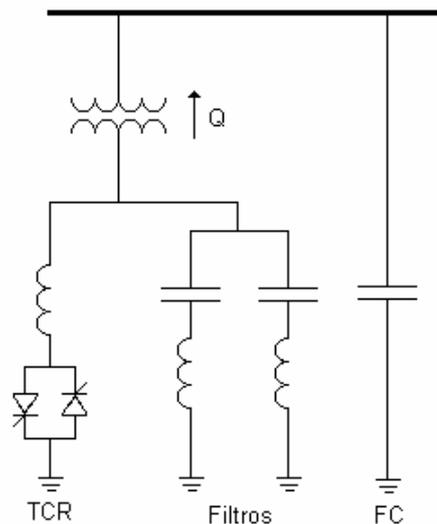


Figura 14 – SVC Composto por um *TCR* e por um *FC*.

3.3.2 – SVC Constituído por *TCR-TSC*

O diagrama esquemático de funcionamento do *SVC* utilizando o *TCR* e o *TSC* está mostrado na Figura 15. Da mesma maneira que o arranjo apresentado no item 3.3.1, a potência reativa de saída deste compensador é continuamente controlada sobre toda a extensão da faixa controlável de operação. Na máxima potência reativa injetada, o *TCR* está desconectado e o *TSC* está conectado. A capacitância de saída é obtida pela soma do *TSC* e dos filtros.

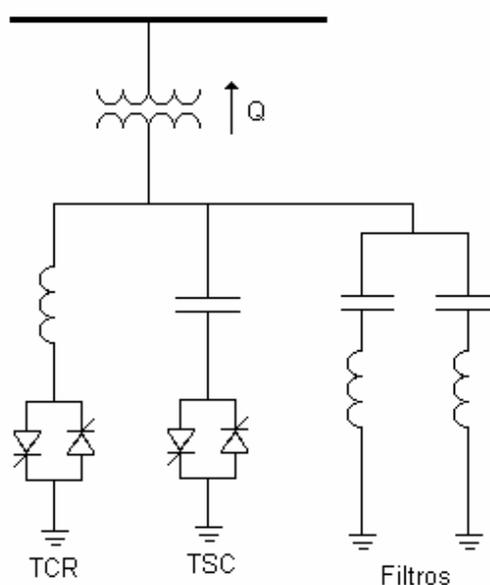


Figura 15 – SVC Composto por um *TCR* e por um *TSC*.

A característica $V - I$ deste SVC está apresentada na Figura 16. O controle da faixa linear possui seus limites determinados pela susceptância máxima (B_{LMX}) do reator e pela susceptância capacitiva total (B_C) determinada pelo equivalente entre a capacitância do TSC e a capacitância dos filtros. Se a tensão do sistema cair abaixo de um valor pré-definido (tipicamente da ordem de $0,3 pu$) por um longo período, pode-se perder o controle do tiristor, necessitando com isso a desconexão do SVC do SEP. O SVC pode ser conectado novamente, tão rápido a tensão seja restabelecida.

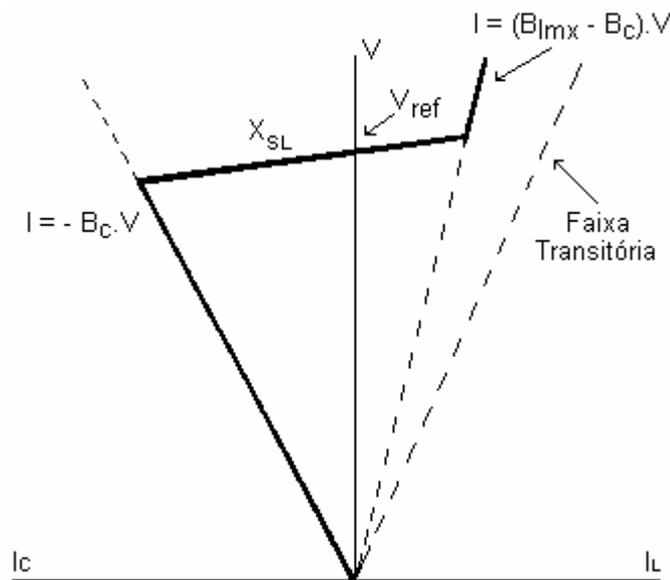


Figura 16 – Curva Característica do SVC.

Dentro de sua faixa de controle linear, o SVC é equivalente a uma fonte de tensão V_{ref} em série com uma reatância característica (X_{SL}). A rampa de reatância X_{SL} apresenta um efeito significativo no funcionamento do SVC. Um elevado coeficiente angular para X_{SL} faz o SVC menos susceptível a mudanças nas condições do sistema que podem causar consideráveis excursões na tensão do barramento no qual o SVC está conectado. O valor de X_{SL} é determinado pelo ganho do controlador (regulador de tensão). A seleção do regulador de tensão é baseada em diversos estudos como o de fluxo de potência e de estabilidade. Tipicamente, a rampa de reatância tem seu valor entre 1 e 5%. A faixa transitória mostrada na Figura 16 tem sua função descrita no capítulo 4.

Cabe ressaltar que o SVC conectado na interligação Sudeste/Nordeste do SIN, em Bom Jesus da Lapa, apresenta esta estrutura.

3.3.3 – SVC Constituído por TCR-MSVC

A Figura 17 mostra o diagrama esquemático de funcionamento do SVC utilizando o TCR e o MSC (capacitor chaveado mecanicamente). A potência reativa de saída é similar à encontrada no SVC composto por um TCR e por um TSC. Sua principal diferença está na velocidade de resposta e nas perdas. Capacitores chaveados mecanicamente são geralmente conectados no barramento de alta tensão e o chaveamento destes são sincronizados através da utilização de tiristores.

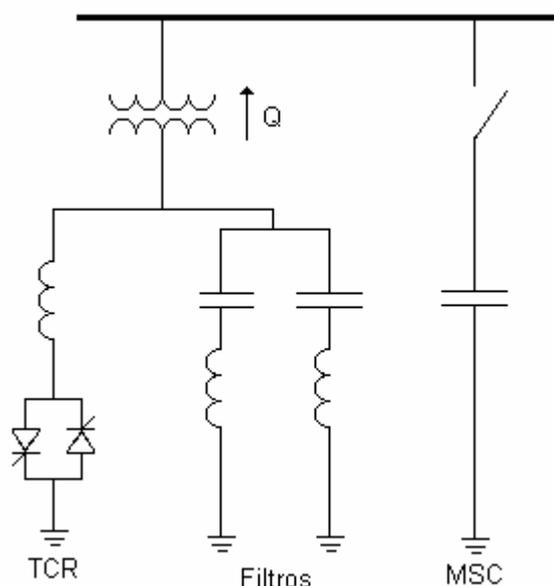


Figura 17 – SVC Composto por um TCR e por um MSC.

3.4 – Modelo do SVC para Estudos de Estabilidade

O modelo do SVC para estudos de estabilidade eletromecânica deve levar em consideração sua ação de controle e uma correta representação do sistema. Os objetivos da análise de grandes e pequenas perturbações relativas à aplicação dos SVC na estabilidade de SEP são, de uma maneira geral, a determinação da

influência do SVC na estabilidade do sistema e a determinação dos parâmetros de controle adequados para um desempenho satisfatório no regime transitório e no amortecimento na ocorrência de uma perturbação.

Os parâmetros do modelo do SVC são ajustados de acordo com o desempenho do SVC no *SEP*, de maneira a representar as várias condições operativas e suas respostas para vários distúrbios.

Para estudos de estabilidade eletromecânica em *SEP*, no que se refere ao controle de tensão no ponto de conexão com o sistema, o diagrama de blocos do SVC e do *SEP*, mostrado na Figura 18, apresenta resultados satisfatórios. Este sistema pode inclusive ser usado para verificar a adequação dos parâmetros de controle. Para este tipo de análise, o *SEP* é representado por uma fonte de tensão equivalente em série com a reatância equivalente do sistema X_{th} (em pu). A Figura 18 mostra o diagrama de blocos simplificado do SVC com um controle em malha fechada no terminal de tensão. O modelo está baseado na hipótese de que a tensão V_T sofra somente pequenos desvios do seu valor nominal.

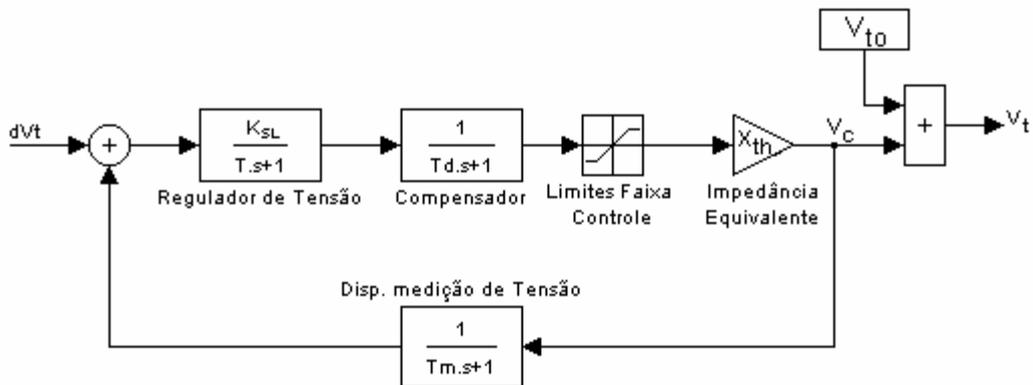


Figura 18 – Diagrama de Blocos do SVC e do Sistema de Potência.

No modelo simplificado tem-se que T_m é a constante de tempo do dispositivo de medição de tensão. Já o parâmetro K_{SL} representa o ganho do regulador de tensão, sendo este igual ao inverso da rampa de reatância controlada do SVC (X_{SL}). A constante de tempo T está associada ao regulador de tensão. Por sua vez, T_d é a

constante de tempo do circuito compensador. Finalmente o parâmetro X_{th} representa a reatância equivalente do *SEP*, vista a partir do ponto de conexão do *SVC*.

Neste sistema, as simulações são realizadas a partir de uma variação na tensão de referência representada através da entrada (dV_t). Por sua vez, a saída da tensão controlada do *SVC* é representada pelo sinal V_t , sendo V_{t0} a tensão inicial do barramento controlado.

Capítulo 4 – O *STATCOM*

Os primeiros dispositivos *FACTS* baseados em eletrônica de potência utilizados em *SEP* com o objetivo de compensar dinamicamente linhas de transmissão e com isso aumentar a estabilidade do sistema foram os *SVC*.

O *STATCOM*, objeto central deste trabalho, também pode ser enquadrado na família de dispositivos chamada de *FACTS* (IEEE Task Force Report, 1997). Porém, diferentemente dos *SVC*, que utilizam tiristores para chavear ou controlar capacitores e reatores permanentemente conectados ao *SEP*, o *STATCOM* é um dispositivo inversor que usa o *gate turn-off* do tiristor *GTO* e a energia *cc* armazenada em um capacitor para gerar uma tensão síncrona trifásica nos seus terminais de saída. Portanto, o *STATCOM* pode ser considerado como uma evolução dos dispositivos *FACTS* do tipo *shunt*, posicionando-se numa segunda geração destes dispositivos (Larsen, 1992; Gyugyi, 1994 e Lehn, 2002).

Quando comparado aos compensadores síncronos, o *STATCOM* pode responder mais rapidamente à mudança nas condições do sistema, não contribui com correntes de curto-circuito, tem a capacidade de manter o sincronismo e não tem partes móveis. O *STATCOM* quando comparado aos outros compensadores estáticos *shunt* (*SVC*) apresenta significativas vantagens como seu desempenho em baixa tensão e uma menor produção de harmônicos (Hanson, 2002; Uzunovic, 2001 e Baker 2001).

4.1 – Princípio de Funcionamento

O *STATCOM* opera como uma fonte de potência reativa com conexão *shunt* acoplada ao *SEP* através de um transformador. Seu princípio de funcionamento é, portanto, análogo ao compensador síncrono, se a tensão do capacitor *cc* for comparada ao efeito da tensão de campo no mesmo. Em outras palavras, se a tensão do capacitor *cc* for incrementada a partir de seu valor nominal, o *STATCOM* está “sobrecitado” e gera potência reativa. De maneira contrária, se a tensão do capacitor *cc* for decrementada abaixo de seu valor nominal, o *STATCOM* está “subexcitado” e absorve potência reativa do sistema como apresentado na Figura 19.

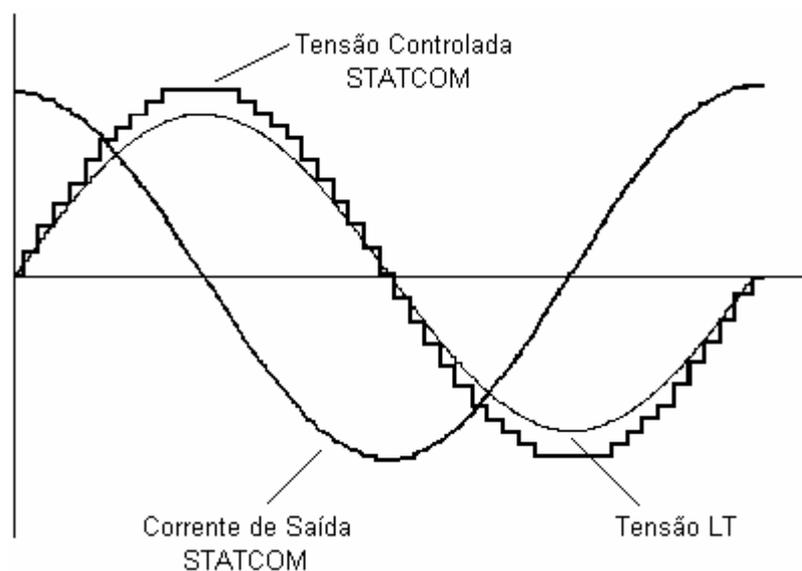


Figura 19 – Forma de Onda de Tensão e Corrente de Saída do *STATCOM*.

O *STATCOM* pode ser visto como uma fonte de tensão alternada conectada em série a uma reatância de acoplamento com a característica da tensão de saída, pela corrente (característica $V - I$), mostrada na Figura 20. A tensão fornecida pelo *STATCOM* é superior ao *SVC* devido a sua capacidade de fornecer a corrente capacitiva total, mesmo quando a tensão do sistema apresenta-se próxima de zero. Além disso, o *STATCOM* apresenta um ganho transitório em ambas regiões indutiva e capacitiva (Gyugyi, 1994).

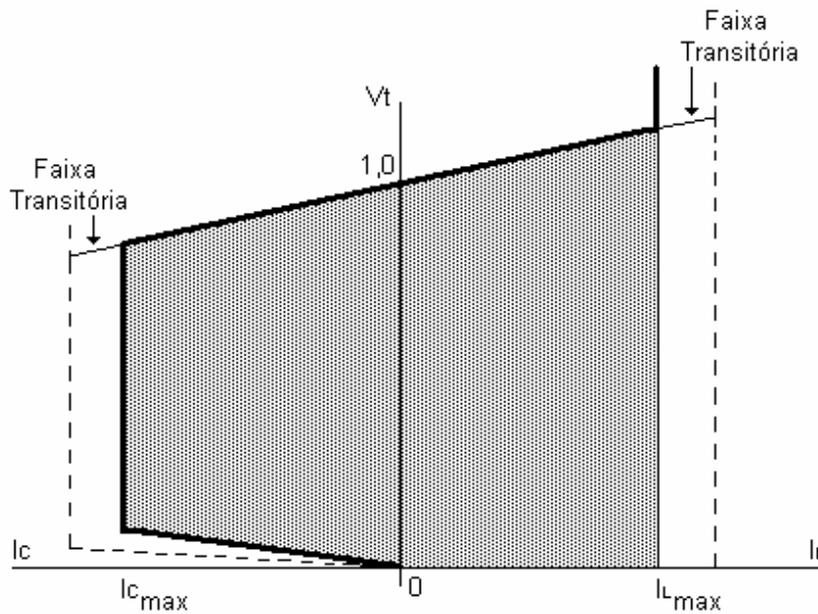


Figura 20 – Característica $V-I$ do STATCOM.

4.2 – Esquema de Compensação de Potência Reativa

O *STATCOM* é composto de um inversor multi-pulso, de um pequeno capacitor *cc* e de um transformador de acoplamento, conforme mostrado na Figura 21. A troca de potência reativa entre o *STATCOM* e o *SEP*, em regime permanente, também é mostrada na Figura 21.

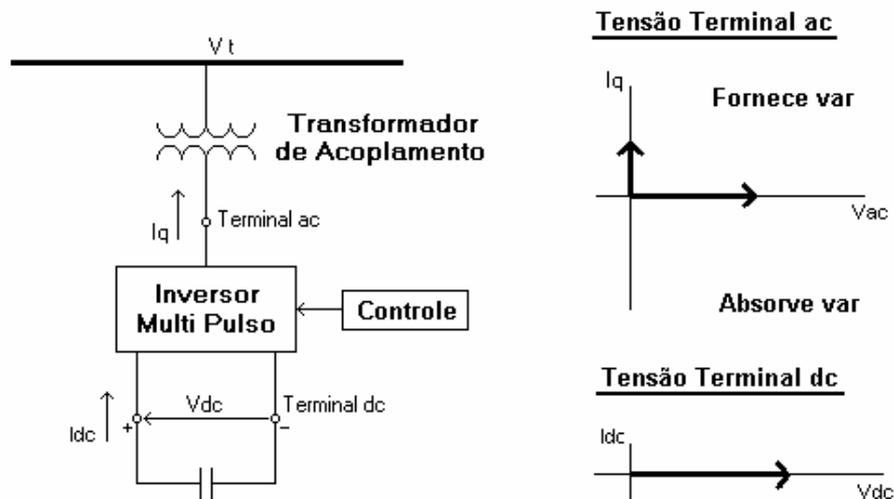


Figura 21 – Modelo Esquemático do STATCOM e Modos de Operação.

Nesta configuração operativa, o próprio inversor tem a capacidade de manter o capacitor carregado no nível de tensão apropriado, de modo a efetuar o controle de potência reativa do *SEP*, no ponto onde o *STATCOM* está conectado. Esta operação é realizada tornando a tensão de saída do inversor adiantada de um pequeno ângulo em relação à tensão do *SEP*. Com isso, o inversor absorve uma pequena quantidade de potência ativa necessária para a reposição de perdas dos elementos semicondutores e para a manutenção da tensão do capacitor *cc* num nível adequado. Este mesmo mecanismo de controle é usado para aumentar ou diminuir a tensão do capacitor, e com isso controlar a amplitude da tensão de saída do inversor para efetuar a troca de potência reativa com o *SEP*.

Através da característica $V - I$ do *STATCOM*, apresentada na Figura 20, observa-se que este equipamento pode fornecer ambas as compensações indutiva e capacitiva, além de estar habilitado a controlar a corrente de saída sob toda a faixa controlável, independente da tensão do *SEP*. Com isso, o *STATCOM* pode fornecer a corrente capacitiva total em qualquer nível de tensão, inclusive próximo de zero. Esta sua importante característica o faz superior no suporte de tensão em relação a outros dispositivos *FACTS*, como os *SVC*, que não são capazes de fornecer a corrente capacitiva total com a diminuição da tensão do sistema. Isto pode ser visto através da relação $V - I$ do *SVC* mostrada na Figura 16. Mais ainda, um *STATCOM* realiza uma melhor compensação dinâmica que um *SVC* de mesmo valor (Gyugyi, 1994).

Conforme mostrado também na Figura 20, o *STATCOM* apresenta um ganho transitório em ambas as regiões indutiva e capacitiva. O *SVC* de acordo com a Figura 16 não apresenta ganho transitório na geração de potência reativa (região capacitiva) pois a máxima corrente capacitiva de saída é determinada pelo valor do capacitor e pela magnitude da tensão do *SEP* no qual o *SVC* está conectado. Além disso, o *STATCOM* está apto a produzir a corrente de saída capacitiva total, em níveis baixos de tensão. Estas duas características causam uma melhora efetiva na estabilidade transitória e no amortecimento das oscilações para *SEP* compensados por *STATCOM*, em relação a sistemas compensados por *SVC* (Chun, 2000.1 e Chun, 2000.2).

4.3 – Melhoria na Estabilidade Transitória

Para mostrar a melhoria na estabilidade transitória de *SEP* compensados por *STATCOM*, em relação ao mesmo sistema compensado por um *SVC* equivalente (mesmo valor), seja o *SEP* representado na Figura 22.

O referido *SEP* é constituído por duas máquinas síncronas, compensado no ponto médio através de um *STATCOM*, sendo a corrente capacitiva de saída máxima do equipamento chamada de $I_{C_{máx}}$. O sistema apresentado é adequado para este tipo de estudo pois pode representar a interligação entre dois subsistemas.

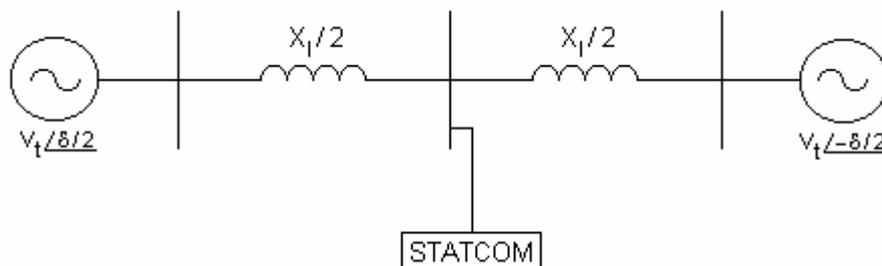


Figura 22 – Sistema Elétrico de Potência Compensado por *STATCOM*.

A Figura 23 apresenta a melhoria na estabilidade transitória do sistema compensado por um *STATCOM*, onde a potência transmitida P é mostrada em relação ao deslocamento angular δ .

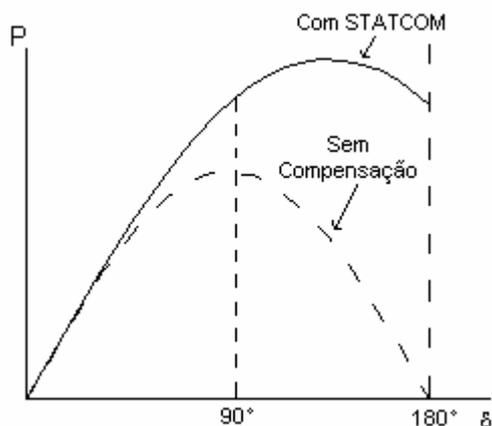


Figura 23 – Característica $P-\delta$ do Sistema Compensado por *STATCOM*.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa, a Figura 24 mostra a relação equivalente da potência transmitida (P) pelo deslocamento angular (δ) para um SVC de mesmo valor.

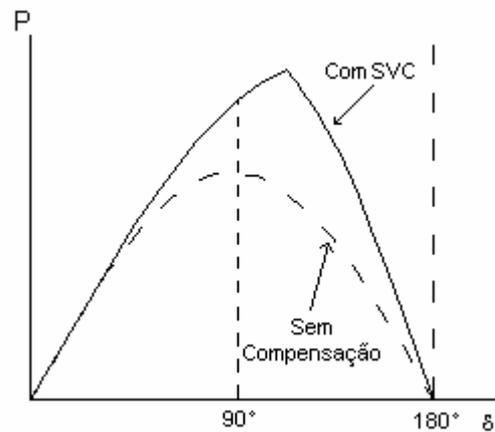


Figura 24 – Característica $P-\delta$ do Sistema Compensado por SVC.

Com base nas Figura 23 e 24 pode-se observar que o *STATCOM*, assim como o *SVC*, apresentam-se como compensadores *shunt* semelhantes, conectados no ponto médio da linha de transmissão onde a potência transmitida é definida com base na equação (8).

$$P = \left(\frac{2.V_t^2}{X_l} \right) .sen(\delta/2) \quad (8)$$

Os dois equipamentos *FACTS* comportam-se desta maneira semelhante até que a máxima corrente capacitiva de saída seja alcançada. A partir deste ponto os equipamentos comportam-se de maneira completamente distinta.

O *STATCOM* tem a capacidade de fornecer a máxima corrente capacitiva de saída ($I_{C_{max}}$), ao invés de uma admitância capacitiva fixa como no caso do *SVC*, independentemente do aumento do deslocamento angular (δ) e da variação da tensão no ponto de compensação. A potência transmitida pelo sistema compensado através do *STATCOM* é dada pela equação (9) (Gyugyi, 1994).

$$P = \frac{V_t^2}{X_l} \cdot \text{sen}(\delta) + \frac{V_t \cdot I_{C_{\text{máx}}}}{2} \cdot \text{sen}(\delta/2) \quad (9)$$

Por sua vez, a potência transmitida pelo mesmo sistema compensado por um SVC (de mesmo valor) é apresentada na equação (10) (Gyugyi, 1994).

$$P = \frac{\frac{V_t^2}{X_l}}{1 - \left(\frac{X_l}{4}\right) \cdot B_{C_{\text{máx}}}} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (10)$$

Em conseqüência disto, a diminuição da potência transmitida (P) na região $\pi/2 < \delta < \pi$ é evitada e obtém-se uma área $\int P \cdot d\delta$ que representa a melhora na margem de estabilidade do *SEP* compensado por *STATCOM*.

4.4 – Aumento na Margem de Estabilidade

O aumento na margem de estabilidade, obtido com o *STATCOM* em relação a um SVC de mesmo valor, está mostrado na Figura 25 através da utilização do critério de igualdade de áreas. Para esta análise é utilizado o modelo composto por duas máquinas, mostrado na Figura 22, compensado no ponto médio através de um *STATCOM* e de um SVC.

Assume-se, inicialmente, que o sistema esteja operando, em regime permanente, nas condições P_0 e δ_0 . O sistema então é submetido a uma falta trifásica franca passageira, e com isso a potência elétrica transmitida pelo *SEP* durante o defeito é zero. Durante o período de falta a máquina tende a acelerar, devido à diferença entre a potência mecânica e a potência elétrica, já que a potência mecânica do sistema é considerada constante. A área de aceleração é representada pela área listrada (A_1), e o deslocamento angular do rotor durante o defeito é incrementado de δ_0 para δ_1 , onde $\delta_1 > \delta_0$.

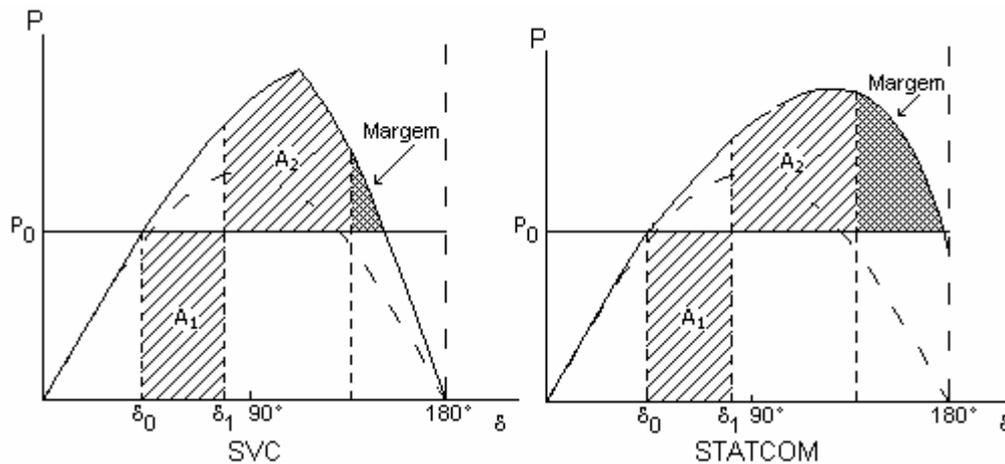


Figura 25 – Aumento da Margem de Estabilidade Através de um STATCOM e de um SVC.

Quando o sistema é restabelecido, pela eliminação do defeito, a potência transmitida torna-se maior que a potência mecânica, devido ao incremento do deslocamento angular δ . Graças a esse fenômeno, a máquina tende a desacelerar (A_2). A energia recuperada durante o defeito é representada pela área sombreada na Figura 25. Está área sombreada representa a margem de estabilidade transitória do sistema. Pode-se ver que a margem de estabilidade transitória obtida com o STATCOM é significativamente maior que a alcançada com um SVC similar. Desta forma, a potência elétrica transmitida pode ser aumentada, ainda mais, se a compensação do SEP for realizada através de um STATCOM, ao invés de um SVC.

4.5 – Esquema Básico de Controle do STATCOM

O esquema básico funcional do controle do STATCOM utilizado para compensação *shunt* está estruturalmente mostrado na Figura 26, em conjunto com o equivalente de Thévenin do SEP. A tensão terminal V_t do SEP está sujeita a variações dinâmicas de frequência e amplitude, devido a distúrbios na carga e no próprio sistema (faltas ou perda de grandes blocos de geração) que causam excursões angulares nas máquinas.

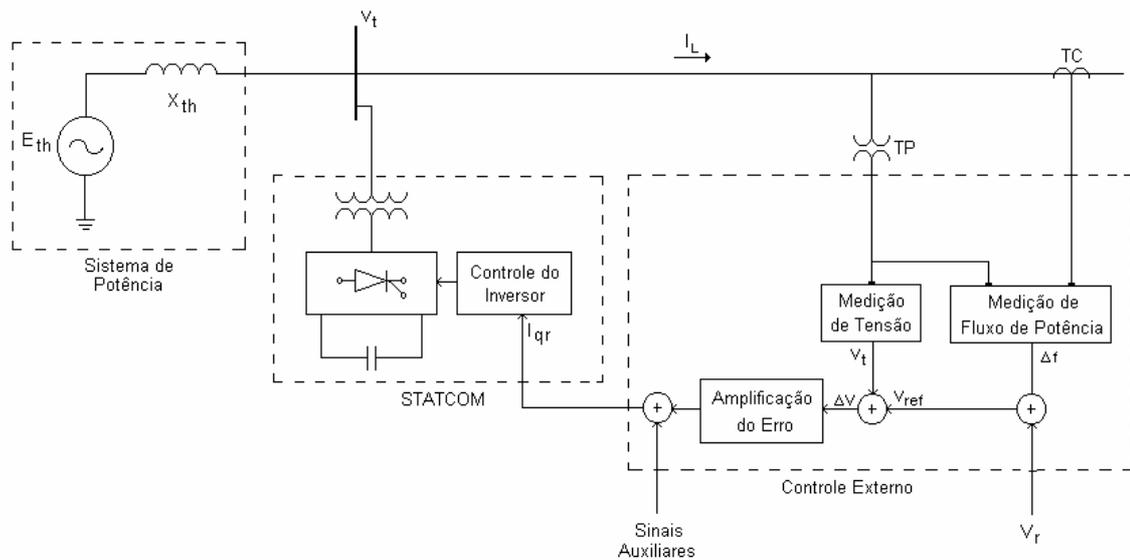


Figura 26 – Esquema Funcional de Controle de um STATCOM (Gyugyi, 1994).

