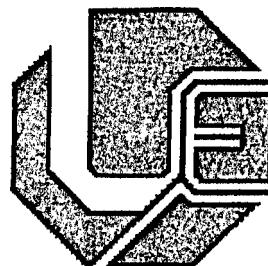


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

MON  
621.3  
P659a  
TES/MEM



**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO STATCOM NO  
COMPORTAMENTO DINÂMICO DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO  
O SIMULADOR “SABER”**

**ADEON CECILIO PINTO**

**SISBI/UFU**



1000208549

**DEZEMBRO  
2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO STATCOM NO  
COMPORTAMENTO DINÂMICO DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO  
O SIMULADOR “SABER”**

Dissertação apresentada por **Adeon Cecilio Pinto** à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca examinadora:

Geraldo Caixeta Guimarães, Dr. (UFU) – Orientador

José Carlos de Oliveira, Dr. (UFU) – Co-Orientador

Adélio José de Moraes , Dr. (UFU)

Sebastião Ércules Melo de Oliveira, Dr. (COPPE/UFRJ)

Uberlândia, 20 de Dezembro de 2002

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO STATCOM NO  
COMPORTAMENTO DINÂMICO DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO  
O SIMULADOR “SABER”**

**ADEON CECILIO PINTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, PhD.  
Orientador

Prof. Alcimar Barbosa Soares, PhD.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Sebastião (in memorian) e Laida, as  
minhas filhas Natália e Larissa, e aos  
meus irmãos Claudemar, Sônia,  
Sebastião Filho e Sonilda pela  
compreensão e carinho, essenciais  
para o desenvolvimento desta  
dissertação.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela companhia em todos os momentos.

Ao professor Geraldo Caixeta Guimarães meu agradecimento pela orientação, apoio e confiança depositada, indispensáveis que fez que objetivos fossem atingidos e este trabalho realizado.

Ao professor José Carlos de Oliveira pelas colaborações em todas as etapas deste trabalho.

À Walkyria pelo inestimável auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos amigos do laboratório de Qualidade, Charles, Jair, Ricardo, Rogério pelas importantes contribuições para a realização deste trabalho.

Aos amigos do grupo de Dinâmica, Adelício e Cláudio pelo constante incentivo.

À Joana, secretária do Curso de Pós-Graduação, pelos esclarecimentos, prestatividade e amizade, e da mesma forma, à Marcília, secretária do Curso de Graduação.

Aos demais amigos e funcionários da faculdade.

À CAPES pelo apoio financeiro.

# **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO STATCOM NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO O SIMULADOR “SABER”**

## **RESUMO**

Praticamente todos os sistemas de energia elétrica do mundo, incluindo o sistema brasileiro, têm experimentado problemas com relação ao alto nível de carregamento das linhas de transmissão, devido a falta de investimento para compensar o crescimento da demanda de potência. Com o objetivo de contribuir neste sentido surgiu, nos anos 80, uma tecnologia denominada FACTS, que empregava elementos passivos como resistores, reatores e capacitores na primeira família destes dispositivos. Nos equipamentos da última geração, estes elementos foram substituídos por inversores modernos, graças aos avanços da eletrônica de potência e, mais especificamente, das chaves semicondutoras de elevada potência como os GTOs. Dentro dos dispositivos FACTS, representados pelos compensadores estáticos avançados, destaca-se o STATCOM, o qual realiza tanto o controle de potência reativa quanto de potência ativa. Este trabalho foi elaborado levando-se em consideração os vários aspectos relacionados com este equipamento FACTS tais como: o princípio de funcionamento, a modelagem matemática e a implementação computacional. Somando a estes propósitos, apresenta-se e discute-se os resultados de investigações computacionais, empregando o simulador “SABER”, com vista à análise do comportamento dinâmico de um sistema elétrico munido com este compensador, quando o sistema é submetido a algumas grandes perturbações.

**Palavras-Chave:** FACTS, inversores, compensação, modelagem, STATCOM, comportamento dinâmico

# **STATCOM INFLUENCE ANALYSIS IN THE DYNAMIC BEHAVIOUR OF ELECTRIC POWER SYSTEMS USING SIMULATOR "SABER"**

## **ABSTRACT**

Almost all the world-wide electric power systems, included the Brazilian one, have experienced problems in relation to the high loading level of transmission lines, caused by the lack of investment to compensate the growing power demand. Aiming to solve this problem, it was developed, in the eighties, a technology denominated FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), which employed passive elements as resistors, reactors and capacitors in its first family. In the most recent generation equipments, these elements were substituted by modern inverters, thanks to the evolution of power electronics and, more specifically, high power semiconductor switches like GTOs. Within the FACTS devices, referred by advanced static compensators, that named STATCOM stands out, since it accomplishes the control of reactive as well as active power. This work was conceived taking into account several aspects related with this FACTS equipment such as: operational principles, mathematical modelling and computational implementation. Adding to these purposes, the results of computer investigations with the simulation package "SABER" are presented and discussed in order to analyses the dynamic behaviour of an electric power system equipped with such compensator, when the system is submitted to some great disturbances.

**Keywords:** FACTS, inverters, compensation, modelling, STATCOM, dynamic behaviour

# SUMÁRIO

<b>Capítulo I – INTRODUÇÃO GERAL</b>	001
1.1 – Considerações Iniciais	001
1.2 – Justificativas para esta Dissertação	002
1.3 – O Estado da Arte	003
1.4 – A Estrutura da Dissertação	005
<b>Capítulo II – SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS – FACTS</b>	007
2.1 – Considerações Iniciais	007
2.2 – Classificação dos Dispositivos FACTS	008
2.3 – Formas para o Controle da Potência Transmitida	012
2.4 – Considerações Finais	019
<b>Capítulo III – MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO COMPENSADOR STATCOM</b>	021
3.1- Considerações Iniciais	021
3.2 – Considerações Gerais sobre a Teoria Vetorial	022
3.2.1 – Representação Vetorial de Grandezas Trifásicas	023
3.2.2 – Representação Vetorial no Sistema Ortogonal Estacionário (d-q)	025
3.2.3 – Representação Vetorial no Sistema Ortogonal Síncrono ( $\alpha$ - $\beta$ )	027
3.3 – Considerações sobre o STATCOM	030
3.4 – Vantagens do STATCOM Sobre o SVC	032

---

**Sumário**

3.5– Princípios Básicos de Operação do STATCOM	034
3.5.1 – Compensação de Potência Reativa	035
3.5.2 – Compensação de Potência Ativa	039
3.5.3 – Compensação Simultânea das Potências Ativa e Reativa	041
3.6 – Circuito Equivalente e Modelagem Matemática	044
3.7 – Sistema de Controle do STATCOM	050
3.8 – Plataforma Computacional Utilizada - o Simulador “SABER”	054
3.9 – Implementação Computacional do STATCOM no SABER	055
3.9.1 – Unidade de Potência	058
3.9.2 – Unidade de Medição	060
3.9.3 – Unidade de Controle	064
3.9.4 – Unidade de Distribuição de Pulso	067
3.10 – Considerações Finais	069
<b>Capítulo IV – DESEMPENHO DINÂMICO DE UM SISTEMA ELÉTRICO SOB A AÇÃO DO STATCOM</b>	071
4.1 – Considerações Iniciais	071
4.2 – Noções de Estabilidade de Sistema Elétrico	072
4.2.1 – Aspectos da Estabilidade de um Sistema Multi-Máquinas	072
4.2.2 – Estabilidade Angular	073
4.2.2.1 – Estabilidade de Regime Permanente	074
4.2.2.2 – Estabilidade de Regime Transitório	075
4.2.2.3 – Estabilidade de Regime Dinâmico	078
4.2.3 – Estabilidade de Tensão	078

---

**Sumário**

<b>4.3 – Efeitos dos Compensadores de Reativos na Estabilização de Sistemas</b>	
Elétricos	079
<b>4.4 – Sistema Elétrico Utilizado</b>	081
4.4.1 – Parâmetros dos Componentes do Sistema Elétrico	082
<b>4.5 – Casos Estudados</b>	087
4.5.1 – Análise de Curto-Circuito Trifásico	087
4.5.2 – Análise de Perda de Geração com Rejeição de Carga	099
4.5.3 – Análise de Perda de Carga	112
4.5.4 – Mudança no Modo de Operação	122
<b>4.6 – Considerações Finais</b>	123
<b>Capítulo V – CONCLUSÕES GERAIS</b>	125
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	128

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de um sistema de transmissão de duas barras	12
Figura 2.2 – Ilustração do Controlador de Fluxo de Potência Generalizado	14
Figura 2.3 – Curvas do comportamento da potência em função do ângulo	16
Figura 3.1 – Representação vetorial de uma variável trifásicas	23
Figura 3.2 – Exemplo de uma trajetória vetorial	24
Figura 3.3 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal estacionário	25
Figura 3.4 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal síncrono	28
Figura 3.5 – Características V-I do Compensador Estático Convencional (SVC)	33
Figura 3.6 – Características V-I do STATCOM	33
Figura 3.7 – Diagrama unifilar da conexão do STATCOM	34
Figura 3.8 – Diagrama fasorial do STATCOM produzindo na saída uma tensão $e_p$ com mesma magnitude da tensão $v_t$ do Sistema CA (sem intercâmbio de potência reativa)	36
Figura 3.9 – Diagrama fasorial do STATCOM fornecendo potência reativa	37
Figura 3.10 – Diagrama fasorial do STATCOM absorvendo potência reativa	38
Figura 3.11 – Diagrama fasorial do STATCOM absorvendo e fornecendo potência ativa	40
Figura 3.12 – Diagrama fasorial de operação do STATCOM fornecendo potência ativa e absorvendo ou fornecendo potência reativa	41
Figura 3.13 – Diagrama fasorial de operação do STATCOM absorvendo potência ativa e absorvendo ou fornecendo potência reativa	42
Figura 3.14 – Diagrama de geração/absorção de potências ativa e reativa do STATCOM	43
Figura 3.15 – Representações dos barramentos CA e CC do STATCOM	45
Figura 3.16 – Vetores das tensões e correntes do STATCOM	48
Figura 3.17 – Diagrama de blocos do controle do STATCOM	53
Figura 3.18 – Esquema do STATCOM implementado	56

Figura 3.19 – Diagrama esquemático do modelo do STATCOM implementado	58
Figura 3.20 – Diagrama de blocos do <i>template Unidade_Potência</i> do STATCOM implementado	59
Figura 3.21 – Diagrama de blocos do <i>template Unidade_Medição</i> do STATCOM implementado	61
Figura 3.22 – Diagrama de blocos do <i>template Transformação_Vetorial_</i> <b>Normalização</b>	61
Figura 3.23 – Diagrama de blocos do <i>template Unidade_Contrôle</i> do STATCOM implementado	65
Figura 3.24 – Diagrama de blocos do <i>template Unidade_Distribuição_Pulsos</i> do STATCOM implementado	67
Figura 4.1 – Diagrama de potência transferida X ângulo de potência com o efeito da excitação	75
Figura 4.2 (a) – Diagrama potência X ângulo de carga	76
Figura 4.2 (b) – Diagrama ângulo de potência X tempo	76
Figura 4.3 – Diagrama mostrando o máximo ângulo de carga que pode ser atingido para que a máquina permaneça estável	77
Figura 4.4 – Diagrama unifilar do sistema simulado	82
Figura 4.5 – Modelo do regulador de tensão IEEE Tipo II	84
Figura 4.6 – Modelo do regulador de velocidade de turbina térmica/hidráulica	85
Figura 4.7 – Diagrama unifilar do sistema simulado com curto-círcuito na barra 2	88
Figura 4.8(a) – Tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado – curto- círcuito	89
Figura 4.8(b) – <i>Zoom</i> da tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado durante o curto-círcuito	90
Figura 4.9(a) – Tensão na barra 2 <b>sem</b> a presença do STATCOM – curto-círcuito	90
Figura 4.9 (b) – <i>Zoom</i> da tensão na barra 2 <b>sem</b> a presença do STATCOM durante o curto-círcuito	90
Figura 4.10(a) – Tensão terminal do gerador 1 – curto-círcuito	91
Figura 4.10(b) – <i>Zoom</i> da tensão terminal do gerador 1 durante o curto-círcuito	92
Figura 4.11(a) – Tensões nas barras – curto-círcuito	92

Figura 4.11(b) – <i>Zoom</i> das tensões nas barras durante o curto-circuito	92
Figura 4.12(a) – Potência Ativa fornecida pelos geradores – curto-circuito	94
Figura 4.12(b) – <i>Zoom</i> da potência Ativa fornecida pelos geradores durante o curto-circuito	94
Figura 4.13(a) – Potência Reativa fornecida pelos geradores – curto-circuito	94
Figura 4.13(b) – <i>Zoom</i> da potência Reativa fornecida pelos geradores durante o curto-circuito	95
Figura 4.14(a) – Potência Ativa e Reativa do STATCOM – curto-circuito	96
Figura 4.14(b) – <i>Zoom</i> da potência Ativa e Reativa do STATCOM durante o curto-circuito	96
Figura 4.15(a) – Tensão CC do capacitor – curto-circuito	97
Figura 4.15(b) – <i>Zoom</i> da tensão CC do capacitor durante o curto-circuito	97
Figura 4.16 – Velocidades dos geradores síncronos – curto-circuito	98
Figura 4.17(a) – Freqüências das barras de geração – curto-circuito	98
Figura 4.17(b) – <i>Zoom</i> das freqüências das barras de geração durante o curto-circuito	99
Figura 4.18 – Diagrama unifilar do sistema simulado ilustrando a perda do gerador 2 e a carga 2 rejeitada	100
Figura 4.19(a) – Tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado – perda Geração	101
Figura 4.19(b) – <i>Zoom</i> da tensão na barra 2 durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	101
Figura 4.20(a) – Tensão na barra 2 <b>sem</b> a presença do STATCOM – perda geração	102
Figura 4.20(b) – <i>Zoom</i> da tensão na barra 2 <b>sem</b> a presença do STATCOM durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	102
Figura 4.21(a) – Tensão terminal do gerador 1 – perda geração	103
Figura 4.21(b) – <i>Zoom</i> da tensão terminal do gerador 1 durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	103
Figura 4.22(a) – Tensões nas barras – perda geração	103
Figura 4.22(b) – <i>Zoom</i> das tensões nas barras durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	104

Figura 4.23(a) – Potência Ativa fornecida pelos geradores – perda geração	105
Figura 4.23(b) – <i>Zoom</i> da potência Ativa fornecida pelos geradores durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	106
Figura 4.24(a) – Potência Reativa fornecida pelos geradores – perda geração	106
Figura 4.24(b) – <i>Zoom</i> da potência Reativa fornecida pelos geradores durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	106
Figura 4.25(a) – Potência Ativa e Reativa do STATCOM – perda geração	107
Figura 4.25(b) – <i>Zoom</i> da potência Ativa e Reativa do STATCOM durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	107
Figura 4.26(a) – Tensão CC do capacitor – perda geração	108
Figura 4.26(b) – <i>Zoom</i> da tensão CC do capacitor durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	108
Figura 4.27 – Velocidades dos geradores síncronos – perda geração	109
Figura 4.28(a) – Freqüências das barras de geração – perda geração	110
Figura 4.28(b) – <i>Zoom</i> das freqüências das barras de geração durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2	110
Figura 4.29 – Potências Ativa e Reativa consumida pela carga 1 – perda geração	111
Figura 4.30 – Correntes na armadura do gerador 1 – perda geração	111
Figura 4.31 – Diagrama unifilar do sistema simulado ilustrando a perda da carga 3	112
Figura 4.32(a) – Tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado – perda de carga	113
Figura 4.32(b) – <i>Zoom</i> da tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado durante a perda da carga 3	113
Figura 4.33(a) – Tensão terminal do gerador 1 – perda de carga	114
Figura 4.33(b) – <i>Zoom</i> da tensão terminal do gerador 1 durante a perda da carga 3	114
Figura 4.34(a) – Tensões nas barras – perda de carga	114
Figura 4.34(b) – <i>Zoom</i> das tensões nas barras durante a perda da carga 3	115
Figura 4.35(a) – Potência Ativa fornecida pelos geradores – perda de carga	116
Figura 4.35(b) – <i>Zoom</i> da potência Ativa fornecida pelos geradores durante a perda da carga 3	116

Figura 4.36(a) – Potência Reativa fornecida pelos geradores – perda de carga	117
Figura 4.36(b) – <i>Zoom</i> da potência Reativa fornecida pelos geradores durante a perda da carga 3	117
Figura 4.37(a) – Potência Ativa e Reativa do STATCOM – perda de carga	117
Figura 4.37(b) – <i>Zoom</i> da potência Ativa e Reativa do STATCOM durante a perda da carga 3	118
Figura 4.38(a) – Tensão CC do capacitor – perda de carga	119
Figura 4.38(a) – <i>Zoom</i> da tensão CC do capacitor durante a perda da carga 3	119
Figura 4.39 – Velocidades dos geradores síncronos – perda de carga	119
Figura 4.40(a) – Freqüências das barras de geração – perda de carga	120
Figura 4.40(b) – <i>Zoom</i> das freqüências das barras de geração durante a perda da carga 3	120
Figura 4.41 – Fluxos de potência reativa nas linhas de transmissão – perda de carga	121
Figura 4.42 – Tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado – mudança no modo de operação	123
Figura 4.43 – Potência Reativa do STATCOM – mudança no modo de operação	123

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Operação do STATCOM	51
Tabela 4.1 – Dados dos geradores síncronos	83
Tabela 4.2 – Dados dos reguladores de tensão	84
Tabela 4.3 – Dados dos reguladores de velocidade	85
Tabela 4.4 – Dados das cargas	85
Tabela 4.5 – Dados das linhas	86
Tabela 4.6 – Dados dos transformadores (conexão Δ-Y)	86
Tabela 4.7 – Dados do STATCOM	86
Tabela 4.8 – Casos analisados	87

# **Capítulo I**

## **INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

As interconexões de sistemas elétricos têm sido feitas objetivando minimizar o número de unidades geradoras, visando atender a maior quantidade de cargas com um certo grau de confiabilidade. Caso contrário, seria necessário mais geração para suprir as cargas com a mesma confiabilidade. Sob esse aspecto, e sob o ponto de vista econômico, a transmissão tem sido alvo de pesquisas. À medida que a transferência de potência (demanda e geração) cresce, o sistema fica mais complexo tornando-se, assim, menos confiável. Neste caso, os controles podem ser inadequados para permitir a utilização de todo o potencial das linhas de transmissão existentes.

Diante desses fatos e buscando soluções para o problema de suprimento elétrico, o EPRI (*Electric Power Research Institute*), juntamente com algumas concessionárias americanas, propôs o conceito FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), que é uma filosofia de transporte de energia elétrica por Sistemas de Transmissão CA Flexíveis.

## 1.2 – JUSTIFICATIVAS PARA ESTA DISSERTAÇÃO

Devido ao fato dos compensadores estáticos avançados serem recentes, esta filosofia de compensação ainda encontra-se em fase de pesquisa, principalmente no que tange as várias estratégias de controle, tipos de inversores, injeção de harmônicos, etc. Neste sentido este trabalho foi concebido com intuito de realizar um estudo mais completo, para avaliar a atuação do compensador estático avançado paralelo ou STATCOM, quanto aos efeitos positivos (ou negativos) no comportamento dinâmico de um sistema elétrico.

Como a tecnologia empregada neste equipamento é 100 % importada, surge então a necessidade de estudos preliminares que possam garantir e justificar a necessidade deste antes das decisões de compromisso e compra desta tecnologia. Esta etapa deve anteceder a fase de implementação junto à um sistema real e, por este motivo só pode ser realizada computacionalmente. Disto decorre a busca de um modelo matemático que represente fielmente o equipamento e o sistema, e subsequentemente, sua implementação computacional empregando-se, preferencialmente, técnicas no domínio do tempo.

---

### 1.3 – O ESTADO DA ARTE

Apesar dos dispositivos empregados para os FACTS serem fundamentados em tecnologia relativamente recente, devido o rápido avanço tecnológico, há uma grande variedade de dispositivos empregando este conceito. As vantagens de se empregar os sistemas de transmissão flexíveis são claramente comentadas em [2, 3, 24 e 29].

As referências [1 – 3], [24] e [29] contemplam equipamentos que usam tiristores convencionais, além dos elementos passivos de circuitos como capacitores e indutores. Estes dispositivos são: RCT (Reator Controlado a Tiristor), CCT (Capacitor Chaveado a Tiristores), CE ou SVC (Compensador Estático de Reativos ou *Static var Compensator*), TSSC (Capacitor Série Chaveado a Tiristores), TCSC (Capacitor Série Controlado a Tiristores) e Defasadores. Estas mesmas referências fazem uma comparação entre esta família de compensadores, designados por convencionais, e a nova geração, dos FACTS, que são os compensadores estáticos avançados, os quais empregam os GTOs (*Gate Turn Off Thiristors*). Os produtos desta última tecnologia compreendem: ASVC (*Advanced Static var Compensator*), ASC (*Advanced Series Compensator*) e UPFC (*Unified Power Flow Controller*). As referências [4] e [5] tratam dos conceitos e princípios básicos de funcionamento dos compensadores avançados paralelo, série e unificado. Já aquelas identificadas por [2], [6] e [29] investigam a modelagem destes compensadores avançados empregando conceitos da teoria vetorial e potência instantânea.

A citação do uso experimental e comercial de unidades STATCOM é feita em [7 – 9]. A referência [8] descreve um destes dispositivos, oriunda de uma parceria entre o EPRI (*Electric Power Research Institute*), a TVA (*Tennessee Valley Authority*) e o WSTC (*Westinghouse Science and Technology Center*), nos Estados Unidos. Este desenvolvimento ocorreu por volta de 1996, e gerou um equipamento de potência  $\pm 100$  Mvar, baseado em tecnologia GTO. Em 1997, a AEP (*American Electric Power*), juntamente com o EPRI e a Westinghouse, começaram o desenvolvimento e instalação do primeiro UPFC de alta potência no mundo, com duas pontes inversoras de  $\pm 160$  Mvar. A ponte inversora paralela (STATCOM) foi posta em funcionamento primeiramente, e só em 1998, a ponte série foi disponibilizada [10 – 12].

Em relação aos dispositivos, destaca-se em [13] a justificativa do emprego do STATCOM como suporte de tensão e, em [8] para proporcionar amortecimentos para as constantes oscilações encontradas nas referidas regiões. Este último propósito visa também melhorar a estabilidade transitória dos sistemas de potência, como pode ser visto em [14 – 17]. Os artigos [18] e [19] sugerem o emprego do STATCOM para compensação de *Flicker* proveniente da operação de fornos a arco e em geração eólica, respectivamente.