O controle básico do STATCOM é realizado da maneira mostrada a seguir. O controle interno do inversor, que gera o sinal de disparo dos tiristores GTO, recebe o sinal de referência I_{qr} para a corrente reativa de saída desejada, a qual representa a demanda de potência reativa do SEP. A partir deste sinal de referência, o controle interno do inversor processa e seleciona a tensão necessária de saída do STATCOM em relação à tensão do SEP, de modo a compensar dinamicamente o sistema no qual o equipamento está acoplado.

O STATCOM tem condições efetivas de minimizar a magnitude e duração de distúrbios em SEP pela regulação da tensão terminal e amortecimento de oscilações. Para realizar isto, um controle externo deve ser empregado para gerar o sinal de referência para o controle interno do STATCOM e produzir a potência reativa necessária para minimizar o distúrbio do SEP (Chun, 1998 e Farsangi, 2000).

A malha externa de controle básico é construída para regular a tensão terminal através do controle da corrente reativa de saída do STATCOM. Com esta finalidade, como mostrado na Figura 26, a amplitude V_t da tensão terminal é medida através de um transformador de potencial e de um circuito processador. A amplitude da tensão medida é comparada com a tensão de referência V_{ref} . A diferença entre essas duas

grandezas, o sinal de erro ΔV , é amplificada e processada através de um processador de erro, para fornecer o sinal de referência I_{qr} correspondente à corrente reativa desejada de saída.

O amortecimento das oscilações em *SEP* pode ser realizado pela modulação (controle) da corrente reativa de saída do *STATCOM* (Ying, 2000).

Com base na Figura 26, o amortecimento de oscilações em *SEP*, através da modulação da potência reativa, pode ser realizado pela modificação da tensão de referência V_{ref} . Isto é, um sinal representando a oscilação de potência do sistema é obtido ou pela medição direta da frequência (variação Δf) ou pela medição da potência ativa transmitida (variação $\int P.dt$) e somado a V_r , já que tanto Δf como $\int P.dt$ são proporcionais ao deslocamento angular do rotor da máquina síncrona. O sinal resultante desta soma induz a corrente reativa de saída do *STATCOM* a oscilar ao redor do ponto de operação definido pela tensão de referência V_r . Isto obriga a tensão terminal a aumentar quando, por exemplo, o desvio de frequência (Δf) for positivo, de modo a aumentar a potência elétrica transmitida e assim opor-se à aceleração das máquinas síncronas do sistema. De maneira análoga, este sinal faz com que a tensão terminal diminua quando Δf for negativo, de modo a reduzir a potência elétrica transmitida pelo sistema e com isso opor-se à desaceleração das máquinas síncronas do sistema. Portanto a malha de controle externa do *STATCOM* possibilita uma maneira eficaz de reduzir as oscilações em *SEP*, na ocorrência de distúrbios, além de aumentar sua estabilidade transitória.

Capítulo 5 – Modelo Linearizado do *STATCOM* em Sistemas Elétricos de Potência

A modelagem matemática de um equipamento é de fundamental importância para a caracterização correta de sua influência na melhoria da estabilidade de *SEP*. Neste contexto, o presente capítulo traz a modelagem linearizada do *STATCOM* inserido em um sistema.

O modelo linearizado aqui desenvolvido também representa um sistema de controle que pode influenciar diretamente a melhoria da estabilidade e do amortecimento de *SEP* na ocorrência de pequenos distúrbios em uma determinada condição operativa.

5.1 – Sistema Elétrico de Potência Analisado

O *SEP* utilizado para o desenvolvimento do modelo linearizado do *STATCOM* é composto por uma máquina síncrona, sendo $\overset{\circ}{V}_t$ sua tensão terminal, conectada a um barramento infinito representado pela tensão $\overset{\circ}{V}_\infty$. O sistema também apresenta uma linha de transmissão, representada pelas reatâncias X_1 e X_2 , que conecta a máquina síncrona ao barramento infinito. A linha de transmissão por sua vez, apresenta um ponto intermediário compensado através de um *STATCOM*.

O *STATCOM* é composto por um transformador de acoplamento representado por sua reatância (X_{TRAFO}), por um inversor que utiliza tiristores *GTO*, onde c e ψ são suas variáveis de controle e por um pequeno capacitor cc representado pela tensão V_{dc} , pela capacitância C_{dc} e por sua corrente I_{dc} . O conjunto representando o *SEP* e o *STATCOM* está mostrado esquematicamente na Figura 27.

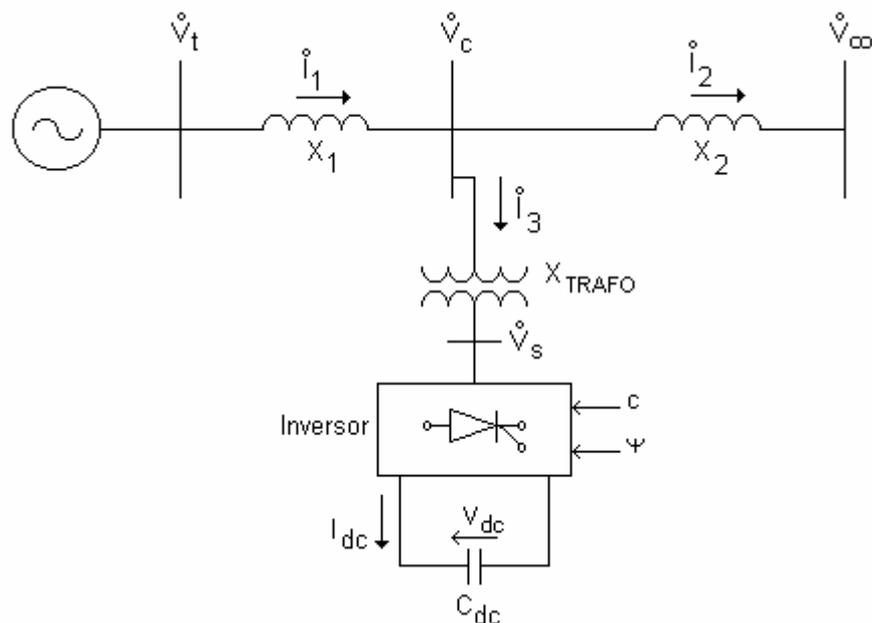


Figura 27 – Modelo do Sistema Elétrico de Potência e do *STATCOM*.

O *SEP* utilizado para o desenvolvimento do modelo linearizado do *STATCOM* pode representar a interligação entre dois subsistemas. Através do mesmo pode-se observar a influência do equipamento na melhoria do amortecimento das oscilações na ocorrência de distúrbios.

5.2 – Equacionamento do Modelo Linearizado

O inversor, que faz parte do *STATCOM*, tem a capacidade de gerar uma tensão trifásica controlada representada através da equação (11). A diferença entre a tensão $\overset{\circ}{V}_s$ e $\overset{\circ}{V}_c$ (que é a tensão no ponto de conexão com o sistema de potência)

na reatância X_{TRAFO} produz uma troca de potência reativa entre o *STATCOM* e o *SEP* que possibilita o aumento da estabilidade e do amortecimento das oscilações deste sistema (Chun, 1998 e Wang, 1999.2).

$$v_s(t) = V_s \cdot \text{sen}(\omega t - \psi) \quad (11)$$

De acordo com a equação (11), a tensão de saída do *STATCOM* pode ser controlada pela amplitude V_s e pelo ângulo ψ . Com base no modelo mostrado na Figura 27, tem-se que a corrente através do *STATCOM* (\dot{I}_3) pode ser decomposta em coordenadas $dq0$, como mostrado na equação (12) (Wang, 1997 e Wang, 1999.1).

$$\dot{I}_3 = I_{3d} + j \cdot I_{3q} \quad (12)$$

A tensão controlada de saída do *STATCOM* pode ser escrita em função da tensão do capacitor cc , conforme indica a equação (13).

$$\dot{V}_s = c \cdot V_{dc} \cdot (\cos \psi + j \cdot \text{sen} \psi) \quad (13)$$

Na equação (13) tem-se que c é uma constante que representa a razão entre a tensão do lado ca e do lado cc e a taxa de modulação do inversor. O modelo do *STATCOM* mostrado através das equações (12) e (13) pode ser usado com eficiência em estudos de estabilidade de *SEP*.

Com base no modelo apresentado na Figura 27 podem ser obtidas as seguintes relações:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 - \frac{\dot{V}_t - j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1 - \dot{V}_s}{j \cdot X_{TRAFO}} \quad (14)$$

$$\overset{\circ}{V}_t = \overset{\circ}{V}_\infty + j \cdot X_1 \cdot \overset{\circ}{I}_1 + j \cdot X_2 \cdot \overset{\circ}{I}_2 \quad (15)$$

Onde $\overset{\circ}{I}_1$ e $\overset{\circ}{I}_2$ são as correntes do *SEP* analisado. Arranjando adequadamente as equações (14) e (15) obtém-se a equação (16).

$$j \cdot \left(X_1 + X_2 + X_1 \cdot \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \cdot (I_{1d} + j \cdot I_{1q}) = \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \cdot (X_q \cdot I_{1q} + j \cdot (E'_q - X'_d \cdot I_{1d})) - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \cdot (c \cdot V_{dc} \cdot \cos \psi + j \cdot c \cdot V_{dc} \cdot \sin \psi) - \overset{\circ}{V}_\infty \cdot \sin \delta - j \cdot \overset{\circ}{V}_\infty \cdot \cos \delta \quad (16)$$

Onde as variáveis E'_q , X'_d e X_q representam a tensão transitória de eixo em quadratura, a reatância transitória de eixo direto e a reatância síncrona de eixo em quadratura, respectivamente. Já a variável δ representa a diferença angular entre o rotor da máquina síncrona e o barramento infinito.

Com base na equação (16) obtém-se a corrente fornecida pela máquina síncrona, que é mostrada através das equações (17) e (18).

$$I_{1q} = \frac{V_\infty \cdot \sin \delta + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \cdot c \cdot V_{dc} \cdot \cos \psi}{X_1 + X_2 + X_1 \cdot \frac{X_2}{X_{TRAFO}} + \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \cdot X_q} \quad (17)$$

$$I_{1d} = \frac{E'_q - V_\infty \cdot \cos \delta - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \cdot c \cdot V_{dc} \cdot \sin \psi + E'_q \cdot \frac{X_2}{X_{TRAFO}}}{X_1 + X_2 + X_1 \cdot \frac{X_2}{X_{TRAFO}} + \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \cdot X'_d} \quad (18)$$

O modelo do *SEP* utilizado neste trabalho (Wang, 1999.2; Kundur, 1994; Anderson, 1977; Stevenson 1975 e Heffron, 1952) é composto pelas equações (19), (20), (21) e (22) mostradas em seguida, sendo esta modelagem adequada para estudos de estabilidade de sistemas.

$$\dot{\delta} = \omega_s \cdot (\omega - 1) \quad (19)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} \cdot (P_m - P_e - P_d) \quad (20)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} \cdot (E_{fd} - E'_q) \quad (21)$$

$$\dot{E}'_{fd} = \frac{K_A}{T_A} \cdot (V_{t0} - V_t) - \frac{1}{T_A} \cdot E'_{fd} \quad (22)$$

Nas expressões anteriores tem-se que: ω representa a velocidade angular, E_{fd} a tensão de campo da máquina síncrona e juntamente com δ e E'_q formam o conjunto de variáveis de estado. Por sua vez, P_m , P_e e P_d estão associados ao torque mecânico, elétrico e de amortecimento, respectivamente. A constante M está relacionada à constante de tempo de inércia da máquina síncrona e E'_q representa a tensão de eixo em quadratura. Já T'_{d0} representa a constante de tempo transitória de eixo direto. Finalmente, K_A e T_A são valores referentes ao sistema de regulação de tensão.

As equações (23), (24) e (25) apresentam as expressões de P_e , E'_q e V_t utilizadas nas equações (20) a (22).

$$P_e = E'_q \cdot I_{1q} + (X_q - X'_d) I_{1d} \cdot I_{1q} \quad (23)$$

$$E'_q = E'_q + (X_d - X'_d) I_{1d} \quad (24)$$

$$V_t = \sqrt{(E'_q - X'_d \cdot I_{1d})^2 + (X_q \cdot I_{1q})^2} \quad (25)$$

Linearizando as equações (17) a (25), e admitindo a potência mecânica constante, obtém-se as equações (26) a (29) que representam o *SEP* composto de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito, compensado por um *STATCOM* num ponto intermediário.

$$\dot{\Delta\delta} = \omega_s \cdot \Delta\omega \quad (26)$$

$$\dot{\Delta\omega} = \frac{1}{M} \cdot (-\Delta P_e - D \cdot \Delta\omega) \quad (27)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} \cdot (\Delta E_{fd} - \Delta E_q) \quad (28)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} \cdot \Delta E_{fd} - \frac{K_A}{T_A} \cdot \Delta V_t \quad (29)$$

Por sua vez, as equações (30), (31) e (32) explicitam outras expressões resultantes do processo de linearização. Ainda, a constante D representa o coeficiente de amortecimento mecânico.

$$\Delta P_e = C_1 \cdot \Delta\delta + C_2 \cdot \Delta E'_q + C_{pdc} \cdot \Delta V_{dc} + C_{pc} \cdot \Delta c + C_{p\psi} \cdot \Delta\psi \quad (30)$$

$$\Delta E_q = C_4 \cdot \Delta\delta + C_3 \cdot \Delta E'_q + C_{qdc} \cdot \Delta V_{dc} + C_{qc} \cdot \Delta c + C_{q\psi} \cdot \Delta\psi \quad (31)$$

$$\Delta V_t = C_5 \cdot \Delta\delta + C_6 \cdot \Delta E'_q + C_{vdc} \cdot \Delta V_{dc} + C_{vc} \cdot \Delta c + C_{v\psi} \cdot \Delta\psi \quad (32)$$

Finalmente, substituindo as equações (30), (31) e (32) nas equações (26) a (29), obtém-se o modelo linearizado do *SEP* analisado, composto por uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão com um ponto intermediário compensado por um *STATCOM*. O modelo do *STATCOM* é constituído por um transformador de acoplamento, um inversor que

utiliza tiristores *GTO* e por um pequeno capacitor *cc*. Este modelo está mostrado, em sua forma matricial, na equação (33).

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta E'_q} \\ \dot{\Delta E'_{fd}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ -\frac{C_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{C_2}{M} & 0 \\ -\frac{C_4}{T_{d0}} & 0 & -\frac{C_3}{T_{d0}} & \frac{1}{T_{d0}} \\ -\frac{K_A \cdot C_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A \cdot C_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{C_{pdc}}{M} & -\frac{C_{pc}}{M} & -\frac{C_{p\psi}}{M} \\ -\frac{C_{qdc}}{T_{d0}} & -\frac{C_{qc}}{T_{d0}} & -\frac{C_{q\psi}}{T_{d0}} \\ -\frac{K_A \cdot C_{vdc}}{T_A} & -\frac{K_A \cdot C_{vc}}{T_A} & -\frac{K_A \cdot C_{v\psi}}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{dc} \\ \Delta c \\ \Delta \psi \end{bmatrix} \quad (33)$$

O vetor de controle apresenta três variáveis. A primeira delas chamada de ΔV_{dc} , representa a variação de tensão do capacitor *cc* na ocorrência de um distúrbio. A segunda variável de controle é chamada de Δc . Esta variável representa a variação de tensão entre o lado *cc* e o lado *ca* para o referido distúrbio. A outra variável de controle é chamada de $\Delta \psi$ e representa a diferença de fase entre a tensão controlada de saída do *STATCOM* e a tensão do *SEP*. As expressões que explicitam todas as constantes utilizadas na equação (33) estão apresentadas no anexo A1.

5.3 – Diagrama de Blocos do Modelo Linearizado do *STATCOM*

Com base no modelo linearizado mostrado na equação (33) pode-se construir o respectivo diagrama de blocos, como apresentado na Figura 28. No diagrama de blocos apresentado nesta figura podem ser observados parâmetros de *SEP* como, por exemplo, a inércia da máquina síncrona representada pela constante *M* considerada igual a 3,0 e o amortecimento mecânico representado pela constante *D* igual a 4,0. O equipamento de compensação *shunt* (*STATCOM*) é representado por um subsistema também mostrado na Figura 29.

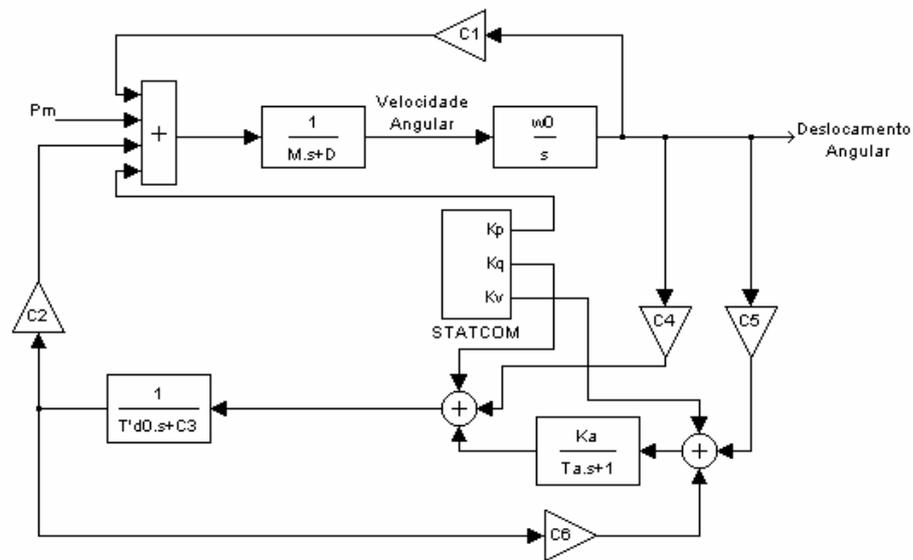


Figura 28 – Diagrama de Blocos do Sistema de Potência Compensado por um STATCOM.

O subsistema que representa o STATCOM é na realidade a implementação através de diagrama de blocos da matriz de controle apresentada na equação (33) e está mostrado na Figura 29.

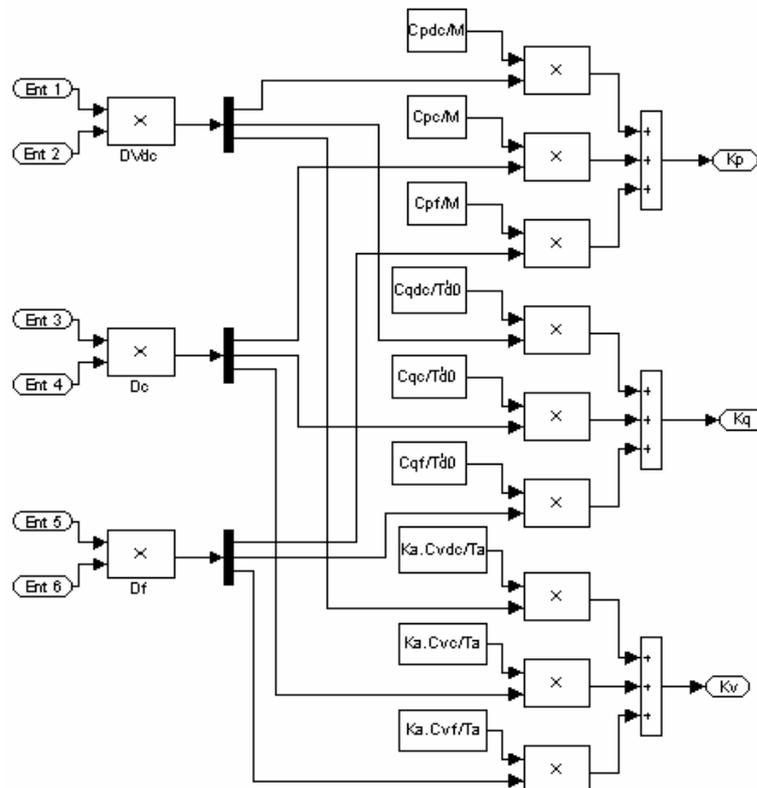


Figura 29 – Diagrama de Blocos do STATCOM.

5.4 – Resultados Obtidos

As simulações realizadas através do programa *MATLAB* com o modelo linearizado de um *STATCOM* acoplado ao *SEP* usado na análise consideram uma elevação de 5% na potência mecânica da máquina síncrona. A Figura 30 apresenta o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona em relação ao barramento infinito para o sistema compensado por um *STATCOM*. Para efeito comparativo a mesma curva é mostrada para um sistema operando sem a presença do *STATCOM*. Da figura pode-se observar que este dispositivo *FACTS* de compensação *shunt* influi positivamente na melhora da estabilidade e do amortecimento das oscilações deste sistema, quando da ocorrência do distúrbio.

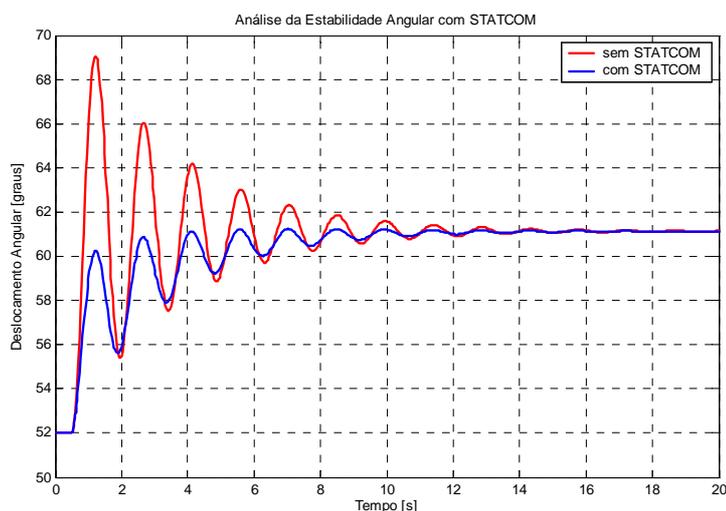


Figura 30 – Deslocamento Angular para o Sistema Compensado por *STATCOM*.

A Figura 31 apresenta a diferença entre a potência mecânica e a potência elétrica (potência acelerante) da máquina síncrona para o mesmo distúrbio. Desta figura pode-se observar que o *STATCOM* contribui para um maior amortecimento das oscilações pós-distúrbio.

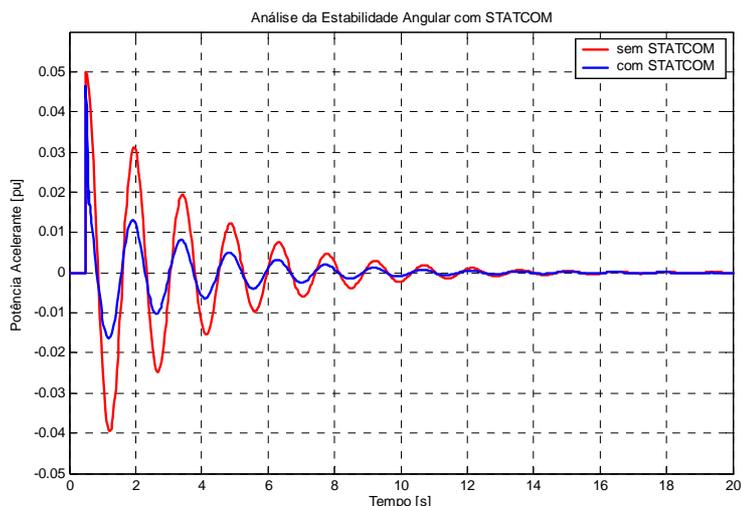


Figura 31 – Potência Acelerante para o Sistema Compensado por *STATCOM*.

A Figura 32 mostra a velocidade angular da máquina síncrona para a variação de 5% em sua potência mecânica.

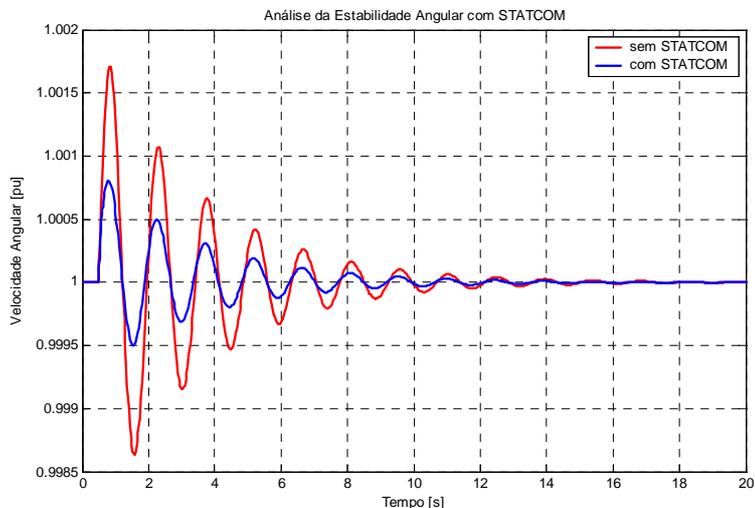


Figura 32 – Velocidade Angular para o Sistema Compensado por *STATCOM*.

A Figura 33, por sua vez, mostra o subespaço de estados (relação entre as variáveis de estado δ e ω) deste *SEP*. Do subespaço de estados observa-se como o sistema alcança o novo ponto de regime com uma variação muito menor do deslocamento angular e da velocidade angular.

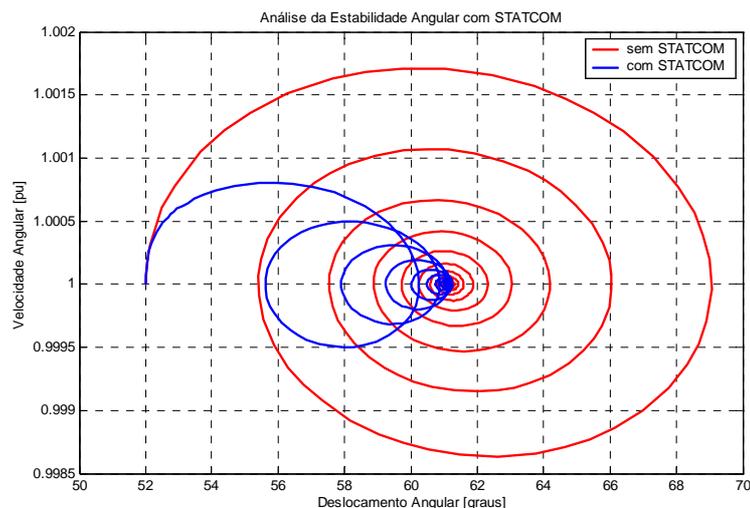


Figura 33 – Subespaço de Estados para o Sistema Compensado por *STATCOM*.

Neste ponto, pode-se observar a influência do *STATCOM* na estabilidade do *SEP* analisado alterando os ajustes de controle (K_p , K_v e K_q) do mesmo. Isto é feito modificando os parâmetros da matriz de controle da equação (33).

Para o mesmo distúrbio considerado anteriormente, ou seja, uma elevação de 5% na potência mecânica, a Figura 34 mostra o deslocamento angular do rotor considerando o novo ajuste do *STATCOM*. Pode-se observar que o *STATCOM* pode melhorar ainda mais a estabilidade e amortecimento, com a otimização do ajuste de seu sistema de controle. A Figura 34 apresenta, para efeito de comparação, a resposta do sistema com e sem o *STATCOM*.

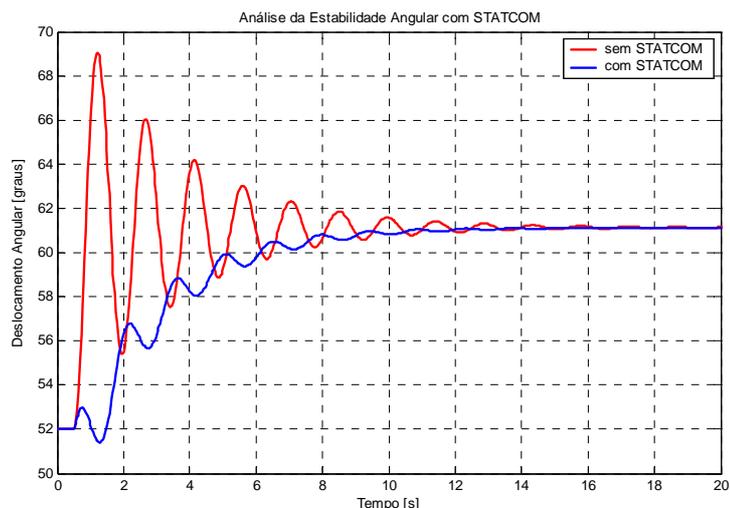


Figura 34 – Deslocamento Angular para o Sistema Compensado por *STATCOM*.

A Figura 35, mostra a potência acelerante da máquina síncrona com o novo ajuste do *STATCOM*. Desta figura pode-se observar como este equipamento de compensação *shunt* atenuou fortemente a amplitude e as conseqüências de um distúrbio num *SEP*. A diferença entre a amplitude da potência acelerante para o sistema compensado e para o sistema sem compensação foi muito significativa e está caracterizada nesta figura.

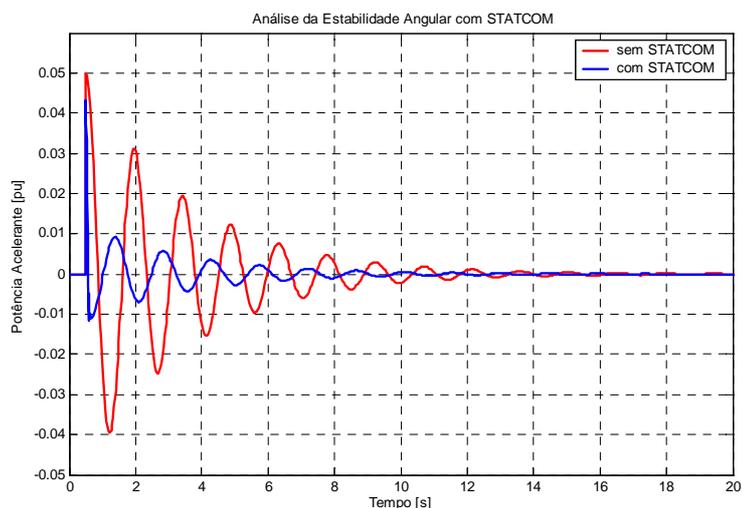


Figura 35 – Potência Acelerante para o Sistema Compensado por *STATCOM*.

A Figura 36 mostra a velocidade angular da máquina síncrona para o distúrbio analisado. Desta figura, observa-se como o *STATCOM* atua no sentido de diminuir a variação da velocidade angular na ocorrência do distúrbio.

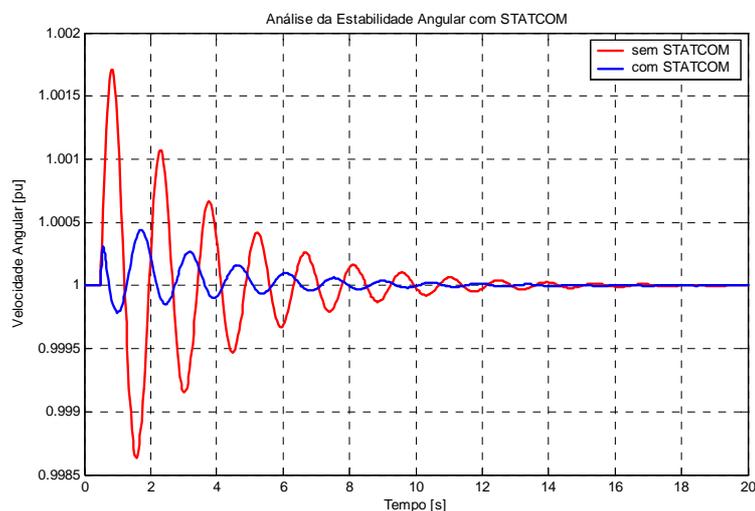


Figura 36 – Velocidade Angular para o Sistema Compensado por *STATCOM*.

Finalmente, a Figura 37 apresenta o subespaço de estados deste sistema com o novo ajuste do *STATCOM*. Pode ser observado como o sistema apresenta uma variação significativamente menor do deslocamento angular e principalmente da velocidade angular para o referido distúrbio.

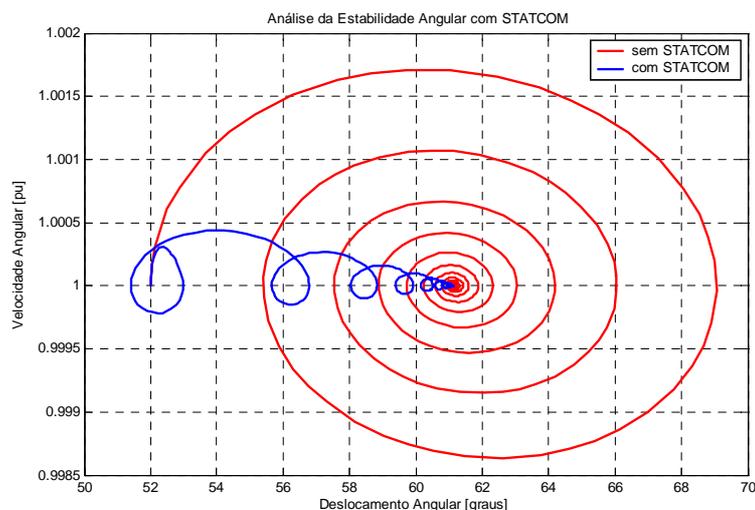


Figura 37 – Subespaço de Estados para o Sistema Compensado por *STATCOM*.

O *STATCOM* mostra-se eficiente e adequado para melhorar o comportamento dinâmico dos *SEP* quando da ocorrência de distúrbios. A sua presença melhora sensivelmente a estabilidade proporcionando amortecimentos significativos das oscilações causadas por variações próximas ao ponto de operação.

As simulações realizadas mostram que um ajuste adequado das variáveis de controle do *STATCOM* também influi positivamente na atenuação da amplitude das variáveis e nas conseqüências dos distúrbios. Isto pode ser visto através da curva de potência acelerante. Ainda, através do subespaço de estados observa-se como o sistema apresenta uma variação menor do deslocamento angular e principalmente da velocidade angular para o distúrbio considerado.

Os resultados obtidos para o modelo linearizado sugerem análises considerando uma modelagem não-linear para o *STATCOM*. Esta modelagem não-linear permite uma investigação mais abrangente da influência do equipamento na melhoria da estabilidade de *SEP*, já que possibilita a simulação de distúrbios mais severos, como a ocorrência de faltas, perda de grandes blocos de geração ou mesmo variações mais significativas na carga. A modelagem não-linear do *STATCOM* é o assunto principal do capítulo 6.

Capítulo 6 – Modelo Não-Linear do *STATCOM* em Sistemas Elétricos de Potência

O *STATCOM* assemelha-se em muitos aspectos ao compensador síncrono, porém sem inércia. O equipamento básico que constitui o *STATCOM* é o inversor multi-pulso, que tem a função geral de converter uma tensão de entrada *cc* em uma tensão de saída *ca* trifásica na frequência fundamental. O sistema de controle deste equipamento é basicamente projetado para manter a magnitude da tensão do barramento no qual o *STATCOM* está acoplado constante pelo controle da tensão de saída do inversor multi-pulso (Cañizares, 2000 e Mithulananthan, 2002).

O referido equipamento de compensação *shunt* também pode influenciar fortemente a estabilidade e a dinâmica de *SEP* pelo aumento da estabilidade transitória e por uma melhora efetiva no amortecimento das oscilações nestes sistemas na ocorrência de distúrbios como faltas, perda de grandes blocos de geração ou mudanças repentinas no perfil da carga (Lu, 2001).

Os distúrbios citados anteriormente são fortemente não-lineares. Com isso, para uma correta caracterização da influência do *STATCOM* na melhoria da estabilidade de *SEP*, uma modelagem não-linear do equipamento deve ser desenvolvida (Ni, 1997).

Este capítulo apresenta a modelagem básica não-linear do *STATCOM* para estudos de estabilidade de *SEP*.

6.1 – Diagrama de Blocos do Modelo Não-Linear do STATCOM

O diagrama de blocos do modelo não-linear do *STATCOM*, utilizado em estudos de estabilidade de *SEP*, está esquematicamente mostrado na Figura 38, onde observa-se o efeito da rampa de reatância X_{SL} e a dinâmica do chaveamento dos tiristores *GTO* representado pelo bloco do compensador (Petitclair 1997.1 e Petitclair 1997.2).

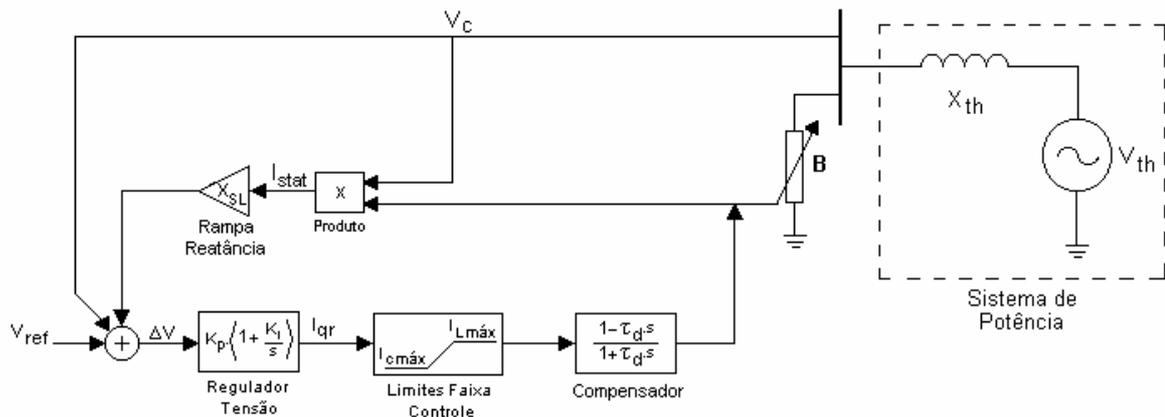


Figura 38 – Modelo Não-Linear do *STATCOM*.

Para o modelo não-linear, a tensão do barramento controlado (V_c) é medida e multiplicada pela susceptância equivalente do equipamento (B). Isto resulta num sinal de corrente (I_{stat}) que representa a corrente reativa desejada de saída do equipamento. Esta corrente, por sua vez, é multiplicada pelo ganho X_{SL} que representa a rampa de reatância controlada do *STATCOM*.

Em seguida, uma tensão de referência (V_{ref}) é comparada à tensão do barramento controlado do *STATCOM* e com a tensão controlada de saída do *STATCOM*. Desta comparação, surge um sinal de erro (variação) de tensão ΔV . Este sinal então sensibiliza um regulador de tensão produzindo uma corrente de referência (I_{qr}) que é proporcional à corrente de saída do *STATCOM*.

A corrente de referência proporcional à corrente de saída do *STATCOM*, passa então por um bloco limitador de corrente, onde seus limites são dados por $I_{Lm\acute{a}x}$ e

$I_{Cmáx}$. Esta corrente então segue, como entrada, para um bloco chamado de compensador que representa a dinâmica de chaveamento dos tiristores *GTO*.

A saída deste bloco representa uma susceptância variável equivalente à tensão de saída controlável para a corrente reativa desejável gerada ou absorvida pelo inversor. Este sinal de saída é que atuará no sistema de modo a aumentar a estabilidade e a dinâmica do *SEP* no qual o *STATCOM* está conectado.

6.2 – Bloco do Regulador de Tensão

O bloco do regulador de tensão do *STATCOM* para seu modelo não-linear está isoladamente mostrado na Figura 39.



Figura 39 – Regulador de Tensão do *STATCOM*.

O regulador de tensão utilizado no diagrama de blocos do modelo não-linear do *STATCOM* é um regulador do tipo *PI* (Proporcional-Integral). Sua entrada, como dito anteriormente é um sinal de erro de tensão (ΔV). Este sinal é obtido através da comparação entre a tensão do barramento controlado, da tensão do *STATCOM* e de uma tensão de referência.

A saída deste bloco representa uma corrente de referência do *STATCOM* (I_{qr}). O valor de K_i e K_p são obtidos de estudos de estabilidade eletromecânica e de fluxo de potência. Nos casos testes apresentados no capítulo seguinte são considerados, K_i igual a 0,05 e K_p igual a 10,0.

6.3 – Bloco de Limites de Corrente

O bloco que representa os limites da corrente reativa de saída do *STATCOM* para seu modelo não-linear está separadamente mostrado na Figura 40.

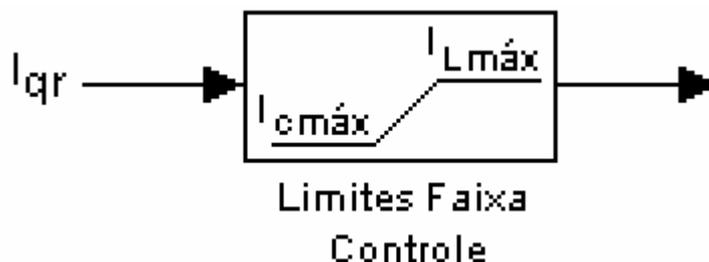


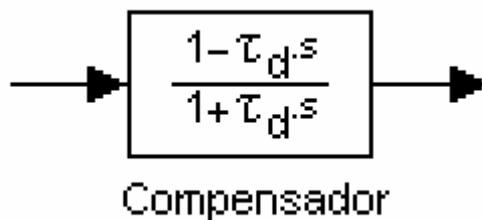
Figura 40 – Limites para a Corrente de Saída do *STATCOM*.

A entrada do bloco que representa os limites para a faixa controlável de corrente é dada pela corrente I_{qr} . Os limites para a corrente indutiva máxima ($I_{Lmáx}$) e para a corrente capacitiva máxima ($I_{Cmáx}$) são dados pelos valores $\pm 1,0$. Estes valores representam a corrente nominal de saída do *STATCOM*.

A interpretação física para estes valores de limite de corrente pode ser observada na Figura 20 que mostra a característica $V - I$ do *STATCOM*. Desta figura, observa-se que o equipamento tem a capacidade de sustentar a corrente máxima de saída em ambas as faixas operativas (indutiva e capacitiva). Esta sua importante característica torna-o mais eficiente na melhoria da estabilidade de *SEP* quando comparado a compensadores do tipo *SVC* que não conseguem sustentar a corrente máxima de saída na região capacitiva conforme pode-se observar através da característica $V - I$ de um *SVC* mostrada na Figura 16.

6.4 – Bloco do Circuito Compensador

O bloco que caracteriza o circuito compensador do *STATCOM* para seu modelo não-linear está separadamente apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Circuito Compensador do *STATCOM*.

O bloco que representa o circuito compensador do *STATCOM* tem como entrada a corrente de referência do *STATCOM* (com seus limites) e sua saída representa uma susceptância variável que é obtida pela combinação da tensão de saída controlável do *STATCOM* com a corrente de saída do inversor. As formas de onda da tensão controlável de saída do *STATCOM* e a da corrente de saída do inversor estão mostradas na Figura 19.

Este bloco representa a dinâmica do chaveamento dos tiristores *GTO* para uma determinada condição operativa dada pela demanda de potência reativa do *SEP*. O valor típico de τ_d para este equipamento é igual a *0,04*. Conforme dito anteriormente, através do controle da potência reativa de saída do *STATCOM* pode-se aumentar a estabilidade transitória e o amortecimento de oscilações do *SEP* no qual este dispositivo *FACTS* de compensação *shunt* está acoplado.

Capítulo 7 – Simulações com o *STATCOM* e Análise Comparativa

O presente capítulo tem como objetivo apresentar as principais simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM*. Para isso, o modelo deste equipamento *FACTS* de compensação *shunt* apresentado na Figura 38 é implementado em dois *SEP* denominados teste 1 e teste 2.

O *STATCOM* é implementado no *SEP* teste 1 utilizando o programa *MATLAB* e sua caixa de ferramentas *SIMULINK*. A máquina síncrona é representada através do modelo E'_q . Esta máquina é constituída de regulador de velocidade e regulador de tensão, possuindo também um *ESP* cuja função principal é atenuar a amplitude das oscilações ocorridas após o distúrbio. A análise será feita com e sem a presença do *ESP*. Além disso, é realizado um estudo comparativo com dispositivos de compensação *shunt* do tipo *SVC*.

Para o *SEP* teste 2, o *STATCOM* é modelado através do código denominado Controlador Definido por Usuário (*CDU*) no programa *ANATEM* desenvolvido pelo *CEPEL*. Neste caso, três máquinas síncronas de pólos salientes são modeladas com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores (um no eixo direto e o outro no eixo em quadratura). Uma outra máquina síncrona de pólos lisos é modelada com um enrolamento de campo e três enrolamentos amortecedores (um no eixo direto e dois no eixo em quadratura). Todas estas máquinas síncronas apresentam reguladores de tensão e velocidade. Para o *SEP* teste 2 é realizado um estudo comparativo com e sem a presença do *STATCOM*.

7.1 – Sistema de Potência Teste 1

O *SEP* teste 1 está esquematicamente apresentado na Figura 42.

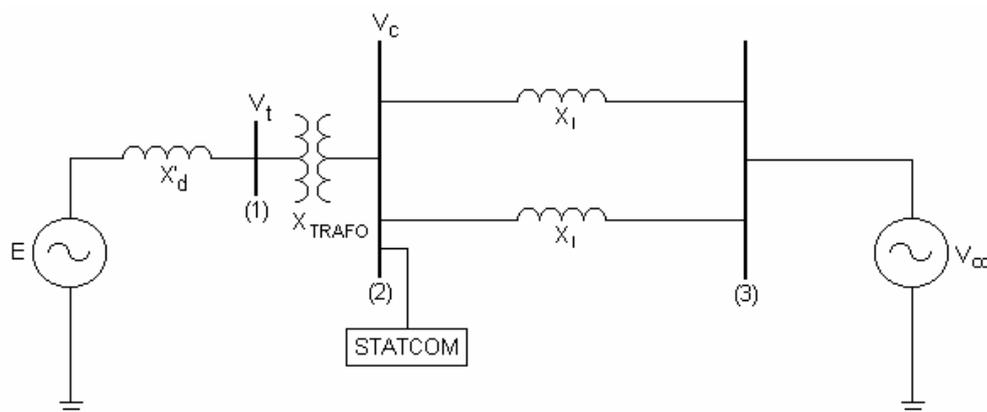


Figura 42 – Sistema Elétrico de Potência Teste 1.

Este sistema é composto por uma máquina síncrona, onde V_t é sua tensão terminal. A máquina síncrona, por sua vez, está conectada a um barramento infinito representado por sua tensão V_∞ .

O referido *SEP* também apresenta duas linhas de transmissão, em paralelo, que conectam o barramento infinito ao barramento controlado onde está inserido o equipamento *FACTS* de compensação *shunt* do tipo *STATCOM*. As linhas de transmissão são representadas somente por sua reatância série X_l . O barramento controlado é representado por sua tensão V_c .

Finalmente, o *SEP* teste 1 também apresenta um transformador que conecta a máquina síncrona ao barramento controlado. Este transformador é representado por sua reatância X_{TRAFO} .

Neste *SEP* pode-se simular a ocorrência de vários defeitos. Estes defeitos podem ser desde a ocorrência de curtos-circuitos monofásicos ou trifásicos até a perda de grandes blocos de geração.

O curto-circuito monofásico é representado pela inserção de um reator equivalente no barramento (2), sendo posteriormente eliminado através da abertura de uma das linhas de transmissão. Por sua vez, um curto-circuito do tipo trifásico franco é representado pela inserção de um reator de elevado valor nominal também no barramento (2), sendo posteriormente eliminado pela abertura de uma das linhas de transmissão.

A simulação da perda de um grande bloco de geração ou de uma mudança no perfil de carga é representada por uma alteração na potência mecânica da máquina síncrona.

7.2 – Sistema de Potência Teste 2

O *SEP* teste 2 está esquematicamente apresentado na Figura 43.

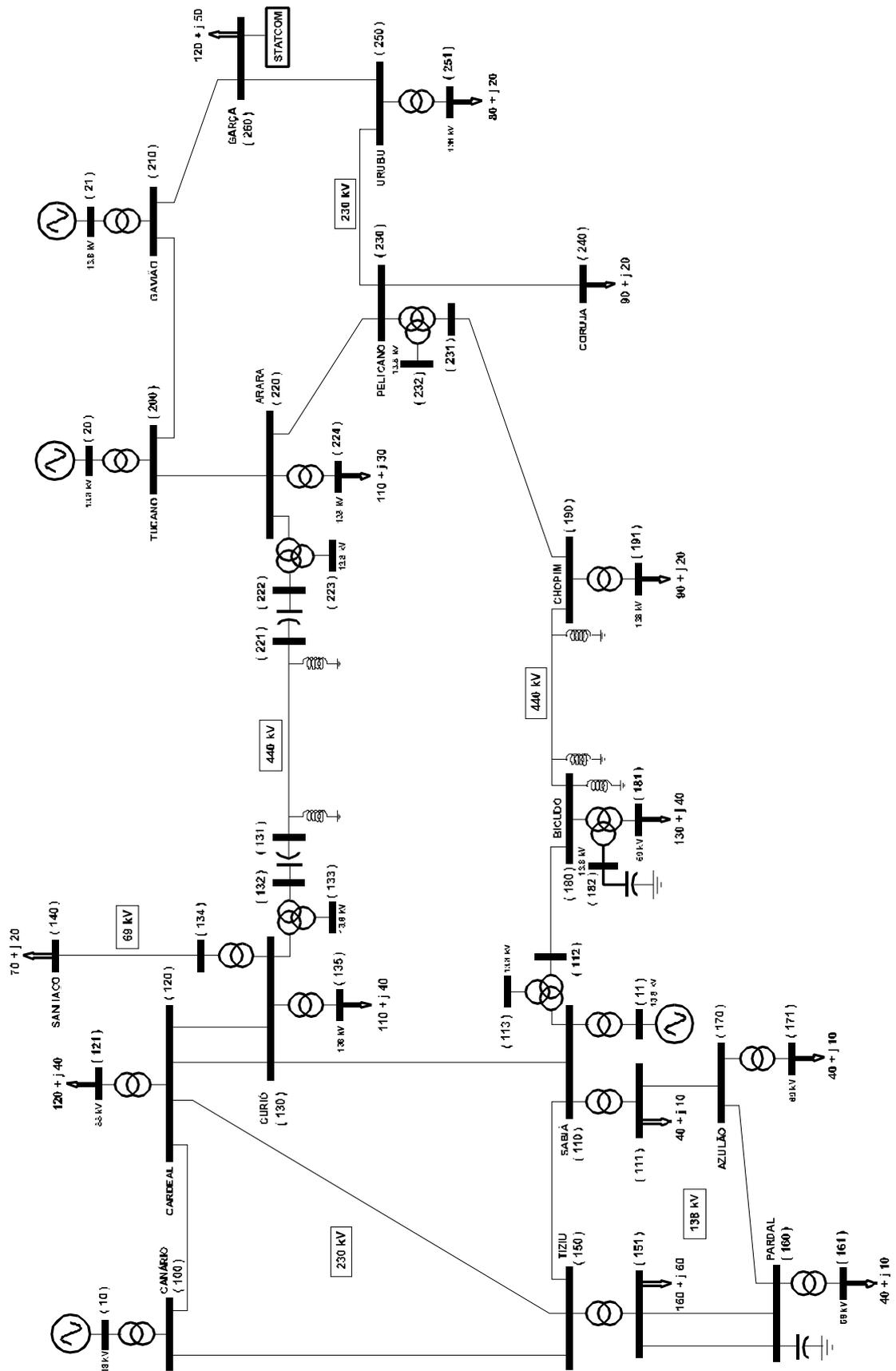


Figura 43 – Sistema Elétrico de Potência Teste 2.

Este sistema é utilizado para analisar a influência deste compensador *shunt* em um *SEP* de porte mais elevado. O *SEP* teste 2 é constituído por quatro máquinas síncronas, por quarenta e oito barramentos e por cinquenta e cinco ramos (linhas de transmissão, compensadores série, transformadores de dois enrolamentos e transformadores de três enrolamentos).

Neste *SEP* também pode-se simular a ocorrência de defeitos severos como curtos-circuitos e perdas de grandes blocos de geração. Este estudo leva em consideração a ocorrência de um curto-circuito trifásico em um barramento com posterior abertura da respectiva linha de transmissão. Isto é feito no programa *ANATEM* através dos comandos *APCB* (aplicação de curto-circuito em barra *ca*), *RMCB* (remoção de curto-circuito em barra *ca*) e *ABCI* (abertura total de circuito *ca*).

O dispositivo de compensação *shunt* do tipo *STATCOM* está conectado no barramento de Garça 230 kV. A razão da colocação do *STATCOM* neste local é a pequena capacidade de geração de potência reativa das máquinas síncronas desta área (Tucano e Gavião), em comparação a capacidade de geração de potência ativa. Além disso, o barramento de Garça 230 kV necessita de um suporte de reativo devido a sua elevada carga.

7.3 – Simulações Com e Sem o STATCOM no Sistema Teste 1

Neste item são apresentados os principais resultados obtidos considerando um estudo comparativo no sistema teste 1. As simulações contemplam a presença ou não do *STATCOM*. São consideradas simulações de curto-circuito trifásico aplicado no barramento (2) da Figura 42, com posterior abertura de uma das linhas de transmissão, para diversos tempos de eliminação do defeito. Também são apresentados os resultados para uma variação de 20% na potência mecânica da máquina síncrona.

7.3.1 – Curto-Circuito Trifásico Franco

7.3.1.1 – Com ESP

a) Tempo de Eliminação do Defeito de 100 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento (2) do sistema teste 1 consideram o referido defeito com um tempo de eliminação de 100 ms.

A Figura 44 apresenta a velocidade angular da máquina síncrona para o referido defeito. De modo comparativo, a mesma curva é mostrada para este sistema operando sem o *STATCOM*. Da figura pode-se observar como o *STATCOM* reduz a velocidade angular da máquina, quando da ocorrência do distúrbio.

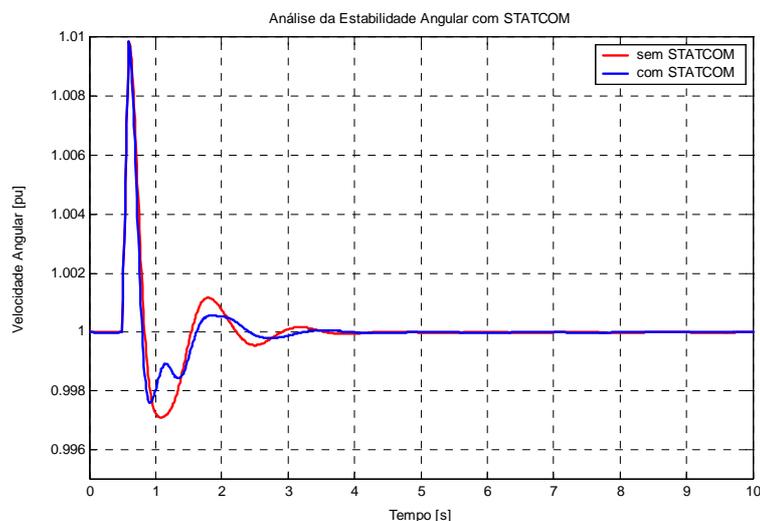


Figura 44 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 45 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona (ângulo delta) em relação ao barramento infinito para o sistema com e sem a presença do compensador do tipo *STATCOM*. Da análise desta figura, observa-se que o *STATCOM* influi positivamente na melhora da estabilidade transitória de *SEP*.

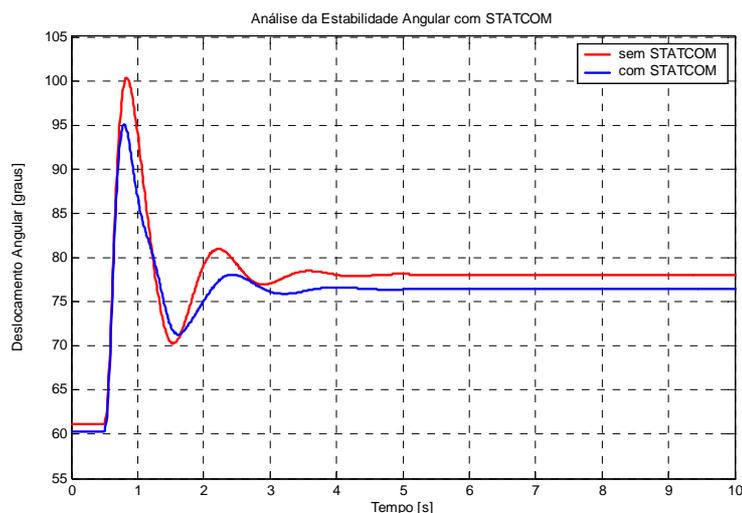


Figura 45 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o STATCOM.

A diferença no valor pré-defeito apresentada na Figura 45 deve-se ao valor de regime permanente do STATCOM que é igual a $-0,5 pu$.

A Figura 46 apresenta a potência acelerante, que é a diferença entre a potência mecânica e a potência elétrica, da máquina síncrona para o mesmo distúrbio.

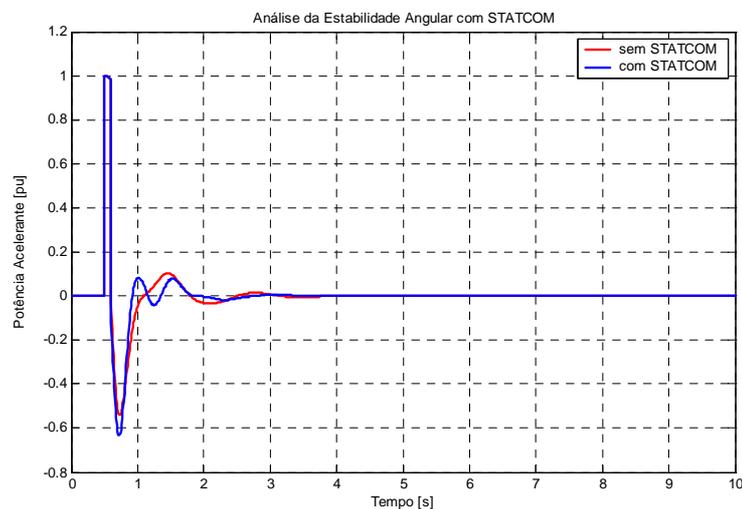


Figura 46 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com e sem o STATCOM.

A Figura 47, mostra a tensão terminal da máquina síncrona. Pode-se observar o modo pelo qual o compensador FACTS com conexão *shunt* do tipo STATCOM pode contribuir com um adequado suporte de tensão para o SEP no qual ele está

conectado. Pode-se ver ainda na Figura 47 que as oscilações na tensão terminal da máquina síncrona ocorridas após o distúrbio tem uma amplitude menor e alcançam um novo ponto de regime mais rapidamente quando comparada ao sistema operando sem a presença deste compensador.

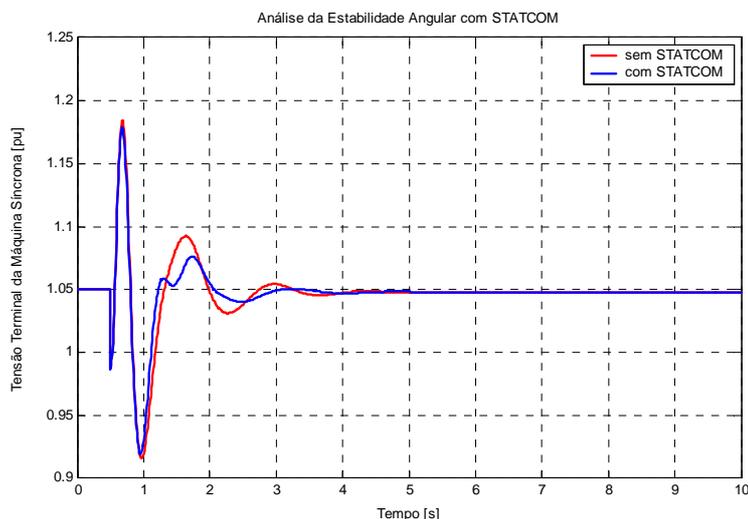


Figura 47 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Finalmente na Figura 48 observa-se como o *STATCOM*, através de seu sistema de controle, tende a aumentar a potência elétrica transmitida na ocorrência do curto-circuito trifásico franco para tentar se opor a aceleração da máquina síncrona. Esta característica importante foi apresentada, de maneira teórica, no capítulo 4.

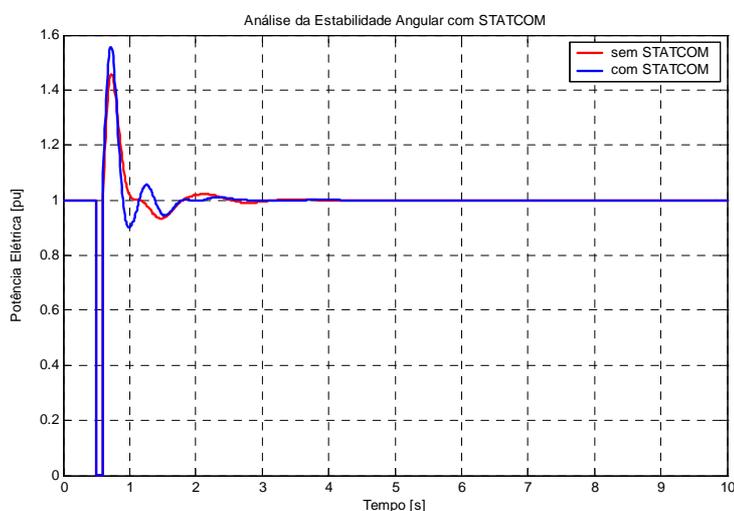


Figura 48 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

b) Tempo de Eliminação do Defeito de 178 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento (2) do sistema teste 1 consideram, agora, um tempo de eliminação do defeito de 178 ms. Este tempo corresponde ao limite de estabilidade angular transitória para o sistema operando sem a presença do *STATCOM*.