Devido ao fato dos compensadores avançados utilizarem pontes inversoras, tem-se, como consequência, a injeção de harmônicos no sistema. Neste sentido, os estudos que visam obter melhores topologias, diminuindo assim a injeção de harmônicos, são baseadas em inversores de seis e doze pulsos, multi-níveis ou PWM [4], [8], [20 – 22].

---

Embora estes aspectos sejam observados, a questão da geração de harmônicos não será enfocada nesta dissertação.

#### **1.4– A ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo introdutório, designado por capítulo I, esta dissertação encontra-se assim estruturada:

#### **CAPÍTULO II – Sistemas de Transmissão CA Flexíveis – FACTS**

Este capítulo é dedicado a apresentar uma síntese a respeito dos conceitos atrelados à tecnologia FACTS. Neste sentido, inicialmente tem-se uma caracterização dos equipamentos que empregam tal filosofia, tipos de conexão, semicondutor empregado, etc. Posteriormente através de um modelo generalizado de compensador, demonstra-se as diferentes maneiras de atuação dos vários dispositivos FACTS.

#### **CAPÍTULO III – Modelagem e Implementação Computacional do compensador STATCOM**

Sendo o STATCOM uma inovação tecnológica, torna-se necessário uma descrição teórica do equipamento relatando as partes referentes à constituição física como também o princípio de funcionamento e as características operacionais. Além disto

---

este capítulo descreve toda a implementação computacional na plataforma computacional SABER utilizando a teoria vetorial, uma vez que nela se baseia toda a malha de controle empregada na sua operação.

## **CAPÍTULO IV – Desempenho Dinâmico de um Sistema Elétrico sob a Ação do STATCOM**

Considerando-se a importância dos estudos computacionais no comportamento dos sistemas elétricos de potência, este capítulo apresenta, além de uma breve discussão referente à estabilidade de sistemas elétricos de potência, os resultados de simulações conduzidas em uma sistema elétrico hipotético. Assim é feita uma completa análise do comportamento de um sistema na presença do STATCOM, comprovando a modelagem implementada no capítulo anterior e, a eficácia do dispositivo para a compensação de distúrbios.

## **CAPÍTULO V – Conclusões Gerais**

Finalmente, este capítulo destina-se a apresentar as principais discussões e conclusões finais dos vários capítulos que formam o corpo desta dissertação. Além disso, serão ressaltadas questões associadas às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

---

## **Capítulo II**

### **SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS – FACTS**

#### **2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Buscando soluções alternativas para os problemas de suprimento elétrico, algumas pesquisas tem sido direcionadas a fim de tornarem os sistemas de transmissão de energia elétrica mais aproveitáveis, e portanto, postergando a necessidade de investimento no setor energético. Neste sentido, vem sendo aplicada a proposta denominada “*Flexible AC Transmission Systems - FACTS*”, que é uma filosofia que emprega equipamentos da eletrônica de potência em sistema de transmissão para controle em tempo real do fluxo de potência e prover suporte de tensão. Desta maneira, o problema se resume em otimizar o fluxo de potência nas linhas de transmissão em tempo real. Deve observar que, com o avanço da eletrônica de potência, além dos dispositivos convencionais existentes, atualmente podem ser encontrados os “GTOs” (*Gate Turn Off Thiristors*), permitindo o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos para sistemas de potência mais elevada [30].

Este capítulo tem por meta abordar os principais aspectos relacionados aos sistemas de transmissão CA flexíveis (FACTS) e, com isso, identificar exatamente em que área, ou geração, dos FACTS, o equipamento em estudo neste trabalho se encontra

classificado. Para tanto, apresenta-se uma descrição teórica da tecnologia FACTS empregada em diversos equipamentos de compensação de sistema de potência, desde os mais antigos até os mais recentes. É também descrito de forma clara os princípios básicos dos tipos de compensação, utilizando um controlador de fluxo de potência generalizado.

## 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS FACTS

Um compensador pode ser classificado como dispositivo FACTS se ele for capaz de controlar, em tempo real, pelo menos um dos três seguintes parâmetros: tensão terminal ( $V_s$  ou  $V_r$ ), impedância ou reatância da linha ( $X_{sr}$ ) e ângulo de potência( $\delta$ ), da equação da potência transmitida ( $P_{sr}$ ) entre dois nós ou barras de um sistema elétrico.

$$P_{sr} = \frac{V_s V_r}{X_{sr}} \operatorname{sen} \delta \quad (2.1)$$

Dentre os diversos dispositivos comercialmente disponíveis destacam-se:

### (a) - Compensadores Síncronos

Um compensador síncrono é uma máquina síncrona funcionando como motor sem carga no seu eixo. Assim, a potência ativa consumida corresponde às perdas elétricas, mecânicas e rotacionais. Já sua potência reativa varia com a tensão de excitação a qual

é imposta pela excitatriz ao enrolamento de campo (rotor), podendo esta máquina gerar ou consumir tal potência. Aumentando a tensão de excitação acima do valor de referência (este valor representa um ponto de neutralidade, condição na qual o compensador síncrono não gera nem absorve reativos) a máquina fornece potência reativa, comportamento similar ao capacitor, daí ser às vezes denominado de condensador síncrono. Caso a tensão de excitação seja reduzida abaixo do valor de referência, a energia magnética torna-se insuficiente para seu funcionamento e o compensador síncrono passa a absorver potência reativa da rede, comportamento similar ao reator.

Vantagens do compensador síncrono:

- Boa tecnologia existente;
- Bom amortecimento de todas as freqüências estranhas à rede;
- Impedância interna indutiva;
- Capacidade de injetar elevadas correntes capacitivas durante períodos transitórios de subtensão.

Desvantagens do compensador síncrono:

- Necessidade de um grande local de instalação (sala de máquina);
- Se ocorrer um falta toda a compensação é perdida;
- Baixa impedância de curto circuito;
- Tempo de resposta lento;
- Instabilidade rotacional;
- Manutenções freqüentes, principalmente preventivas.

### (b) – Compensadores Estáticos

Devido os avanços nos semicondutores e também nos sistemas de controle, os compensadores síncronos foram sendo substituídos pelos compensadores estáticos. Quando comparados com os compensadores síncronos, estes, além de fornecer uma resposta mais rápida, sem possibilidade de instabilidade eletro-mecânica, estes requerem menos manutenção já que não possuem partes rotativas.

O nome estático se deve ao fato dos dispositivos não possuírem partes rotativas, sendo formados pela combinação de elementos passivos de compensação de reativos, como reatores e capacitores, configurando um sistema de compensação, destinados a variar o intercâmbio de potência reativa de uma determinada barra com o restante do sistema. A sua principal característica é que pode absorver ou fornecer potência reativa, dentro de sua faixa nominal de operação.

Os principais Compensadores Estáticos atualmente empregados podem ser classificados segundo o tipo de conexão com o sistema:

- Conexão em derivação:
  - Reator Controlado a Tiristor (RCT);
  - Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT);
  - Compensador Estático de Reativo (CE).

- Conexão em série:
  - Capacitor Série Chaveado a Tiristor (TSSC);
  - Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC).

### (c) – Compensadores Estáticos Avançados

Os compensadores estáticos avançados empregam uma filosofia de geração e absorção de reativos diferente daquela utilizada pelos compensadores estáticos convencionais. Enquanto os equipamentos anteriormente enfocados utilizam elementos passivos (reatores e capacitores), os avançados utilizam inversores, principalmente os VSI (*Voltage-Sourced Inverter*). Desta forma estes atuam como uma fonte de potência reativa controlável, além de permitir troca de potência ativa com o sistema de potência de modo simultâneo e independente do processo de compensação de reativos. Um dos equipamentos desta família constitui-se no cerne deste trabalho, sendo, portanto, detalhado teoricamente no próximo capítulo.

Os equipamentos modernos, mais empregados são:

- Compensador var Estático Avançado (ASVC – *Advanced Static var Compensator*) também conhecido como STATCOM ou ainda STATCON, o qual é o elemento chave desta dissertação;
- Compensador Série Avançado (ASC - *Advanced Series Compensator*), o qual como diz o próprio nome, é conectado em série com a linha de transmissão;

➤ Controlador de Fluxo de Potência Unificado (UPFC – *Unified Power Flow Controller*), o qual é constituído por dois inversores, desempenhando as mesmas funções executadas pelo STATCOM e ASC.

### 2.3 – FORMAS PARA O CONTROLE DA POTÊNCIA TRANSMITIDA

A figura 2.1 apresenta duas barras de um sistema genérico ligadas por uma linha de transmissão.

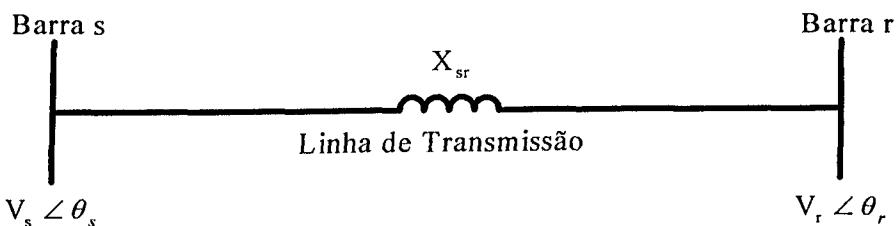


Figura 2.1 – Esquema de um sistema de transmissão de duas barras

Desprezando-se a resistência, a potência ativa transmitida pela linha é dada, simplificadamente, pela equação (2.1) reescrita em (2.2).

$$P_{sr} = \frac{V_s V_r}{X_{sr}} \operatorname{sen} \delta \quad (2.2)$$

Onde:

$P_{sr}$  – Potência que flui da barra s para a barra r;

$V_s$  – Tensão na barra s (magnitude);

$V_r$  – Tensão na barra r (magnitude);

$\theta_s$  – Ângulo de fase da tensão  $V_s$ ;

$\theta_r$  – Ângulo de fase da tensão  $V_r$ ;

$\delta$  – Ângulo de carga ( $\theta_s - \theta_r$ );

$X_{sr}$  – Impedância (reatância) da linha entre as barras s e r.

A expressão (2.2) evidencia três possibilidades para alterar a potência transmitida através da linha de transmissão que conecta as barras s e r. São elas:

- a) o ângulo de carga, isto é, ângulo entre as fases das tensões nas barras terminais;
- b) a magnitude das tensões das barras terminais;
- c) a impedância equivalente das linhas de transmissão.

Os dispositivos FACTS caracterizam-se exatamente pela sua intervenção nestas grandezas supracitadas.

O conceito básico adotado para transmissão de potência controlada em tempo real estabelece que os parâmetros do sistema de potência, os quais determinam o fluxo de potência, podem ser alterados instantaneamente. Desta forma é possível obter as relações básicas de potência para um modelo de duas máquinas, como mostrado na figura 2.2.

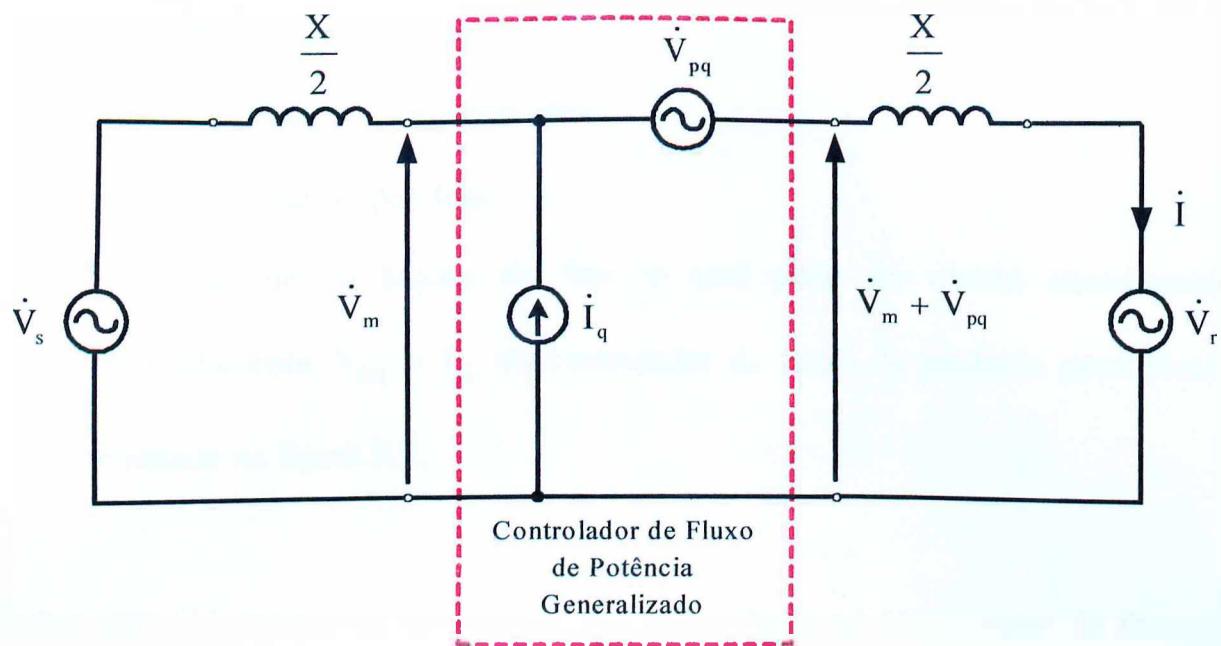


Figura 2.2 - Ilustração do Controlador de Fluxo de Potência Generalizado

A figura 2.2 mostra o gerador terminal emissor com fasor de tensão  $\dot{V}_s$ , o gerador terminal receptor com fasor de tensão  $\dot{V}_r$ , a impedância da linha de transmissão  $X$  (desprezando a resistência) dividida em duas seções ( $X/2$ ), e um controlador de fluxo de potência generalizado (por conveniência) no ponto médio da linha. O controlador de fluxo de potência consiste de dois elementos controláveis, uma fonte de tensão ( $\dot{V}_{pq}$ ), inserida em série com a linha, e uma fonte de corrente ( $\dot{I}_q$ ), conectada em paralelo com a linha no ponto médio. Ambas, a magnitude e o ângulo da tensão  $\dot{V}_{pq}$  são livremente variáveis, considerando que apenas a magnitude da corrente  $\dot{I}_q$  é variável; seu ângulo de fase está fixado em  $90^\circ$  em relação a tensão  $\dot{V}_m$  do ponto médio (adotado como referência) [28].

A figura 2.2 evidencia quatro formas para a transmissão da potência. São elas:

- (1) Sem compensação de linha;
- (2) Com compensação capacitiva série;
- (3) Com compensação paralela;
- (4) Com controle de ângulo de fase, o qual pode ser obtido especificando adequadamente  $\dot{V}_{pq}$  e  $\dot{i}_q$  no controlador de fluxo de potência generalizado mostrado na figura 2.2.

Para o caso (1), assume-se que ambos  $\dot{V}_{pq}$  e  $\dot{i}_q$  são zeros (controlador de fluxo de potência está inativo). Então a potência transmitida entre os geradores emissor e receptor pode ser obtida pela expressão (2.2) transcrita anteriormente. Para  $V_r = V_s = V$ , tem-se:

$$P_1 = \frac{V^2}{X} \operatorname{sen} \delta \quad (2.3)$$

Onde  $\delta$  é o ângulo entre os fasores de tensão terminal emissor e receptor. A Potência  $P_1 = f(\delta)$  está mostrada na figura 2.3 (curva azul).

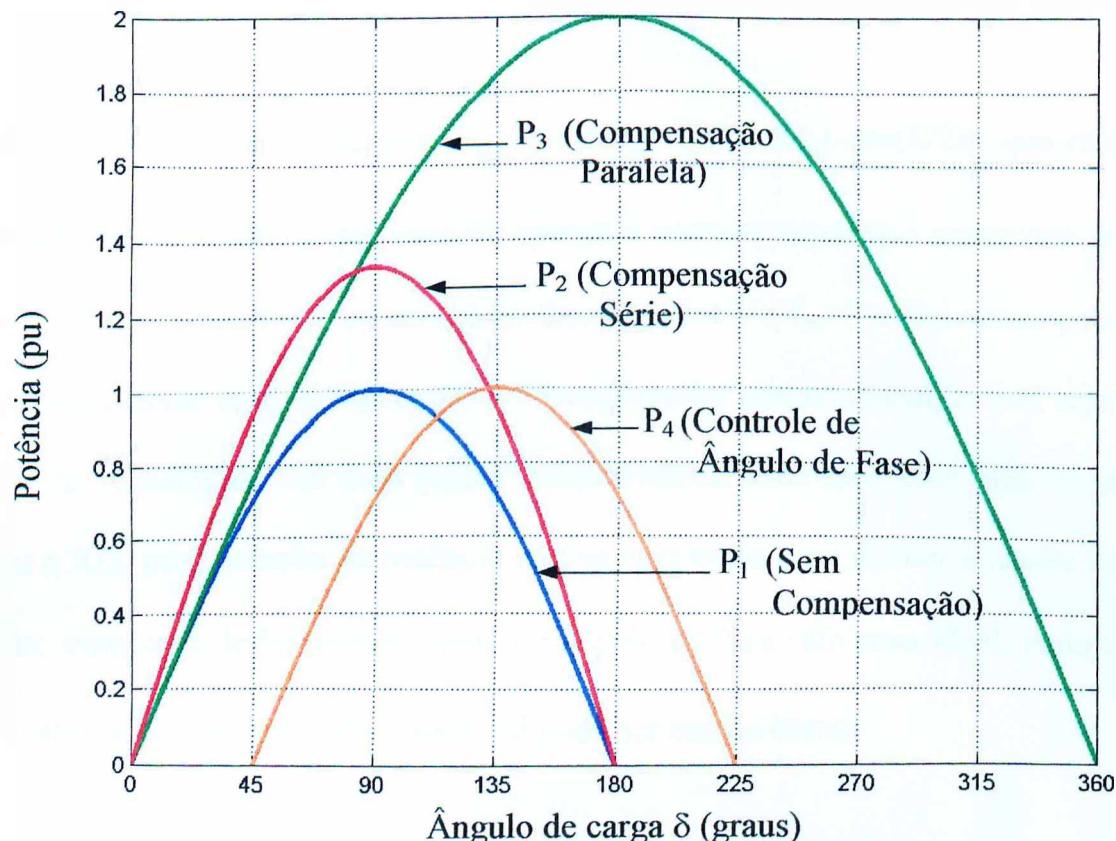


Figura 2.3 – Curvas do comportamento da potência em função do ângulo

Para o caso (2), admite-se que  $\dot{I}_q = 0$  e  $\dot{V}_{pq} = -jkX\dot{I}$ , que representa uma tensão em série com a linha e atrasada da corrente de  $90^\circ$ , com uma amplitude proporcional às magnitudes da corrente e impedância da linha. Em outras palavras, a fonte de tensão atua precisamente na freqüência fundamental como um capacitor, proporcionando, assim, uma compensação série. O grau de compensação é definido pelo coeficiente  $k$  ( $0 < k < 1$ ). Nestas condições, a potência passa a ser dada pela expressão (2.4).

$$P_2 = \frac{V^2}{X(1-k)} \sin \delta \quad (2.4)$$

A potência  $P_2=f(\delta)$  está indicada, na figura 2.3, com  $k = 0,25$  (curva vermelha).

Para o caso (3), assume-se que  $\dot{V}_{pq} = 0$  e  $\dot{I}_q = -j(4V/X)[1-\cos(\delta/2)]$ , que representa uma fonte de corrente  $I_q$  que absorve apenas a corrente capacitativa necessária para que a magnitude da tensão do ponto médio fique igual a  $V$  ( $V_m=V$ ). Em outras palavras, a fonte de corrente reativa atua como um compensador paralelo ideal, o qual segmenta a linha de transmissão em duas partes independentes, cada uma com uma impedância igual a  $X/2$ , para geração da potência reativa necessária para manter a tensão do ponto médio constante, independentemente do ângulo  $\delta$ . Para este caso ideal, compensação do ponto médio, a expressão  $P$  versus  $\delta$  pode ser escrita como:

$$P_3 = 2 \frac{V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.5)$$

A potência  $P_3=f(\delta)$  é ilustrada na figura 2.3 (curva verde).

Para o caso (4), assume-se que  $\dot{I}_q = 0$  e  $\dot{V}_{pq} = \pm jV_m \cdot \operatorname{tg}\alpha$  (muito embora a tensão de saída sofra pequena alteração) é adicionada em quadratura com a tensão do ponto médio ( $V_m$ ), produzindo, assim, um defasamento angular  $\alpha$  (atrasado ou adiantado). A idéia básica do defasador é manter a potência transmitida no nível desejado, independentemente do ângulo  $\delta$ , em uma escala de operação pré-determinada. Assim, por exemplo, a potência pode ser mantida no seu valor de pico depois do ângulo  $\delta$  exceder  $\pi/2$  (o ângulo da potência de pico) através do controle da amplitude da tensão

em quadratura  $V_{pq}$ , assim que o ângulo de fase efetivo ( $\delta-\alpha$ ) entre as tensões terminais do emissor e receptor seja de  $\pi/2$ . Desta maneira, a potência transmitida pode ser aumentada significativamente, embora o defasador, por si, não aumente o limite de transmissão de potência em regime permanente.

Considerando ( $\delta-\alpha$ ) como o ângulo de fase efetivo entre as tensões terminais do emissor e receptor, a potência transmitida  $P$  pode ser expressa como segue:

$$P_4 = \frac{V^2}{X} \operatorname{sen}(\delta - \alpha) \quad (2.6)$$

A potência  $P_4=f(\delta)$  é fornecida na figura 2.3 com  $\alpha = 45^\circ$  (curva laranja).

As expressões (2.4) a (2.6) definem as relações entre as potências transmitidas e os ângulos de transmissão, com compensação série e derivação, e controlador de ângulo de fase. Deve ser notado que estas equações são válidas para condições de regime permanente, isto é, elas definem a potência transmitida para dadas tensões terminais, impedância de linha, e ângulo. A idéia do conceito de transmissão CA flexível é o controle desse parâmetros em tempo real e, com isto, assim variar (aumentar ou diminuir) quase instantaneamente a potência transmitida, prevalecendo as condições do sistema. A habilidade de controlar rapidamente a potência, dentro de limites definidos apropriadamente, pode aumentar a estabilidade transitória (primeira oscilação), como também o amortecimento do sistema. Aumentando a estabilidade

transitória e o amortecimento permite-se um correspondente aumento na potência de regime permanente transmissível e assim um maior utilização do sistema.

## 2.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar uma visão geral da filosofia de compensação denominada de FACTS. Para tanto, o termo FACTS foi conceituado e apresentadas as justificativas da necessidade de aplicação de tais recursos.

Outro ponto contemplado foi a apresentação, de maneira simples, de alguns equipamentos enquadrados na tecnologia FACTS. Nesse contexto, pertencendo a penúltima geração de compensadores estáticos, foram citados os dispositivos baseados em tiristores, quais sejam: RCT, CCT e CE para compensação paralela, TSSC e TCSC para compensação série. Já compondo a última geração dos compensadores estáticos, estes, baseados em inversores de potência, foram apresentados os dispositivos ASVC (ou STATCOM) para compensação paralela, ASC para compensação série, e UPFC, o qual efetua o controle série e paralelo unificado.

Com o objetivo de verificar os benefícios alcançados pelos processos de compensação, tanto paralela quanto série, através de um controlador de fluxo de potência generalizado mostrou-se a eficiência de equipamentos que empregam a tecnologia

FACTS, os quais permitem o aumento da capacidade de transporte de energia elétrica nas linhas de transmissão, como também a melhoria da estabilidade do sistema, proporcionando carregamento das linhas com ângulo de transmissão maiores que 90°.

## **Capítulo III**

# **MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO COMPENSADOR STATCOM**

### **3.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Este capítulo está voltado para os aspectos gerais de funcionamento e aplicação do STATCOM, assim como apresentar seu equacionamento, sua malha de controle e, sua implementação na plataforma computacional SABER.

A primeira parte dos desenvolvimento enfoca a modelagem matemática do compensador, iniciando-se com a teoria vetorial na qual se baseia a malha de controle a ser empregada. A segunda parte contempla os demais aspectos relacionados com a modelagem computacional do STATCOM, com destaque a sua incorporação na citada estrutura computacional utilizando técnicas de modelagem no domínio do tempo.

### 3.2 – CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A TEORIA VETORIAL

Há muito tempo o controle vetorial tem sido usado, principalmente, em máquinas elétricas e, atualmente, vem sendo largamente aplicado à análise e controle de sistemas de potência. Neste sentido, o uso de vetores é muito útil para representação matemática de correntes e tensões dos compensadores avançados, pois simplifica a análise e o controle dos mesmos quando conectados a uma rede trifásica.

Essa simplificação se deve à redução no número de equações envolvidas nos algoritmos de controle, uma vez que grandezas trifásicas são transformadas em duas coordenadas através de uma matriz de transformação. A partir dessas transformações, informações importantes, como defasamento angular, módulo e potências, podem ser obtidas com facilidade.

Assim, uma vez que a teoria vetorial será empregada no controle do STATCOM tratado nesta dissertação, e visando um melhor entendimento sobre o assunto, esta seção mostra em linhas gerais o conceito da transformação vetorial para grandezas genéricas.

---

### 3.2.1 – Representação Vetorial de Grandezas Trifásicas

Considere que um conjunto de variáveis trifásicas cuja soma a qualquer instante seja zero pode ser representado unicamente por um simples ponto P em um plano, como ilustrado na figura 3.1[6].

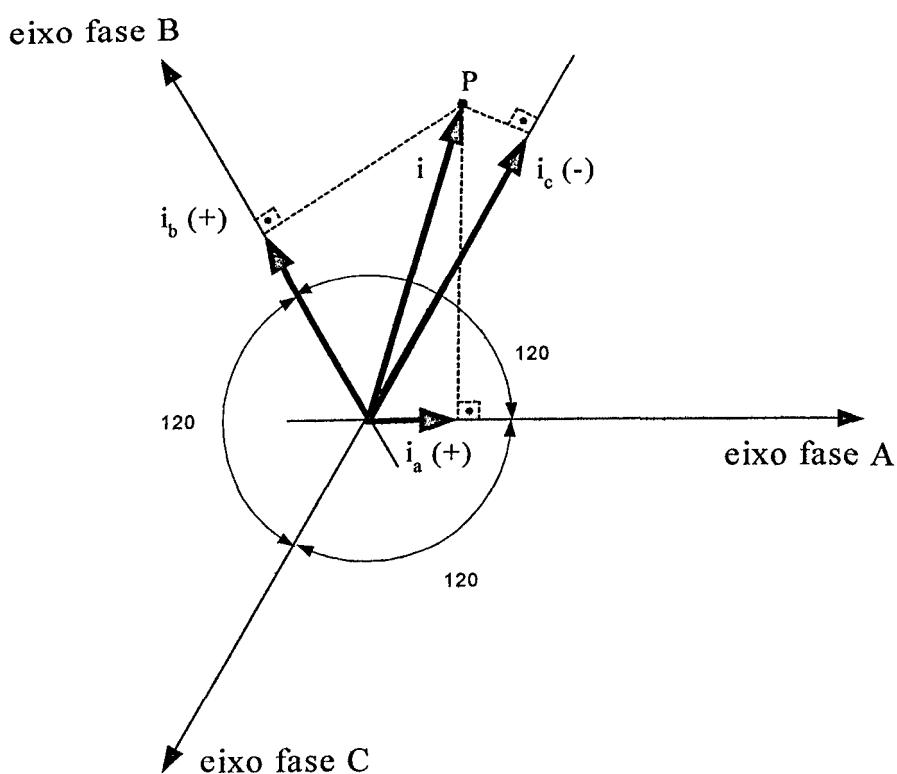


Figura 3.1 – Representação vetorial de uma variável trifásica

Na figura anterior, a linha a partir da origem dos eixos até o referido ponto tem magnitude e direção que podem ser unicamente definidas para aquele instante particular. Tal linha pode, então, ser considerada como sendo um vetor. Esse vetor possui uma projeção sobre cada um dos três eixos das fases dispostos simetricamente, que corresponde aos valores instantâneos da variável da fase associada (tensão ou corrente). À medida que os valores das grandezas de fase mudam, o vetor associado

descreve uma trajetória, ou seja, um lugar no plano. Portanto, essa trajetória contém as informações a respeito do conjunto das variáveis trifásicas, incluindo distorções harmônicas e componentes transitórias. Como ilustração, a figura 3.2 apresenta uma trajetória que se estabeleceria no caso de um conjunto trifásico altamente distorcido. Caso os sinais elétricos fossem senoidais e equilibrados, o lugar geométrico decorrente da trajetória do ponto seria circular.

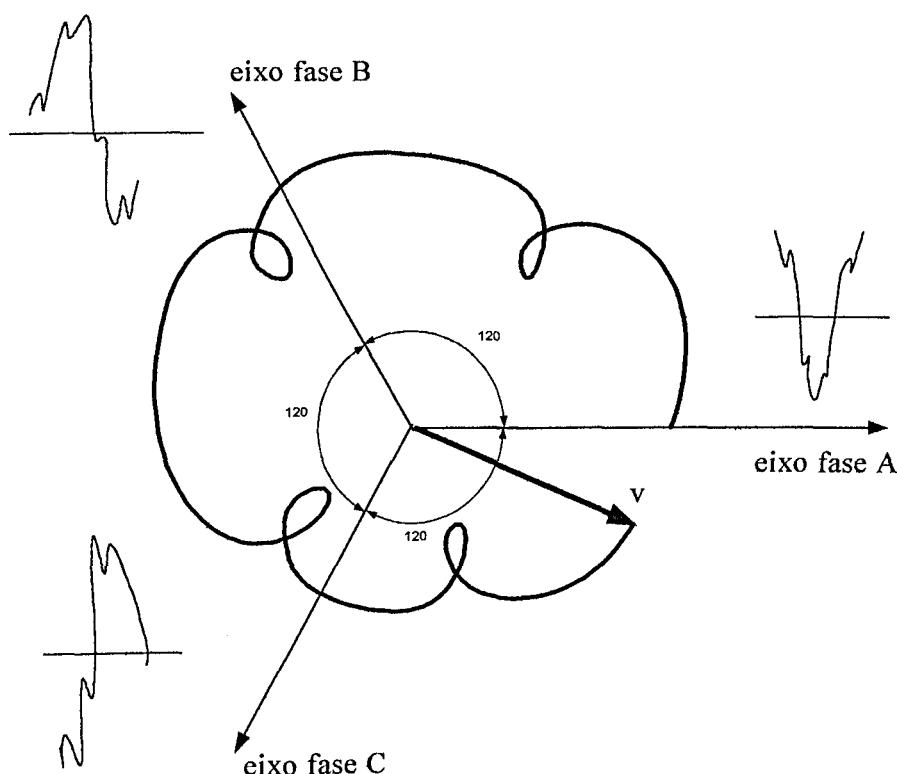


Figura 3.2 – Exemplo de uma trajetória vetorial

De outra forma, a representação de um determinado vetor pode ser feita através das coordenadas de um sistema ortogonal, seja ele estacionário ou rotativo na velocidade síncrona, o que é visto nas próximas subseções.

### 3.2.2 – Representação Vetorial no Sistema Ortogonal Estacionário (d-q)

No sistema ortogonal estacionário, um vetor é descrito pelas suas componentes d e q, como é o caso dos vetores de tensão e correntes mostrados na figura 3.3.

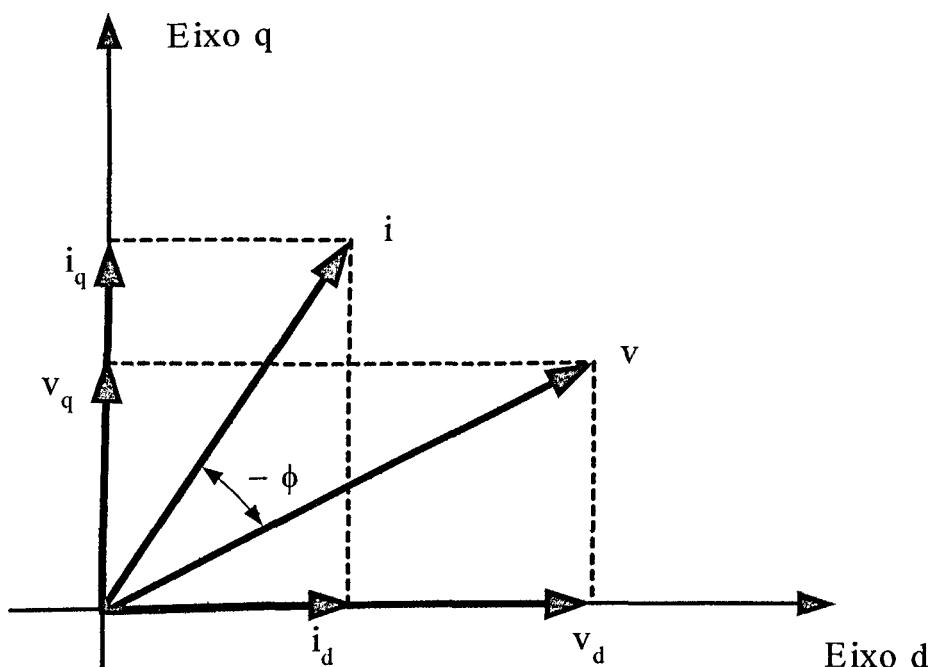


Figura 3.3 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal estacionário

Com isso, a transformação das variáveis de fase (tensão e corrente) para as coordenadas d e q é feita através da equação (3.1)

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$(3.1) \quad [C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Onde:

- $v_{d,q}$  – componentes da tensão nos eixos estacionários d e q
- $i_{d,q}$  – componentes da corrente nos eixos estacionários d e q
- $v_{a,b,c}$  – componentes da tensão nas fases a, b e c
- $i_{a,b,c}$  – componentes da corrente nas fases a, b e c
- $C$  – matriz de conversão

Supondo que a figura 3.3 represente os vetores de tensão e corrente associados a um ponto na linha de transmissão, a potência ativa instantânea nesse ponto é dada pela equação (3.2):

$$(3.2) \quad p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$$

Utilizando a equação (3.1), a mesma potência ativa instantânea dada por (3.2) pode ser escrita em termos das grandezas d e q, como mostra a equação (3.3):

$$p = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) = \frac{3}{2} |v| |i| \cos(\phi) \quad (3.3)$$

Onde:

$v$  – potência ativa instantânea

$v$  – vetor de tensão

$i$  – vetor de corrente

$\phi$  – ângulo entre os vetores de tensão e corrente

Da equação (3.3) torna-se claro que, apenas a componente do vetor de corrente que está em fase com o vetor de tensão, é que contribui para o valor da potência ativa instantânea. Por outro lado, a componente do vetor de corrente que está em quadratura com o vetor de tensão pode ser removido sem que a potência varie e, por isso, é responsável pela transmissão da potência reativa instantânea [6], que é dada pela equação (3.4).

$$q = \frac{3}{2} (v_d i_q - v_q i_d) = \frac{3}{2} |v| |i| \sin(\phi) \quad (3.4)$$

Onde:

$q$  – potência reativa instantânea

### 3.2.3 – Representação Vetorial no Sistema Ortogonal Síncrono ( $\alpha$ - $\beta$ )

Em um sistema elétrico de potência contendo vários conjuntos de tensões e correntes trifásicas, é conveniente definir o conjunto (a, b e c) de tensões em uma barra como

sendo a referência o que, consequentemente, determina o vetor de tensão de referência para o sistema. Tendo isso em mente, procura-se estabelecer um novo sistema de coordenadas ortogonais, cujo eixo d deslocado, é chamado de  $\alpha$ , coincide com a direção do referido vetor de tensão de referência do sistema, e o eixo q (agora referido como  $\beta$ ) esteja em quadratura como o mesmo. A coincidência do vetor da tensão de referência com o eixo  $\alpha$  ( $|v| = v_\alpha$ ) implica na sua componente em quadratura ser nula ( $v_\beta = 0$ ). Isso é melhor visualizado através da figura 3.4 e das demonstrações a seguir:

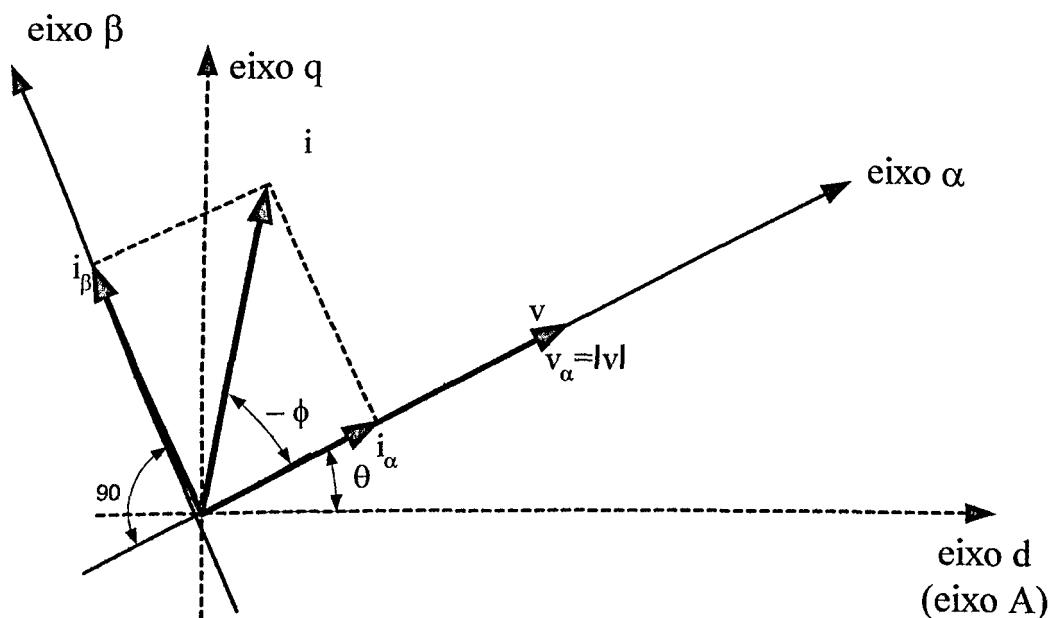


Figura 3.4 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal síncrono

Da figura anterior, verifica-se que a componente  $i_\alpha$  responde pela potência ativa instantânea e a componente  $i_\beta$  pela potência reativa instantânea.

Os eixos  $\alpha$  e  $\beta$  não são estacionários, ou seja, seguem a trajetória do vetor da tensão de referência. Assim, as coordenadas  $\alpha$  e  $\beta$ , dentre desse sistema de referência rotativo na velocidade síncrona, é dada pela seguinte transformação (relações 3.5):

$$\begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix},$$

$$[C_1] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$[C_1]^{-1} = \frac{3}{2} [C_1], \quad \theta = \text{arc tg} \left( \frac{v_q}{v_d} \right)$$

Onde:

$i_{\alpha, \beta}$  – componentes da corrente nos eixos rotativos  $\alpha$  e  $\beta$

$|v|$  – módulo do vetor da tensão de referência ( $v = v_d + jv_q$ )

$C_1$  – matriz de conversão

Em que as componentes  $v_d$  e  $v_q$  são obtidas pela equação (3.1).

Fazendo as devidas substituições, as equações (3.3) e (3.4) se transformam na relações (3.6), a seguir:

$$p = \frac{3}{2} |v| i_\alpha \quad \text{e} \quad q = \frac{3}{2} |v| i_\beta \quad (3.6)$$

Das equações acima, observa-se que, no sistema de referência síncrono, apenas a componente de corrente  $i_\beta$  transporta a potência reativa instantânea, já a componente  $i_\alpha$  é responsável pela transmissão da potência ativa instantânea [2].

Sob condições balanceadas de regime permanente, as coordenadas dos vetores de tensão e corrente no sistema de referência síncrono são grandezas constantes. Isto faz com que a análise vetorial seja uma ferramenta muito útil para o controle de sistemas trifásicos [29].

### **3.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O STATCOM**

Os desenvolvimentos dos primeiros compensadores avançados de reativos, usando inversores de comutação forçada, ocorreram no início da década de 1980. Com o objetivo de confirmar a praticabilidade destes equipamentos, a proposta inicial foi de produzir uma fonte de reativos controlável. Este trabalho, todavia culminou numa fonte de potência reativa de controle contínuo com elevado tempo de resposta. Desde então ficou constatado que o dispositivo era eficiente não apenas para compensação de reativos, como também para a melhoria de estabilidade dinâmica de sistemas de potência [7].

O grande avanço dos equipamentos utilizados na compensação de sistemas elétricos está relacionado com o progresso da eletrônica de potência, que tem disponibilizado dispositivos semicondutores de alta potência. Os mais utilizados em sistemas de potência são os tiristores GTO (*Gate Turn Off*), os quais tornaram possível construir grandes inversores de comutação forçada (VSI) com capacidade nominal de centenas de MVA, e saída de tensão praticamente senoidal, podendo ser vistos como fontes de

---

tensão controláveis ou geradores eletrônicos [18], referidos por STATCOM. Estes inversores podem ser conectados em derivação, em série ou em ambos os modos de conexão com o sistema para realizar compensação, possuindo a capacidade de gerar potência reativa em seus terminais CA. Além disso, eles podem também fornecer potência ativa, caso tenham uma fonte de potência ou outro dispositivo de armazenamento de energia (capacitor) em seus terminais CC. Sendo estes de comutação forçada, não dependem da tensão da linha CA, e suas tensões de saída podem ser controladas muito rapidamente, tanto em magnitude quanto em ângulo.

O STATCOM, sendo uma fonte de tensão controlável conectada à linha de transmissão de potência através de uma reatância de ligação, geralmente um transformador de acoplamento, faz com que qualquer corrente desejada possa fluir através da reatância de ligação.

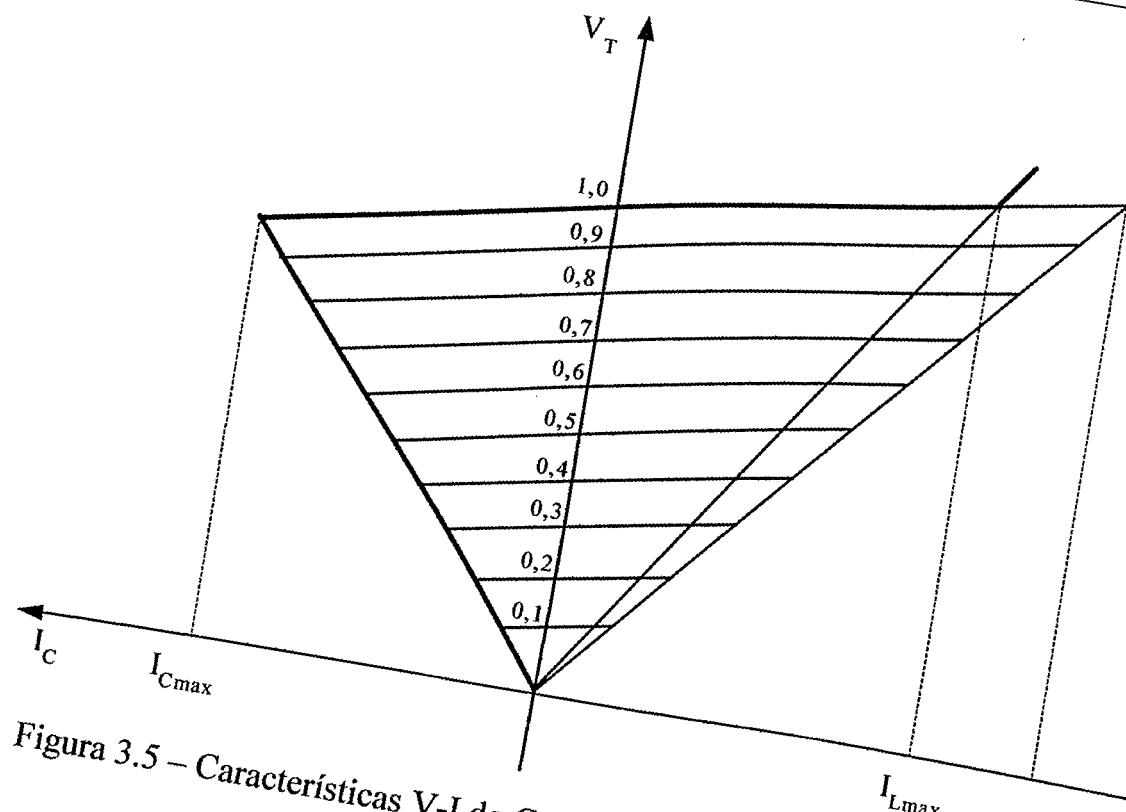
A composição de um STATCOM é o inversor VSI que converte uma tensão contínua em seus terminais de entrada em uma tensão alternada trifásica em sua saída, sendo esta tensão CC fornecida por um capacitor conectado na entrada do inversor. Devido a grande quantidade de harmônicos produzidos pelo inversor, várias técnicas de eliminação são utilizadas, entre elas podem citar o PWM senoidal (*Pulse Wide Modulation*) e inversor multi-pulsos [21].