A Figura 49 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona para o limite de estabilidade angular transitória do *SEP* teste 1 operando sem a presença do referido compensador *shunt*. Da figura observa-se como o *STATCOM* aumenta a margem de estabilidade transitória de *SEP* conforme mostrado no capítulo 4.

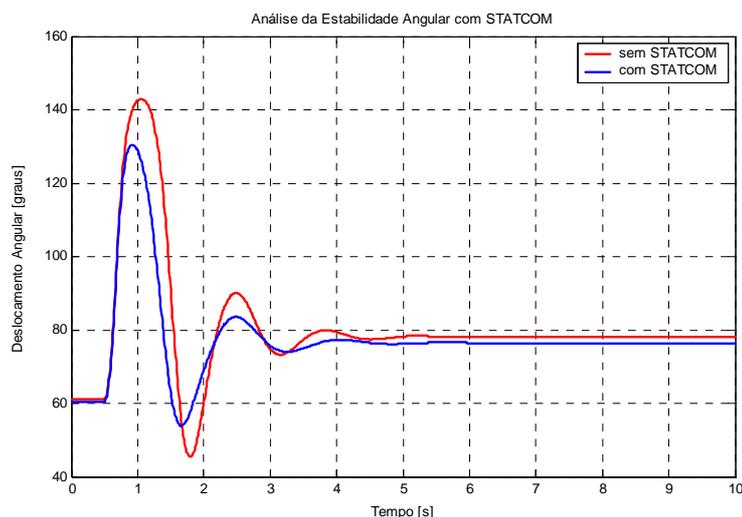


Figura 49 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 50 apresenta a tensão terminal da máquina síncrona. Da análise desta figura observa-se como o *STATCOM* fornece um suporte de tensão, através de seu sistema de controle, para o sistema no qual ele está conectado. Observa-se ainda como o sistema apresenta uma menor amplitude das oscilações pós-defeito para o sistema compensado por *STATCOM*.

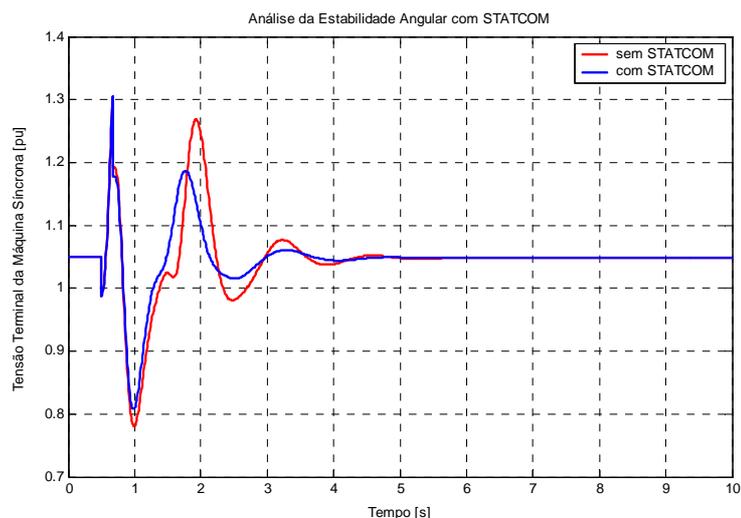


Figura 50 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 51 mostra a potência acelerante da máquina síncrona. Desta figura observa-se que o *STATCOM* conduz o sistema a um melhor amortecimento das oscilações ocorridas após o referido distúrbio.

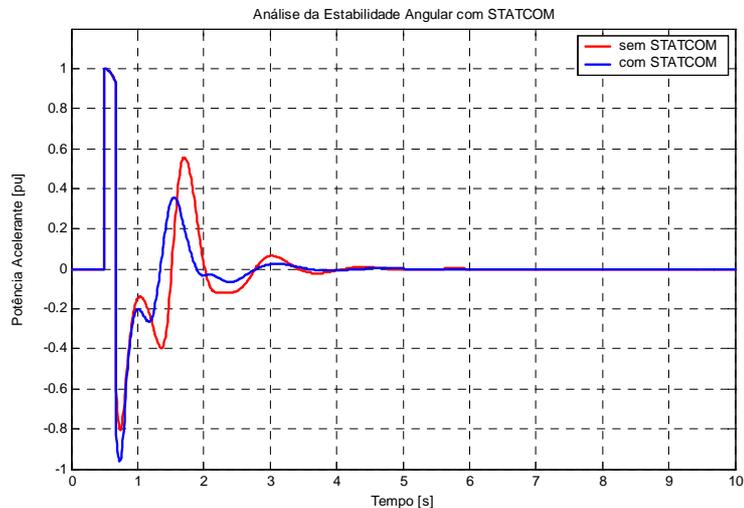


Figura 51 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 52 apresenta a tensão de campo da máquina síncrona para o referido tempo de eliminação do defeito. Pode-se observar como o *STATCOM* contribui para a diminuição da amplitude das oscilações pós-defeito e para o aumento da estabilidade transitória de *SEP*.

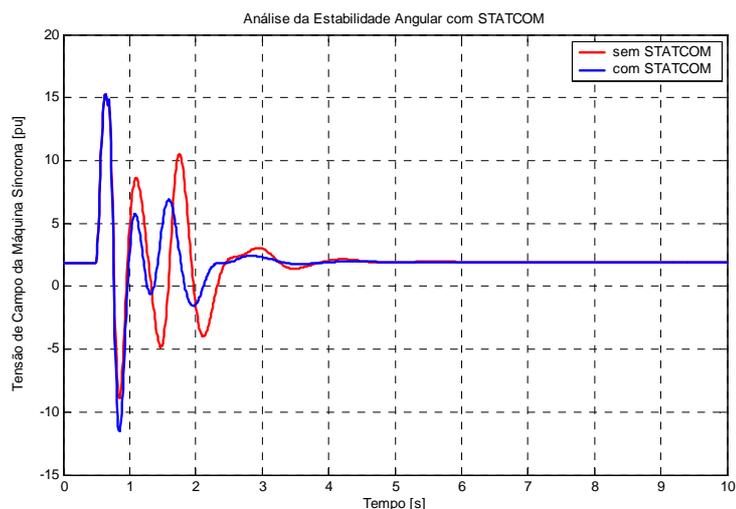


Figura 52 – Tensão de Campo para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 53 mostra a tensão transitória de eixo em quadratura da máquina síncrona.

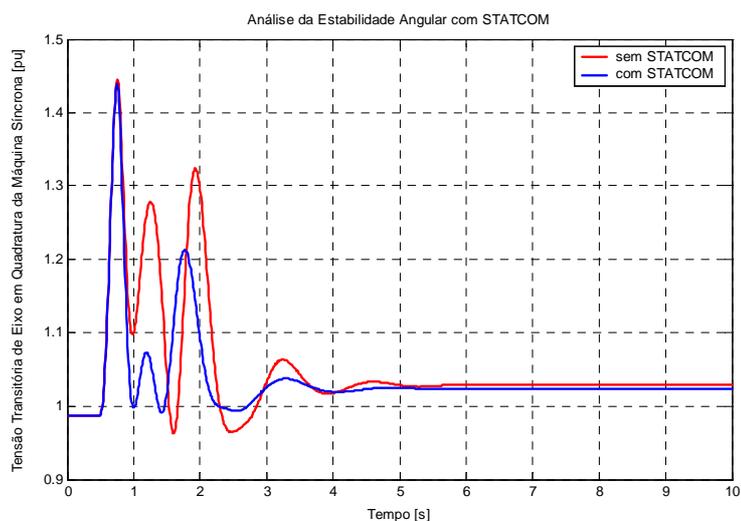


Figura 53 – Tensão E'_q para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Observa-se desta figura, que o *STATCOM*, através do suporte de tensão e do aumento da margem de estabilidade transitória, pode diminuir a amplitude das oscilações na tensão E'_q .

c) Tempo de Eliminação do Defeito de 188 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento (2) do sistema teste 1 consideram, agora, o tempo de eliminação do referido defeito de 188 ms. Este tempo de eliminação corresponde ao limite de estabilidade angular transitória para o sistema operando com a presença do *STATCOM*. Deve-se ressaltar que para este tempo de eliminação do defeito o sistema operando sem a presença do *STATCOM* é instável.

A Figura 54 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona para o limite de estabilidade angular transitória do *SEP* teste 1 operando com a presença do *STATCOM*. Pode-se observar que o *STATCOM* aumenta a margem de estabilidade transitória de *SEP* através do aumento do tempo de eliminação do defeito.

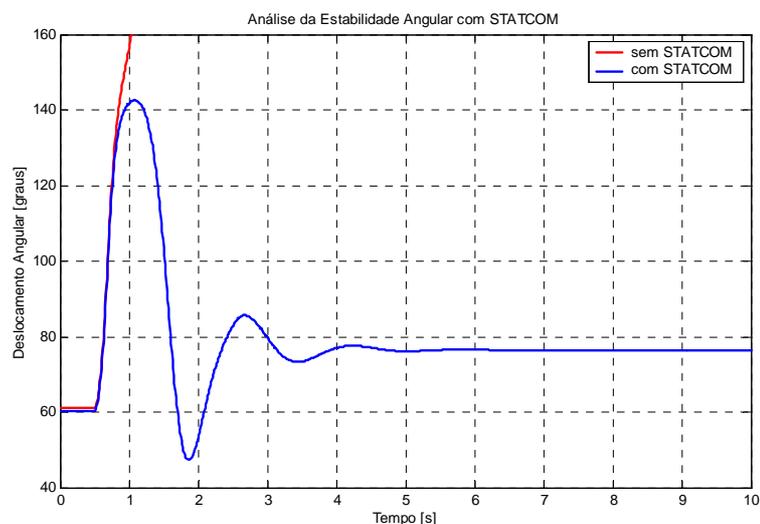


Figura 54 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 55 apresenta a potência elétrica transmitida pelo *SEP* teste 1 com a presença do *STATCOM*, considerando seu limite de estabilidade transitória. Desta figura observa-se como o *STATCOM* aumenta a potência elétrica transmitida, na ocorrência do curto-circuito trifásico franco, opondo-se a aceleração da máquina.

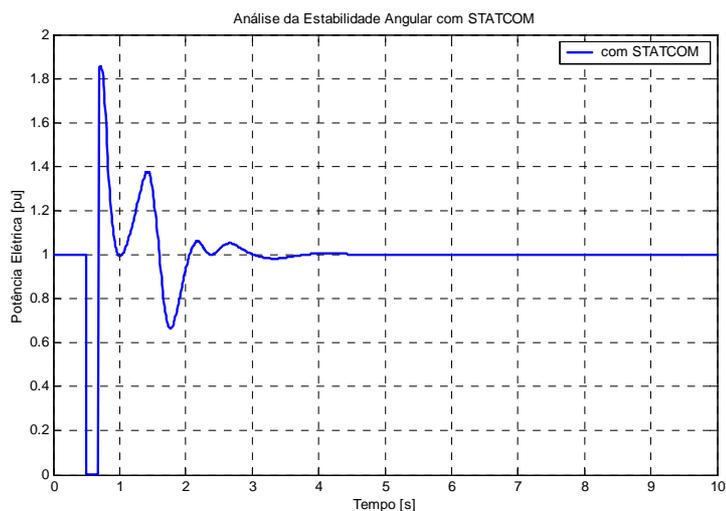


Figura 55 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com o STATCOM.

A Figura 56 mostra a corrente de eixo direto da máquina síncrona para o sistema teste 1. Observa-se como este sistema alcança um novo ponto de regime apesar de estar operando muito próximo de seu limite de estabilidade transitória.

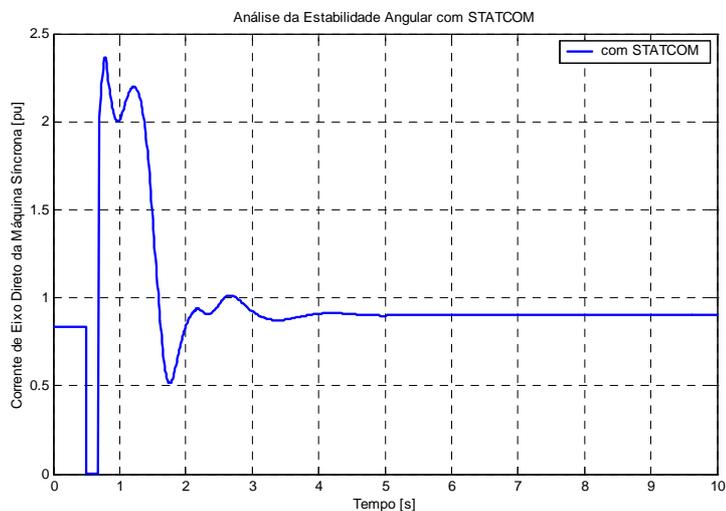


Figura 56 – Corrente I_d para o Sistema Teste 1 com o STATCOM.

A Figura 57, por sua vez, mostra a tensão terminal da máquina síncrona para o tempo crítico de eliminação do defeito no sistema teste 1. Observa-se desta figura que apesar do sistema estar operando neste limite, o STATCOM oferece um suporte de tensão adequado para o sistema através de seu sistema de controle.

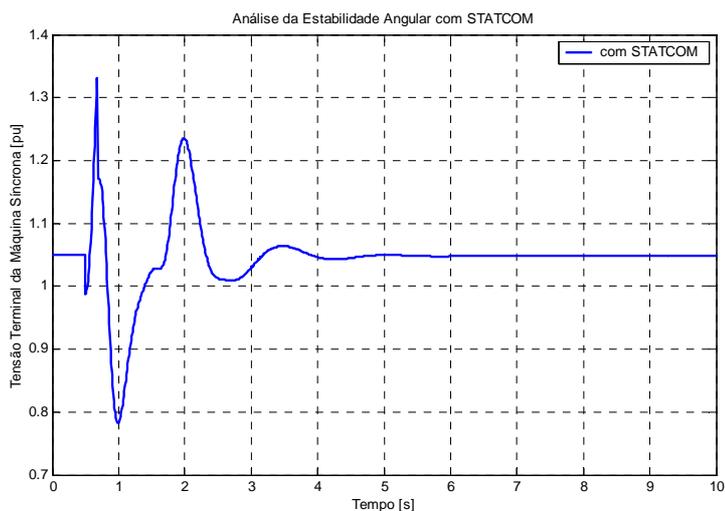


Figura 57 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com o STATCOM.

Finalmente a Figura 58 mostra a velocidade angular da máquina síncrona para este defeito com o tempo crítico de eliminação do defeito.

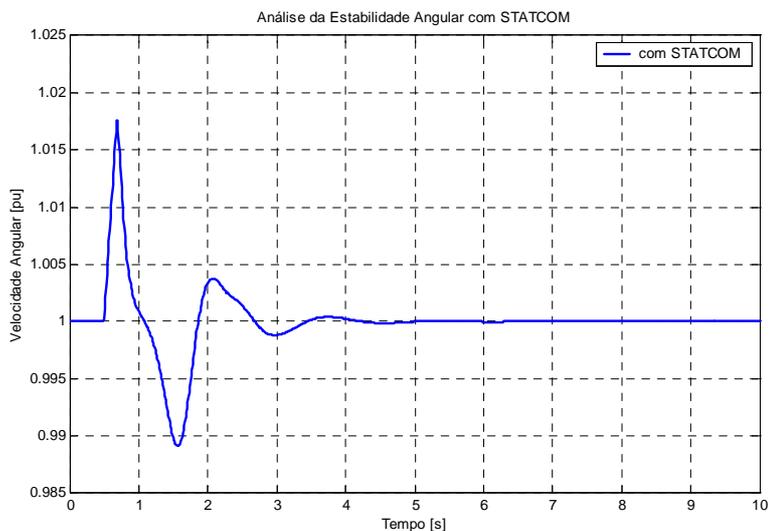


Figura 58 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com o STATCOM.

7.3.1.2 – Sem ESP

a) Tempo de Eliminação do Defeito de 50 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do STATCOM conectado no barramento (2) do sistema teste 1 consideram, agora, o referido defeito com um

tempo de eliminação de 50 ms. Estas simulações, por sua vez, não consideram o sistema teste 1 operando com o *ESP*.

A Figura 59 apresenta a velocidade angular da máquina síncrona para o referido defeito. Nesta figura são observadas respostas do sistema com e sem o *STATCOM*. Nota-se que o *STATCOM* influencia fortemente o amortecimento das oscilações na velocidade angular ocorridas após o defeito.

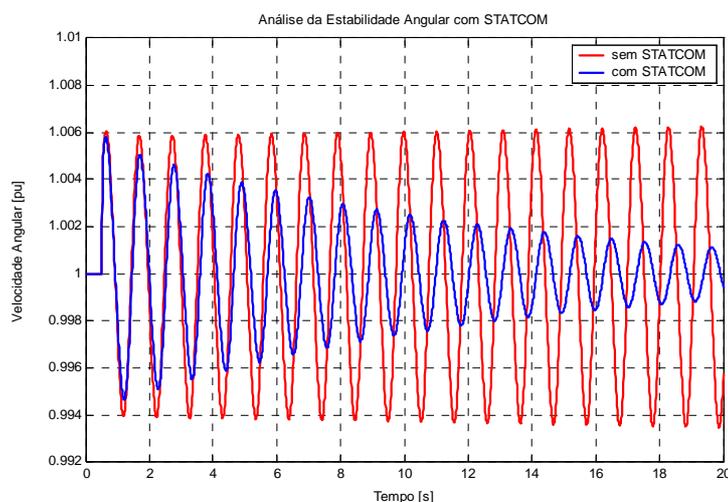


Figura 59 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 60 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona em relação ao barramento infinito para o sistema com e sem o *STATCOM*.

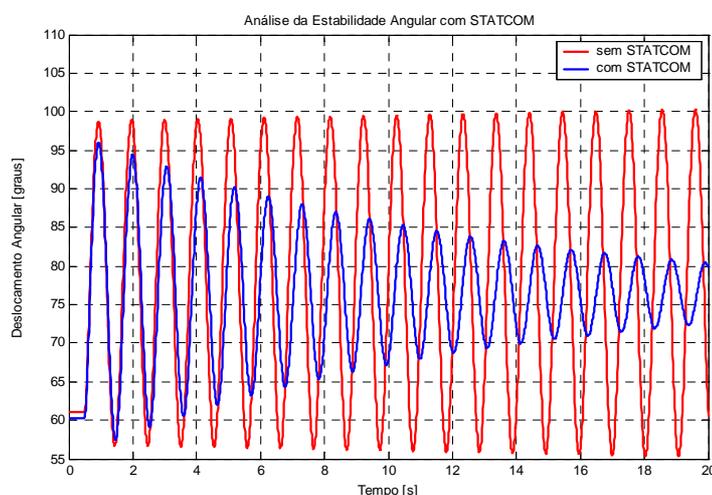


Figura 60 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Da análise desta figura, observa-se que o *STATCOM* pode melhorar o amortecimento das oscilações ocorridas e tornar o sistema dinamicamente estável.

A Figura 61 mostra a potência acelerante da máquina síncrona para o mesmo distúrbio, onde observa-se que o *STATCOM* contribui para uma expressiva redução da potência acelerante pós-efeito. Para o sistema operando sem o *STATCOM*, não ocorre amortecimento.

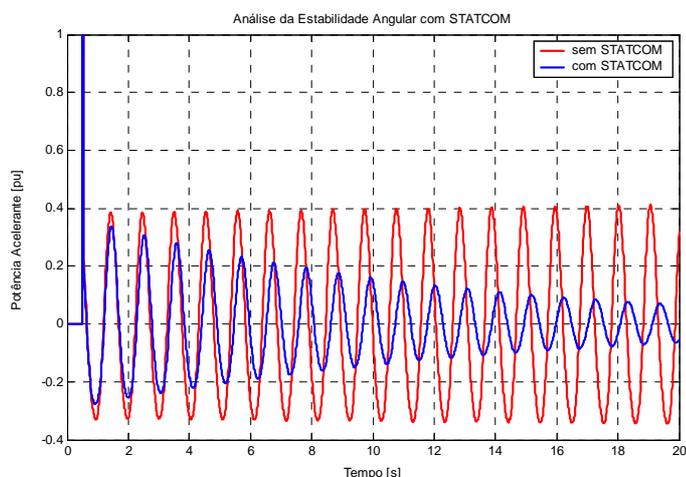


Figura 61 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 62 mostra que para o sistema teste 1 operando sem o *STATCOM*, a potência elétrica apresenta uma elevada oscilação. Enquanto que para o sistema com o *STATCOM* estas oscilações sofrem reduções ao longo do tempo.

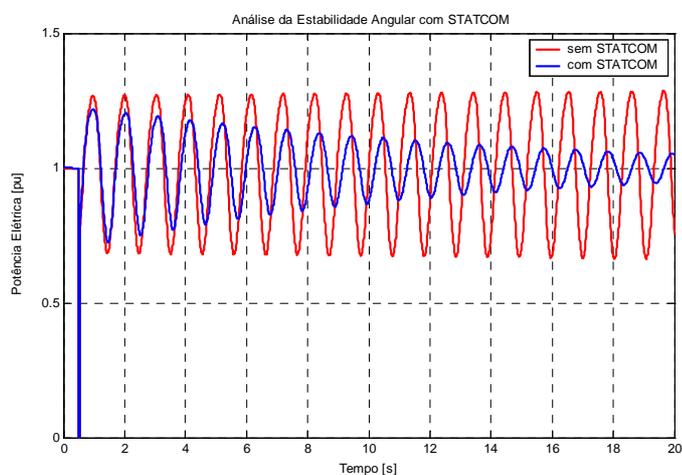


Figura 62 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 63 apresenta a relação entre a tensão transitória de eixo em quadratura, a velocidade angular e o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona.

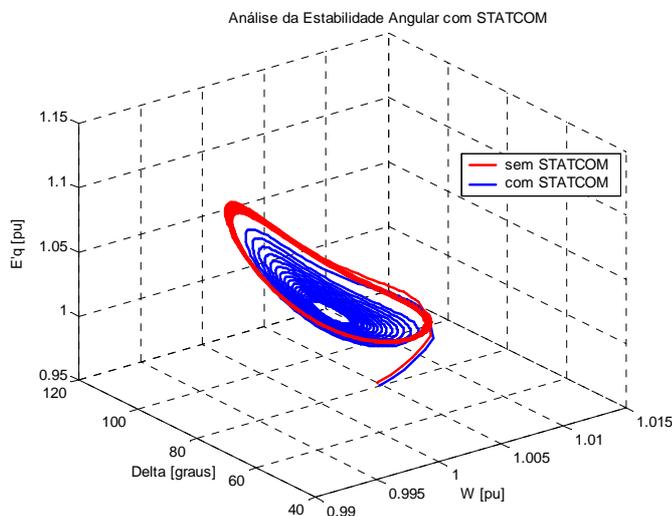


Figura 63 – Relações para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Através desta figura, pode-se observar como o *STATCOM* é eficiente no amortecimento das oscilações ocorridas no *SEP*.

b) Tempo de Eliminação do Defeito de 150 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento (2) do sistema teste 1 consideram, agora, o referido defeito com um tempo de eliminação de 150 ms. Este tempo corresponde ao limite de estabilidade angular transitória para o sistema operando sem a presença do *STATCOM*. Estas simulações, por sua vez, também não consideram o sistema teste 1 operando com o *ESP*.

A Figura 64 apresenta o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona para o limite de estabilidade angular transitória do *SEP* teste 1 operando com e sem a presença do compensador. Desta figura observa-se como o *STATCOM* aumenta consideravelmente a margem de estabilidade transitória do sistema, bem como promove o amortecimento das oscilações após o defeito.

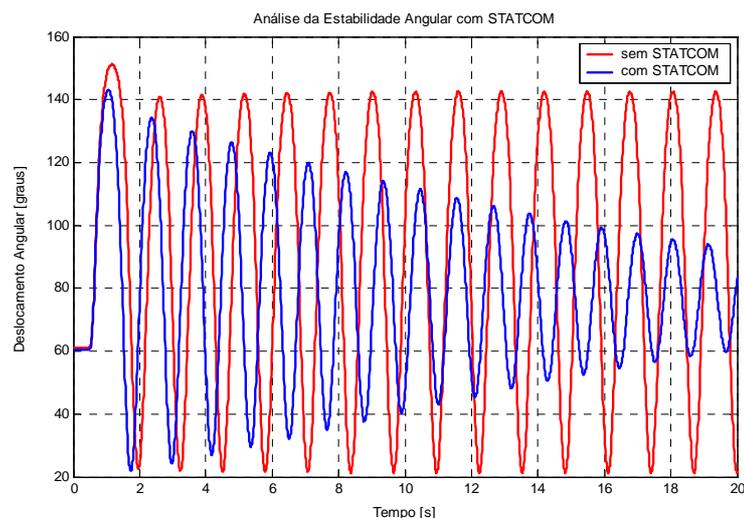


Figura 64 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o STATCOM.

A Figura 65 mostra a potência elétrica transmitida pelo sistema para este defeito. Nota-se que as oscilações apresentadas no sistema sem compensação inviabilizam sua operação. De maneira contrária, considerando a presença do STATCOM, o sistema apresenta uma taxa de amortecimento que conduz o sistema a um novo ponto de operação estável.

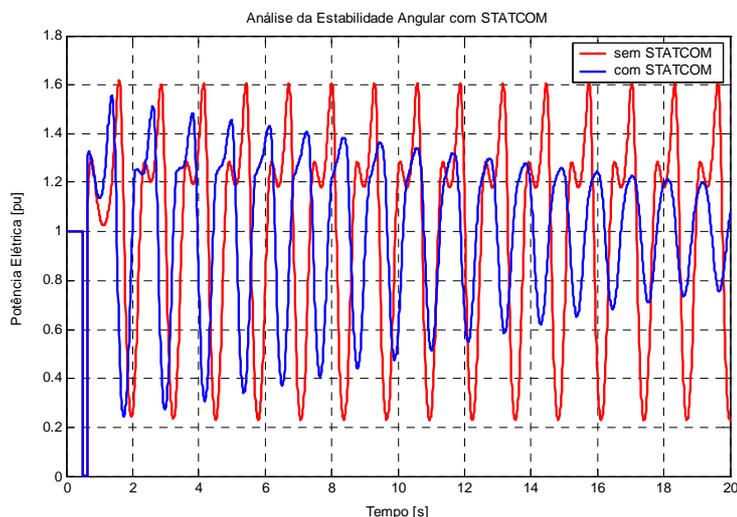


Figura 65 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com e sem o STATCOM.

A Figura 66 apresenta a tensão terminal da máquina síncrona para este sistema.

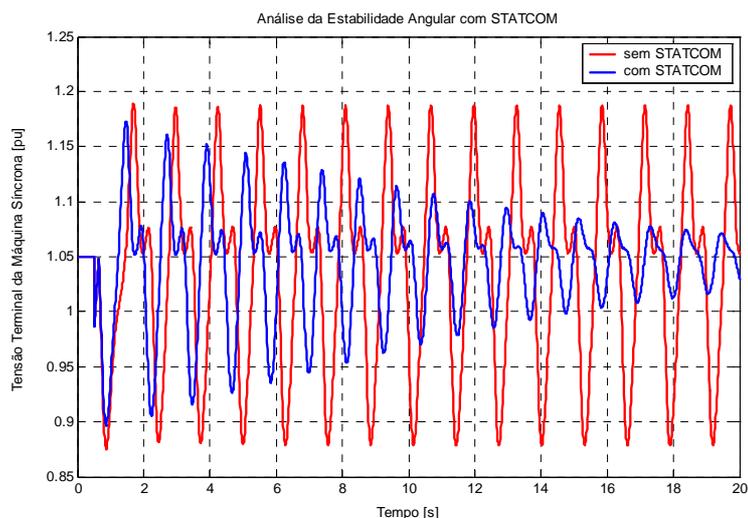


Figura 66 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Da figura observa-se que o *STATCOM* fornece um suporte de tensão considerável para o sistema na ocorrência do defeito. Além disso, o *STATCOM* influencia fortemente o amortecimento pós-distúrbio.

A Figura 67 mostra como a presença do *STATCOM* pode atenuar fortemente as oscilações ocorridas na tensão de campo da máquina síncrona para o referido distúrbio. Ainda nesta figura, observa-se que no caso sem compensação o sistema é dinamicamente instável, em termos práticos.

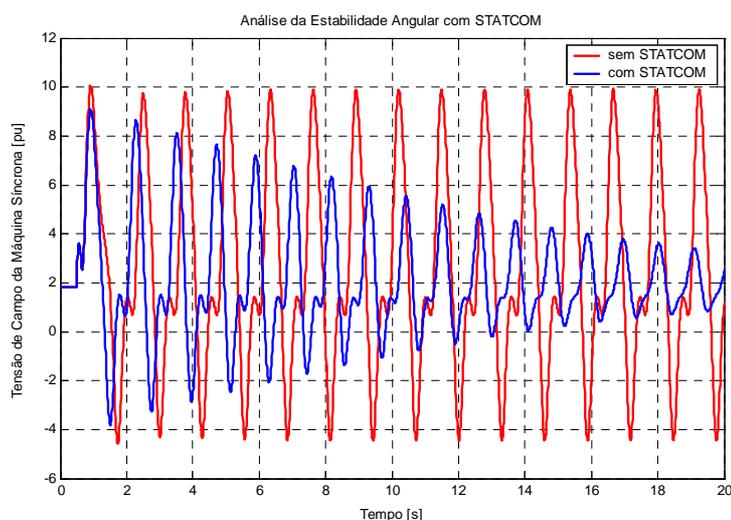


Figura 67 – Tensão de Campo para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Finalmente a Figura 68 apresenta a relação entre a tensão transitória de eixo em quadratura, a velocidade angular e o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona. Esta figura mostra como o sistema sem a presença do *STATCOM* está em seu limite de estabilidade angular transitória, além de não apresentar nenhum tipo de amortecimento. Por sua vez, o sistema compensado apresenta uma margem de estabilidade transitória e uma taxa de amortecimento pós-defeito.