---

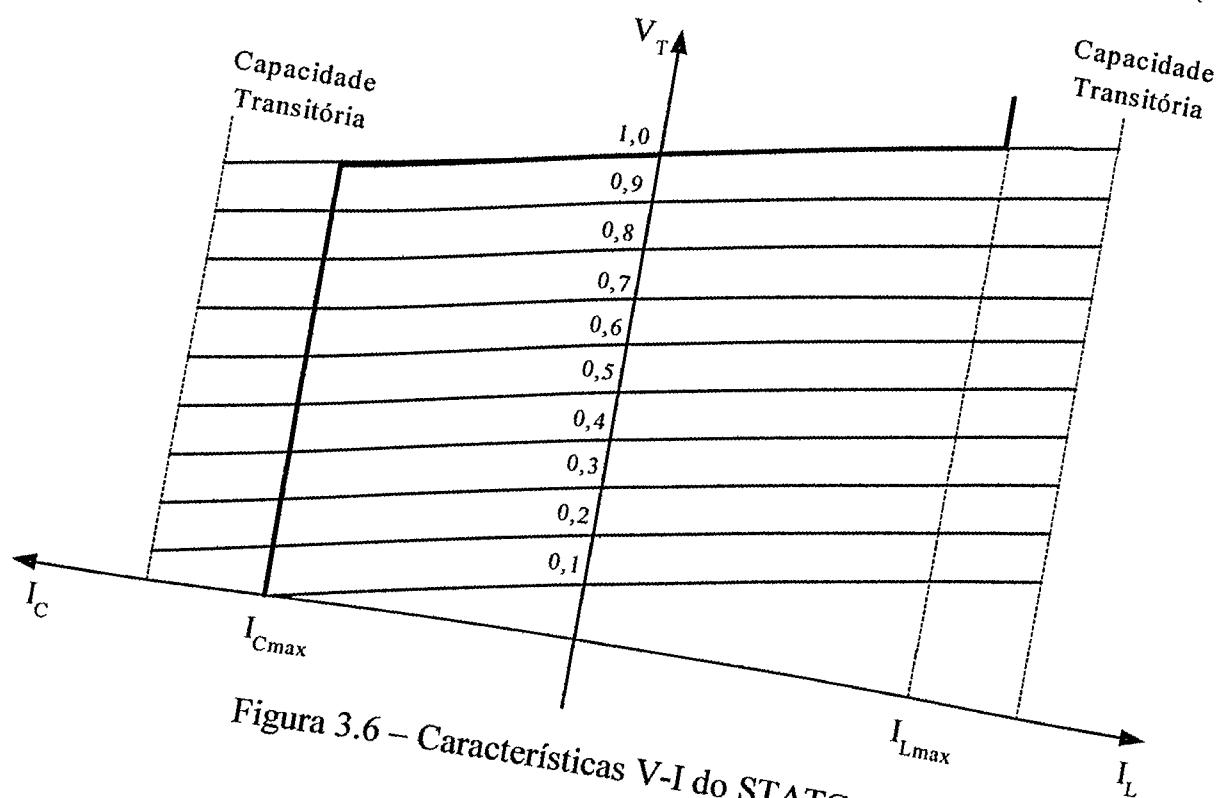
### 3.4 – VANTAGENS DO STATCOM SOBRE O SVC

Através das figuras 3.5 e 3.6, as quais mostram as características teóricas V-I do SVC (*Static var Compensator*) do STATCOM, respectivamente, é possível analisar a superioridade do equipamento em questão versus o compensador estático convencional. Como se observa, o STATCOM pode prover ambas formas de compensação, capacitiva e indutiva, e também é capaz de controlar sua corrente de saída sobre a escala máxima nominal, capacitiva ou indutiva, independente da tensão do sistema CA. Com isto, o dispositivo pode fornecer corrente de saída capacitativa para qualquer tensão do sistema. Ao contrário, o SVC, sendo composto de reatores e capacitores (chaveados a tiristores), pode suprir apenas potência reativa, e também diminui a corrente de saída com a diminuição da tensão do sistema, como determinado pela sua admitância capacitativa máxima equivalente. Portanto, o STATCOM é superior ao SVC como equipamento de suporte de tensão.

Como ilustram as figuras 3.5 e 3.6, o STATCOM tem uma capacidade transitória aumentada em ambas as regiões de operação, indutiva e capacitativa, enquanto o SVC convencional não possui meios de aumentar transitoriamente a geração reativos desde que sua corrente capacitativa máxima é estritamente determinada pelo porte do capacitor e a magnitude da tensão do sistema. A capacidade transitória disponível inerente do STATCOM é dependente das características dos semicondutores de potência usados e a temperatura de junção na qual os dispositivos são operados.



*Figura 3.5 – Características V-I do Compensador Estático Convencional (SVC)*



### 3.5– PRINCÍPIOS BÁSICOS DE OPERAÇÃO DO STATCOM

Um esquema representativo da conexão de um STATCOM com o sistema CA, através do qual são feitos os esclarecimentos sobre o seu princípio de funcionamento, é mostrado na figura 3.7.

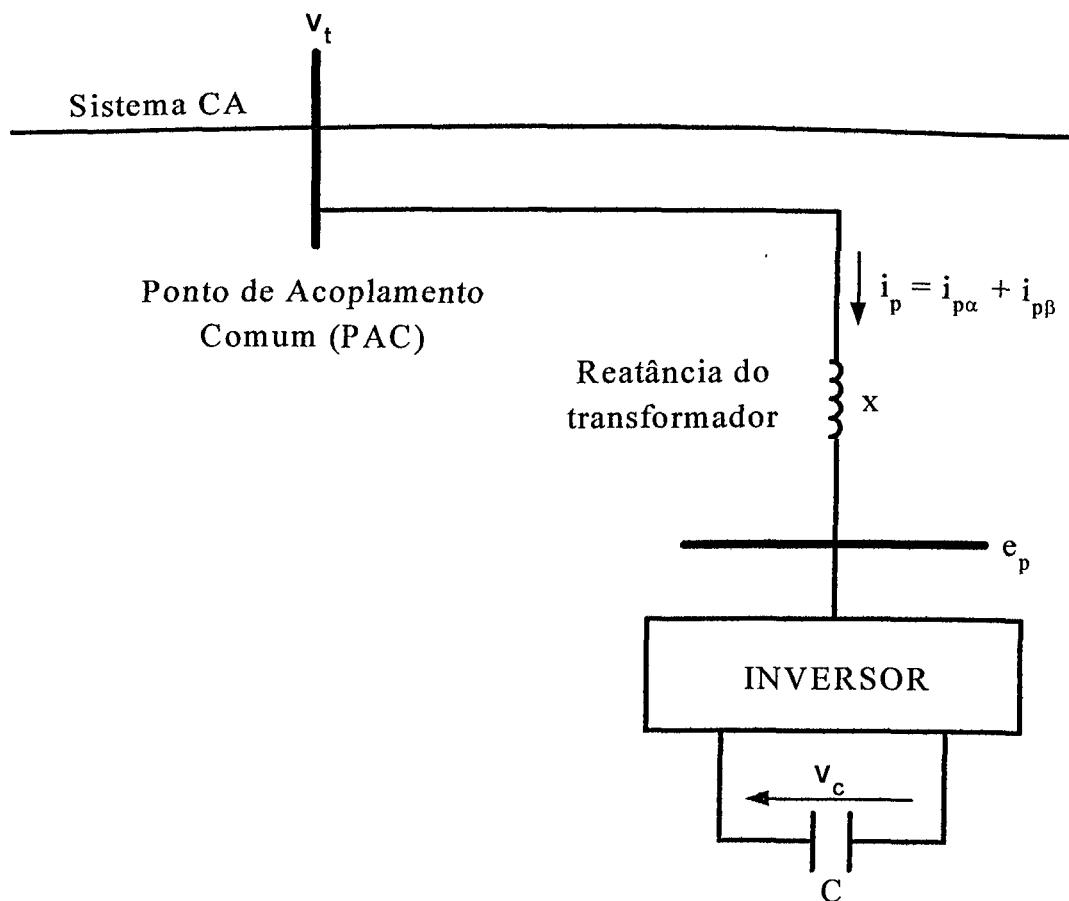


Figura 3.7 – Diagrama unifilar da conexão do STATCOM

Na figura 3.7:

$v_t$  – tensão no barramento ao qual o STATCOM está conectado (PAC)

$e_p$  – tensão na saída do inversor

$x$  – reatância do transformador de acoplamento

$i_p$  – corrente no ramo do STATCOM

$i_{p\alpha}, i_{p\beta}$  – componentes da corrente  $i_p$  nos eixos rotativos  $\alpha$  e  $\beta$

O arranjo anterior assume a impedância do transformador de acoplamento como basicamente reativa, o que normalmente se aproxima da realidade. Além disso, as análises são feitas considerando-se que, nos terminais trifásicos do inversor, é gerada uma tensão  $e_p$  com as seguintes características:

- Tensão  $e_p$  em fase com a tensão  $v_t$  do sistema CA;
- Tensão  $e_p$  adiantada da tensão  $v_t$  do sistema CA;
- Tensão  $e_p$  atrasada da tensão  $v_t$  do sistema CA.

O inversor funciona como uma fonte alternada controlável, a qual produz uma tensão de saída em fase com a da linha de transmissão. Esta fonte é inserida paralelamente ao sistema através de uma reatância série (reatância de dispersão do transformador de acoplamento). Como a principal função do STATCOM é regular a tensão nas linhas de transmissão através da compensação de reativos (fornecendo ou absorvendo potência reativa), esta potência é controlada através da correlação entre a magnitude da tensão de saída do inversor ( $e_p$ ) e a da tensão do sistema CA ( $v_t$ ). A tensão alternada de saída  $e_p$  é produzida pelo inversor através do chaveamento dos tiristores, os quais são alimentados pela tensão CC do capacitor.

### 3.5.1 – Compensação de Potência Reativa

Se a diferença entre as magnitudes das tensões de saída e do sistema CA é nula, então a troca de potência reativa é nula. O diagrama fasorial da figura 3.8 representa esta situação, onde a tensão de saída está representada com a mesma magnitude e em fase

com a tensão gerada pelo inversor. Nesta condição, não há circulação de corrente ( $i_p = 0$ ), caracterizando assim, um estado inoperante do STATCOM.

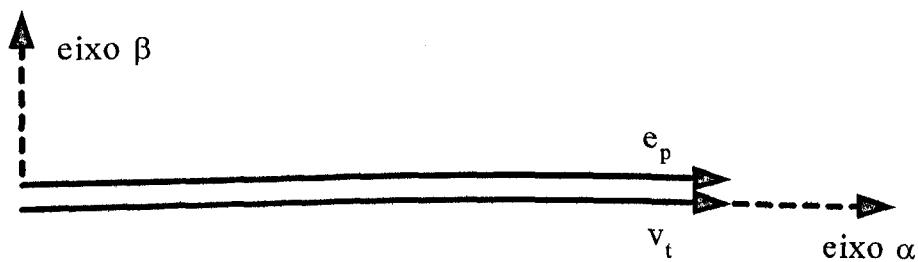


Figura 3.8– Diagrama fasorial do STATCOM produzindo na saída uma tensão  $e_p$  com mesma magnitude da tensão  $v_t$  do Sistema CA (sem intercâmbio de potência reativa)

Caso a tensão de saída do inversor ( $e_p$ ) seja maior que a tensão do sistema CA ( $v_t$ ), porém em fase, o STATCOM fornece reativos ao sistema CA - modo capacitivo, como pode ser verificado no diagrama fasorial da figura 3.9.

A componente ativa da corrente  $i_p$ , denominada  $i_{p\alpha}$ , mostrada na figura 3.9 é nula. Assim, a partir da equação (3.6), reescrita em (3.7), pode-se dizer que a potência ativa que circula entre o STATCOM e o sistema CA, também é nula.

$$p = \frac{3}{2} |v_t| i_{p\alpha} \quad (3.7)$$

Onde:

$p$  – fluxo de potência ativa entre o STATCOM e o sistema CA

$|v_t|$  – módulo do vetor da tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do STATCOM tomado como referência do sistema ortogonal síncrono.

O fluxo de potência reativa  $q$  entre o sistema CA e o STATCOM é obtido através da equação (3.6), reescrita em (3.8).

$$q = \frac{3}{2} | v_t | i_{p\beta} \quad (3.8)$$

A equação anterior mostra que, se  $i_{p\beta}$  é positiva, pois está adiantada de  $v_t$  em  $90^\circ$ , o STATCOM fornece potência reativa, pois  $q$  também é positiva.

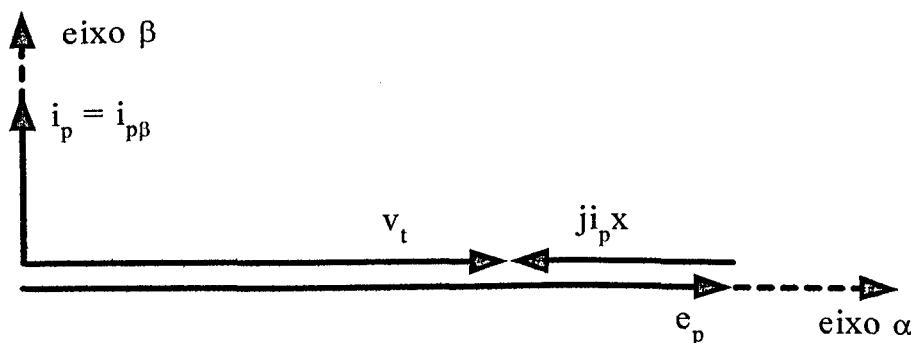


Figura 3.9– Diagrama fasorial do STATCOM fornecendo potência reativa

Caso a tensão de saída do inversor ( $e_p$ ) seja menor que a tensão do sistema CA ( $v_t$ ), ainda em fase, o STATCOM absorve reativos do sistema CA - modo indutivo, como pode ser verificado através do diagrama fasorial da figura 3.10. Mais uma vez, a corrente que circula pelo STATCOM, está  $90^\circ$  em atraso com relação à queda de tensão sobre a reatância indutiva de acoplamento. Verifica-se, no entanto, que essa corrente que circula pelo STATCOM está  $90^\circ$  atrasada da tensão do sistema CA (ainda  $i_p = i_{p\beta}$ , pois  $i_{p\alpha} = 0$ ), caracterizando a operação do STATCOM absorvendo potência reativa.

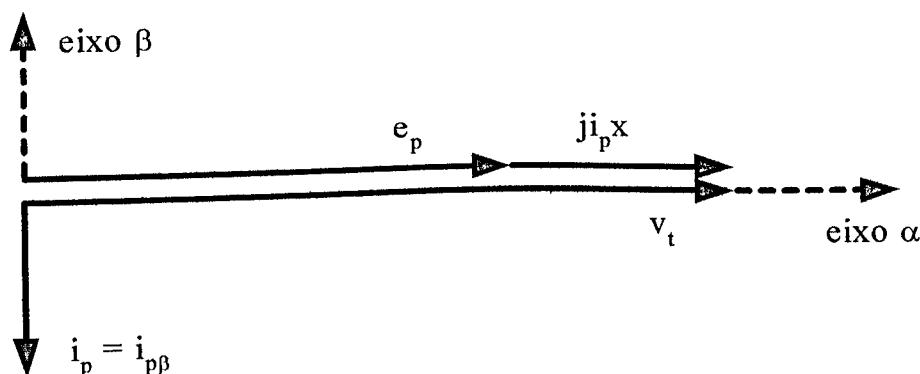


Figura 3.10 – Diagrama fasorial do STATCOM absorvendo potência reativa

Para esta situação a equação (3.8) mostra que, se  $i_{p\beta}$  é negativa, pois está atrasada de  $v_t$  em  $90^\circ$ , portanto o STATCOM absorve potência reativa, pois  $q$  também é negativa.

Diante do exposto, constata-se que, para ângulo de defasagem igual a  $90^\circ$ , a potência reativa fornecida ou absorvida pelo compensador estático avançado depende apenas da magnitude da tensão  $e_p$  em relação a  $v_t$ .

Devido as características de funcionamento de regime permanente deste equipamento no modo capacitivo ser muito similar às do condensador síncrono rotativo, ele também recebe a denominação STATCON (*STATIC CONdenser*). Vale aqui ressaltar devido aos controles eletrônicos do STATCOM, este apresenta capacidades dinâmicas superiores a aquelas fornecidas pelo condensador síncrono, além de trabalhar também no modo indutivo.

### 3.5.2 – Compensação de Potência Ativa

No caso do STATCOM possuir um equipamento de armazenamento de energia (capacitor, bateria, etc.) do lado CC, ele consegue realizar trocas de potência ativa com sistema CA, sendo esta uma das grandes virtudes deste equipamento em relação aos compensadores convencionais. Esta troca de potência ativa entre o inversor e o sistema CA pode ser controlada pelo defasamento entre a tensão de saída do STATCOM ( $e_p$ ) e da tensão CA ( $v_t$ ) que o inversor é capaz de produzir, graças ao nível CC garantido pelo capacitor. Deste modo, no caso em que é desejável absorver potência ativa do sistema CA, a tensão na saída do inversor é produzida atrasada e com a mesma magnitude, da tensão do sistema, definindo o sentido do fluxo de ativos como sendo do inversor para o capacitor. Além disso, o inversor pode também fornecer potência ativa ao sistema CA, desde que a tensão de saída do inversor seja produzida adiantada e com mesma magnitude, da tensão do sistema CA. Esta operação é possível desde que haja um adequado dimensionamento do dispositivo armazenador de energia do lado CC, que deva armazenar a energia vinda do próprio sistema, já que o equipamento não possui capacidade própria de geração de potência ativa.

Quando a tensão nos terminais trifásicos do inversor,  $e_p$ , se encontra atrasada/adiantada de  $v_t$  (em ângulos inferiores a  $90^\circ$ ) e com a mesma magnitude da tensão do sistema CA no ponto de acoplamento,  $v_t$ , tem-se absorção/geração de potência ativa respectivamente. Pelo diagrama fasorial da figura 3.11(a), nota-se que a tensão  $e_p$  está atrasada da tensão  $v_t$  de um ângulo relativamente pequeno. Nestas

condições, a queda de tensão na reatância de dispersão, que é provocada pela corrente  $i_p$ , está praticamente em quadratura com a tensão  $v_t$  do sistema CA. Sabe-se que a corrente em uma reatância indutiva está atrasada  $90^\circ$  da queda de tensão nela. Desta forma, nota-se que a corrente  $i_p$  está praticamente em fase com a tensão  $v_t$  do sistema CA, caracterizando assim, a absorção de potência ativa. De forma análoga, quando a tensão  $e_p$  é produzida adiantada da tensão  $v_t$ , a corrente que circula no inversor está em oposição à tensão do sistema CA, caracterizando assim o fornecimento de potência ativa, figura 3.11(b).

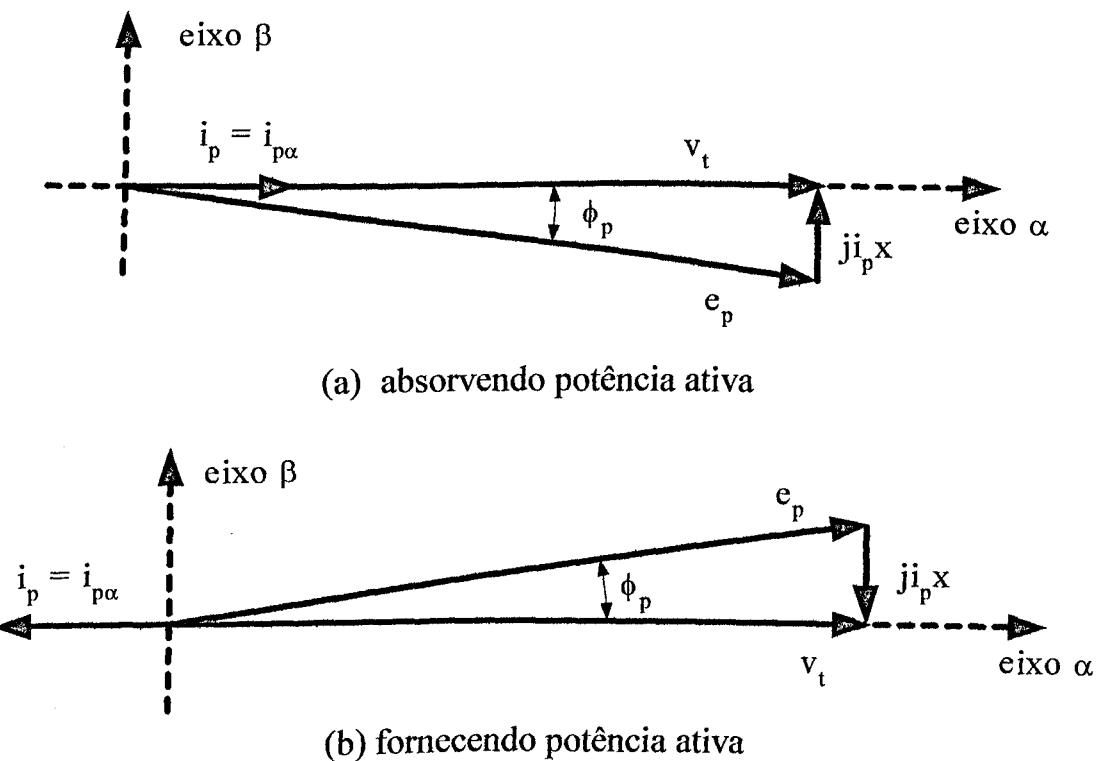


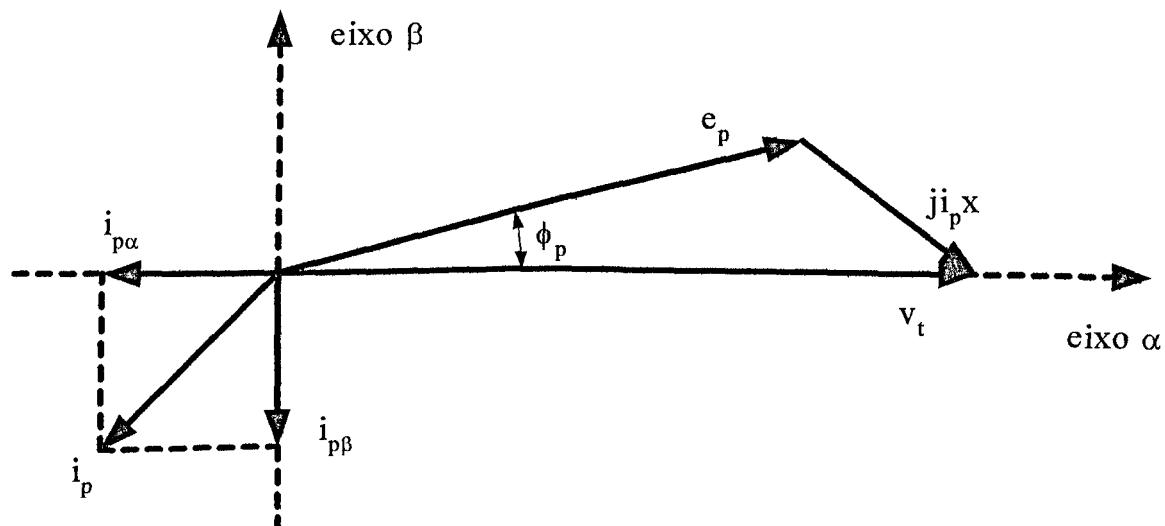
Figura 3.11 – Diagrama fasorial do STATCOM  
absorvendo e fornecendo potência ativa

Na figura:

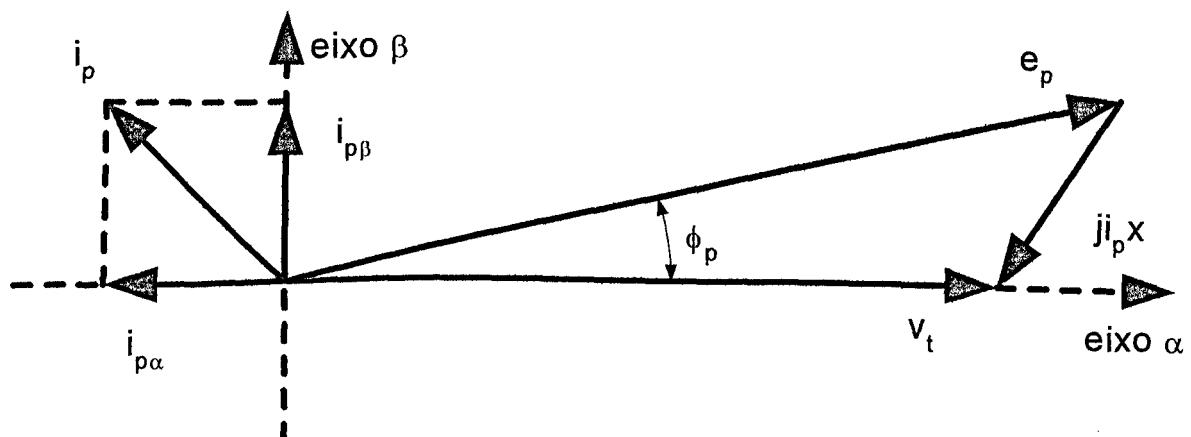
$\phi_p$  – ângulo entre a tensão do sistema ( $v_t$ ) no ponto de acoplamento comum do STATCOM e a tensão nos terminais trifásicos do inversor ( $e_p$ ).

### 3.5.3 – Compensação Simultânea das Potências Ativa e Reativa

Quando a tensão nos terminais trifásicos do inversor,  $e_p$ , se encontra adiantada de  $v_t$  (em ângulos inferiores a  $90^\circ$ ) e com magnitude diferente da tensão do sistema CA ( $v_t$ ) no ponto de acoplamento, a componente ativa da corrente,  $i_{p\alpha}$ , é negativa, como mostra a figura 3.12(a) assim, baseando-se na equação (3.7), verifica-se que a potência ativa também é negativa. Isso significa que, tal potência é drenada do barramento CC e fornecida ao sistema CA.



(a) fornecendo potência ativa e absorvendo potência reativa



(b) fornecendo potência ativa e fornecendo potência reativa

Figura 3.12 – Diagrama fasorial de operação do STATCOM fornecendo potência ativa e absorvendo ou fornecendo potência reativa

Novamente, se  $|e_p| < |v_t|$ , então  $i_{p\beta}$  está atrasada de  $v_t$  de  $90^\circ$ , como mostra a figura 3.10(a), e a potência reativa é absorvida do sistema CA. Por outro lado, se  $|e_p| > |v_t|$ ,  $i_{p\beta}$  encontra-se avançada de  $90^\circ$  com relação a  $v_t$  e, portanto, a potência reativa é fornecida ao sistema CA figura 3.12(b).

Finalmente, quando a tensão  $e_p$  se encontra atrasada de  $v_t$ , a componente  $i_{p\alpha}$ , é positiva, como ilustra a figura 3.13. Com isso, a potência ativa, definida pela equação (3.7) é positiva e, portanto, absorvida pelo STATCOM para manter a tensão CC no capacitor em um patamar constante. Com relação ao fluxo de potência reativa, as mesmas análises e conclusões efetuadas nas subseções anteriores, aplicam-se a este caso e podem ser constatadas nas figuras 3.13(a) e 3.13(b).

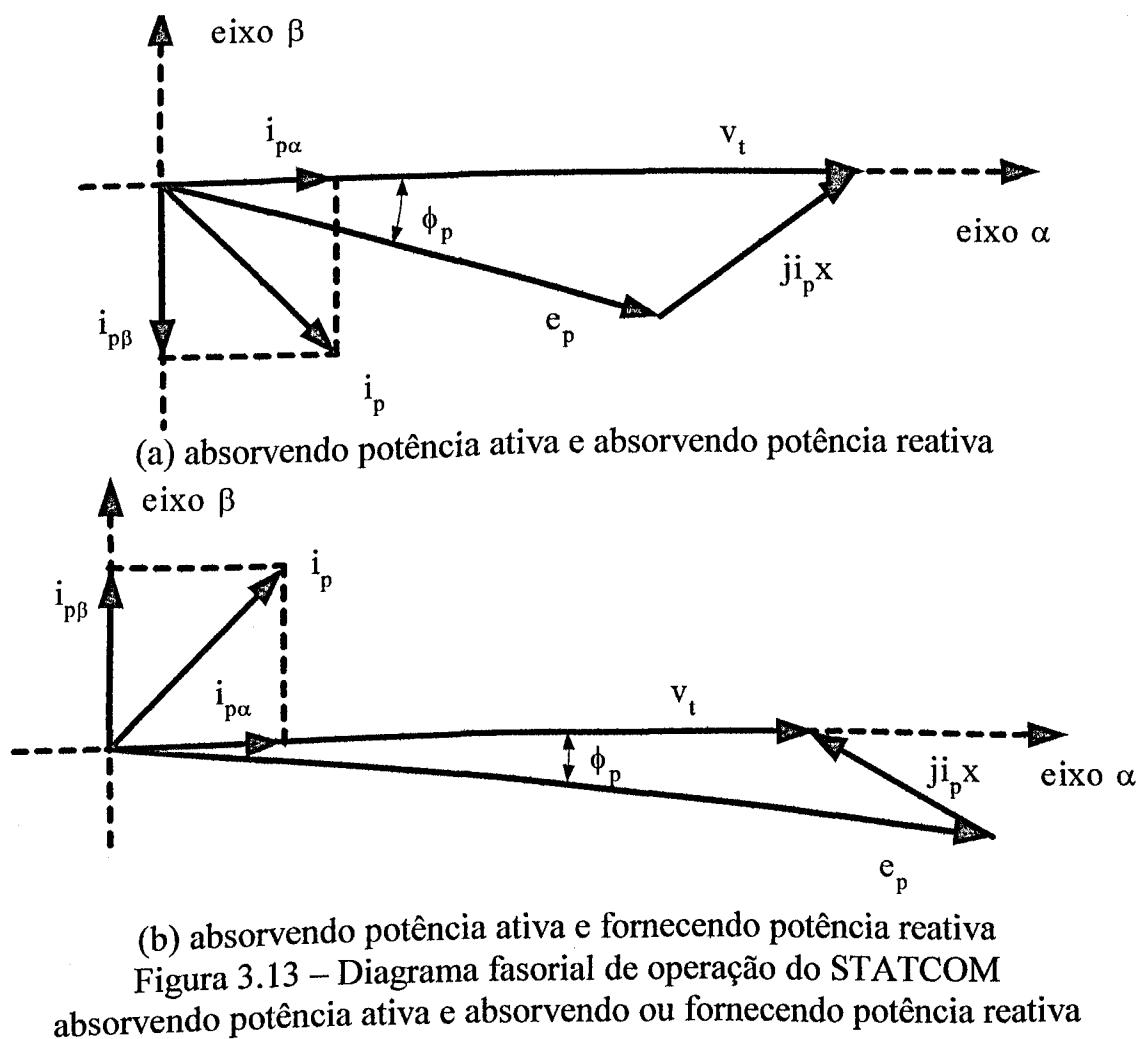


Figura 3.13 – Diagrama fasorial de operação do STATCOM absorvendo potência ativa e absorvendo ou fornecendo potência reativa

Todas as funções descritas anteriormente, absorção e/ou geração de reativos e ativos, podem ser controladas independentemente. Portanto, qualquer combinação de potência ativa, geração/absorção, com potência reativa, geração/absorção, é possível, como pode ser visualizado melhor na figura 3.14. Sendo assim, a potência ativa que o STATCOM troca em seus terminais com o sistema CA, é suprido para, ou absorvido de seus terminais CC pelo dispositivo de armazenamento de energia. Ao contrário, a potência reativa trocada é gerada internamente pelo STATCOM devido as comutações das chaves.

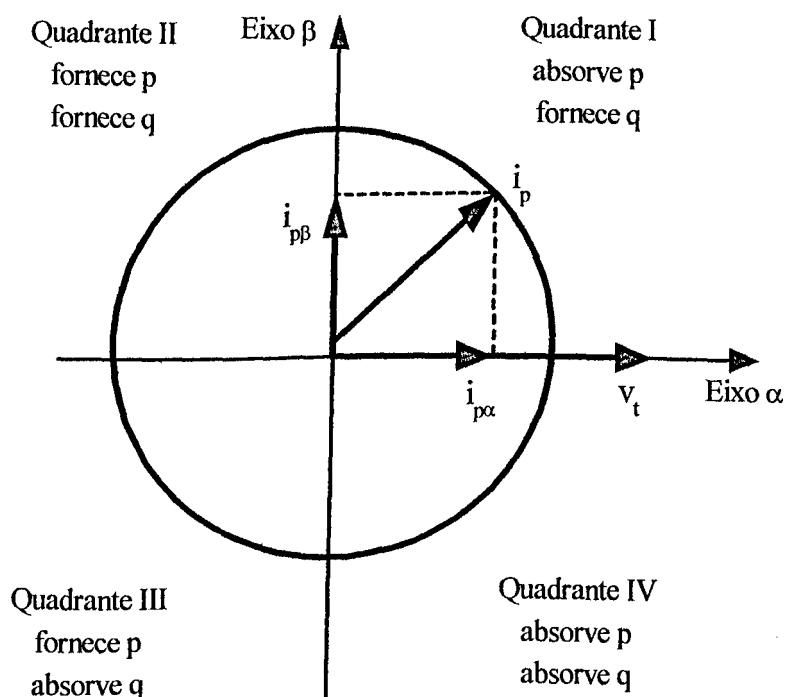


Figura 3.14 – Diagrama de geração/absorção de potências ativa e reativa do STATCOM

A capacidade de troca de potência ativa bidirecional do STATCOM, isto é, a habilidade de absorver energia da rede CA e entregar para o dispositivo de armazenamento de energia (capacitor grande ou bateria) e inverter este processo para devolver potência para o barramento CA, faz dele um excelente suporte temporário do

sistema, podendo ser usado para melhorar a eficiência global do sistema e prevenir perda de potência. Também, caso seja usado em combinação com o controle rápido de potência reativa, esta ferramenta torna-se bastante atraente para melhoria da estabilidade transitória e dinâmica de um sistema elétrico de potência.

Devido ao fato do inversor utilizar válvulas “GTO”, as quais possibilitam um processo de chaveamento rápido, para trocas de potências ativa e reativa, o STATCOM pode proporcionar uma melhora na estabilidade dinâmica e transitória (estabilidade angular), e também pode prevenir a estabilidade de tensão (evitando o colapso de tensão) [4].

### **3.6 – CIRCUITO EQUIVALENTE E MODELAGEM MATEMÁTICA**

Através da figura 3.15, a qual representa simplificadamente um STATCOM ligado ao barramento do sistema de potência, observa-se que o compensador é composto por um capacitor no lado CC, um inversor VSI, e indutâncias séries nas linhas, conectando o equipamento ao sistema de potência, podendo estas serem as reatâncias de dispersão do transformador trifásico, responsável pelo acoplamento.

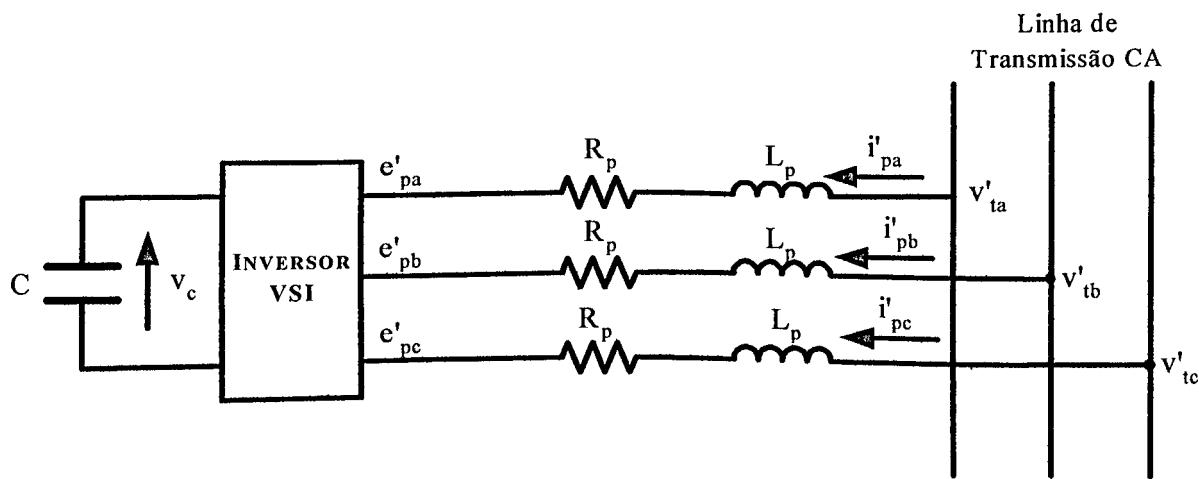


Figura 3.15 – Representações dos barramentos CA e CC do STATCOM

A partir da figura 3.15, a modelagem do STATCOM é definida pelas equações (3.9) a (3.11), como segue:

$$v'ta - e'_{pa} = L_p \frac{d(i'_{pa})}{dt} + R_p i'_{pa} \quad (3.9)$$

$$v'tb - e'_{pb} = L_p \frac{d(i'_{pb})}{dt} + R_p i'_{pb} \quad (3.10)$$

$$v'tc - e'_{pc} = L_p \frac{d(i'_{pc})}{dt} + R_p i'_{pc} \quad (3.11)$$

Para converter as grandezas para o sistema pu, utiliza-se a potência base do transformador e as tensões bases nos terminais do mesmo, de acordo com as equações (3.12) a seguir:

$$x_p = \frac{\omega_b L_p}{Z_{base}}, \quad x_c = \frac{1}{\omega_b C Z_{base}}, \quad r_p = \frac{R_p}{Z_{base}}, \quad i = \frac{i'}{i_{base}}$$

$$(3.12)$$

$$v = \frac{v'}{v_{base}}, \quad e = \frac{e'}{e_{base}} \quad \text{e} \quad Z_{base} = \frac{v_{base}}{i_{base}}$$

Assim, as equações (3.9) a (3.11), transformadas em valores pu e em um novo arranjo na forma matricial, conduzem à equação (3.13).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_p \omega_b}{x_p} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_p \omega_b}{x_p} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_p \omega_b}{x_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{x_p} \begin{bmatrix} (v_{ta} - e_a) \\ (v_{tb} - e_b) \\ (v_{tc} - e_{pc}) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

A transformação vetorial das variáveis trifásicas da equação (3.13) para o sistema ortogonal síncrono, é feito pelas equações (3.14) a (3.16):

$$\begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} e_{p\alpha} \\ e_{p\beta} \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \begin{bmatrix} e_{pa} \\ e_{pb} \\ e_{pc} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_{p\alpha} \\ i_{p\beta} \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Onde  $[C_1]$  é a matriz de transformação, definida no início deste capítulo, e reescrita em (3.17).

$$[C_1] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Em que:

$$\theta = \text{arc tg} \left( \frac{v_{tq}}{v_{td}} \right) \quad (3.18)$$

E as componentes da tensão  $v_t$  no sistema de eixos estacionários  $v_{tq}$  e  $v_{td}$  são obtidas através da transformação a seguir:

$$\begin{bmatrix} v_{td} \\ v_{tq} \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_{ta} \\ v_{tb} \\ v_{tc} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Em que  $[C]$  é a matriz de transformação dada pela equação (3.1) no início deste capítulo. Os vetores das grandezas do lado CA do compensador estático avançado, decomposto nos eixos do sistema ortogonal síncrono, podem ser visualizado como indicado na figura 3.16.

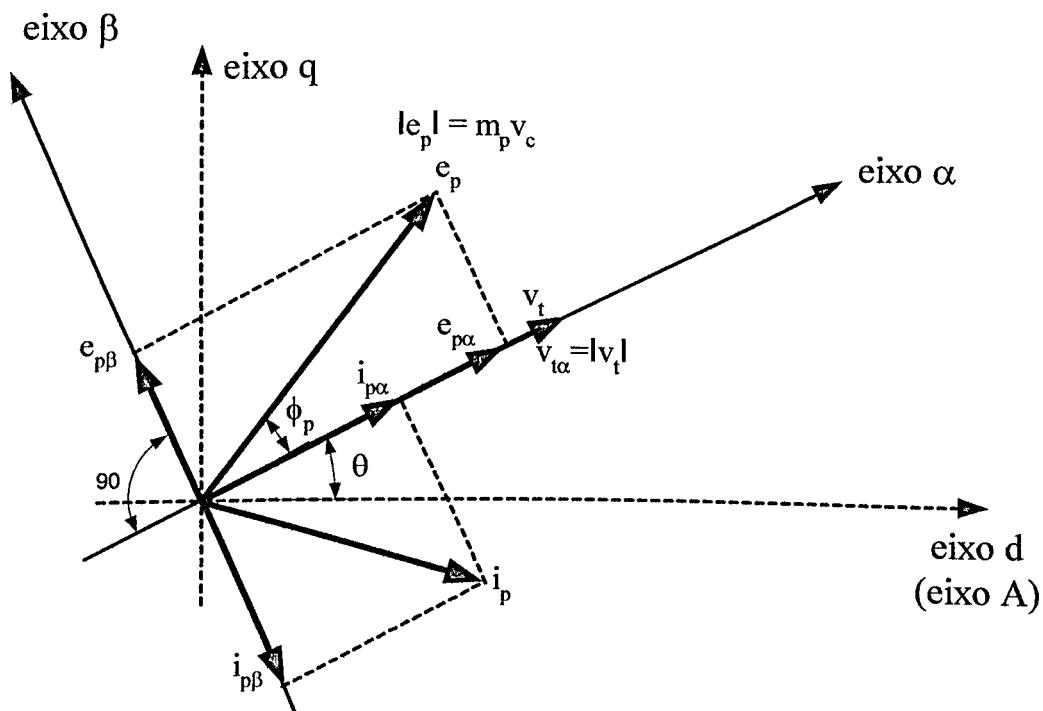


Figura 3.16 – Vetores das tensões e correntes do STATCOM

Como já citado, o diagrama da figura 3.16 representa os vetores do lado CA, no sistema ortogonal síncrono. Quando  $i_{p\beta}$  é positivo o STATCOM está fornecendo reativos, quando este é negativo o STATCOM está absorvendo reativos.

Com as transformações vetoriais executadas, a equação (3.13) pode ser escrita no sistema ortogonal síncrono, como mostra a equação (3.20) [29].

$$\frac{d}{dt} \left[ (i_{p\alpha} + j i_{p\beta}) e^{j\varpi t} \right] = -\frac{r_p \varpi b}{x_p} (i_{p\alpha} + j i_{p\beta}) e^{j\varpi t} + \frac{\varpi b}{x_p} (|v_t| - (e_{p\alpha} + j e_{p\beta})) e^{j\varpi t} \quad (3.20)$$

Onde:

$$\varpi = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.21)$$

Operando o primeiro termo da equação (3.20), resulta:

$$\frac{d}{dt} \left[ (i_p\alpha + j i_p\beta) e^{j\varpi t} \right] = \left( \frac{di_p\alpha}{dt} + j \frac{di_p\beta}{dt} \right) e^{j\varpi t} + j\varpi (i_p\alpha + j i_p\beta) e^{j\varpi t} \quad (3.22)$$

Substituindo a equação (3.22) em (3.20), e fazendo as devidas simplificações, obtém-se (3.23):

$$\begin{aligned} \frac{di_p\alpha}{dt} + j \frac{di_p\beta}{dt} &= -\frac{r_p\varpi_b}{x_p} i_p\alpha + \varpi i_p\beta + \\ &j \left( -\frac{r_p\varpi_b}{x_p} i_p\beta - \varpi i_p\alpha \right) + \frac{\varpi_b}{x_p} (|v_t| - e_p\alpha - j e_p\beta) \end{aligned} \quad (3.23)$$

O agrupamento das partes real e imaginária, resulta na equação matricial (3.24) [30], como segue:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_p\alpha \\ i_p\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_p\omega_b}{x_p} & \omega \\ -\omega & -\frac{r_p\omega_b}{x_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p\alpha \\ i_p\beta \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{x_p} \begin{bmatrix} (|v_t| - e_p\alpha) \\ -e_p\beta \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Finalmente, pode-se dizer que a equação (3.24) é o modelo matemático do circuito de potência do STATCOM, em pu e no sistema de referência síncrono.

Como indicado na figura 3.16,  $|e_p| = m_p v_c$ , onde  $m_p$  é a relação entre o módulo da tensão trifásica do STATCOM e a tensão no barramento CC. Assim, as componentes do vetor  $e_p$  podem ser obtidas através das equações (3.25) e (3.26).

$$e_{p\alpha} = m_p v_c \cos \phi_p \quad (3.25)$$

$$e_{p\beta} = m_p v_c \sin \phi_p \quad (3.26)$$

Onde  $\phi_p$  é a diferença angular entre os vetores da tensão nos terminais trifásicos do inversor e da tensão na barra de acoplamento com o sistema CA. Dependendo da estratégia de controle a ser utilizada, tanto  $m_p$  quanto o ângulo  $\phi_p$  podem ser variados, através das técnicas de chaveamento existentes, para proporcionar uma certa tensão desejada nos terminais trifásicos do STATCOM.