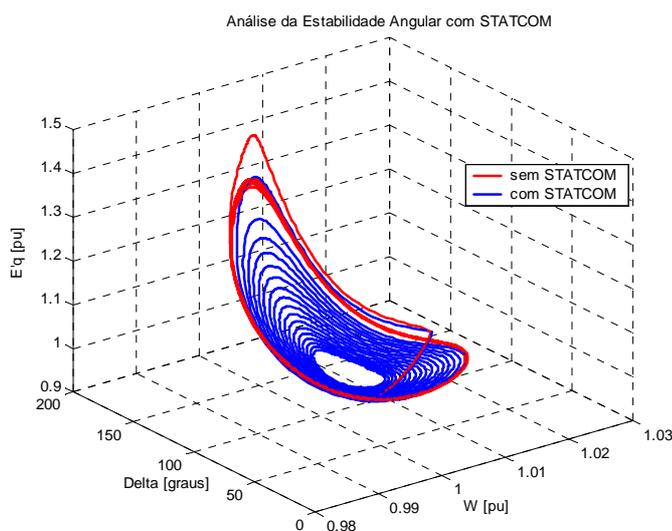


Figura 68 – Relações para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

c) **Tempo de Eliminação do Defeito de 153 ms**

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento (2) do sistema teste 1 consideram, agora, o referido defeito com um tempo de eliminação de 153 ms. Este tempo de eliminação corresponde ao limite de estabilidade angular transitória para o sistema operando com a presença do *STATCOM*. Vale ressaltar novamente que estas simulações não consideram a presença do *ESP*.

A Figura 69 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona para o limite de estabilidade angular transitória do *SEP* teste 1 operando com a presença do *STATCOM*. Desta figura, observa-se que o *STATCOM* aumenta a margem de estabilidade transitória de *SEP* através do aumento do tempo de eliminação do

defeito. Além disso, a taxa de amortecimento conduz o sistema a um novo ponto de equilíbrio estável.

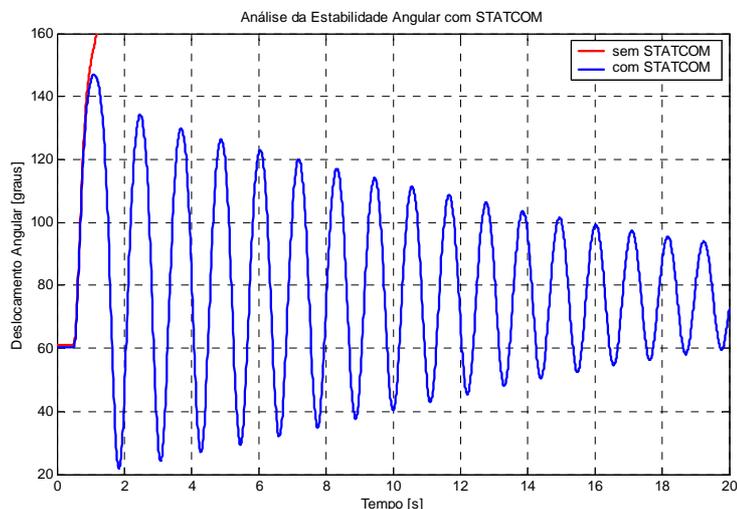


Figura 69 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 70 apresenta a velocidade angular da máquina síncrona para este defeito com seu tempo crítico de eliminação. Apesar disso, a velocidade angular não apresenta uma variação elevada.

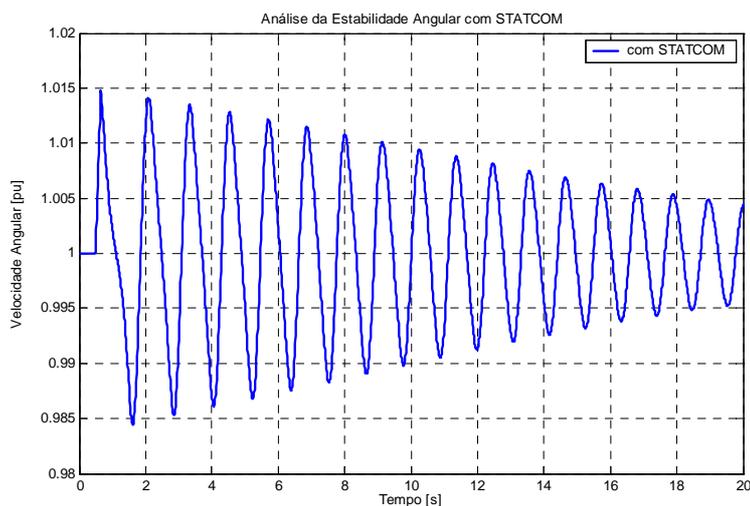


Figura 70 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com o *STATCOM*.

A Figura 71, por sua vez, mostra a tensão terminal da máquina síncrona considerando o tempo crítico de eliminação do defeito. Observa-se na figura que

apesar desta condição operativa, o *STATCOM* oferece um suporte de tensão adequado para o sistema através de seu sistema de controle.

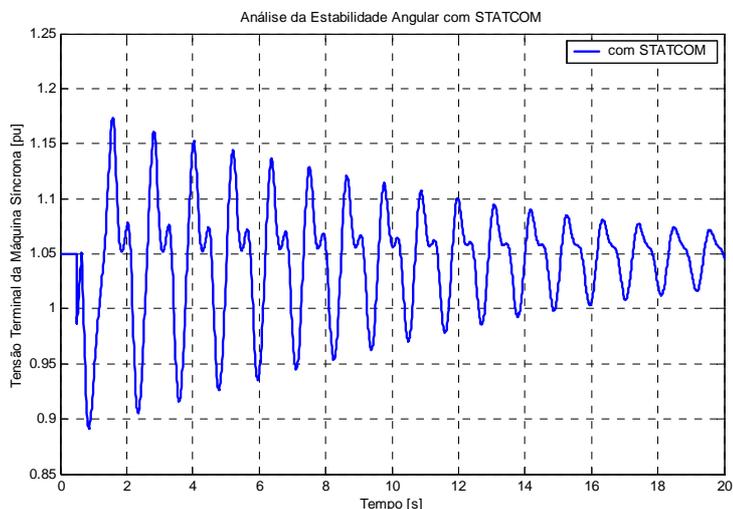


Figura 71 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com o *STATCOM*.

A Figura 72 apresenta a potência elétrica transmitida pelo sistema teste 1, com o *STATCOM*, operando muito próximo de seu limite de estabilidade transitória.

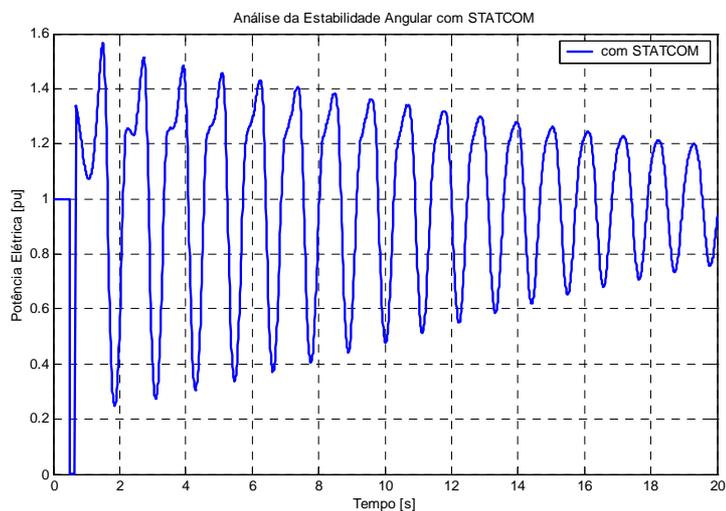


Figura 72 – Potência Elétrica para o Sistema Teste 1 com o *STATCOM*.

O *STATCOM* além de introduzir um aumento na margem de estabilidade transitória também melhora o amortecimento através de seu sistema de controle, conforme discutido no capítulo 4.

Finalmente, a Figura 73 apresenta a relação entre a tensão transitória de eixo em quadratura, a velocidade angular da máquina síncrona e o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona. Esta figura mostra como o sistema está operando em seu limite de estabilidade angular transitória com a presença do *STATCOM*. Isto pode ser visto pela amplitude das oscilações mostradas nesta figura.

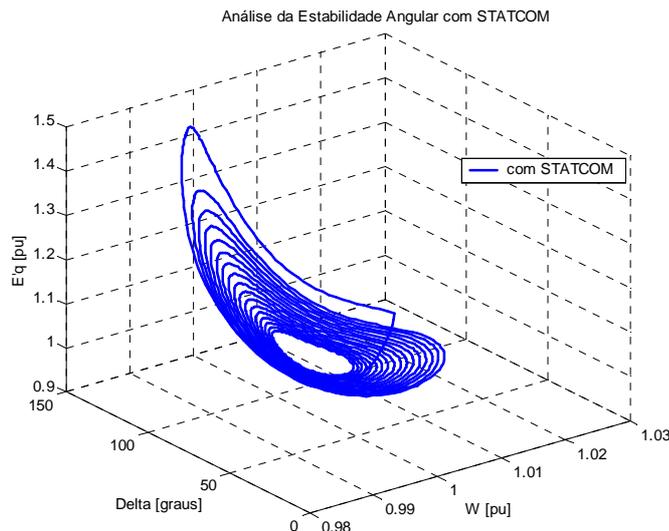


Figura 73 – Relações para o Sistema Teste 1 com o *STATCOM*.

7.3.2 – Variação na Potência Mecânica

7.3.2.1 – Com ESP

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento (2) do sistema teste 1 consideram uma redução de 20% na potência mecânica da máquina síncrona. Esta variação na potência mecânica representa a perda de um bloco de geração ou mesmo uma mudança no nível de carga.

A Figura 74 apresenta a velocidade angular da máquina síncrona para o distúrbio considerado. Para efeito comparativo, a mesma curva é mostrada com este sistema operando sem a presença do *STATCOM*. Pode-se observar que o *STATCOM* não apresenta uma melhora considerável para esta variação na potência mecânica.

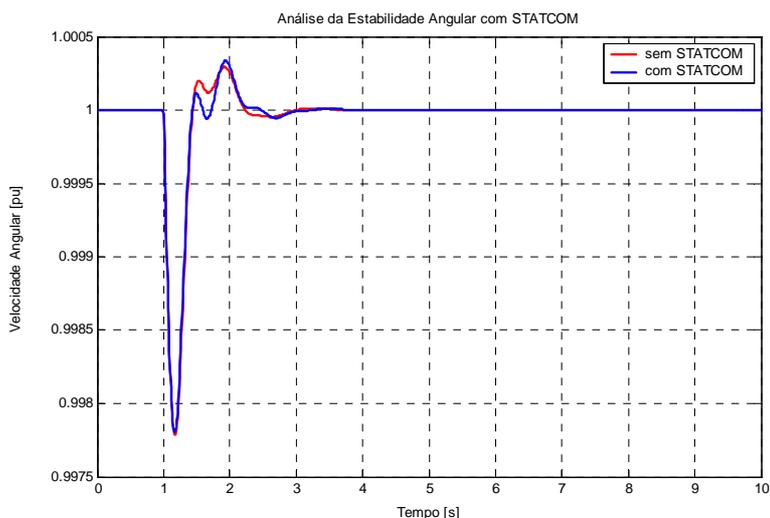


Figura 74 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 75 mostra a potência acelerante para a máquina síncrona, onde pode-se concluir que o *STATCOM* também não influi significativamente na potência acelerante para o referido distúrbio.

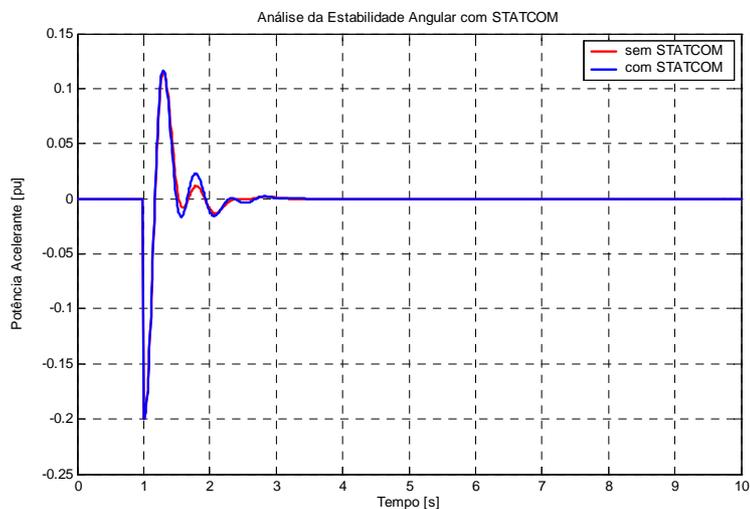


Figura 75 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Finalmente a Figura 76 apresenta a tensão transitória de eixo em quadratura para o referido distúrbio. Pode-se observar nesta figura que o *STATCOM* não apresenta uma influência considerável no fornecimento de suporte de tensão para o sistema.

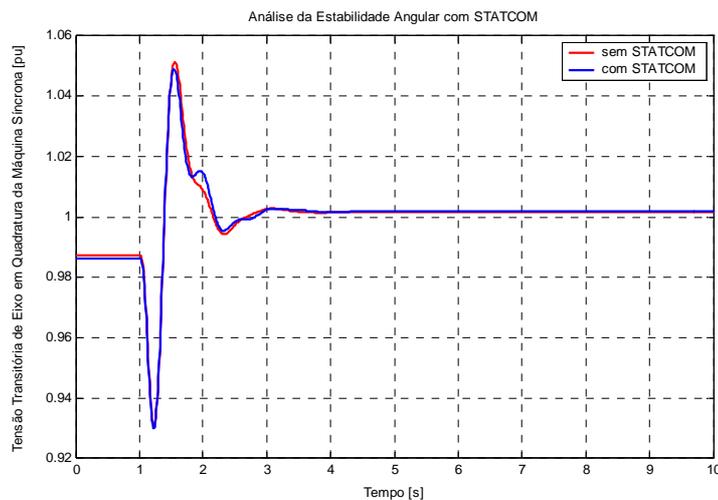


Figura 76 – Tensão E_q' para o Sistema Teste 1 com e sem o STATCOM.

7.3.2.2 – Sem ESP

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento (2) do sistema teste 1 consideram também uma redução de 20% na potência mecânica da máquina síncrona. Estas simulações, por sua vez, não consideram, agora, o sistema teste 1 operando com o *ESP*.

A Figura 77 apresenta o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona considerando o distúrbio estudado. Desta figura observa-se como o *STATCOM* aumenta, através de seu sistema de controle, o amortecimento das oscilações ocorridas após o referido distúrbio. A diferença existente no valor pré-defeito para o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona deve-se ao valor de regime permanente do *STATCOM*.

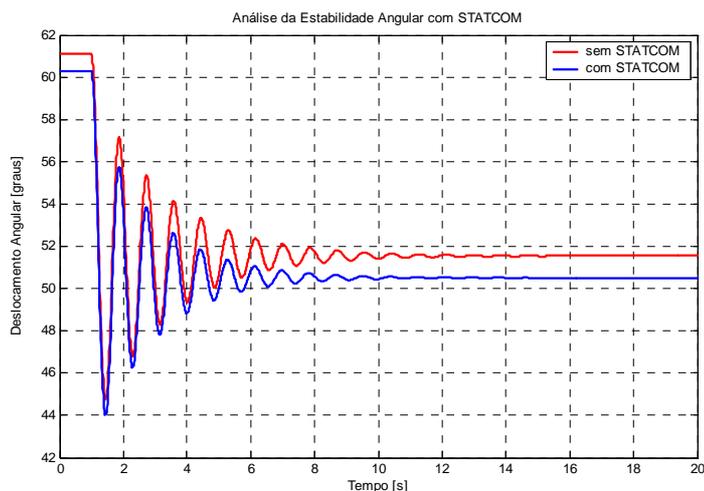


Figura 77 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

A Figura 78 mostra a tensão terminal da máquina síncrona para este sistema teste na ocorrência do distúrbio estudado. Da figura pode-se observar que o *STATCOM* contribui positivamente no comportamento dinâmico, apresentando uma pequena melhora com relação ao caso sem compensação.

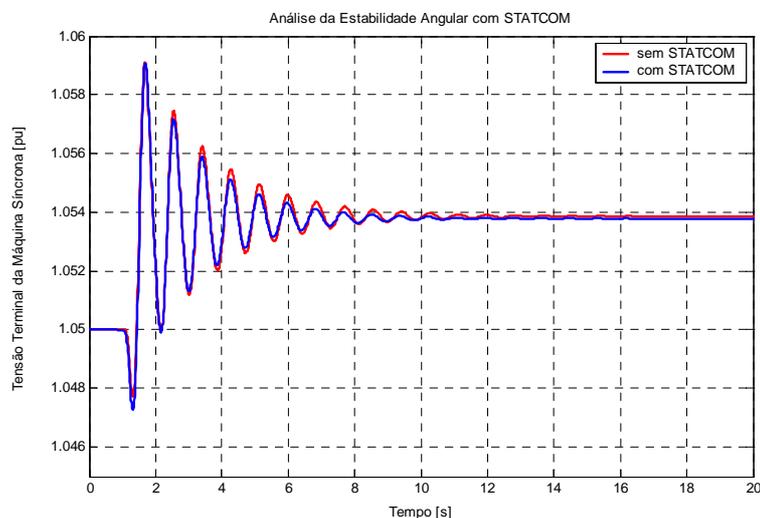


Figura 78 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Finalmente a Figura 79 apresenta a relação entre a tensão transitória de eixo em quadratura, a velocidade angular e o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona.

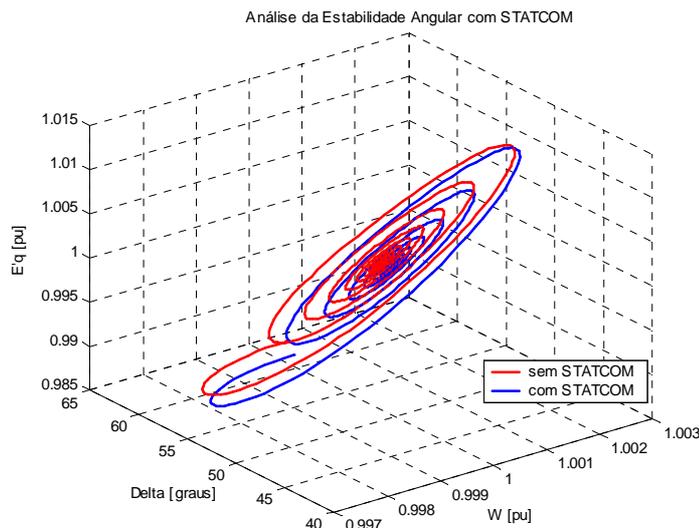


Figura 79 – Relações para o Sistema Teste 1 com e sem o *STATCOM*.

Esta figura mostra como o *STATCOM* apresenta um amortecimento ligeiramente maior das oscilações ocorridas devido à mudança na potência mecânica da máquina síncrona.

7.4 – Simulações com o *STATCOM* x *SVC* no Sistema Teste 1

Neste item são apresentados os principais resultados obtidos considerando um estudo comparativo no sistema teste 1. Este estudo consiste em investigar a influência do *STATCOM* na melhoria da estabilidade e da dinâmica de *SEP* em comparação com outro dispositivo *FACTS* de compensação *shunt*. Para isso, as simulações contemplam a presença do *STATCOM* e de um *SVC* conectados no mesmo local. São consideradas simulações de curto-circuito trifásico aplicado no barramento (2) da Figura 42, com posterior abertura de uma das linhas de transmissão, para diversos tempos de eliminação do defeito. Também são apresentados os resultados para uma variação de 20% na potência mecânica.

7.4.1 – Curto-Circuito Trifásico Franco

a) Tempo de Eliminação do Defeito de 100 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* e com o modelo do *SVC* conectados no barramento (2) do sistema teste 1 consideram o referido defeito com um tempo de eliminação de 100 ms.

A Figura 80 apresenta a velocidade angular da máquina síncrona com a presença do *STATCOM* e do *SVC*. Pode-se observar que o *STATCOM* apresenta uma menor variação da velocidade angular em relação ao *SVC*, quando da ocorrência do distúrbio.

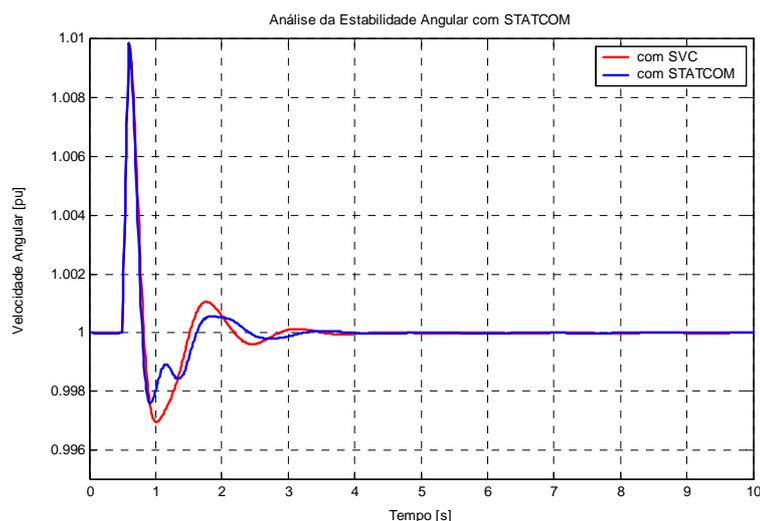


Figura 80 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com *STATCOM* x *SVC*.

A Figura 81 apresenta a potência acelerante da máquina síncrona para o mesmo distúrbio.

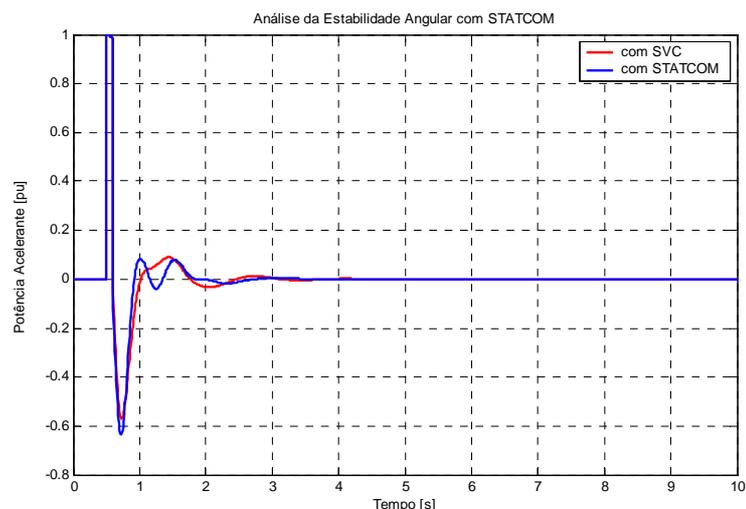


Figura 81 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com *STATCOM* x *SVC*.

A Figura 82 mostra a tensão terminal da máquina síncrona para este defeito. Desta figura, observa-se que o *STATCOM* oferece um melhor suporte de tensão, em relação ao *SVC*.

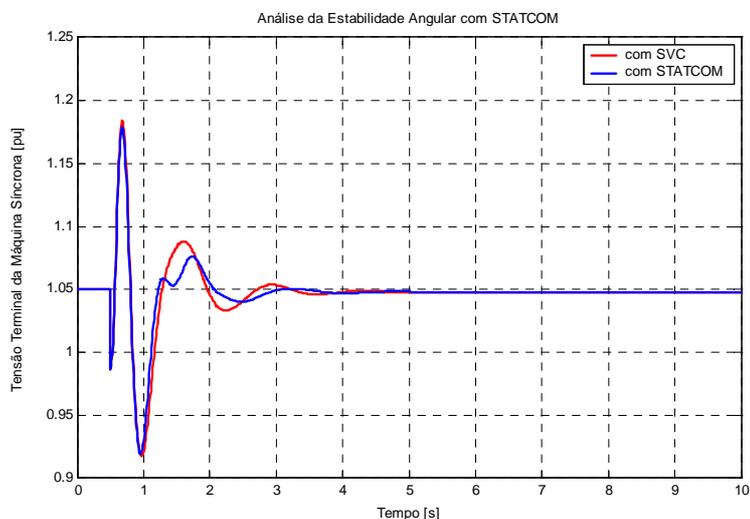


Figura 82 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com *STATCOM* x *SVC*.

b) Tempo de Eliminação do Defeito de 183 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* e com o modelo do *SVC* conectados no barramento (2) do sistema teste 1 consideram agora um tempo de eliminação do defeito de 183 ms. Este tempo corresponde ao limite de

estabilidade angular transitória para o sistema operando com o compensador *shunt* do tipo SVC.

A Figura 83 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona para o limite de estabilidade angular transitória do *SEP* teste 1 operando com o SVC. Da figura observa-se como o *STATCOM* apresenta uma maior margem de estabilidade transitória, em relação aos compensadores do tipo SVC, como apresentado no capítulo 4.

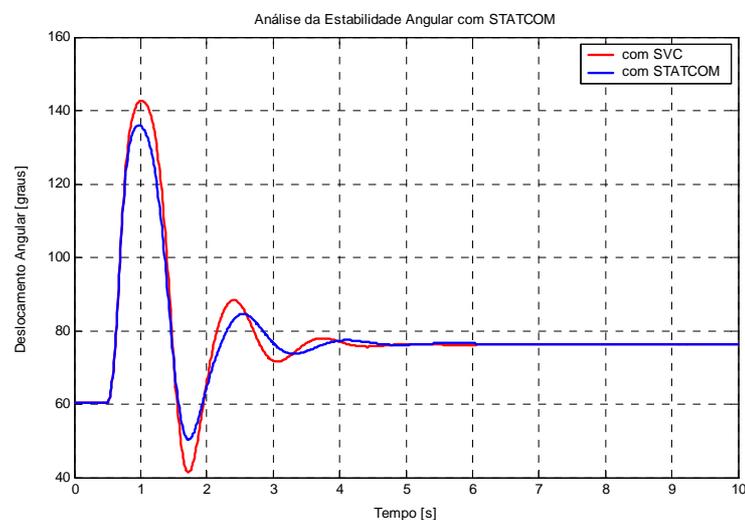


Figura 83 – Ângulo Delta para o Sistema Teste 1 com *STATCOM* x *SVC*.

A Figura 84 apresenta a tensão transitória de eixo em quadratura da máquina síncrona para o sistema teste 1 compensado por um *STATCOM* e por um *SVC*. Observa-se desta figura, como o *STATCOM* apresenta um melhor controle sobre as oscilações na tensão E_q' ocorridas no sistema após o distúrbio.

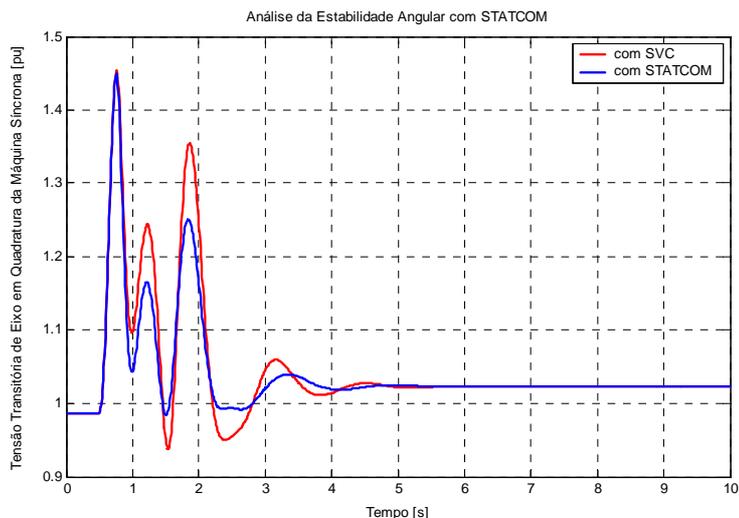


Figura 84 – Tensão E'_q para o Sistema Teste 1 com STATCOM x SVC.

Finalmente a Figura 85 mostra a velocidade angular da máquina síncrona para o referido defeito. Desta figura observa-se que o STATCOM reduz a variação da velocidade angular em relação ao SVC que está operando em seu limite de estabilidade angular transitória.

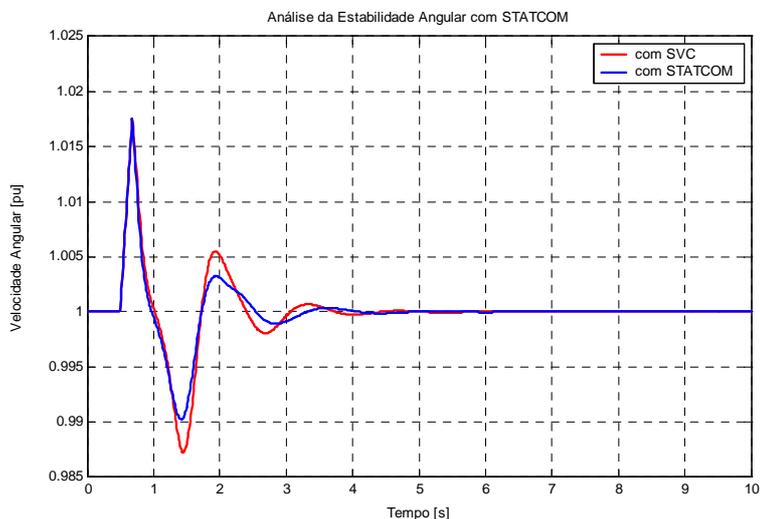


Figura 85 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com STATCOM x SVC.

7.4.2 – Variação na Potência Mecânica

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* e com o modelo do *SVC* conectados no barramento (2) do sistema teste 1 consideram uma redução de 20% na potência mecânica da máquina síncrona.

A Figura 86 apresenta a velocidade angular da máquina síncrona para o distúrbio considerado. Da figura pode-se observar que o *STATCOM* não apresenta uma influência considerável na variação da velocidade angular para este distúrbio.

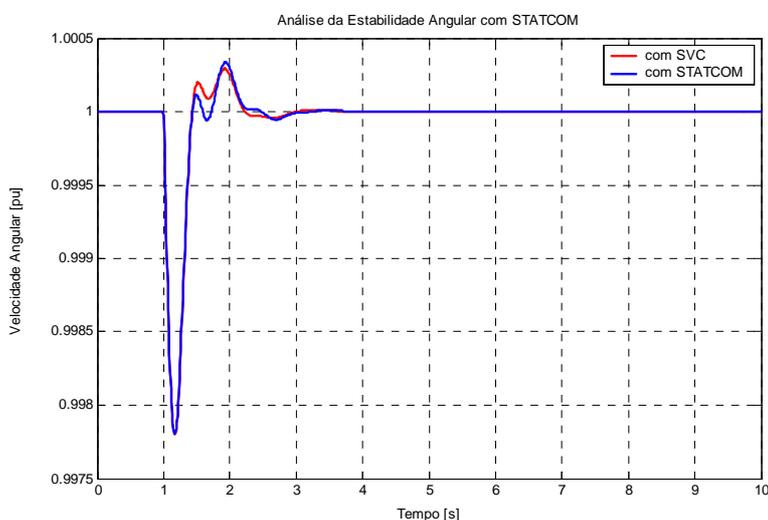


Figura 86 – Velocidade Angular para o Sistema Teste 1 com *STATCOM* x *SVC*.