### **3.7 – SISTEMA DE CONTROLE DO STATCOM**

O principal objetivo do sistema de controle do STATCOM, consiste em controlar o módulo da tensão  $v_t$  do barramento CA, ao qual o equipamento está conectado, mantendo-se a tensão  $v_c$  no capacitor constante.

Esta meta pode ser alcançada alterando-se os fluxos das potências ativa e reativa, entre o equipamento e o sistema CA, através das componentes  $i_{p\alpha}$  e  $i_{p\beta}$  do vetor de corrente  $i_p$ , respectivamente. Isto pode ser confirmado, aplicando-se as análises feitas no início

deste capítulo, para o caso particular do compensador estático avançado, ou seja: “Se uma determinada corrente, denominada  $i_p$ , flui entre o sistema elétrico de potência CA e o STATCOM e, se a direção do vetor da tensão no ponto de conexão do equipamento for coincidente com a direção do eixo  $\alpha$ , do sistema ortogonal síncrono, a componente  $i_{p\beta}$  da referida corrente carreia a potência reativa instantânea e a componente  $i_{p\alpha}$  é a responsável pelo fluxo da potência ativa instantânea [2] ”.

Assim, as equações (3.7) e (3.8) são reescritas em (3.27) e (3.28), respectivamente, para as potências ativa e reativa:

$$p = \frac{3}{2} |v_t| i_{p\alpha} \quad (3.27)$$

$$q = \frac{3}{2} |v_t| i_{p\beta} \quad (3.28)$$

Com relação às equações (3.27) e (3.28), e de acordo com as análises efetuadas na seção 3.6, são feitas as afirmativas resumidas na tabela 3.1.

*Tabela 3.1- Operação do STATCOM*

Situação	STATCOM
$p > 0$	absorvendo potência reativa
$p < 0$	fornecendo potência ativa
$q > 0$	fornecendo potência reativa
$q < 0$	absorvendo potência reativa

Diante do exposto, constata-se que para se controlar os fluxos das potências ativa e reativa no STATCOM, deve-se atuar nas componentes da corrente  $i_{p\alpha}$  e  $i_{p\beta}$ , respectivamente. Tais componentes podem ser alteradas, operando-se apropriadamente o inversor, de modo que nos seus terminais trifásicos seja entregue uma tensão  $e_p$ , cujas componentes  $e_{p\alpha}$  e  $e_{p\beta}$  sejam aquelas requeridas pela equação (3.24), para que  $i_{p\alpha}$  e  $i_{p\beta}$ , se estabeleçam em valores adequados à compensação desejada. Com este propósito, as referências [4] e [29] apresentam malhas de controle as quais, de maneira geral, são baseadas em duas filosofias, a saber:

- Controle da magnitude e do ângulo de fase do vetor de tensão nos terminais trifásicos do inversor;
- Controle apenas do ângulo de fase do vetor de tensão nos terminais trifásicos do inversor.

Neste ponto, portanto, deve-se estabelecer uma estratégia de controle que, a partir do valor medido de  $v_t$  a ser controlado, determine o vetor de tensão  $e_p$  que deva ser gerado pelo inversor, de modo que tal grandeza medida permaneça no (ou acompanhe) seu valor de referência.

A malha de controle utilizada neste trabalho atua sobre o ângulo de fase e na magnitude do vetor de tensão nos terminais trifásicos do inversor, uma vez que uma tensão constante nos terminais do capacitor é requerida. Tal exigência com relação ao controle desta grandeza é uma prática comum na operação deste equipamento.

O presente método de controle fundamenta-se, basicamente, nas análises dos diagramas fasoriais efetuadas na seção 3.5, e encontra-se esquematizado na figura 3.17.

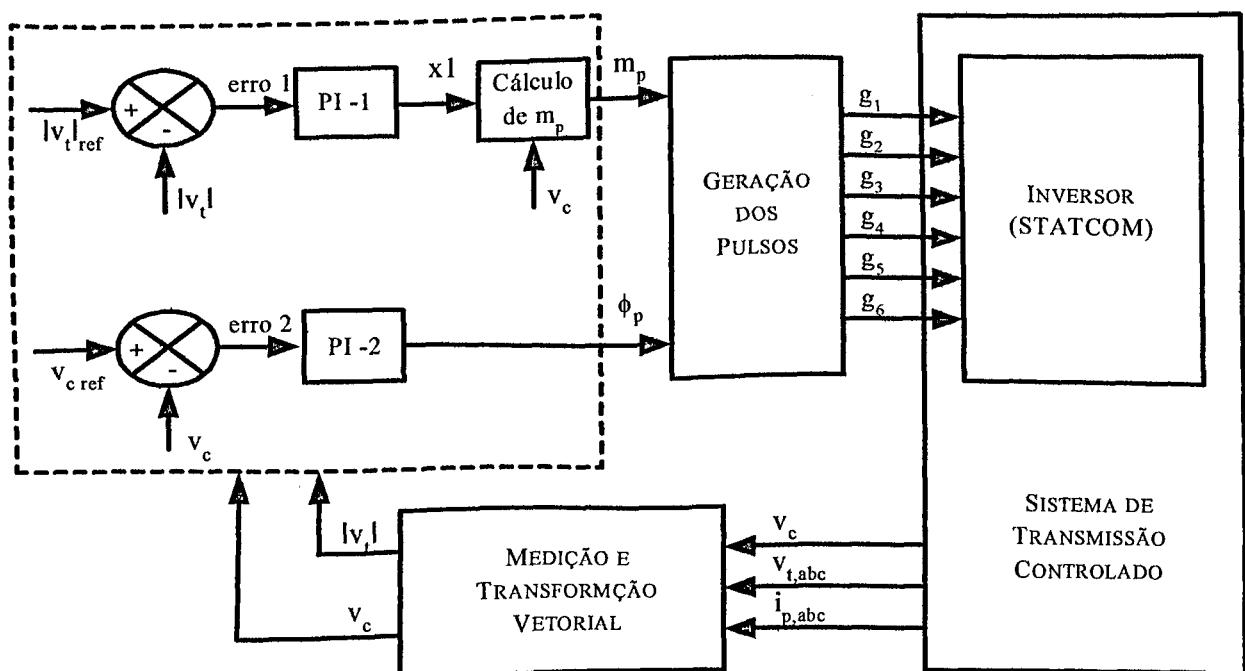


Figura 3.17 – Diagrama de blocos do controle do STATCOM

A figura anterior mostra que, uma vez medido o módulo  $|v_t|$  da tensão no barramento controlado pelo STATCOM, este é comparado com um determinado valor de referência. O sinal de erro proveniente de tal comparação alimenta o controlador PI-1, o qual define o fator de modulação adequado para prover nos terminais trifásicos do inversor uma tensão  $e_p$ , cuja magnitude define o novo fluxo de reativos necessários para que o módulo da tensão no barramento CA seja equiparado com o valor de referência.

À medida que  $|v_t|$  é corrigida, a tensão  $v_c$  nos terminais do capacitor é alterada, devido a uma tendência deste dispositivo de carregar ou descarregar durante tal processo. Assim, uma vez verificado algum sinal de erro entre esta última tensão e o seu valor de referência, o controlador PI-2 define um novo ângulo para a tensão  $e_p$  no lado trifásico do inversor. O desfasamento entre as tensões  $e_p$  e  $v_t$  é responsável pelo fluxo de potência ativa necessária para a descarga ou recarga do capacitor, até que a tensão nos seus terminais atinja o valor de referência estipulado.

### **3.8 – PLATAFORMA COMPUTACIONAL UTILIZADA - O SIMULADOR “SABER”**

A busca de uma plataforma computacional para os fins desta pesquisa, deve-se primar por um *software* que permita vários estudos, como por exemplo: transitórios, harmônicos, fluxo de carga, etc, ou seja, que empregue técnicas de modelagem no domínio do tempo. Dentro desta expectativa destaca-se o simulador “SABER”. Este realiza simulações no citado domínio, que é uma grande vantagem para a análise dinâmica de sistemas elétricos. Este simulador utiliza uma linguagem própria denominada “*MAST*”, de fácil domínio, permitindo a modelagem de componentes elétricos, mecânicos, etc, através de rotinas específicas denominadas “*Templates*”. Isto torna possível a montagem de um sistema complexo, através da conexão de blocos. Além disto, o simulador possui a capacidade de utilizar rotinas elaboradas em outras linguagens como C e Fortran.

São várias as vantagens de utilizar este simulador, entre estas destacam-se:

- Existência de uma biblioteca padrão, para simular elementos do sistema elétrico tais como: resistor (R), indutor (L) e capacitor (C), etc;
- Grande versatilidade gráfica;
- Facilidade na análise de resultados como: distorção harmônica (através da Série de Fourier), análise transitória, etc;
- Permite definir parâmetros de simulação como: tempo de simulação, passo de integração;
- Ajusta automaticamente o passo de integração entre valores máximo e mínimo predefinidos;
- Vários métodos de integração numérica para solução de equações diferenciais;
- Possibilidade de montar o sistema através da conexão (conexão “física”) dos blocos que representam os equipamentos modelados (geradores, motores, transformadores, cabos, etc);
- Modelagem de equipamentos elétricos ou mecânicos através de suas equações diferenciais.

### **3.9 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO STATCOM NO SABER**

Como mencionado, o SABER possui uma grande variedade de componentes elétricos, constituídos por elementos passivos, fontes alternadas e contínuas, chaves, etc. Além disso, permite a criação de novos modelos denominados por *templates*, para o caso de

se necessitar de algum componente diferente daqueles pertencentes à sua biblioteca. Assim, usufruindo destes recursos, foi efetuada a implementação na plataforma SABER do modelo do STATCOM descrito anteriormente e reproduzido na figura 3.18.

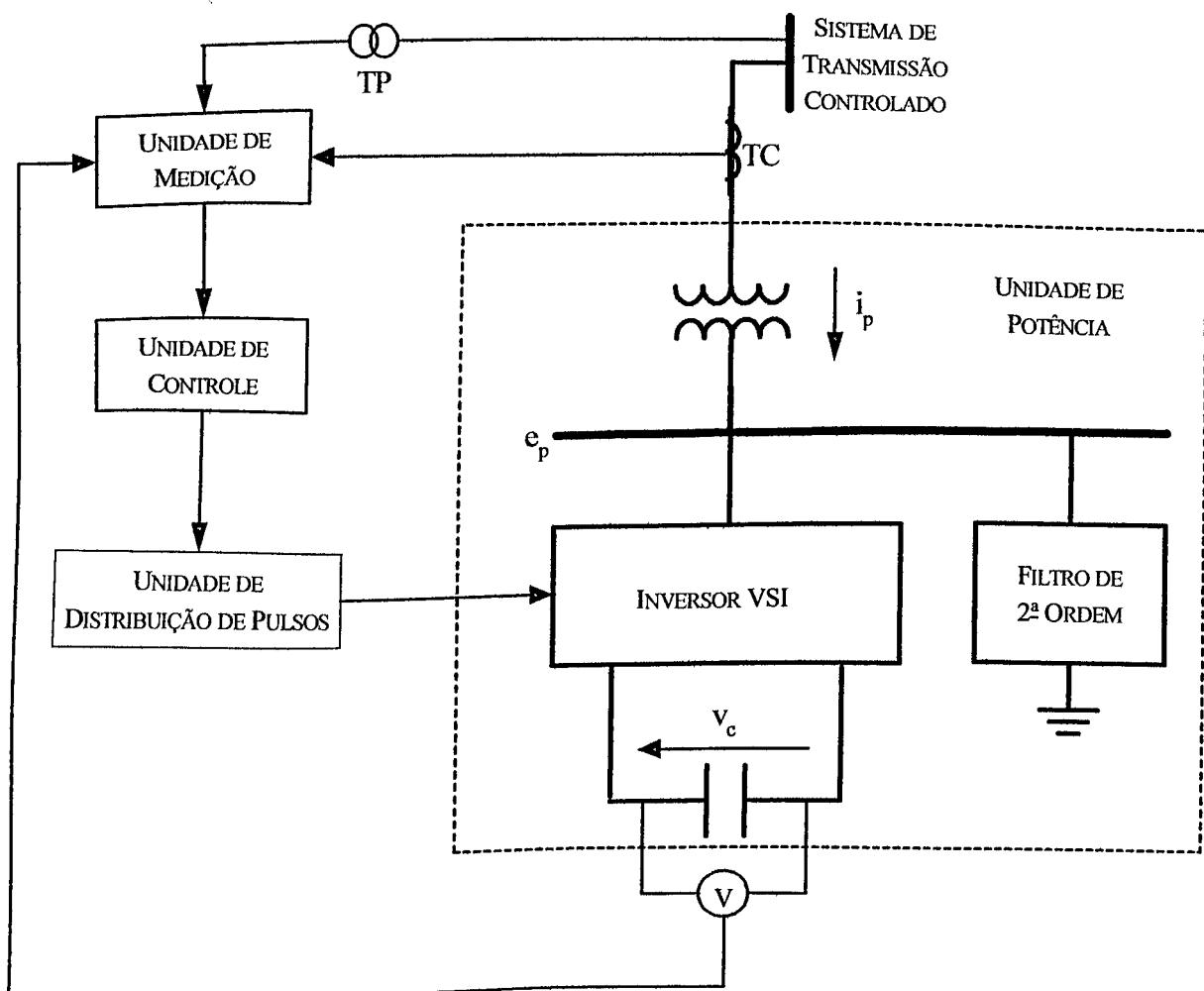


Figura 3.18 – Esquema do STATCOM implementado

Verifica-se, na figura 3.18, a presença de um filtro amortecido de 2<sup>a</sup> ordem, que se justifica devido ao tipo de inversor utilizado, ou seja, VSI com chaveamento do tipo PWM. Neste caso, é possível predizer que, devido ao seu funcionamento, tal

equipamento injeta correntes harmônicas no sistema cujas ordens envolvidas obedecem a equação (3.29).

$$n = kp \pm m \quad (3.29)$$

Onde:

n – ordem harmônica;

p – relação entre as freqüências de chaveamento e fundamental do sistema;

k – um número inteiro e positivo (1, 2, 3...);

m – um número inteiro e positivo (quando k for par, então, m é ímpar e vice-versa).

Diante disso, uma vez que as freqüências de chaveamento encontram-se por volta de 1 kHz, o surgimento de harmônicos ocorre a partir de ordens mais elevadas. Daí o motivo de se escolher uma sistema de filtragem como aquele mostrado na figura 3.18.

O processo de implementação do modelo do STATCOM, exibido na figura 3.18, será agora descrito, enfatizando os *templates* desenvolvidos [2]. Neste sentido, a exposição do modelo implementado do compensador avançado é feita através das suas partes componentes, que consistem das quatro unidades principais mostrada na figura 3.19, onde também são destacados os sinais de intercâmbio entre as mesmas.

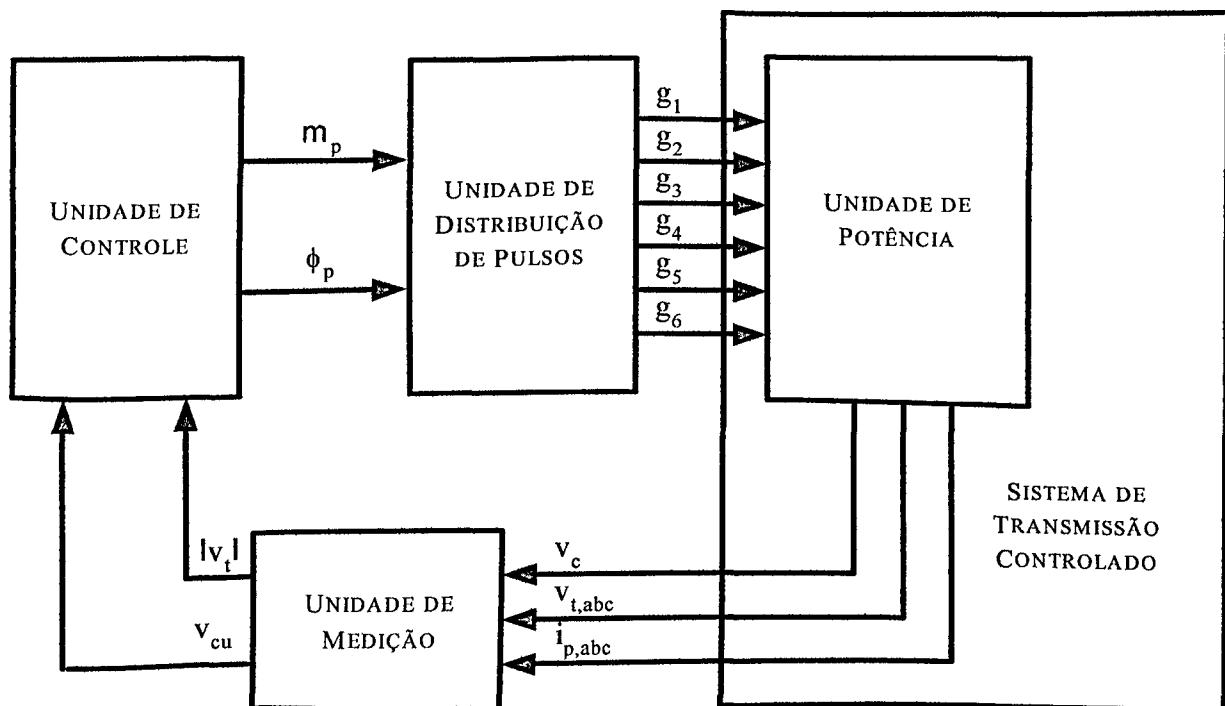


Figura 3.19 – Diagrama esquemático do modelo do STATCOM implementado

Baseando-se na figura 3.19, pode-se dizer que cada unidade (Potência, Medição, Controle, Distribuição de Pulso) é caracterizada por suas funções, as quais são detalhadas nas subseções seguintes.

### 3.9.1 – Unidade de Potência

A unidade de potência é composta pelo transformador de acoplamento entre o STATCOM e o sistema CA, pelas chaves componentes do inversor, pelo capacitor utilizado nos terminais CC e por elementos passivos adicionais (resistores, indutores) representando algum cabeamento. Deve-se ressaltar que, os modelos (*templates*) referentes aos elementos R, L e C utilizados encontram-se disponíveis na biblioteca do simulador em questão. Já os modelos relativos ao transformador de acoplamento e as

chaves da ponte inversora foram desenvolvidos em trabalhos anteriores [31]. Com isso, a modelagem da Unidade de Potência consiste na conexão de tais elementos de modo a se obter a topologia adequada (figura 3.10) [2].

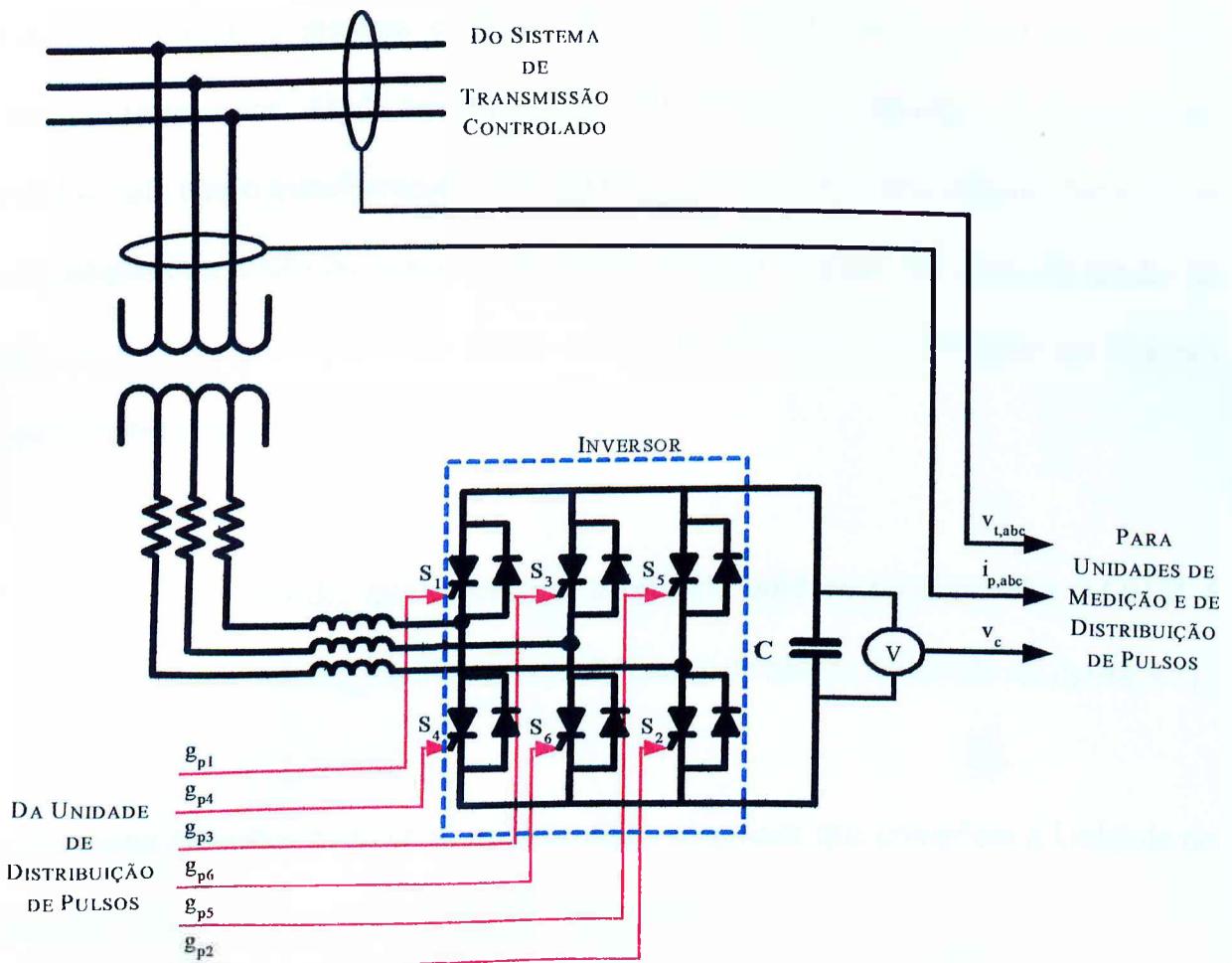


Figura 3.20 – Diagrama de blocos do *template Unidade\_Potência* do STATCOM implementado

Destaca-se ainda que, na Unidade de Potência encontra-se o filtro amortecido comentado anteriormente, cujo *template* representativo também foi desenvolvido em [31]. E também, o circuito de potência, bem como o restante do sistema de transmissão, é modelado de forma trifásica, sendo que as fases são independentemente representadas. Isso conduz a substanciais flexibilidades e versatilidades nos estudos de desempenho e controle de tal compensador.

### 3.9.2 – Unidade de Medição

Esta unidade é dedicada à aquisição de valores medidos das tensões trifásicas no ponto de acoplamento do STATCOM, das correntes trifásicas nos ramos de ligação do equipamento com o sistema e da tensão do capacitor nos terminais de corrente contínua do inversor. Ainda nesta unidade, são efetuadas as manipulações dos sinais medidos, tais como transformação vetorial das tensões e correntes, cálculo dos valores das potências ao longo do tempo e cálculo do módulo e ângulo do vetor da tensão na barra de acoplamento, para que sejam entregues à unidade de Controle no formato requerido pela mesma.

O *template* desenvolvido, que representa a referida unidade no simulador SABER é denominada por **Unidade\_Medição**, cujo diagrama de blocos é exibido na figura 3.21.

Do diagrama posterior pode-se identificar cinco *templates* que compõem a Unidade de Medição, cujas funções são descritas na seqüência:

- **Transformação\_vetorial\_Normalização:** o diagrama de blocos evidenciando as funções deste *template* é mostrado na figura 3.22. primeiramente, os sinais de corrente nas três fases ( $i_{pa}$ ,  $i_{pb}$  e  $i_{pc}$ ) são transformados para sinais de tensão ( $iv_{pa}$ ,  $iv_{pb}$  e  $iv_{pc}$ ) pelo *template Transdutor*, para posteriores manipulações.

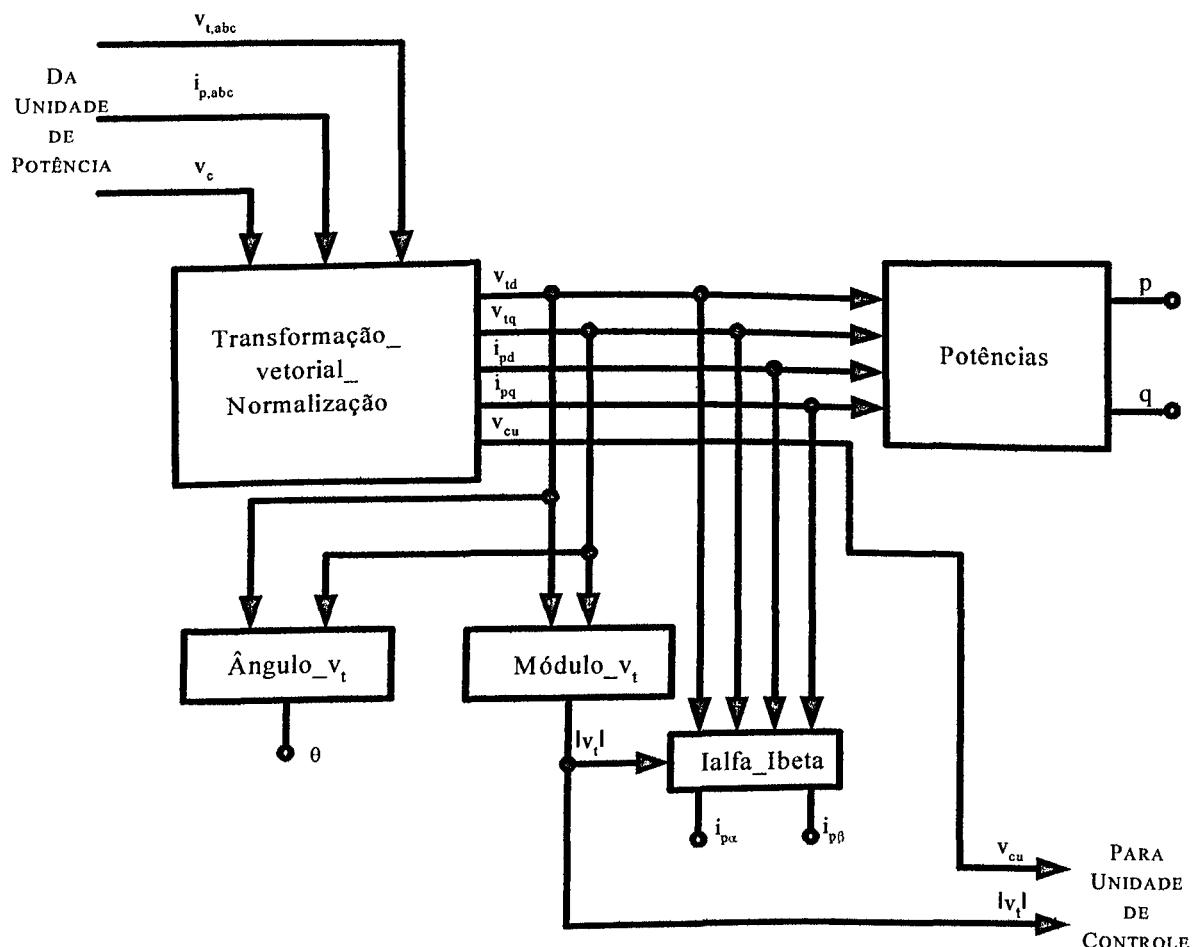


Figura 3.21 – Diagrama de blocos do template **Unidade\_Medição** do STATCOM implementado

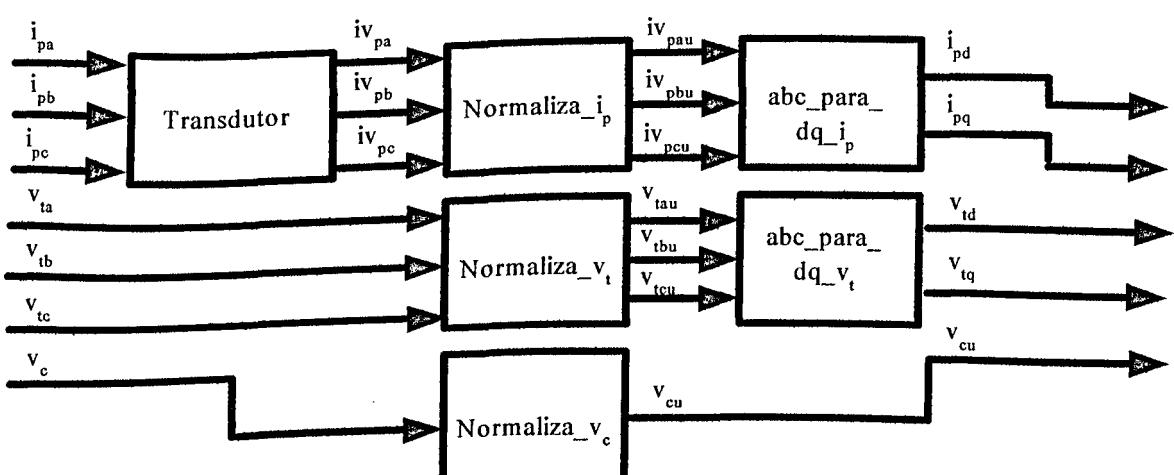


Figura 3.22 – Diagrama de blocos do template **Transformação\_Vetorial\_Normalização**

Tais correntes, assim como as tensões  $v_{ta}$ ,  $v_{tb}$  e  $v_{tc}$ , são normalizadas nos templates `Normaliza_ip` e `Normaliza_vt`, respectivamente, de acordo com as equações (3.30) e (3.31).

$$\dot{v}_{pu} = \frac{\dot{v}_p}{\frac{S_{p\_base}}{\sqrt{3} V_{ca\_base}}} \quad (3.30)$$

$$v_{tu} = \frac{v_t}{v_{ca\_base}} \quad (3.31)$$

Sendo que os valores base para potência ( $S_{p\_base}$ ) e tensão ( $v_{ca\_base}$ ) são fornecidos pelo usuário na entrada de dados do STATCOM. Na seqüência, as tensões e correntes trifásicas normalizadas ( $v_{tau}$ ,  $v_{tbu}$ ,  $v_{tcu}$ ,  $\dot{v}_{pau}$ ,  $\dot{v}_{pbu}$  e  $\dot{v}_{pcu}$ ) são transformadas para grandezas do sistema ortogonal estacionário ( $v_{td}$ ,  $v_{tq}$ ,  $i_{pd}$  e  $i_{pq}$ ), conforme o procedimento apresentado no início deste capítulo, através do respectivo *template* `abc_para_dq`. Além das grandezas alternadas, a tensão medida nos terminais do capacitor ( $v_c$ ) também é normalizada em relação a um valor base informado pelo usuário ( $v_{c\_base}$ ), através da equação (3.32) que está contida no *template* `Normaliza_vc`.

$$v_{cu} = \frac{v_c}{v_{c\_base}} \quad (3.32)$$

- **Módulo\_v<sub>t</sub>:** calcula o módulo do vetor da tensão ( $v_t$ ) na barra controlada através das suas componentes  $v_{td}$  e  $v_{tq}$  e da equação (3.33).

$$|v_t| = \sqrt{v_{td}^2 + v_{tq}^2} \quad (3.33)$$

- **Ângulo\_v<sub>t</sub>:** calcula o ângulo do vetor da tensão ( $v_t$ ) na barra controlada através das suas componentes  $v_{td}$  e  $v_{tq}$  e da equação (3.34).

$$\theta = \text{arc tan} \left( \frac{v_{tq}}{v_{td}} \right) \quad (3.34)$$

Observa-se que, este ângulo ( $\theta$ ) é calculado porém não é enviado para outro *template*.

- **Potências:** a partir dos sinais de tensão e correntes ( $v_{td}$ ,  $v_{tq}$ ,  $i_{pd}$  e  $i_{pq}$ ), calcula as potências ativa (p) e reativa (q) intercambiadas entre o STATCOM e o sistema CA utilizando, para tanto, as equações (3.35) e (3.36). Assim como o ângulo  $\theta$ , estes sinais de potência não são emitidos para outro *template*.

$$p = \frac{3}{2} (v_{td} i_{pd} + v_{tq} i_{pq}) \quad (3.35)$$

$$q = \frac{3}{2} (v_{td} i_{pq} - v_{tq} i_{pd}) \quad (3.36)$$

- **I<sub>alfa</sub>\_I<sub>beta</sub>**: computa as componentes  $i_{p\alpha}$  e  $i_{p\beta}$  da corrente entre o STATCOM e o sistema CA através das equações (3.37) e (3.38). Estas grandezas, também, são visualizadas apenas neste *template*.

$$i_{p\alpha} = \frac{(v_{td} i_{pd} + v_{tq} i_{pq})}{|v_t|} \quad (3.37)$$

$$i_{p\beta} = \frac{(v_{td} i_{pq} - v_{tq} i_{pd})}{|v_t|} \quad (3.38)$$

Uma vez obtidos os sinais ( $|v_t|$  e  $v_{cu}$ ), a serem utilizados pelo sistema de controle do STATCOM, os mesmos são enviados para a Unidade de Controle.

### 3.9.3 – Unidade de Controle

Esta unidade, representada pelo *template* **Unidade\_Controle**, comporta a malha de controle discutida na seção 3.7, cuja saída consiste dos sinais necessários à geração dos pulsos do inversor. O diagrama de blocos representativo deste modelo é mostrado na figura 3.23.

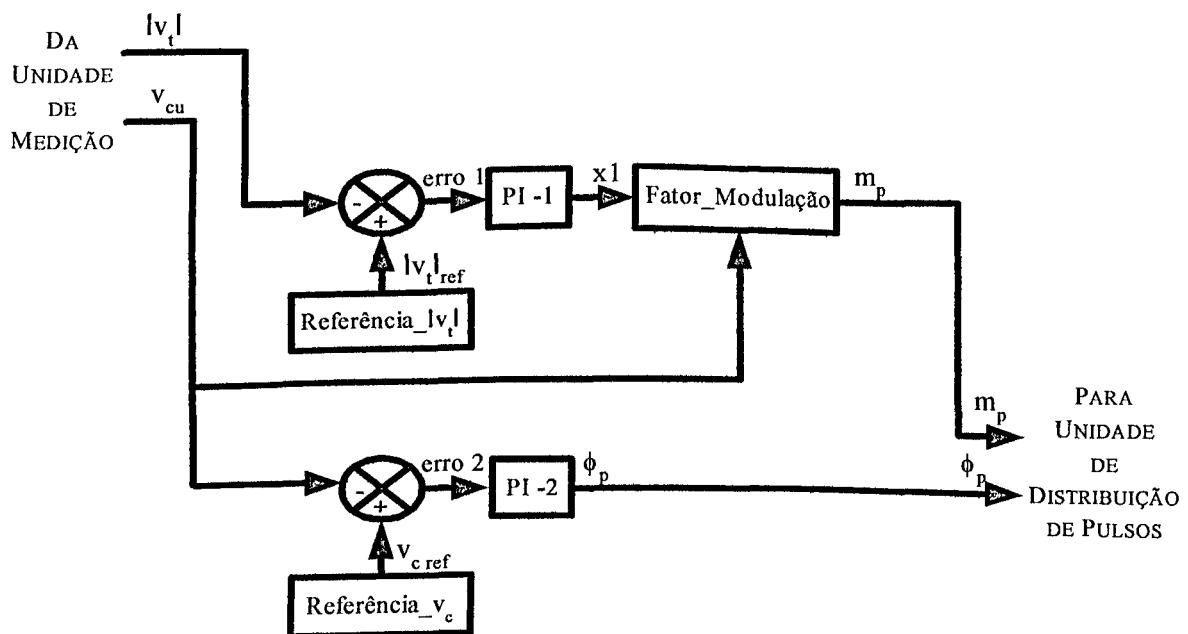


Figura 3.23 – Diagrama de blocos do *template Unidade Controle* do STATCOM implementado

Conforme mencionado anteriormente, o controle consta-se de duas malhas independentes para o controle do módulo da tensão CA  $|v_t|$  (malha superior) e da tensão nos terminais do capacitor  $v_c$  (malha inferior).

Com relação à malha superior, a lógica adotada consiste na comparação do sinal  $|v_t|$ , proveniente da Unidade de Medição, com o valor de referência, oriundo do *template Referência\_* $|v_t|$  que gera um sinal constante estipulado pelo usuário. O erro resultante de tal comparação (erro 1) é enviado para o bloco proporcional/integral (PI-1) que altera a sua saída ( $x1$ ) no sentido de suprimir o referido erro ( $|v_t| = |v_t|_{ref}$ ). Este sinal  $x1$  é processado pelo *template Fator\_Modulação*, através da equação (3.39) [2], de modo que o resultado seja o próprio fator de modulação ( $m_p$ ) requerido para a supressão do erro 1.

$$m_p = 2 \frac{x1 \left( \frac{v_{ca\_base}}{\sqrt{3}} \right)}{v_{cu} (v_c\_base)} \quad (3.39)$$

Vale observar que, na equação anterior, as grandezas  $v_{ca\_base}$  e  $v_c\_base$  são as mesmas utilizadas no template **Transformação\_Vetorial\_Normalização** da Unidade de Medição para normalização das tensões CA e nos terminais do capacitor, respectivamente.

No tocante à malha inferior, a comparação da tensão  $v_c$  com sua respectiva referência (valor definido pelo usuário presente na saída do template **Referência\_** $v_c$ ) dá origem ao erro (erro 2) que, neste caso é a entrada do controlador (**PI-2**). O produto deste último bloco ( $\phi_p$ ) corresponde ao defasamento necessário à tensão entregue pelo inversor, de modo que o erro em questão seja eliminado, ou seja, de modo que  $v_c$  seja igual a referência.

Finalmente, tais sinais de fator de modulação ( $m_p$ ) e defasamento angular ( $\phi_p$ ) são enviados à Unidade de Distribuição de Pulso.

### 3.9.4 – Unidade de Distribuição de Pulso

A partir dos sinais enviados pela Unidade de Controle, a presente unidade, representada no simulador SABER pelo *template* **Unidade\_Distribuição\_Pulsos**, produz os pulsos necessários ao disparo das chaves da ponte inversora. Para melhor visualização da topologia e funcionamento deste *template*, a figura 3.24 traz o seu respectivo diagrama de blocos.

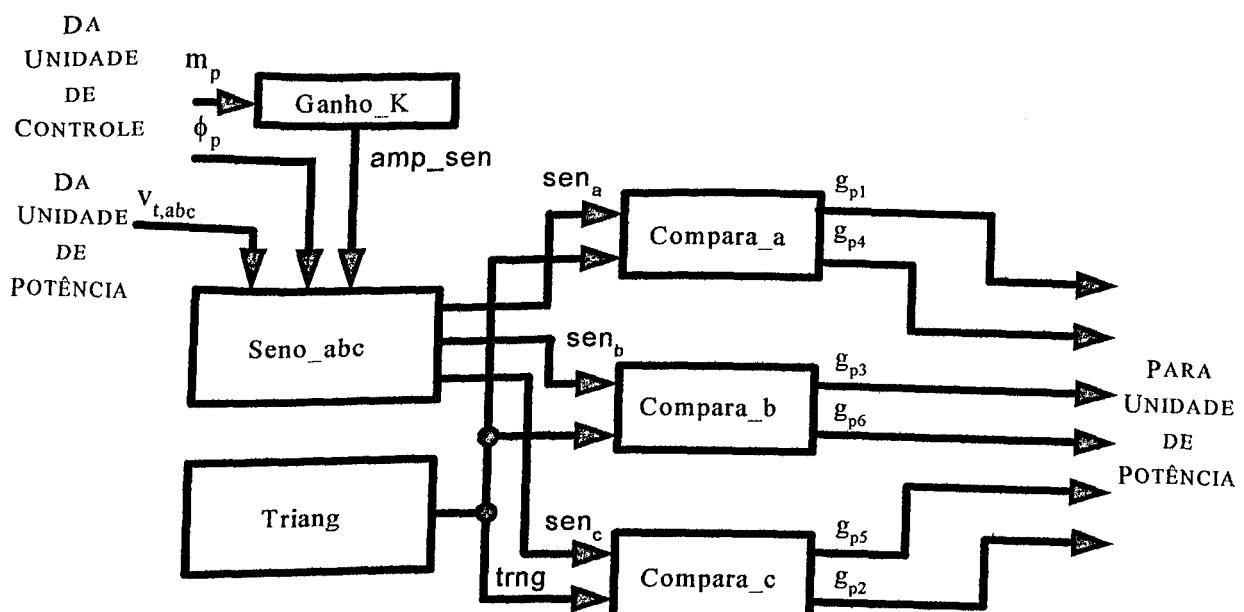


Figura 3.24 – Diagrama de blocos do *template* **Unidade\_Distribuição\_Pulsos** do STATCOM implementado

O chaveamento da ponte inversora emprega a técnica de PWM senoidal, que consiste da comparação de uma onda triangular de alta freqüência (portadora) com uma senoidal (senóide de controle) à freqüência industrial (50 ou 60 Hz) para geração dos pulsos.

O mesmo fator de modulação ( $m_p$ ), definido anteriormente na equação (3.39), também equivale à relação entre as amplitude das ondas senoidais e da onda triangular, como informa a equação (3.40).

$$m_p = \frac{amp\_sen}{amp\_tri} \quad (3.40)$$

Devido a isso, o sinal  $m_p$ , oriundo do template **Unidade\_Controle**, ao passar pelo template **Ganho\_K**, é multiplicado por uma constante ( $amp\_tri$ ), que é previamente definida pelo usuário. O resultado dessa operação ( $amp\_sen$ ) é enviado para o template **Seno\_abc** o qual, a partir desse sinal de entrada, define a amplitude das três ondas senoidais ( $sen_a$ ,  $sen_b$  e  $sen_c$ ) defasadas entre si de  $120^\circ$ , a serem geradas nas suas saídas. É necessário ressaltar que, o sinal  $\phi_p$ , enviado por **Unidade\_Controle**, define o desfasamento entre a senóide de controle da fase “a” ( $sen_a$ ) e a tensão da mesma fase no barramento ao qual o STATCOM está conectado. Já o template **Triang** produz na sua saída ( $trng$ ) a referida onda portadora cujas amplitude ( $amp\_tri$ ) e freqüência são, também definidas pelo usuário.

Uma vez obtidas as senóides de controle para cada fase e a onda triangular comum para as três fases, estas são enviadas aos pares aos seus respectivos blocos comparadores, como ilustrado na figura 3.24. Assim, a lógica implementada no template **Compara\_a** consiste em:

SE ( $\text{sen}_a > \text{trng}$ ) ENTÃO

$g_{p1} = 1$  # Chave S<sub>1</sub> (**Unidade\_Potência**) fechada

$g_{p4} = 0$  # Chave S<sub>4</sub> (**Unidade\_Potência**) aberta

SENÃO

$g_{p1} = 0$  # Chave S<sub>1</sub> (**Unidade\_Potência**) aberta

$g_{p4} = 1$  # Chave S<sub>4</sub> (**Unidade\_Potência**) fechada

FIM\_SE

O mesmo algoritmo acima é aplicada aos *templates* **Compara \_b** e **Compara \_c**, resguardando-se a relação entre as senóides de controle e os respectivos sinais de gatilho.

### 3.10 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os principais conceitos da teoria vetorial para representação de grandezas trifásicas instantâneas, fundamental para análise, modelagem e controle utilizada neste trabalho.

Também apresentou uma abordagem didática do equipamento em foco, o STATCOM, mostrando todo equacionamento básico e o princípio de funcionamento, ilustrado em forma de diagramas fasoriais, evidenciando as suas particularidades operacionais.

Demonstrou-se a principal finalidade do equipamento que é regulação de tensão, através do suprimento de potência reativa controlada em tempo real, funcionando como uma fonte de reativos controlada. Além disso, o STATCOM pode realizar compensação de potência ativa, demonstrando assim a sua superioridade em relação aos outros equipamentos também utilizados para realizar a compensação, como o SVC.

Considerou-se, também, de forma resumida, as vantagens da ferramenta computacional utilizada nesta dissertação, o simulador “SABER”, e a implementação do STATCOM no simulador.

## **Capítulo IV**

### **DESEMPENHO DINÂMICO DE UM SISTEMA ELÉTRICO SOB A AÇÃO DO STATCOM**

#### **4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O aumento do consumo de energia provoca o crescimento dos sistemas elétricos, através das interconexões. Proporcionado alterações nos fluxos de potências devido às novas configurações. Como consequência, pode-se ter sobrecarregamento de algumas linhas, com efeito a deterioração do perfil de tensão e, diminuição da estabilidade. Justificando o emprego de compensadores.

Dentro desta proposta, e após levar-se em consideração as abordagens anteriores, este capítulo tem por meta principal, estudar efeitos relacionados à operação do STATCOM em sistemas elétricos, com respeito ao desempenho dinâmico. Para tanto, apresentar-se-ão os resultados obtidos de análises computacionais, enfocando a simulação do STATCOM em um sistema elétrico submetido a diversos distúrbios.