A Figura 87 por sua vez, apresenta a tensão terminal da máquina síncrona para o distúrbio analisado. Observa-se desta figura que o *STATCOM* não mostra uma melhora considerável no fornecimento de suporte de tensão para o sistema, em comparação ao sistema compensado por *SVC*.

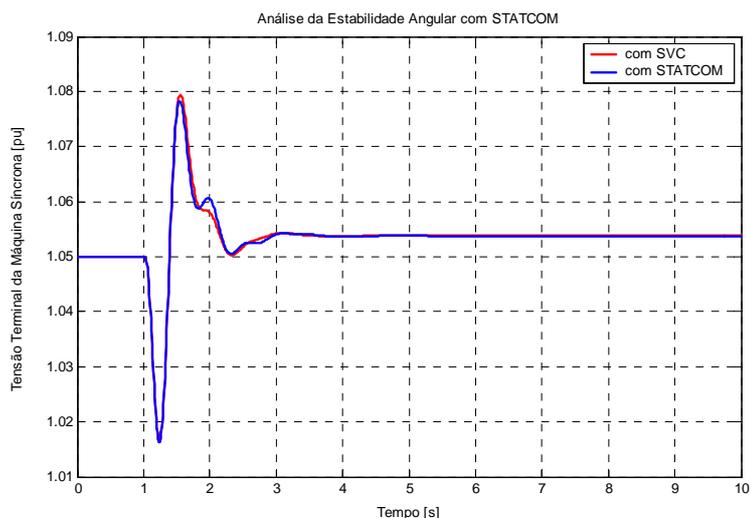


Figura 87 – Tensão Terminal para o Sistema Teste 1 com STATCOM x SVC.

Finalmente a Figura 88 mostra a potência acelerante para a máquina síncrona considerando uma variação de 20% em sua potência mecânica. Da análise desta figura conclui-se que o STATCOM, em relação ao SVC, não apresenta uma influência significativa na potência acelerante da máquina síncrona para este distúrbio.

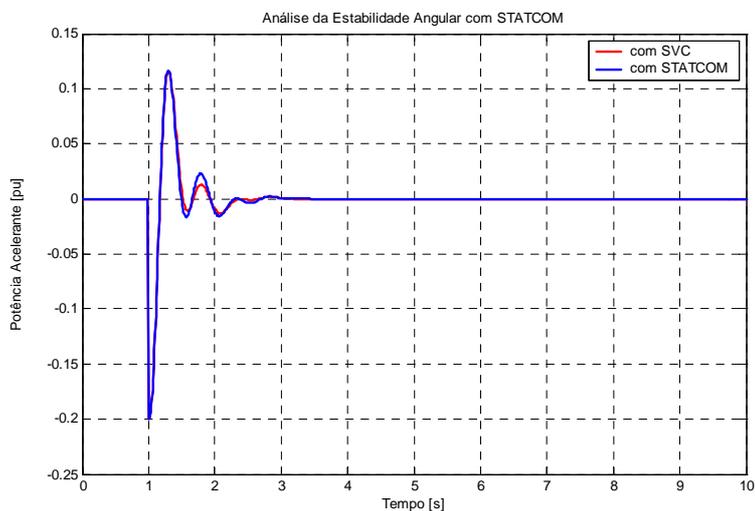


Figura 88 – Potência Acelerante para o Sistema Teste 1 com STATCOM x SVC.

7.5 – Simulações Com e Sem o STATCOM no Sistema Teste 2

Neste item são apresentados os principais resultados obtidos considerando um estudo comparativo no sistema teste 2. Este estudo consiste em investigar a influência do *STATCOM* na melhoria da estabilidade e da dinâmica de *SEP*. Para isso as simulações contemplam a presença ou não deste compensador *FACTS* do tipo *shunt*. São consideradas simulações de curto-circuito trifásico franco aplicados no sistema teste 2 apresentado na Figura 43, com posterior abertura da respectiva linha de transmissão em que é aplicado o defeito, para diversos tempos de eliminação.

7.5.1 – Curto-Circuito Trifásico Franco na LT 230 kV Tucano – Gavião

a) Tempo de Eliminação do Defeito de 100 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento de Garça 230 kV do sistema teste 2 consideram um curto-circuito trifásico aplicado no terminal de Tucano 230 kV com posterior abertura da *LT 230 kV* Tucano – Gavião para um tempo de eliminação do defeito de 100 ms.

A Figura 89 apresenta a frequência no barramento de Garça 230 kV para o defeito estudado. De modo comparativo, a mesma curva é apresentada para este sistema operando com um capacitor equivalente conectado no terminal de Garça 230 kV.

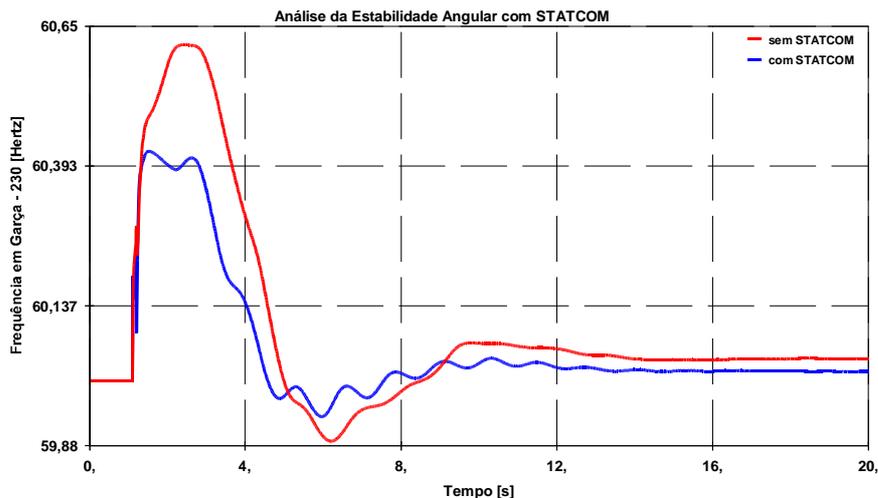


Figura 89 – Frequência em Garça 230 kV para o Sistema Teste 2.

Da figura pode-se observar como o *STATCOM* melhora consideravelmente a dinâmica do *SEP* através da menor variação de frequência, na ocorrência do distúrbio.

A Figura 90 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina síncrona (ângulo delta) de Gavião em relação à máquina de Canário para o sistema com e sem o compensador *shunt* do tipo *STATCOM*. Da análise desta figura, observa-se que o *STATCOM* influi positivamente na melhora da estabilidade transitória do sistema, porém não apresenta uma melhora significativa no que se refere ao amortecimento das oscilações ocorridas após o defeito.

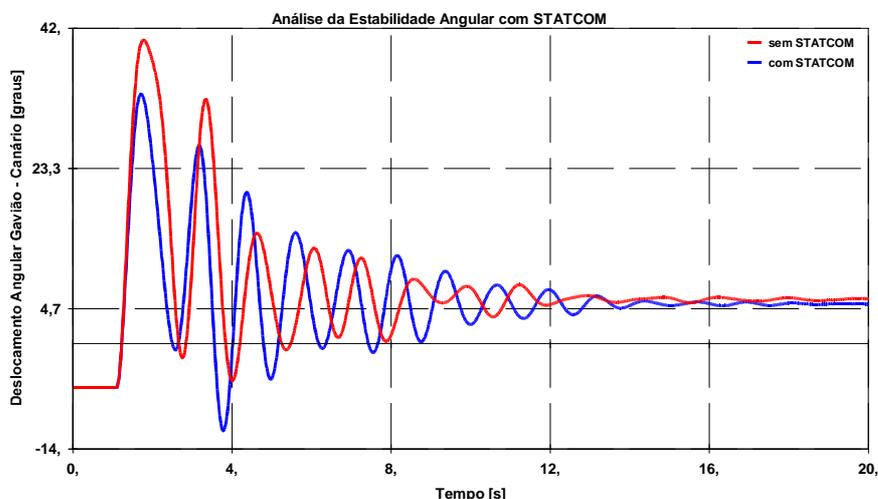


Figura 90 – Ângulo Delta de Gavião – Canário para o Sistema Teste 2.

Através da Figura 91, pode-se observar a tensão no barramento de Garça 230 kV para o referido distúrbio. Desta figura, nota-se a maneira pela qual o compensador *FACTS* com conexão *shunt* do tipo *STATCOM* pode contribuir com um adequado suporte de tensão para o sistema na ocorrência de defeitos, através de seu sistema de controle.

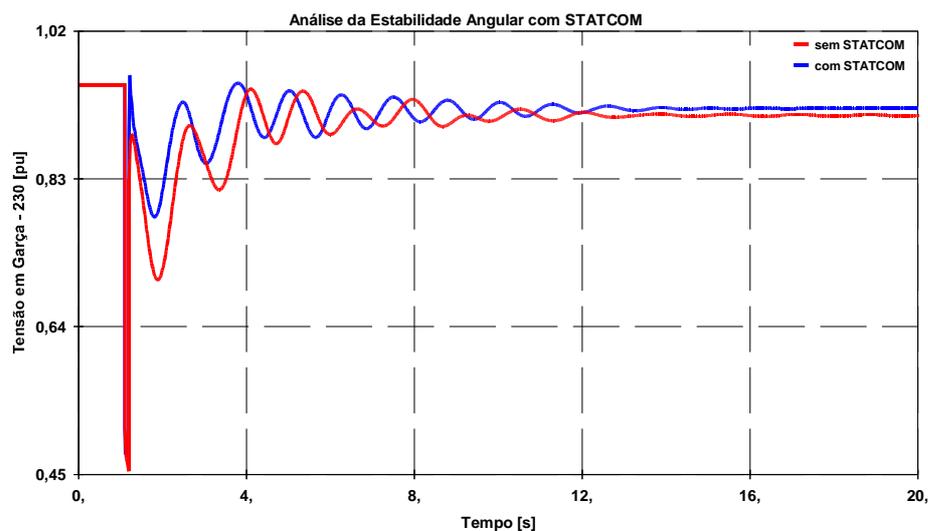


Figura 91 – Tensão em Garça 230 kV para o Sistema Teste 2.

A Figura 92 mostra que o *STATCOM*, através de seu sistema de controle, tende a aumentar a potência elétrica transmitida pela máquina de Gavião na ocorrência de um curto-circuito trifásico ao tentar se opor a aceleração das máquina síncronas do sistema de potência teste 2. Esta figura ilustra adequadamente a característica mostrada no capítulo 4.

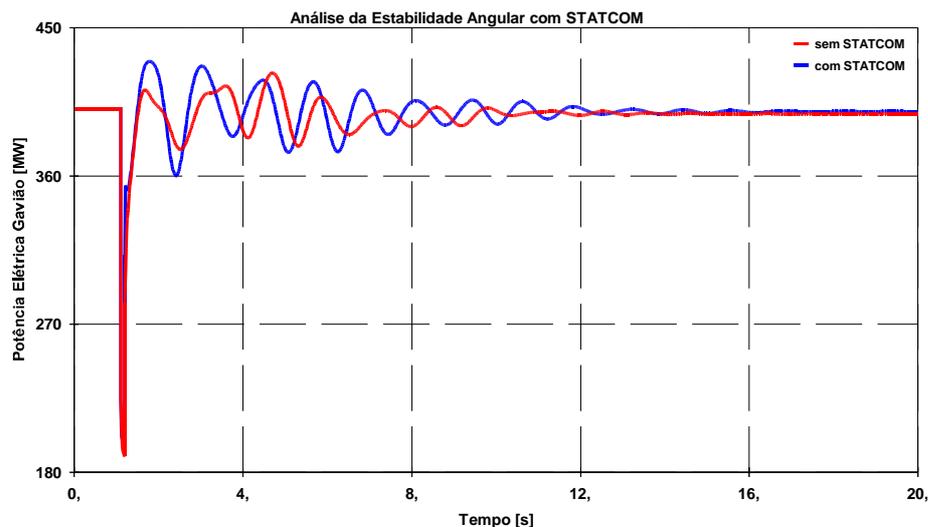


Figura 92 – Potência Elétrica em Gavião para o Sistema Teste 2.

Finalmente a Figura 93 apresenta a tensão transitória de eixo em quadratura da máquina de Tucano. Observa-se desta figura, que o *STATCOM*, através de um adequado suporte de tensão, pode diminuir a amplitude das oscilações ocorridas na tensão E'_q após o distúrbio.

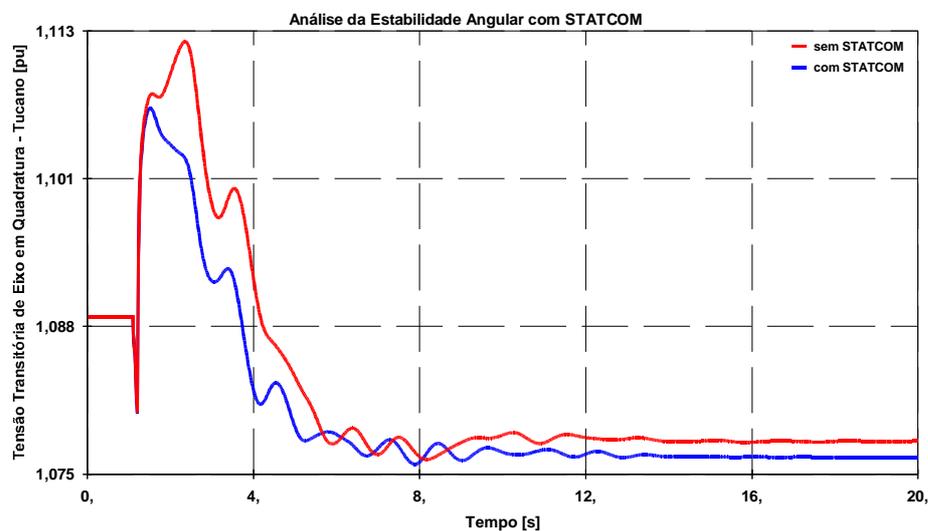


Figura 93 – Tensão E'_q em Tucano para o Sistema Teste 2.

b) Tempo de Eliminação do Defeito de 170 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento de Garça 230 kV do sistema teste 2 consideram agora um defeito em Tucano 230 kV com posterior abertura da *LT* 230 kV Tucano – Gavião em 170 ms. Este tempo corresponde ao limite de estabilidade angular transitória para o sistema operando sem a presença do *STATCOM*.

A Figura 94 apresenta o deslocamento angular do rotor da máquina de Gavião em relação à máquina de Sabiá. Da figura observa-se que o *STATCOM* aumenta consideravelmente a margem de estabilidade transitória do sistema.

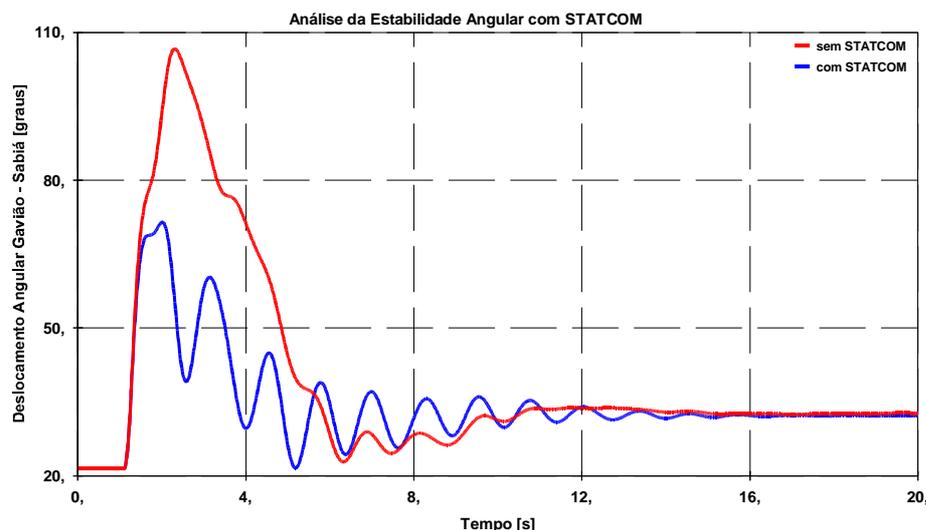


Figura 94 – Ângulo Delta de Gavião – Sabiá para o Sistema Teste 2.

Por sua vez, a Figura 95 mostra a frequência no barramento de Gavião 230 kV, onde pode-se observar como o *STATCOM* melhora a estabilidade e a dinâmica do *SEP* no qual o equipamento está conectado. Isto pode ser visto pela menor variação na frequência do barramento de Gavião 230 kV na ocorrência do distúrbio. Deve-se ressaltar que o *SEP* teste 2, sem o *STATCOM*, está operando em seu limite de estabilidade transitória para o defeito considerado.

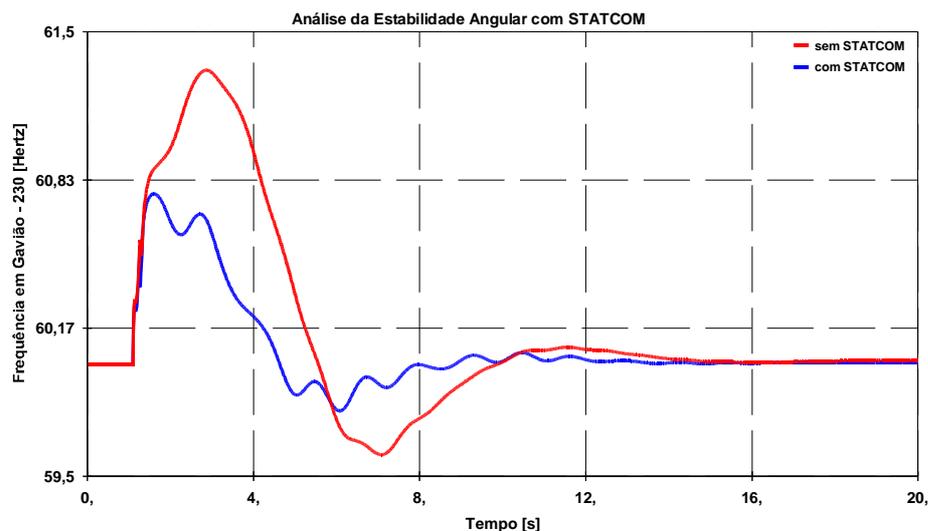


Figura 95 – Frequência em Gavião 230 kV para o Sistema Teste 2.

A Figura 96 apresenta o fluxo de potência ativa na *LT 230 kV Pelicano – Coruja*, onde pode ser observado que o suporte de tensão fornecido pelo *STATCOM*, na ocorrência do distúrbio, permite uma menor variação do fluxo de potência ativa nesta linha de transmissão, diminuindo com isso o impacto causado pelo defeito.

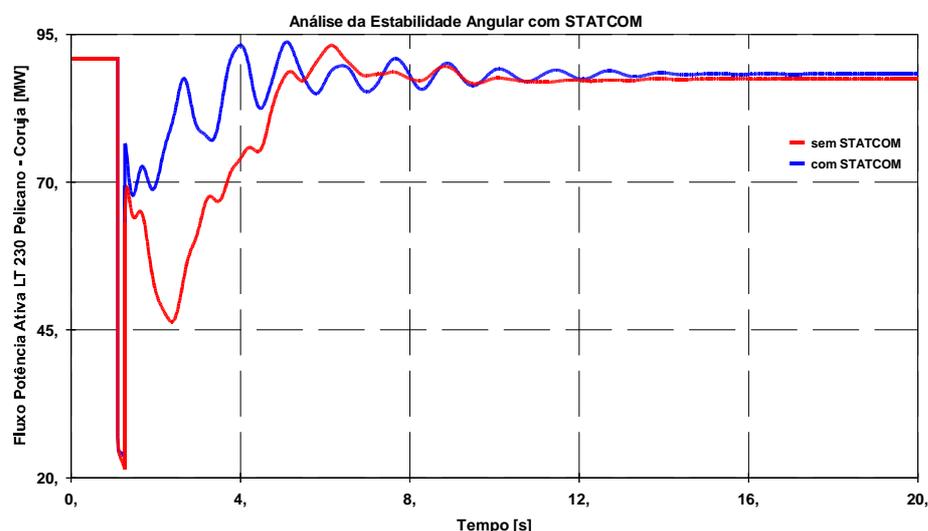


Figura 96 – Fluxo de Potência Ativa na LT 230 kV Pelicano – Coruja para o Sistema Teste 2.

A Figura 97 mostra a tensão no barramento de *Urubu 230 kV* para o referido distúrbio. Desta figura, observa-se o considerável suporte de tensão fornecido pelo *STATCOM*. Esta figura mostra também a melhora na dinâmica deste sistema compensado e o aumento da margem de estabilidade do mesmo.

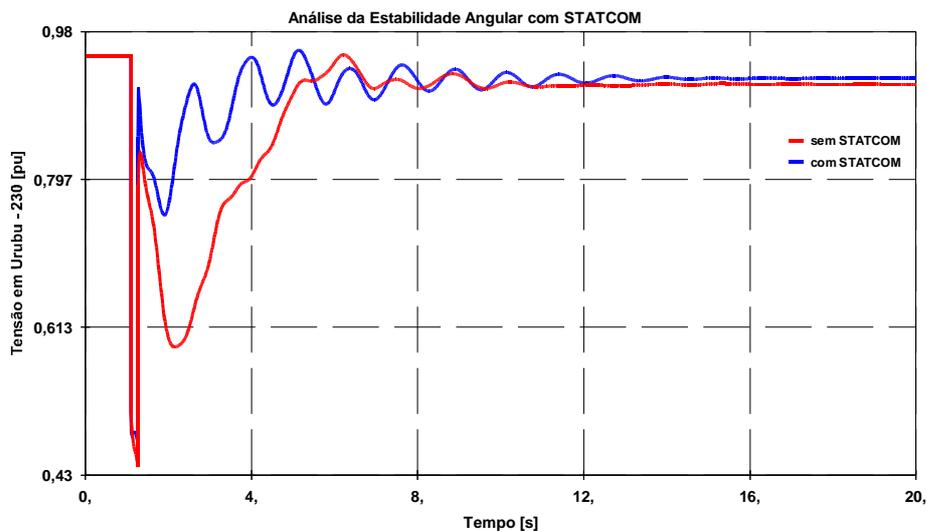


Figura 97 – Tensão em Urubu 230 kV para o Sistema Teste 2.

A Figura 98 apresenta a tensão de campo da máquina de Gavião.

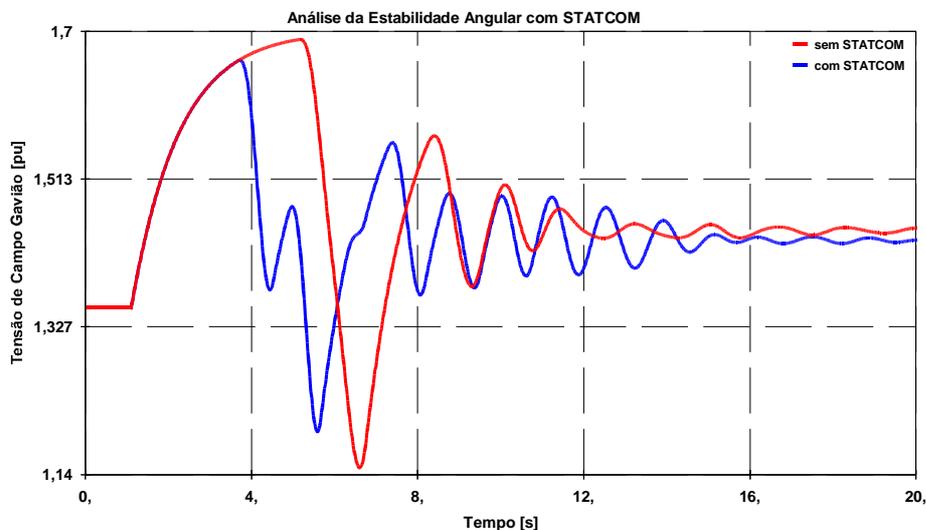


Figura 98 – Tensão de Campo de Gavião para o Sistema Teste 2.

Esta figura mostra como o *STATCOM* contribui para a diminuição da amplitude das oscilações pós-efeito ocorridas na tensão de campo da máquina de Gavião e aumentando com isso a estabilidade transitória do sistema.

c) Tempo de Eliminação do Defeito de 272 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento de Garça 230 kV do sistema teste 2 consideram agora um tempo de eliminação do defeito em Tucano 230 kV com posterior abertura da *LT* 230 kV Tucano – Gavião de 272 ms. Este tempo corresponde ao limite de estabilidade angular transitória para o sistema operando com a presença do *STATCOM*.

A Figura 99 apresenta o deslocamento angular do rotor da máquina de Tucano em relação à máquina de Gavião. Da figura observa-se como o *STATCOM* aumenta consideravelmente a margem de estabilidade transitória do sistema, com a elevação do tempo crítico de eliminação do defeito.

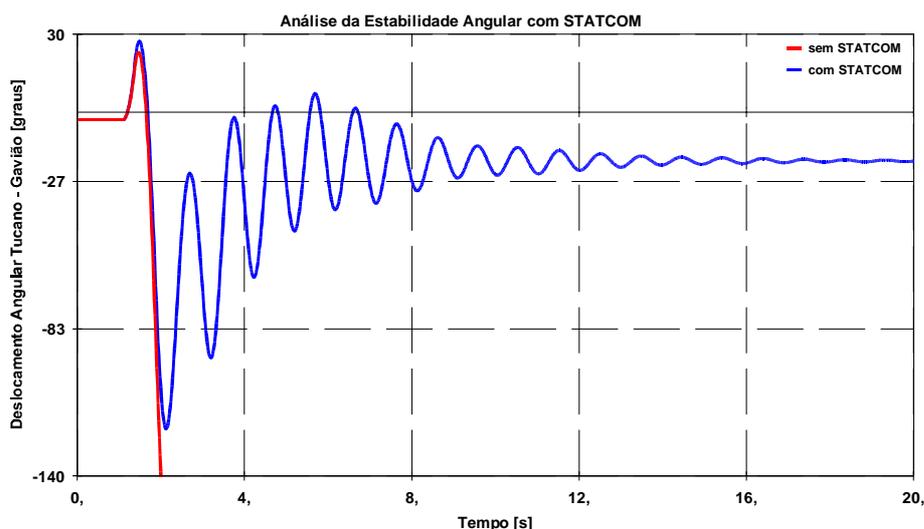


Figura 99 – Ângulo Delta de Tucano – Gavião para o Sistema Teste 2.

A Figura 100 mostra a potência acelerante da máquina síncrona de Canário para o mesmo distúrbio.

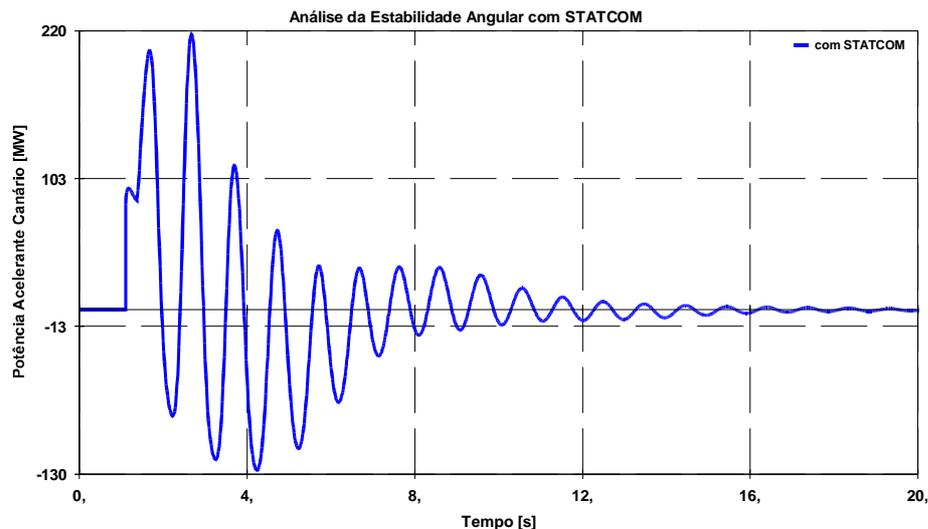


Figura 100 – Potência Acelerante de Canário para o Sistema Teste 2.

A Figura 101 apresenta a tensão no barramento de Gavião 230 kV.

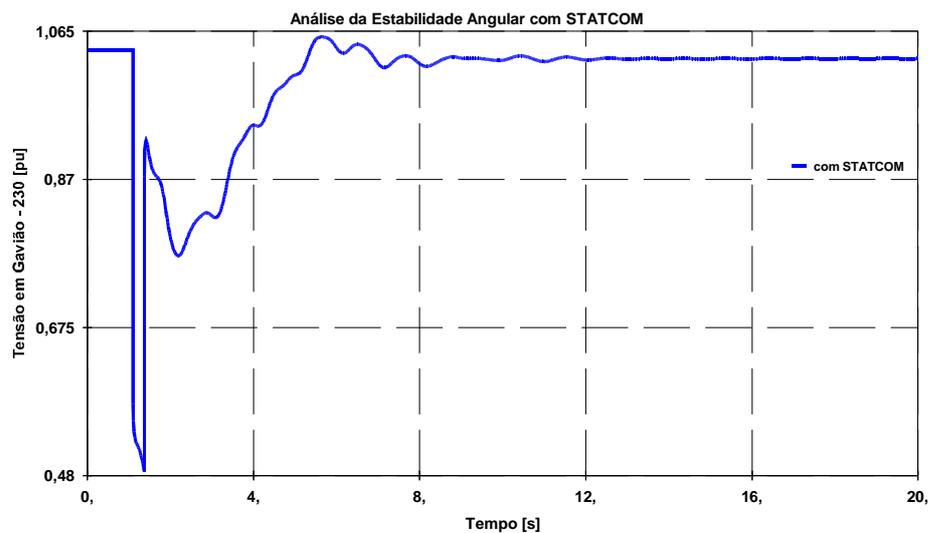


Figura 101 – Tensão em Gavião 230 kV para o Sistema Teste 2.

Através desta figura, observa-se como o *STATCOM* tem a capacidade de sustentar a tensão dos barramentos localizados próximos ao ponto onde este compensador está conectado.

Por sua vez, a Figura 102 mostra a potência reativa de saída controlada do *STATCOM*. Através da injeção desta potência reativa pode-se melhorar o comportamento dinâmico de *SEP*.

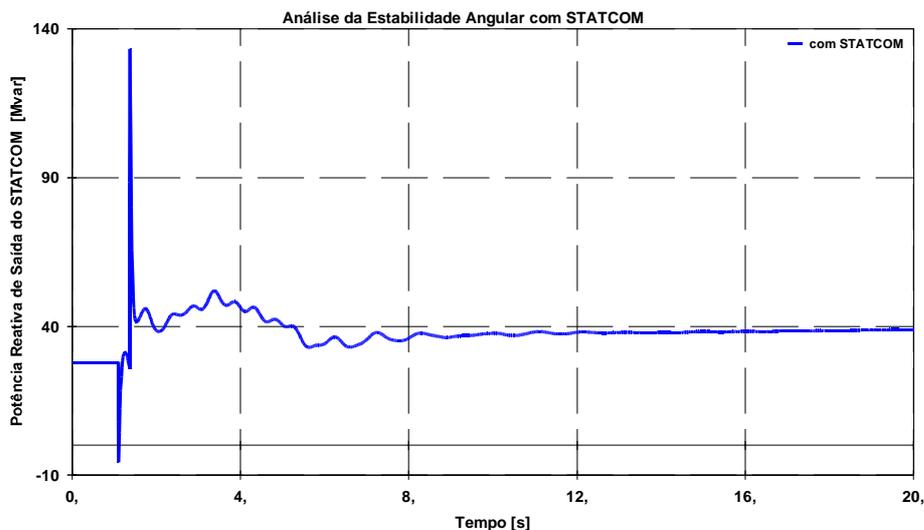


Figura 102 – Potência Reativa de Saída do *STATCOM* para o Sistema Teste 2.

Finalmente a Figura 103 mostra a frequência no barramento de Urubu 230 kV para o defeito estudado. Desta figura pode-se observar como o *STATCOM* melhora a dinâmica do *SEP* no qual o equipamento está conectada, apesar do sistema estar operando próximo de seu limite de estabilidade angular transitória.

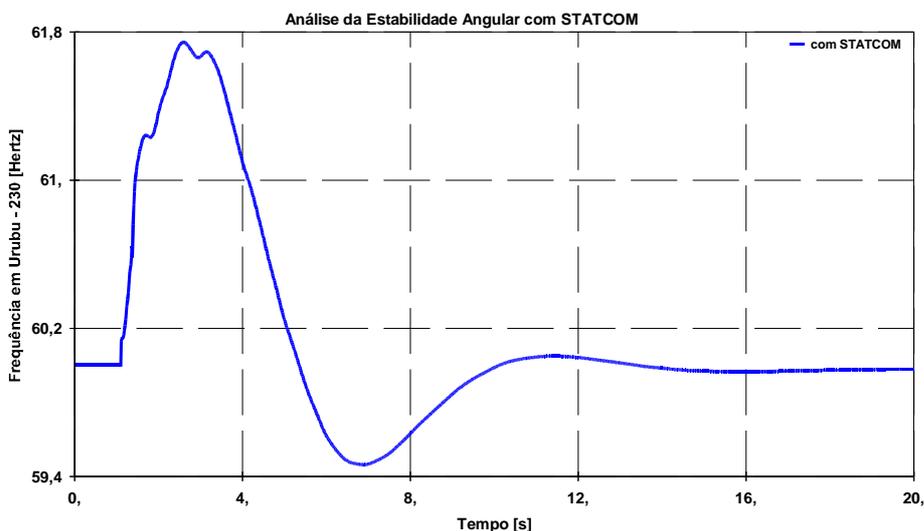


Figura 103 – Frequência em Urubu 230 kV para o Sistema Teste 2.

7.5.2 – Curto-Circuito Trifásico Franco na LT 440 kV Arara – Curió

a) Tempo de Eliminação do Defeito de 100 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento de Garça 230 kV do sistema teste 2 consideram, agora, um curto-circuito trifásico aplicado no terminal de Arara 440 kV com posterior abertura da LT 440 kV Arara – Curió para um tempo de eliminação do defeito de 100 ms.

A Figura 104 apresenta a frequência na máquina de Canário para o respectivo defeito estudado. Para a realização de uma análise comparativa, a mesma curva é apresentada para este sistema operando sem o *STATCOM* conectado no barramento de Garça 230 kV. Desta figura pode-se observar como o *STATCOM* melhora a dinâmica do *SEP* teste 2, visto através da menor variação na frequência desta máquina na ocorrência do distúrbio.

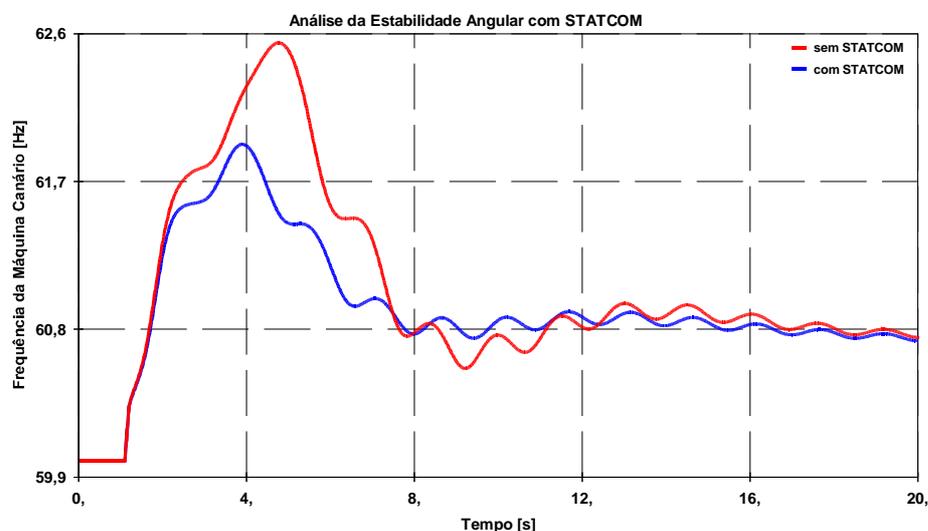


Figura 104 – Frequência na Máquina de Canário para o Sistema Teste 2.

Através da Figura 105, pode-se observar a tensão no barramento de Chopim 440 kV para este distúrbio. Desta figura, nota-se a maneira pela qual o *STATCOM* pode contribuir com um elevado suporte de tensão para o *SEP* na ocorrência de defeitos, através de seu sistema de controle. Este defeito provoca um considerável afundamento de tensão em torno de quatro segundos para o sistema sem

compensação. O *STATCOM* pelo fato de evitar este afundamento de tensão aumenta a margem de estabilidade do sistema.

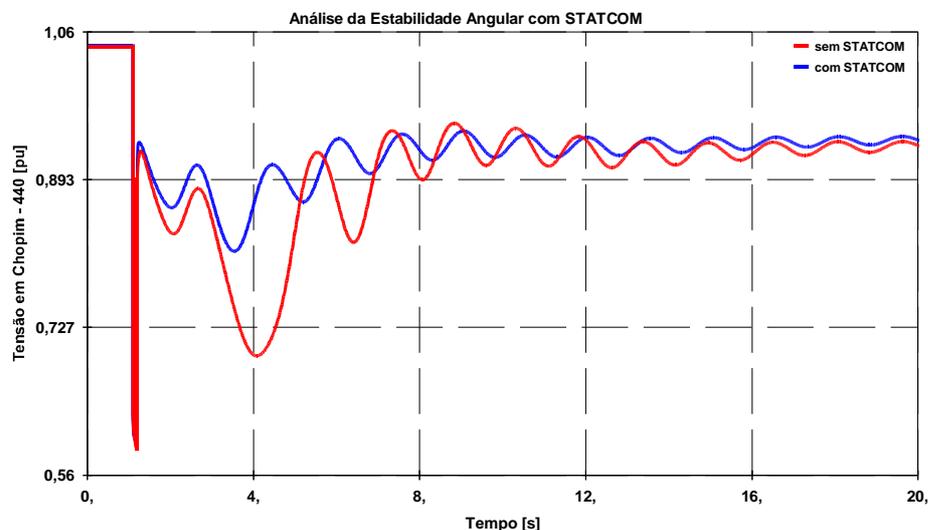


Figura 105 – Tensão em Chopim 440 kV para o Sistema Teste 2.

Por sua vez, a Figura 106 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina de Tucano em relação à máquina de Sabiá para o sistema com e sem o compensador *shunt* do tipo *STATCOM*. Esta figura mostra como este compensador influi positivamente na melhora da estabilidade transitória do sistema, além de apresentar uma melhora razoável no amortecimento das oscilações ocorridas após o defeito.

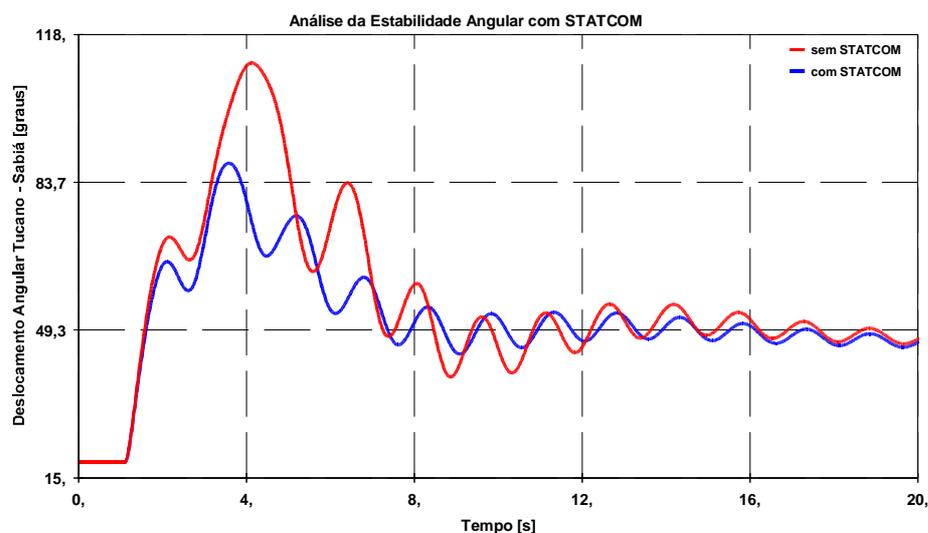


Figura 106 – Ângulo Delta de Tucano – Sabiá para o Sistema Teste 2.

Através da Figura 107, pode-se observar a corrente de eixo em quadratura da máquina de Gavião para o distúrbio analisado. Desta figura, nota-se a maneira pela qual o *STATCOM* pode evitar uma considerável diminuição desta corrente próximo dos quatro segundos.

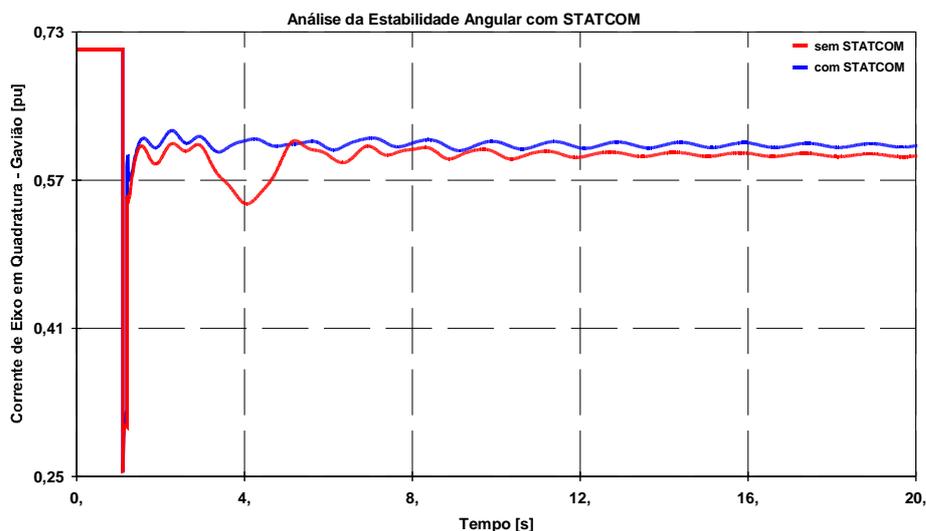


Figura 107 – Corrente I_q em Gavião para o Sistema Teste 2.

Finalmente a Figura 108 mostra a tensão transitória de eixo em quadratura da máquina de Tucano. Com base nesta figura, observa-se como o *STATCOM* pode diminuir a amplitude das oscilações ocorridas na tensão E'_q após o distúrbio através do suporte de tensão realizado por seu sistema de controle.

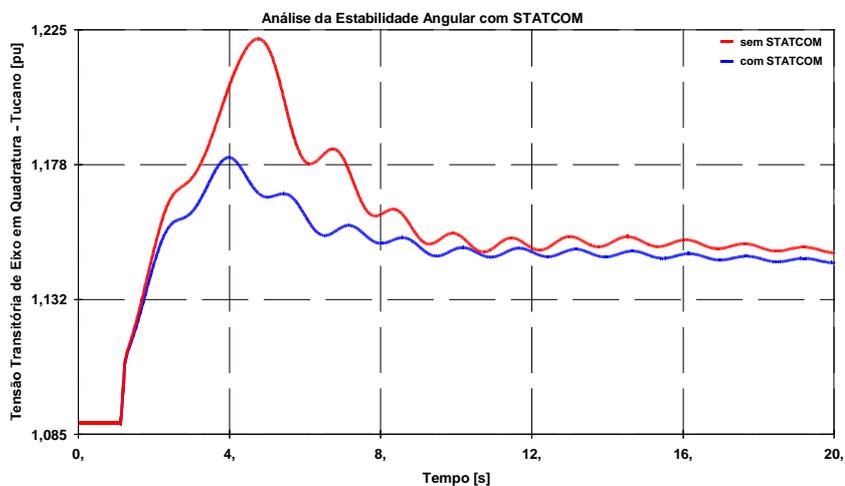


Figura 108 – Tensão E'_q em Tucano para o Sistema Teste 2.

b) Tempo de Eliminação do Defeito de 128 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento de Garça 230 kV do sistema teste 2 consideram agora um tempo de eliminação do defeito em Arara 440 kV com posterior abertura da *LT* 440 kV Arara – Curió de 128 ms. Este tempo corresponde ao limite de estabilidade angular transitória para o sistema operando sem a presença do *STATCOM*.

A Figura 109 mostra o deslocamento angular do rotor da máquina de Gavião em relação à máquina de Sabiá. Da figura observa-se como o *STATCOM* aumenta consideravelmente a estabilidade transitória do sistema e o amortecimento das oscilações ocorridas após o defeito.

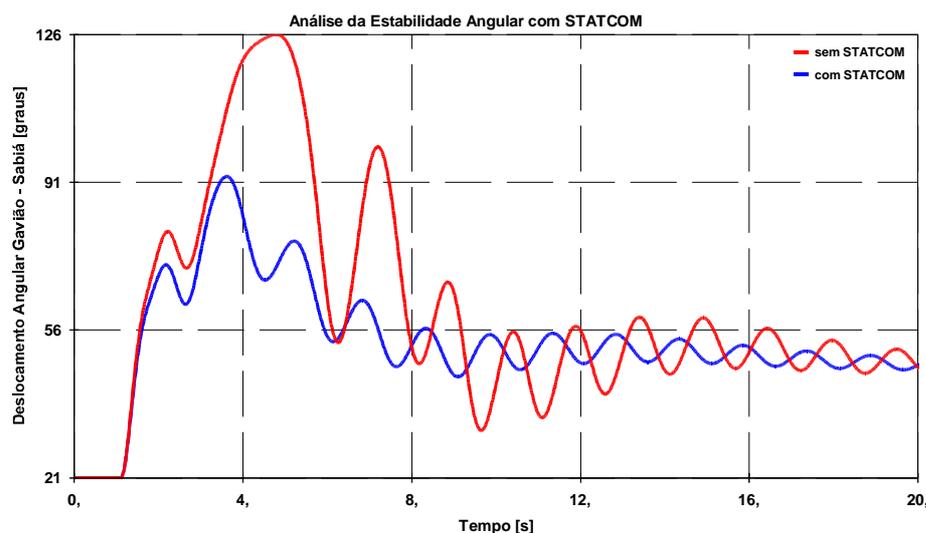


Figura 109 – Ângulo Delta de Gavião – Sabiá para o Sistema Teste 2.

A Figura 110 apresenta a frequência no barramento de Arara 230 kV para este distúrbio. Com base nesta figura, observa-se como o *STATCOM* pode melhorar a estabilidade e a dinâmica do sistema através de uma menor variação da frequência nos barramentos próximos de seu ponto de conexão. Cabe ressaltar que o sistema de potência teste 2, sem o *STATCOM*, está no seu limite de estabilidade transitória.

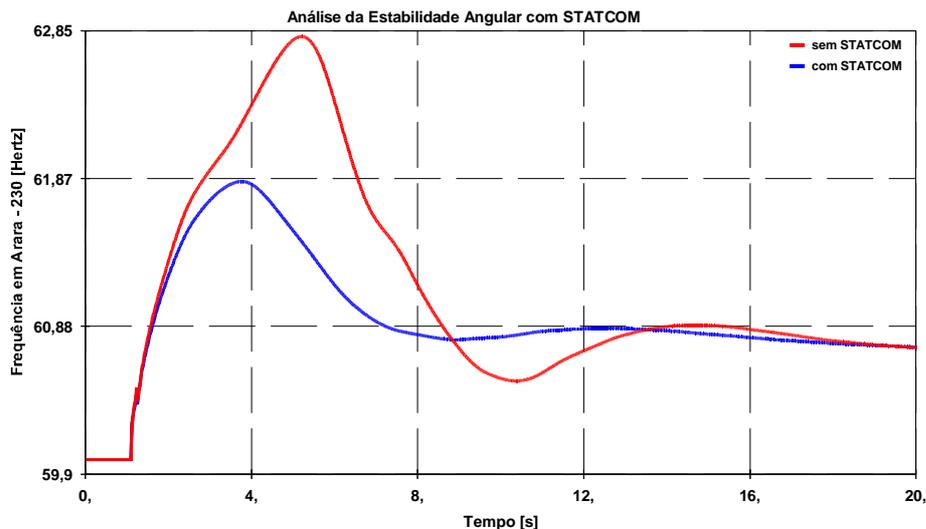


Figura 110 – Frequência em Arara 230 kV para o Sistema Teste 2.

A Figura 111 mostra a tensão no barramento de Pelicano 230 kV para o referido distúrbio. Desta figura, observa-se que o suporte de tensão fornecido pelo *STATCOM* é fundamental para uma correta operação do sistema teste 2 que está em seu limite de estabilidade angular transitória para o caso sem o *STATCOM*. Esta figura mostra ainda, a melhora na dinâmica do sistema compensado por este dispositivo *shunt*. Além disso, o *STATCOM* evita o elevado afundamento de tensão ocorrido no barramento de Pelicano 230 kV no sistema sem compensação, entre três e oito segundos.

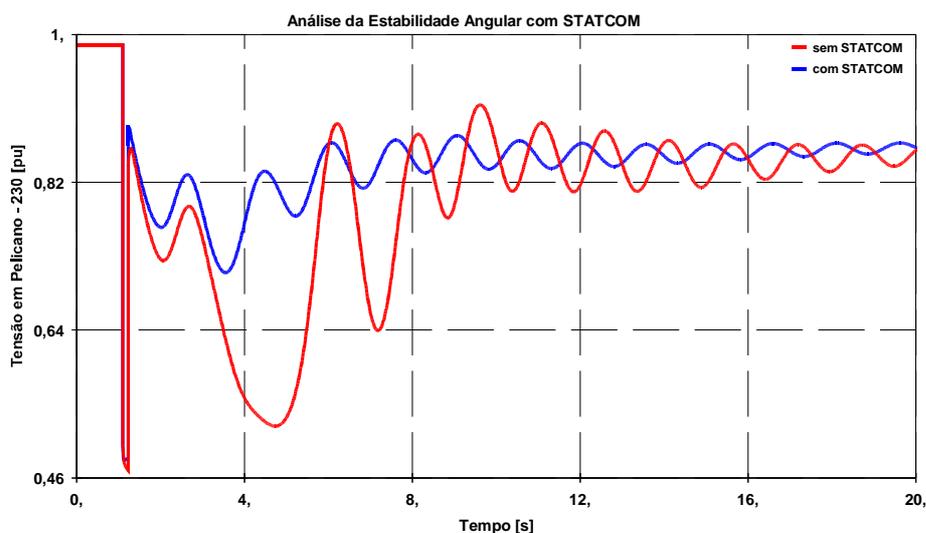


Figura 111 – Tensão em Pelicano 230 kV para o Sistema Teste 2.

A Figura 112 apresenta a tensão de campo da máquina de Tucano, que mostra como o *STATCOM* contribui para a diminuição da amplitude e para um melhor amortecimento das oscilações pós-defeito.

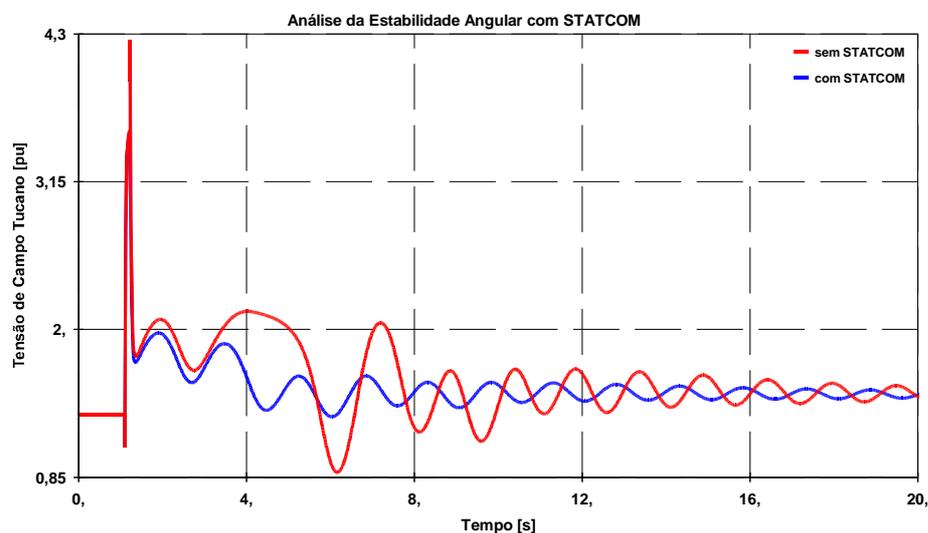


Figura 112 – Tensão de Campo de Tucano para o Sistema Teste 2.

Finalmente a Figura 113 mostra o fluxo de potência ativa na *LT 230 kV Pelicano – Arara* operando para este limite. Pode-se observar que a adequada operação do *STATCOM* permite uma menor oscilação do fluxo de potência ativa nesta linha de transmissão, melhorando com isto as condições pós-distúrbio do sistema.

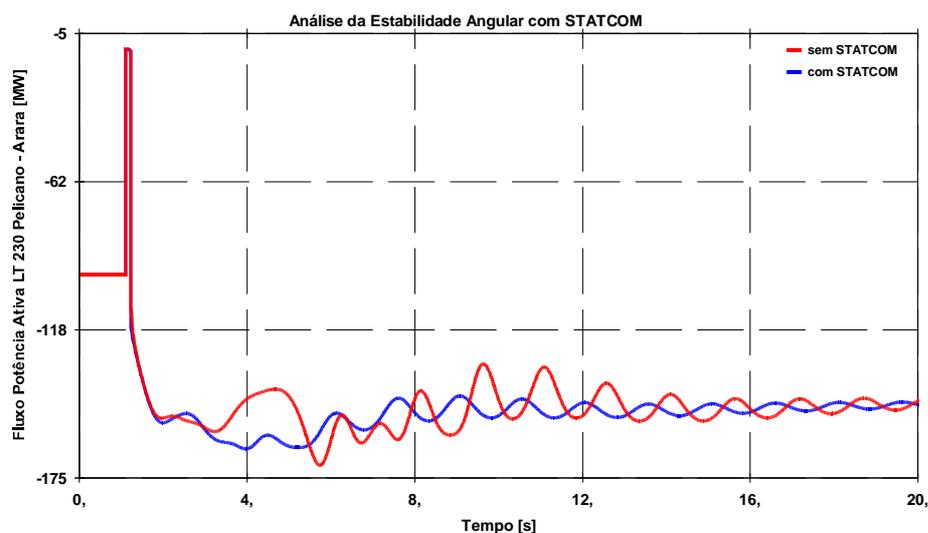


Figura 113 – Fluxo de Potência Ativa na LT 230 kV Pelicano – Arara para o Sistema Teste 2.

c) Tempo de Eliminação do Defeito de 476 ms

As simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* conectado no barramento de Garça 230 kV do sistema teste 2 consideram, agora, um tempo de eliminação do defeito em Arara 440 kV, com posterior abertura da *LT* 440 kV Arara – Curió, de 476 ms. Este tempo corresponde ao limite de estabilidade angular transitória para o sistema operando com a presença do *STATCOM*.

A Figura 114 apresenta o deslocamento angular do rotor da máquina de Tucano em relação à máquina de Sabiá, onde observa-se que o *STATCOM* pode aumentar muito o tempo crítico de eliminação do defeito.

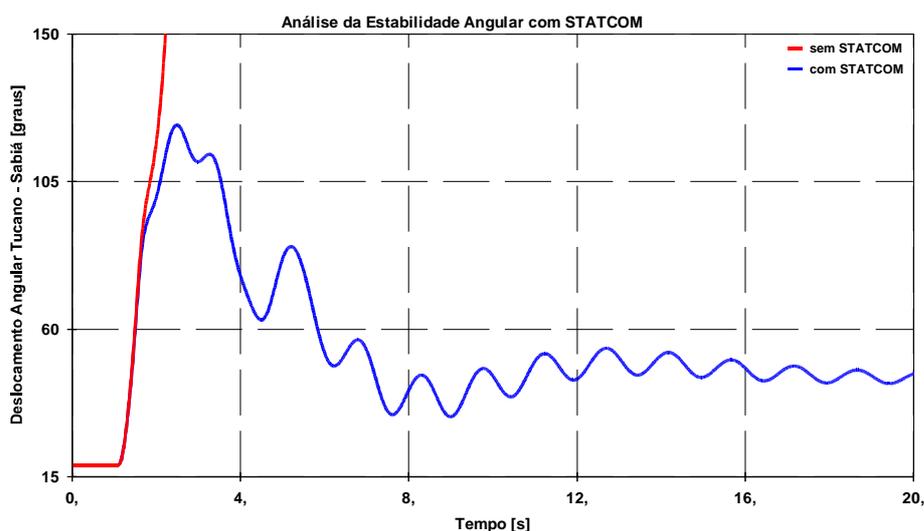


Figura 114 – Ângulo Delta de Tucano – Sabiá para o Sistema Teste 2.

A Figura 115 mostra a frequência no barramento de Tiziu 230 kV para este tempo de eliminação do defeito. Da figura, observa-se como o *STATCOM* melhora a dinâmica do *SEP*, apesar do sistema estar operando próximo de seu limite de estabilidade angular transitória com o *STATCOM*.

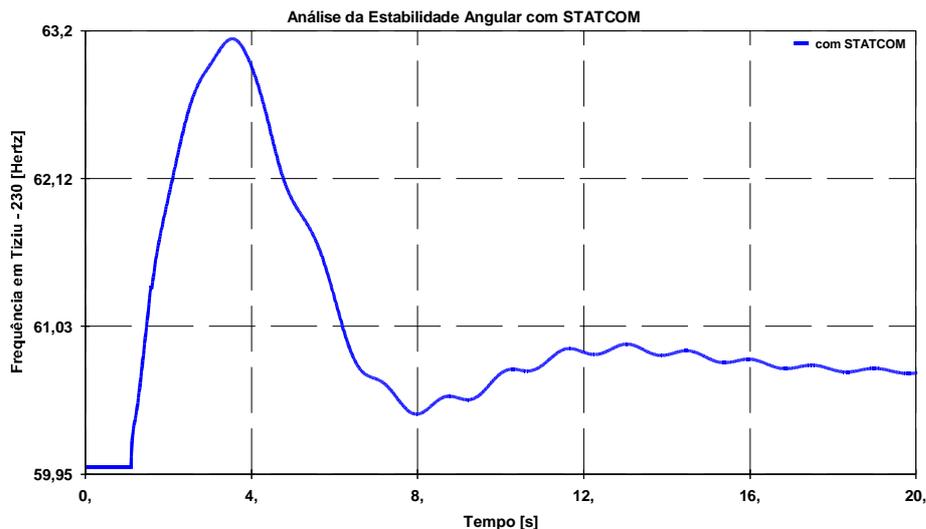


Figura 115 – Frequência em Tiziu 230 kV para o Sistema Teste 2.

A Figura 116 apresenta a tensão no barramento de Arara 440 kV. Esta figura mostra que o *STATCOM* atua na tensão do barramento na condição considerada.

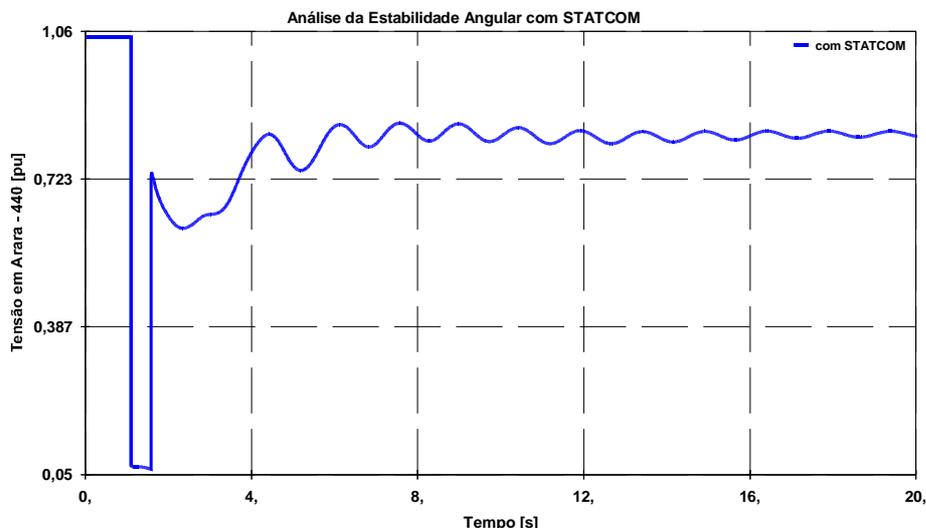


Figura 116 – Tensão em Arara 440 kV para o Sistema Teste 2.

Através da Figura 117, pode-se observar a corrente de eixo em quadratura da máquina de Tucano para o distúrbio analisado. Desta figura, nota-se a maneira pela qual o *STATCOM* pode controlar e com isso evitar uma diminuição desta corrente.

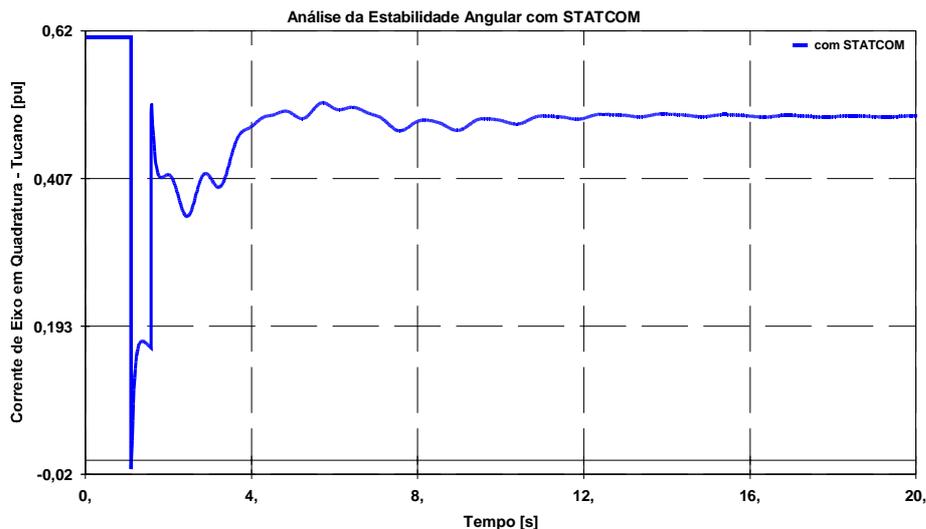


Figura 117 – Corrente I_q em Tucano para o Sistema Teste 2.

Finalmente a Figura 118 mostra a potência reativa de saída controlada do STATCOM. Esta potência reativa de saída, por sua vez é fornecida ao SEP possibilitando o aumento da estabilidade e da dinâmica deste sistema.

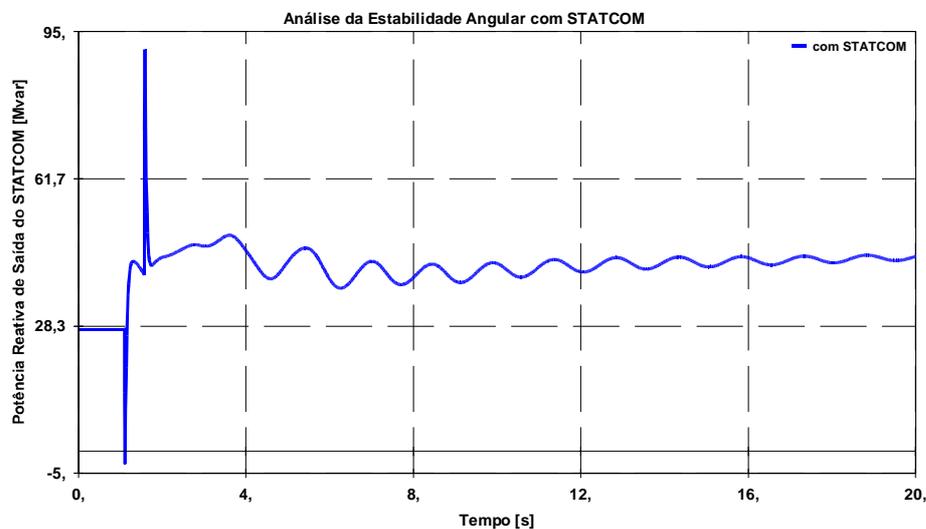


Figura 118 – Potência Reativa de Saída do STATCOM para o Sistema Teste 2.

O STATCOM, através de seu modelo não-linear, mostra-se eficiente e adequado para melhorar o comportamento dinâmico dos SEP quando da ocorrência de distúrbios severos. A sua presença melhora sensivelmente a estabilidade transitória proporcionando aumentos nas margens operativas.

Capítulo 8 – Conclusões

A compensação de potência reativa através de compensadores *FACTS* de conexão *shunt* do tipo *STATCOM* fornece uma solução adequada no que se refere ao controle do fluxo de potência reativa em *SEP*. Além disso, estes compensadores podem melhorar a estabilidade e a dinâmica destes sistemas.

O *STATCOM*, com base nas simulações realizadas com o modelo linearizado, mostra-se eficiente para melhorar o comportamento dinâmico de *SEP* quando da ocorrência de pequenos distúrbios. A sua presença aumenta a estabilidade proporcionando amortecimentos consideráveis das oscilações. As simulações realizadas mostram que um ajuste adequado das variáveis de controle do *STATCOM* influi na atenuação da amplitude e nas conseqüências dos distúrbios. Isto pode ser visto por exemplo, pela potência acelerante. Ainda, com base no subespaço de estados pode-se observar como o sistema apresenta uma menor variação do deslocamento angular e principalmente da velocidade angular para os distúrbios analisados.

O *STATCOM*, através de seu modelo não-linear, também mostra-se adequado para melhorar a estabilidade e a dinâmica dos *SEP* quando da ocorrência de distúrbios severos (não-lineares). Este equipamento *FACTS* melhora sensivelmente a estabilidade transitória e a dinâmica proporcionando um aumento na margem de estabilidade dos sistemas.

As simulações realizadas com o *SEP* denominado teste 1 apresentaram um estudo comparativo da presença do *STATCOM* em relação ao sistema sem compensação, bem como ao mesmo sistema compensado através de um *SVC*. Com isso pôde-se observar como o *STATCOM* é mais eficiente em relação ao *SVC* no que se refere à

melhora do comportamento dinâmico. Ainda no sistema teste 1 pôde-se medir a influência do *STATCOM* na melhora das oscilações pós-defeito.

Por sua vez, as simulações realizadas com o *STATCOM* inserido no sistema denominado teste 2 apresentaram um estudo comparativo para a presença ou não deste compensador num sistema de porte mais elevado. Os resultados obtidos mostram claramente as vantagens da utilização do *STATCOM* com o objetivo de aumentar a estabilidade transitória, aumentando o tempo crítico de eliminação de defeito.

Além disto, o *STATCOM* pode fornecer um suporte de tensão eficiente para a área em que este compensador *shunt* está inserido.

Portanto o *STATCOM* é um componente importante para o controle e a segurança operativa dos *SEP*, proporcionando ganhos substanciais nas margens de operação, em termos da estabilidade angular e da estabilidade de tensão destes sistemas.

Pesquisas futuras devem envolver um aprofundamento na modelagem não-linear e considerar a implementação deste equipamento no Sistema Interligado Nacional (*SIN*). Isto pode ser afirmado pelos promissores resultados obtidos para o modelo não-linear desenvolvido neste trabalho.

Uma outra linha de pesquisa futura, não menos importante, é a investigação da influência de outros dispositivos *FACTS* como o *UPFC* (*Unified Power Flow Controller*). Este equipamento é constituído por dois inversores, um com conexão *shunt* e outro com conexão série, permitindo um controle total sobre o fluxo de potência em sistemas de transmissão.

Referências Bibliográficas

- **Anderson**, P. M., and A. A. Fouad, **1977**. Power System Control and Stability. Ames, Iowa: The Iowa State University Press.
- **Baker**, M. H., B. D. Gemmell, C. Horwill, and D. J. Hanson, **2001**. “STATCOM helps to guarantee a stable system.” IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol. 2 (October-November), 1129-1132.
- **Cañizares**, C. A., **2000**. “Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies.” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2 (January), 1447-1454.
- **Chun**, Li, J. Qirong, X. Xiaorong, and W. Zhonghong, **1998**. “Rule-based control for STATCOM to increase power system stability.” Proceedings of International Conference on Power System Technology (PowerCon), Vol. 1 (August), 372 -376.
- **Chun**, L., J. Qirong, and X. Jianxin, **2000.1**. “Investigation of voltage regulation stability of static synchronous compensator in power systems.” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. (January), 2642-2647.
- **Chun**, L., J. Qirong, and W. Zhonghong, **2000.2**. “Study of STATCOM control for power swings damping improvement.” Proceedings of International Conference on Power System Technology (PowerCon), Vol. 1 (December), 535-540.
- **Farsangi**, M. M., Y. H. Song, and Y. Z. Sun, **2000**. “Supplementary control design of SVC and STATCOM using H_∞ optimal robust control.” Proceedings of International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), (April), 355-360.

- **Garcia, N., M. Madirgal, and E. Acha, 2001.** “Interaction of the *STATCOM* and its associated transformer non-linearity: time domain modelling and analysis.” IEE AC-DC Power Transmission, Conference Publication n°. 458 (November), 355-360.
- **Gyugyi L., 1994.** “Dynamic compensation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage sources.” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, n°. 2 (April), 904-911.
- **Hanson, D. J., C. Horwill, B. D. Gemmell, and D. R. Monkhouse, 2002.** “A *STATCOM*-based relocatable *SVC* project in the *UK* for national grid.” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1 (January), 532-537.
- **Heffron, W. G., and R. A. Phillips, 1952.** “Effect a modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators.” AIEE Transaction.
- **IEEE Task Force Report, 1997.** “Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (*FACTS*).” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, n°. 4 (October), 1848-1853.
- **Kundur, P., 1994.** Power System Stability and Control. EPRI, McGraw-Hill.
- **Larsen, E., N. Miller, S. Nilsson, and S. Lindgren, 1992.** “Benefits of *GTO*-based compensation systems for electric utility applications.” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, n°. 4 (October), 2056-2064.
- **Lehn, P. W., 2002.** “Exact modeling of the voltage source converter.” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, n°. 1 (January), 217-222.

- **Lu, Q., F. Liu, S. Mei, and M. Goto, 2001.** “Nonlinear Disturbance Attenuation control for *STATCOM*.” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3 (January-February), 1323 -1328.
- **Miller, T. J. E., 1982.** Reactive Power Control in Electric Systems. John Wiley & Sons.
- **Mithulananthan, N., C. A. Cañizares, J. Reeve, and G. J. Rogers, 2002.** “Comparison of *PSS*, *SVC* and *STATCOM* controllers for damping power systems oscillations.” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, Issue: 2 (May), 786-792.
- **Ni, Y., and L. Snider, 1997.** “*STATCOM* power frequency model with VSC charging dynamics and its applications in the power systems stability analysis.” Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power Systems Control, Operations and Management (APSCOM), (November), 119-124.
- **Okuno, H., T. Tominaka, S. Fujishima, T. Mitsumoto, T. Kubo, T. Kawaguchi, J.-W. Kim, K. Ikegami, N. Sakamoto, S. Yokouchi, T. Morikawa, T. Tanaka, A. Goto, and Y. Yano, 1999.** “Physical experiments on a ± 10 kVAR *STATCOM* model.” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2 (January-February), 1075-1077.
- **Petitclair, P., S. Bacha, and J.-P. Ferrieux, 1997.1.** “Otimized linearization via feedback control law for a *STATCOM*.” IEEE Annual Meeting of Industry Applications Society, (October), 880-885.
- **Petitclair, P., Y. Besanger, S. Bacha, and N. Hadjsaid, 1997.2.** “*FACTS* modelling and control: applications to the insertion of *STATCOM* on power systems.” IEEE Annual Meeting of Industry Applications Society, (October), 2213-2217.

- **Rahim**, A. H. M. A., S. A. Al-Baiyat, and F. M. Kandlawala, **2001**. “A robust *STATCOM* controller for power system dynamic performance enhancement.” IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2 (July), 887-892.
- **Stevenson**, W. D., **1975**. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. Editora McGraw-Hill, São Paulo.
- **Uzunovic**, E., B. Fardanesh, L. Hopkins, B. Shperling, S. Zelingher, and A. Schuff, **2001**. “*NYP*A convertible static compensator (CSC) application phase I: *STATCOM*.” IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol. 2 (October-November), 1139-1143.
- **Wang**, H. F., and F. J. Swift, **1997**. “A unified model for the analysis of *FACTS* devices in damping power systems oscillations part I: single-machine infinite-bus power systems.” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, nº. 2 (April), 941-946.
- **Wang**, H. F., **1999.1**. “Modeling *STATCOM* into power systems.” International Conference on Electric Power Engineering (PowerTech), (August-September), 302.
- **Wang**, H. F., **1999.2**. “Phillips-Heffron model of power systems installed with *STATCOM* and applications.” IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146 (September), 521-527.
- **Ying**, Y., J. Chen, and Y. Han, **2000**. “*STATCOM* modeling and analysis in damping power system oscillations.” 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), Vol. 2 (July), 756-762.
- **Yonezawa**, H, T. Shimato, M. Tsukada, K. Matsuno, I. Iyoda, J. J. Paserba, and G. F. Reed, **2000**. “Study of a *STATCOM* application for voltage stability

evaluated by dynamic *PV* curves and times simulations.” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2 (January), 1471-1476.

Apêndice A1

O apêndice A1 apresenta as equações adicionais que definem os valores dos sinais de controle do *STATCOM*. Os referidos sinais de controle são chamados de K_p , K_q e K_v . Este apêndice também mostra as expressões que explicitam o valor das derivadas parciais das variáveis de interesse em relação as variáveis de estado e de controle do modelo linearizado do *STATCOM* conectado num *SEP* composto por uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão.

As equações (A.1), (A.2) e (A.3) mostram as equações referentes aos sinais de controle do *STATCOM*.

$$K_p = \frac{C_{pdc}}{M} \cdot \Delta V_{dc} + \frac{C_{pc}}{M} \cdot \Delta c + \frac{C_{pv}}{M} \cdot \Delta \psi \quad (\text{A.1})$$

$$K_q = \frac{C_{qdc}}{T_{d0}} \cdot \Delta V_{dc} + \frac{C_{qc}}{T_{d0}} \cdot \Delta c + \frac{C_{qv}}{T_{d0}} \cdot \Delta \psi \quad (\text{A.2})$$

$$K_v = \frac{K_A \cdot C_{vdc}}{T_A} \cdot \Delta V_{dc} + \frac{K_A \cdot C_{vc}}{T_A} \cdot \Delta c + \frac{K_A \cdot C_{vv}}{T_A} \cdot \Delta \psi \quad (\text{A.3})$$

As equações (A.4) a (A.8) mostram as derivadas parciais da potência elétrica transmitida em relação as variáveis de estado e também em relação as variáveis de controle do modelo linearizado do *STATCOM*.

$$C_1 = \frac{\partial P_e}{\partial \delta} = \left(\frac{E_q' V_\infty \cos \delta}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right)} \right) + \left((X_q - X_d') \left(\frac{E_q' \left(1 - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) V_\infty \cos \delta - V_\infty^2 \cos^2 \delta + V_\infty^2 \sin^2 \delta + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c V_{dc} \cos \psi V_\infty \sin \delta - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c V_{dc} \sin \psi \cos \delta}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right) \left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right)} \right) \right) \quad (A.4)$$

$$C_2 = \frac{\partial P_e}{\partial E_q'} = \left(\frac{V_\infty \sin \delta + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c V_{dc} \cos \psi}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right)} \right) + \left((X_q - X_d') \left(\frac{\left(1 - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) (V_\infty \sin \delta + c V_{dc} \cos \psi)}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right) \left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right)} \right) \right) \quad (A.5)$$

$$C_{pdc} = \frac{\partial P_e}{\partial V_{dc}} = \left(\frac{E_q' \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c \cos \psi}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right)} \right) + \left((X_q - X_d') \left(\frac{E_q' \left(1 - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) c \cos \psi - V_\infty \cos \delta \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c \cos \psi - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c \sin \psi V_\infty \sin \delta - 2 \left(\frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right)^2 c^2 V_{dc} \sin \psi \cos \psi}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right) \left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right)} \right) \right) \quad (A.6)$$

$$C_{pc} = \frac{\partial P_e}{\partial c} = \left(\frac{E_q' \frac{X_2}{X_{TRAFO}} V_{dc} \cos \psi}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right)} \right) + \left((X_q - X_d') \left(\frac{E_q' \left(1 - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) V_{dc} \cos \psi - V_\infty \cos \delta \frac{X_2}{X_{TRAFO}} V_{dc} \cos \psi - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} V_{dc} \sin \psi V_\infty \sin \delta - 2 \left(\frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right)^2 c V_{dc}^2 \sin \psi \cos \psi}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right) \left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right)} \right) \right) \quad (A.7)$$

$$C_{p\psi} = \frac{\partial P_e}{\partial \psi} = \left(\frac{-E_q' \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c V_{dc} \sin \psi}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right)} \right) + \left((X_q - X_d') \left(\frac{-E_q' \left(1 - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) c V_{dc} \sin \psi + V_\infty \cos \delta \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c V_{dc} \sin \psi - \frac{X_2}{X_{TRAFO}} c V_{dc} V_\infty \sin \delta \cos \psi + \left(\frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right)^2 c^2 V_{dc}^2 (\sin \psi - \cos^2 \psi)}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right) \left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \right) \right)} \right) \right) \quad (A.8)$$

Por sua vez, as equações (A.9) a (A.13) também mostram as derivadas parciais da tensão síncrona de eixo em quadratura em relação as variáveis de estado e controle do modelo linearizado do *STATCOM*.

$$C_4 = \frac{\partial E_q}{\partial \delta} = (X_d - X_d') \left(\frac{V_e \cdot \text{sen} \delta}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)} \right) \quad (\text{A.9})$$

$$C_3 = \frac{\partial E_q}{\partial E_q'} = 1 + (X_d - X_d') \left(\frac{\left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)} \right) \quad (\text{A.10})$$

$$C_{qdc} = \frac{\partial E_q}{\partial V_{dc}} = (X_d - X_d') \left(\frac{-\frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot c \cdot \text{sen} \psi}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)} \right) \quad (\text{A.11})$$

$$C_{qc} = \frac{\partial E_q}{\partial c} = (X_d - X_d') \left(\frac{-\frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} \cdot \text{sen} \psi}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X_d' \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)} \right) \quad (\text{A.12})$$

$$C_{q\psi} = \frac{\partial E_q}{\partial \psi} = (X_d - X_d') \left(\frac{-\frac{X_2}{X_{TRAFO}} \cdot c \cdot V_{dc} \cdot \cos \psi}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \cdot \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right)} \right) \quad (\text{A.13})$$

Finalmente as equações (A.14) a (A.18) apresentam as derivadas parciais da tensão terminal da máquina síncrona em relação as variáveis de estado e controle do modelo linearizado do *STATCOM*.

$$C_5 = \frac{\partial V_t}{\partial \delta} = \frac{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(\frac{-\left(\frac{\text{sen} \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \cdot V_{dc} \right) - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right) \cdot E_q'}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \cdot \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right)} \right) \cdot X_d + E_q' \cdot \text{sen} \delta}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \cdot \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right) \right)} \right] \cdot V_\infty \cdot X_d + 2 \cdot \left(\cos \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \cdot V_{dc} + \text{sen} \delta \cdot V_\infty \right) \cdot \cos \delta \cdot \left(\frac{1}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \cdot \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right) \right)^2} \right) \cdot V_\infty \cdot X_q^2}{\sqrt{\left(\frac{-\left(\frac{\text{sen} \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \cdot V_{dc} - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right) \cdot E_q'}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \cdot \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right)} \right) \cdot X_d}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{TRAFO}} + X_d' \cdot \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right) \right)} + E_q' \right)^2 + \left(\frac{\left(\cos \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{TRAFO}} \cdot V_{dc} + \text{sen} \delta \cdot V_\infty \right) \cdot X_q}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{TRAFO}} + X_q' \cdot \left(1 + \frac{X_2}{X_{TRAFO}}\right) \right)} \right)^2}} \quad (\text{A.14})$$

$$C_6 = \frac{\partial V_t}{\partial E'_q} = \frac{\left(\left(\frac{-\left(\frac{\text{sen } \psi.c. X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} \right) - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) E'_q}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)} \right) \cdot X_d + E'_q \left(1 - \frac{\left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right) \cdot X_d \right)}{\sqrt{\left(\left(\frac{-\text{sen } \psi.c. \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) E'_q}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right) \cdot X_d + E'_q \right)^2 + \left(\frac{\left(\cos \psi.c. \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} + \text{sen } \delta \cdot V_\infty \right) \cdot X_q}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right)^2}} \quad (\text{A.15})$$

$$C_{vdc} = \frac{\partial V_t}{\partial V_{dc}} = \frac{\frac{1}{2} \left(\left(\frac{2 \cdot \left(\frac{-\left(\frac{\text{sen } \psi.c. X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} \right) - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) E'_q}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)} \right) \cdot X_d + E'_q \right) \cdot \frac{\text{sen } \psi.c. X_2}{X_{\text{TRAFO}}}}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \cdot X_d + 2 \cdot \left(\cos \psi.c. \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} + \text{sen } \delta \cdot V_\infty \right) \cdot \cos \psi.c. \frac{c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot X_q^2}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)^2}} \right)}{\sqrt{\left(\left(\frac{-\text{sen } \psi.c. \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) E'_q}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right) \cdot X_d + E'_q \right)^2 + \left(\frac{\left(\cos \psi.c. \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} + \text{sen } \delta \cdot V_\infty \right) \cdot X_q}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right)^2}} \quad (\text{A.16})$$

$$C_{vc} = \frac{\partial V_i}{\partial c} = \frac{\frac{1}{2} \left[\frac{2 \left[\frac{\left(-\left(\frac{\text{sen } \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} \right) - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \cdot E'_q \right)}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)} \right] \cdot X_d + E'_q \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}}}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right] \cdot X_d \cdot V_{dc} + 2 \left(\cos \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} + \text{sen } \delta \cdot V_\infty \right) \cdot \cos \psi \cdot \left(\frac{\frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot X_q^2 \cdot V_{dc}}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X_q \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)^2}} \right)}{\sqrt{\left[\frac{\left(-\frac{\text{sen } \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \cdot E'_q \right) \cdot X_d}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} + E'_q \right]^2 + \left[\frac{\left(\cos \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} + \text{sen } \delta \cdot V_\infty \right) \cdot X_q}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X_q \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right]^2}}$$

(A.17)

$$C_{v\psi} = \frac{\partial V_i}{\partial \psi} = \frac{\frac{1}{2} \left[\frac{2 \left[\frac{\left(-\left(\frac{\text{sen } \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} \right) - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \cdot E'_q \right)}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right)} \right] \cdot X_d + E'_q \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}}}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right] \cdot X_d \cdot V_{dc} - 2 \left(\cos \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} + \text{sen } \delta \cdot V_\infty \right) \cdot \text{sen } \psi \cdot \left(\frac{c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot X_q^2 \cdot V_{dc}}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X_q \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)^2}} \right)}{\sqrt{\left[\frac{\left(-\frac{\text{sen } \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} - \cos \delta \cdot V_\infty + \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \cdot E'_q \right) \cdot X_d}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X'_d \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} + E'_q \right]^2 + \left[\frac{\left(\cos \psi \cdot c \cdot \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \cdot V_{dc} + \text{sen } \delta \cdot V_\infty \right) \cdot X_q}{\left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_{\text{TRAFO}}} + X_q \left(1 + \frac{X_2}{X_{\text{TRAFO}}} \right) \right)} \right]^2}}$$

(A.18)

Apêndice A2

O apêndice A2 apresenta os parâmetros utilizados para as simulações realizadas com o modelo não-linear do *STATCOM* e dos *SEP* teste 1 e teste 2.

A Tabela 1 apresenta os dados referentes ao *SEP* teste 1.

Tabela 1 – Dados do *SEP* Teste 1.

Tensão do Barramento Infinito [V_{∞}]	1,00 (pu)
Tensão Terminal da Máquina [V_t]	1,05 (pu)
Potência Inicial Despachada [P_{m0}]	1,00 (pu)
Reatância do Transformador [X_t]	0,10 (pu)
Reatância de Cada Linha de Transmissão [X_l]	0,60 (pu)

Já a Tabela 2 apresenta os dados referentes à máquina síncrona do *SEP* teste 1.

Tabela 2 – Dados da Máquina Síncrona para o *SEP* Teste 1.

Reatância de Eixo Direto da Máquina Síncrona [X_d]	1,2 (pu)
Reatância de Eixo em Quadratura da Máquina Síncrona [X_q]	1,2 (pu)
Reatância Transitória de Eixo Direto da Máquina Síncrona [X'_d]	0,2 (pu)
Constante de Tempo Transitória de Eixo Direto da Máquina Síncrona [T'_{d0}]	5,0 (s)
Constante de Tempo de Inércia da Máquina Síncrona [H]	5,0 (s)
Coefficiente de Amortecimento Mecânico [D]	1,0 (pu)

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de seqüência positiva das linhas de transmissão do *SEP* teste 2.

Tabela 3 – Parâmetros de Seqüência Positiva das Linhas de Transmissão do *SEP* Teste 2.

Tensão (kV)	Base 100 MVA		
	R (%/km)	X (%/km)	Q (MVAR/km)
440	0,0013	0,0159	0,7737
230	0,0256	0,0967	0,1707
138	0,1270	0,2640	0,0621
69	0,5060	0,8700	0,0189

Por sua vez, a Tabela 4 mostra os parâmetros de todas as linhas de transmissão presentes no *SEP* teste 2.

Tabela 4 – Parâmetros das Linhas de Transmissão do SEP Teste 2.

Barramento		Tensão	Comprimento	Reator (MVar) não chaveável	
Lado 1	Lado 2	(kV)	(km)	Lado 1	Lado 2
CANÁRIO	CARDEAL	230	108		
CANÁRIO	TIZIU	230	230		
CARDEAL	TIZIU	230	225		
CARDEAL	CURIÓ	230	180		
SABIÁ	CURIÓ	230	50		
SABIÁ	TIZIU	230	94		
CURIÓ	SANHAÇO	69	6		
Barramento		Tensão	Comprimento	Reator (MVar) não chaveável	
Lado 1	Lado 2	(kV)	(km)	Lado 1	Lado 2
TIZIU	PARDAL	138	40		
SABIÁ	AZULÃO	138	19		
PARDAL	AZULÃO	138	26		
SABIÁ	BICUDO	440	60		
BICUDO	CHOPIM	440	150	40	80
CURIÓ	ARARA	440	450	80	80
CHOPIM	PELICANO	440	240		
PELICANO	CORUJA	230	41		
PELICANO	URUBU	230	65		
URUBU	GARÇA	230	44		
GAVIÃO	GARÇA	230	90		
TUCANO	GAVIÃO	230	85		
TUCANO	ARARA	230	96		
ARARA	PELICANO	230	101		

Já a Tabela 5 apresenta os dados referentes aos transformadores de dois enrolamentos presentes no SEP teste 2.

Tabela 5 – Dados dos Transformadores de Dois Enrolamentos do *SEP* Teste 2.

Barramento	Tensão (kV)		X (%) base do transformador	S (MVA) por unidade	Número de Unidades
	Enrol. 1	Enrol. 2			
CANÁRIO	18	230	11,70	110	5
SABIÁ	13,8	230	13,10	85	4
SABIÁ	230	138	13,76	150	1
CARDEAL	230	88	9,46	80	2
CURIÓ	230	138	14,00	140	1
CURIÓ	230	69	12,57	30	2
CURIÓ	230	69	12,85	30	1
PARDAL	138	69	9,40	120	2
AZULÃO	138	69	8,80	100	1
TIZIU	230	138	13,92	150	2
CHOPIM	440	138	13,27	100	1
TUCANO	13,8	230	12,00	110	3
GAVIÃO	13,8	230	12,40	180	3
ARARA	230	138	11,10	120	1
URUBU	230	138	12,92	100	1

A Tabela 6 mostra os dados referentes aos transformadores de três enrolamentos presentes no *SEP* teste 2.

Tabela 6 – Dados dos Transformadores de Três Enrolamentos do *SEP* Teste 2.

Barramento	Tensão (kV)			X (%) na base do transformador		
	Primário	Secundário	Terciário	P-S	S-T	T-P
CURIÓ	230	440	13,8	14,00	10,50	26,00
ARARA	230	440	13,8	14,00	10,50	26,00
SABIÁ	230	440	13,8	14,00	10,50	26,00
PELICANO	230	440	13,8	14,00	10,50	26,00
BICUDO	440	69	13,8	12,00	3,55	15,50

A Tabela 7 apresenta os dados referentes ao nível e tipo de carga utilizado nas simulações do *SEP* teste 2.

Tabela 7 – Dados das Cargas do SEP Teste 2.

Barramento	Tensão Nominal (kV)	Limite de reativos (MVAr)		Tipo (%)		
		Ativa (MW)	Reativa (MVAr)	P cte	Z cte	I cte
SABIÁ	138	40,0	10,0	100	0	0
CARDEAL	88	120,0	40,0	100	0	0
CURIÓ	138	110,0	40,0	100	0	0
SANHAÇO	69	70,0	20,0	100	0	0
TIZIU	138	160,0	60,0	100	0	0
PARDAL	69	40,0	10,0	100	0	0
AZULÃO	69	40,0	10,0	100	0	0
BICUDO	69	130,0	40,0	100	0	0
CHOPIM	138	90,0	20,0	100	0	0
ARARA	138	110,0	30,0	100	0	0
CORUJA	230	90,0	20,0	100	0	0
URUBU	138	80,0	20,0	100	0	0
GARÇA	230	120,0	50,0	100	0	0

Já a Tabela 8 mostra os dados das máquinas síncronas do SEP teste 2 para estudos de regime permanente.

Tabela 8 – Dados das Máquinas Síncronas (Regime Permanente) do SEP Teste 2.

Barramento	Tensão Nominal (kV)	Potência/máq. Nominal (MVA)	Limite/máq. de reativos (MVAr)		Nº de Unidades	T i p o
			Máximo	Mínimo		
CANÁRIO	18,0	100	35	-35	5	hidráulica
SABIÁ	13,8	75	25	-25	4	t é r m i c a
TUCANO	13,8	115	35	0	5	hidráulica
GAVIÃO	13,8	158	45	-45	4	hidráulica

A Tabela 9, por sua vez, apresenta os dados das máquinas síncronas do SEP teste 2 para estudos de transitório eletromecânico.

Tabela 9 – Dados das Máquinas Síncronas (Regime Transitório) do SEP Teste 2.

Barramento	Base de Potência da Máquina								
	Xd (%)	Xq (%)	X'd (%)	X'q (%)	X''d (%)	Xl (%)	Ra (%)	D (pu)	H (s)
CANÁRIO	101,40	77,00	31,40	-	28,00	16,30	0,50	2,00	3,120
SABIÁ	105,00	98,00	18,50	36,00	13,00	7,00	0,31	2,00	6,187
TUCANO	106,00	61,00	31,50	-	25,00	14,70	0,24	2,00	3,817
GAVIÃO	92,00	51,00	30,00	-	22,00	13,00	0,20	2,00	3,177

Finalmente a Tabela 10 mostra os parâmetros para o modelo não-linear do *STATCOM* utilizados nos estudos de transiente eletromecânico dos *SEP* teste 1 e teste 2.

Tabela 10 – Dados do *STATCOM* para Estudos de Transiente Eletromecânico.

Capacidade do <i>STATCOM</i>	$\pm 50,00$ (MVar)
Rampa de Reatância [X_{SL}]	0,05 (pu)
Ganho Proporcional do Regulador de Tensão [K_p]	10,00 (pu)
Ganho Integral do Regulador de Tensão [K_I]	0,05 (pu)
Corrente Indutiva Máxima [$I_{Lm\acute{a}x}$]	1,00 (pu)
Corrente Capacitiva Máxima [$I_{Cm\acute{a}x}$]	-1,00 (pu)
Constante de Tempo de Chaveamento dos Tiristores <i>GTO</i> [τ_d]	0,04 (s)