## 4.2 – NOÇÕES DE ESTABILIDADE DE SISTEMA ELÉTRICO

Com o crescimento natural dos sistemas de energia elétrica, o problema da estabilidade acentua-se, uma vez que, a relação geração/carga se torna bastante suscetível aos distúrbios aí provocados. Fica claro então a necessidade de estudos nesta área visando o desenvolvimento de novas técnicas e dispositivos com capacidade de melhorar a estabilidade do sistema. Assim, nas próximas subseções apresentar-se, de forma resumida, os aspectos da estabilidade de um sistema multi-máquinas, assim como sua classificação quanto ao tipo de estudo a ser realizado, ficando mais clara a idéia de estabilidade.

### 4.2.1 – Aspectos da Estabilidade de um Sistema Multi-Máquinas

O problema da estabilidade de um sistema elétrico está relacionado diretamente com o comportamento das máquinas síncronas e seus reguladores, das cargas, assim como a influência da topologia do próprio sistema. Após uma perturbação, que não envolva mudanças na topologia ou na potência do sistema, as máquinas devem retornar ao seu estado original de operação. Se houver um desbalanceamento entre geração e carga (suprimento e demanda) causada pela mudança da carga, geração ou nas condições do circuito, um novo ponto de operação deve ser atingido pelas máquinas geradoras. Em qualquer caso, todas as máquinas síncronas conectadas devem permanecer em sincronismo se o sistema for estável, ou seja, permanecem operando na mesma

freqüência. Assim pode-se afirmar que se a resposta de um sistema de potência durante um período transitório que se segue a um distúrbio é amortecida, e o sistema retorna em um tempo finito a uma nova condição de operação, o sistema é estável, caso isto não ocorra o sistema é instável.

Para a análise correta da estabilidade de um sistema, as condições sobre as quais a estabilidade é examinada devem estar bem estabelecidas. Isto inclui as condições de operação, assim como o tipo de perturbação ao qual o sistema é submetido. Estas condições se tornam de vital importância à medida que o sistema elétrico cresce e a estabilidade fica mais comprometida. Outro aspecto importante a ser analisado é o período transitório que pode ser definido como o tempo entre a ocorrência do distúrbio e o restabelecimento da operação normal do sistema. Concluindo, um sistema elétrico multi-máquinas é estável se, após um transitório, houver um amortecimento tal que todas as máquinas interconectadas retornem a um determinado ponto de operação com a mesma freqüência, isto é, mantendo-se em sincronismo uma com as outras.

#### 4.2.2 – Estabilidade Angular

Costuma-se separar o estudo de estabilidade em três fases ou regimes distintos: estabilidade de regime permanente, estabilidade de regime transitório, e estabilidade de regime dinâmico. Estes fenômenos são considerados em mais detalhes a seguir:

#### 4.2.2.1 – Estabilidade de Regime Permanente

Durante o período normal de operação do sistema elétrico a carga total sofre pequenas, graduais e lentas variações e os geradores se ajustam de forma a manter a freqüência especificada. Quando a carga se torna maior do que a do regime normal de trabalho do sistema, as flutuações tornam-se mais significativas. Um limite é alcançado quando a transferência de potência do gerador para a carga não pode mais ser aumentada e qualquer acréscimo por menor que seja, pode causar a perda de sincronismo entre os geradores. A estabilidade de regime permanente visa justamente analisar o caso descrito acima, onde se verifica que um limite de estabilidade pode ser atingido. Em sistemas elétricos reais, a perda de estabilidade sob este aspecto é possível, porém pouco provável, devido a capacidade de geração e da interligação de vários sistemas.

O amortecimento do gerador é também um importante fator na manutenção da estabilidade, principalmente nas máquinas de rotores sólidos, onde aparecem de correntes parasitas produzindo conjugados amortecedores. As máquinas síncronas de pólos salientes são equipadas com enrolamentos amortecedores.

Outra forma de melhorar a estabilidade da máquina seria com o uso de regulador de tensão. Isto porque a tensão de saída da máquina pode ser variada pelo controle de excitação, podendo-se assim interferir em mais uma variável da potência de transferência.

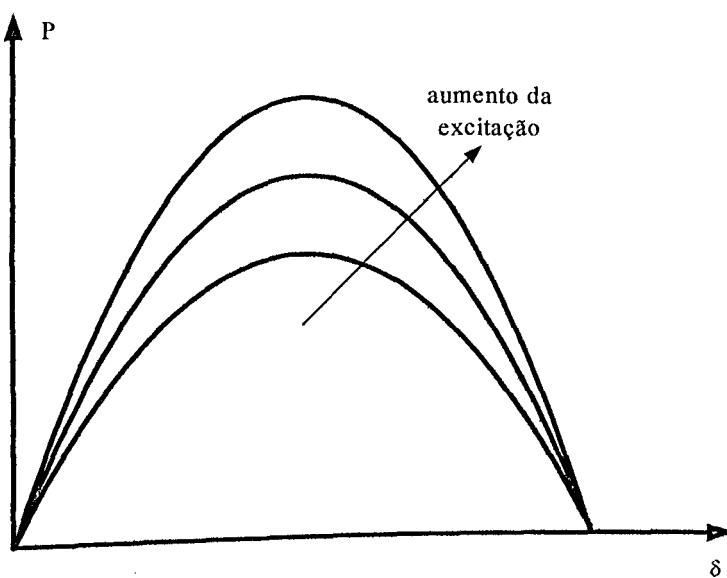


Figura 4.1 – Diagrama de potência transferida X ângulo de potência com o efeito da excitação

#### 4.2.2.2 – Estabilidade de Regime Transitório

Quando uma grande e súbita perturbação ocorre no sistema, a máquina não responde imediatamente ao distúrbio devido à inércia das massas rotativas acopladas ao eixo, assim ela irá oscilar em torno de um valor de regime permanente. As figuras 4.2(a) e 4.2(b) mostram esta oscilação do ângulo de potência da máquina síncrona, devido à mudança na potência do sistema. Em regime permanente a máquina fornece potência elétrica  $P_{el} = P_{ml}$ , sendo  $P_{ml}$  a potência mecânica fornecida à máquina síncrona com ângulo de carga  $\delta_1$ .  $P_{el2}$  associada com  $\delta_2$  é o estado final, ou seja, a nova posição em regime permanente e  $\delta_3$  é o ângulo máximo atingido no transitório. A máquina se mantém estável enquanto a área  $A_2$  puder ser feita igual a  $A_1$ , quando isto não mais for

possível a máquina sair do sincronismo. Este critério é conhecido como “critério de estabilidade das áreas iguais”.

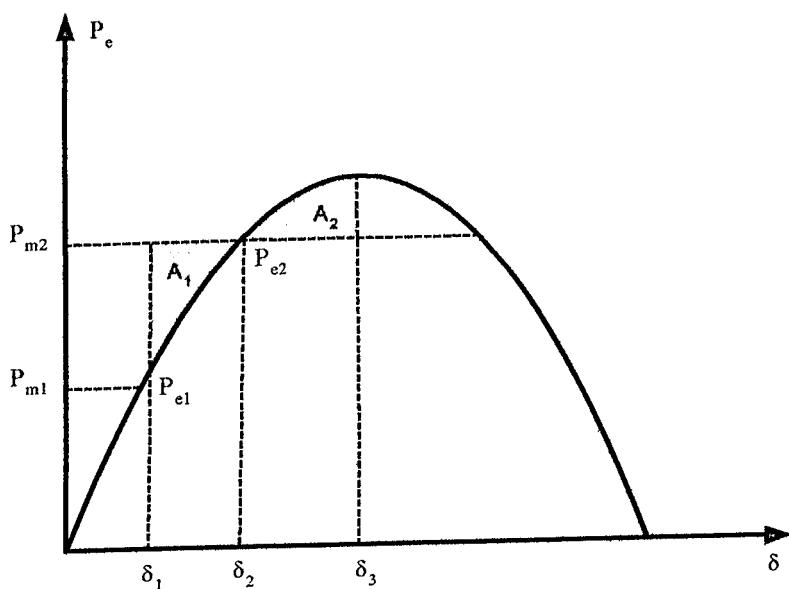


Figura 4.2 (a) – Diagrama potência X ângulo de carga

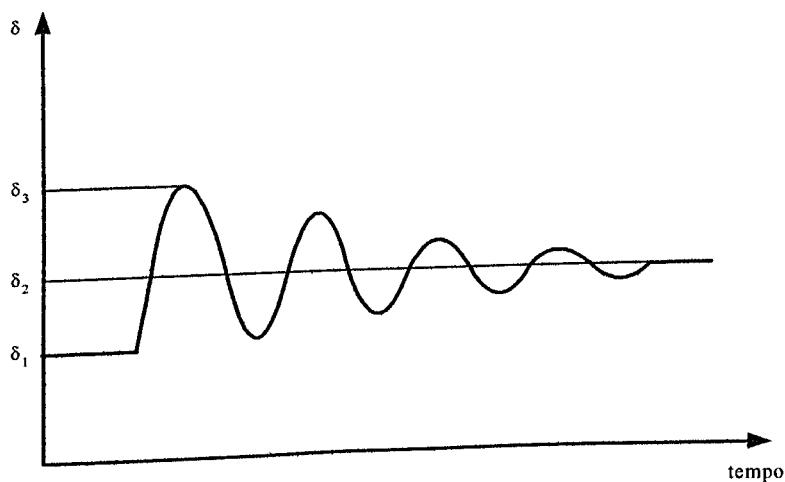


Figura 4.2 (b) – Diagrama ângulo de potência X tempo

A figura 4.3 mostra um diagrama onde se observa o valor máximo do ângulo de carga ( $\delta_{\max}$ ) para que ainda exista estabilidade.

O estudo a estabilidade em regime transitório é justamente o estudo feito quando da ocorrência de grandes perturbações, tais como: curto-círcuito, perda de linha, grandes variações de carga, perda de geração, etc; e é usualmente feito por poucos segundos após o distúrbio. Desta forma este estudo visa analisar se o sistema elétrico, ou um gerador em particular, irá ou não suportar este tipo de transitório, ou até onde um transitório desta natureza os afeta.

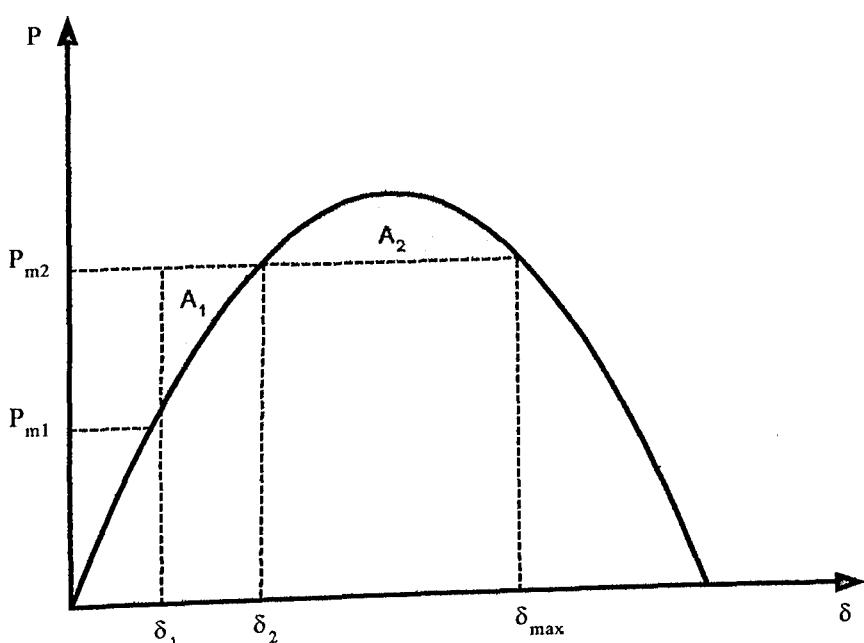


Figura 4.3 – Diagrama mostrando o máximo ângulo de carga que pode ser atingido para que a máquina permaneça estável

Três fatores afetam os resultados do estudo de estabilidade de regime transitório. Primeiramente o tipo de falta, em segundo lugar a posição onde ocorre a falta e em terceiro lugar o tempo de duração da falta.

#### 4.2.2.3 – Estabilidade de Regime Dinâmico

Quando um sistema está trabalhando próximo dos limites de estabilidade, pequenas perturbações podem eventualmente causar instabilidade. Esta situação se torna mais pronunciada a medida que o sistema cresce e as potências precisam ser transmitidas a distâncias maiores. Assim, a análise de estabilidade de regime dinâmico deve considerar agora componentes tais como reguladores de velocidade e de tensão, os quais poderiam ser ignorados nos casos anteriores. Esta análise exige que todos os componentes do sistema sejam mais precisamente modelados, conseguindo com isto melhorar substancialmente a qualidade dos resultados obtidos. Uma outra característica deste tipo de estabilidade é que o tempo de estudo da estabilidade dinâmica pode ser maior que os demais; chegando na ordem de minutos.

#### 4.2.3 – Estabilidade de Tensão

O comportamento dinâmico de um sistema elétrico de potência refere-se à capacidade do sistema de “responder” a um distúrbio (falta) e também a sua operação em regime permanente. A habilidade de se transferir potência reativa das fontes produtoras para o pontos de consumo durante a operação em regime permanente é o principal aspecto da estabilidade de tensão. A capacidade máxima de transferência de potência não é obrigatoriamente o limite de estabilidade de tensão. Devido as variações constante nas cargas, o sistema elétrico é um sistema dinâmico.

A definição de estabilidade de tensão é capacidade do sistema de potência de manter níveis de tensão aceitáveis em todas as barras, seja em condição normal de operação (regime permanente), ou após uma perturbação [24].

#### **4.3 – EFEITOS DOS COMPENSADORES DE REATIVOS NA ESTABILIZAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

Os grandes centros geradores estão distantes do centros de consumo, daí a necessidade de transportar esta energia gerada até os consumidores, utilizando-se de linhas de transmissão que operam quase sempre próximas de seus limites de carregamento. O ideal é que se transporte o máximo de potência com a máxima segurança, ou seja, que estas linhas sejam confiáveis e com o mínimo de perdas. Isto implica que grandezas tais como tensão, corrente e potência reativa sejam controladas.

Um sistema de potência deve atender a demanda da carga com as seguintes exigências:

- Com confiabilidade, pois a demanda sofre variações contínuas e aleatórias, tanto em potência ativa como reativa.
- Com qualidade no fornecimento, ou seja, apresentando um perfil de tensão e freqüência constante ou em um nível considerado satisfatório.

Para que um sistema de potência seja eficiente e confiável, deve-se:

- Manter a tensão sempre dentro de limites aceitáveis;
- Diminuir o fluxo de potência reativa.

Como foi dito, a carga em um sistema elétrico de potência varia constantemente, variando o perfil de tensão, e isto provoca uma variação da potência reativa exigida pelo sistema. Assim, torna-se necessário o uso de equipamentos para controle deste perfil, o qual pode ser feito através compensadores de reativos [23].

Deve-se salientar que a utilização de compensadores não é o único meio de controlar tensão de uma rede, mas devido aos custos em relação a criação de novas linhas e também novas unidades geradoras, este procedimento tem sido o mais viável.

A necessidade de realizar compensação de reativos de um sistema de potência fundamenta-se nas seguintes premissas:

- A necessidade de se manter a estabilidade do sistema de potência;
- Através da compensação de potência reativa tem-se uma melhora na estabilidade transitória e dinâmica do sistema durante e após os distúrbios;
- Controle de tensão entre os limites aceitáveis em regime permanente, e também para fornecer um serviço de qualidade para os consumidores (cargas);
- Desvios de tensão não corrigidos podem levar ao desligamento ou até mesmo danos de equipamentos, ou dependendo do grau de variação, à saída parcial ou total de operação do sistema elétrico;

- Evitar fluxo desnecessário de potência de reativa nas linhas transmissão;
- A circulação de potência reativa em excesso na linha provoca perdas no sistema de transmissão, portanto uma compensação que consiga fornecer a quantidade adequada de acordo com a necessidade do sistema reduz as perdas.

A compensação de um sistema tem como objetivo atender as exigências em regime permanente, como também após distúrbios, ou seja, durante o comportamento transitório do sistema. Tendo isto em mente, procede-se, a seguir, estudos do comportamento dinâmico de um sistema elétrico na presença de um compensador estático avançado, particularmente, o STATCOM.

#### 4.4 – SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO

Para a realização das simulações propostas, utilizou-se de um sistema elétrico extraído da referência [2], com algumas modificações próprias ao propósito deste trabalho. Dentre estas cita-se a utilização de geradores síncronos, ao invés de barramentos infinitos. Conforme apresentado na figura 4.4, o sistema é composto por dois geradores munidos de reguladores de velocidade e de tensão, alimentando três cargas.

Alguns dos componentes necessários aos estudos já fazem parte da biblioteca de recursos disponíveis no SABER. Estes *templates* foram desenvolvidos em trabalhos anteriores, destacando-se os modelos para: gerador, transformador, carga e linha de

transmissão. Como mencionado, o *template* relacionado com o STATCOM constitui-se em desenvolvimentos próprios desta dissertação.

O STATCOM foi conectado na barra 2, já que estudos preliminares indicaram ser esta a barra mais fragilizada sob o ponto de vista de sustentação de tensão.

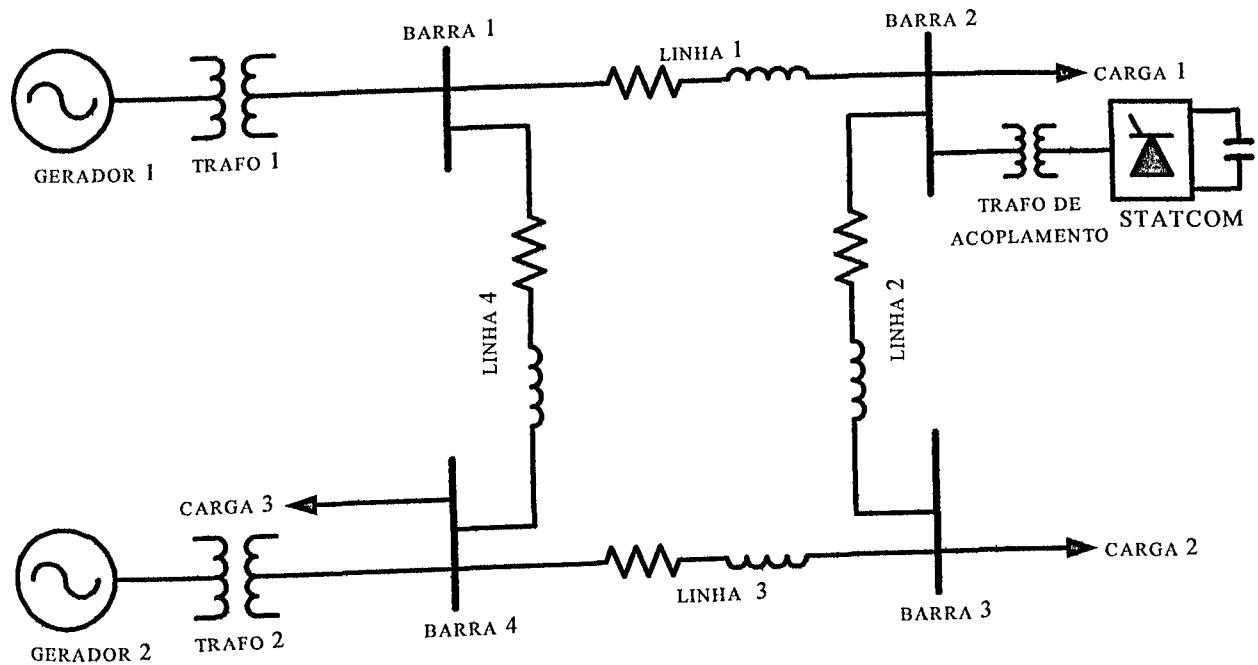


Figura 4.4 – Diagrama unifilar do sistema simulado

#### 4.4.1 – Parâmetros dos Componentes do Sistema Elétrico

Os dados dos componentes que compõem o sistema elétrico simulado estão fornecidos nas tabelas 4.1 a 4.7.

**Tabela 4.1 - Dados dos geradores síncronos [31]**

Descrição	Simbologia	Valor
Potência nominal - (MVA)	$S_{nom}$	25
Tensão nominal - (kV)	$V_{nom}$	13,8
Reatância síncrona de eixo direto - (pu)	$X_d$	1,1339
Reatância síncrona de eixo em quadratura - (pu)	$X_q$	1,11239
Reatância de dispersão de uma fase do estator - (pu)	$X_l$	0,1727
Reatância transitória de eixo direto - (pu)	$X'_d$	0,2159
Reatância subtransitória de eixo direto - (pu)	$X''_d$	0,1833
Reatância subtransitoria de eixo em quadratura – (pu)	$X''_q$	0,18
Resistência por fase do estator - (pu)	$R_s$	0,0014
Constante de tempo transitória de eixo direto de circuito aberto - (s)	$T'_{d0}$	6,48
Constante de tempo subtransitoria de eixo direto de circuito aberto - (s)	$T''_{d0}$	0,004
Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura de circuito aberto - (s)	$T''_{q0}$	0,004
Momento de inércia das partes girantes - (s)	Inércia	4,75
Corrente do campo a vazio – (A)	$I_{rotor}$	210
Velocidade – (rad/s)	$w$	377,0
Freqüência - (Hz)	$f$	60,0
Número de pólos	$p$	2

Tabela 4.2 - Dados dos reguladores de tensão [31]

Descrição	Simbologia	Valor
Constante de tempo da referência - (s)	Tref	0,5
Ganho do circuito de estabilização - (pu)	Kf	0,01
Constante de tempo de estabilização - (s)	Tfl	1,5
Constante de tempo de estabilização - (s)	Tf2	0,34
Constante de tempo do regulador - (s)	Ta	0,01
Ganho de malha aberta do regulador - (pu)	Ka	700
Constante de tempo da excitatriz - (s)	Te	0,33
Constante da excitatriz - (pu)	Ke	1
Constante de tempo do filtro de entrada - (s)	Tr	0,0023
Tensão máxima do regulador - (pu)	Vmax	7,9
Tensão mínima do regulador - (pu)	Vmin	-7,9
Tensão mínima da excitação - (pu)	Emin	0
Tensão nominal da excitação - (V)	Enom	100
Tensão nominal do barramento a ser controlado - (V)	Vnom	13800
Fator de saturação para 100% Emax - (pu)	SEmax	0,95
Fator de saturação para 75% Emax - (pu)	SEpmax	0,93

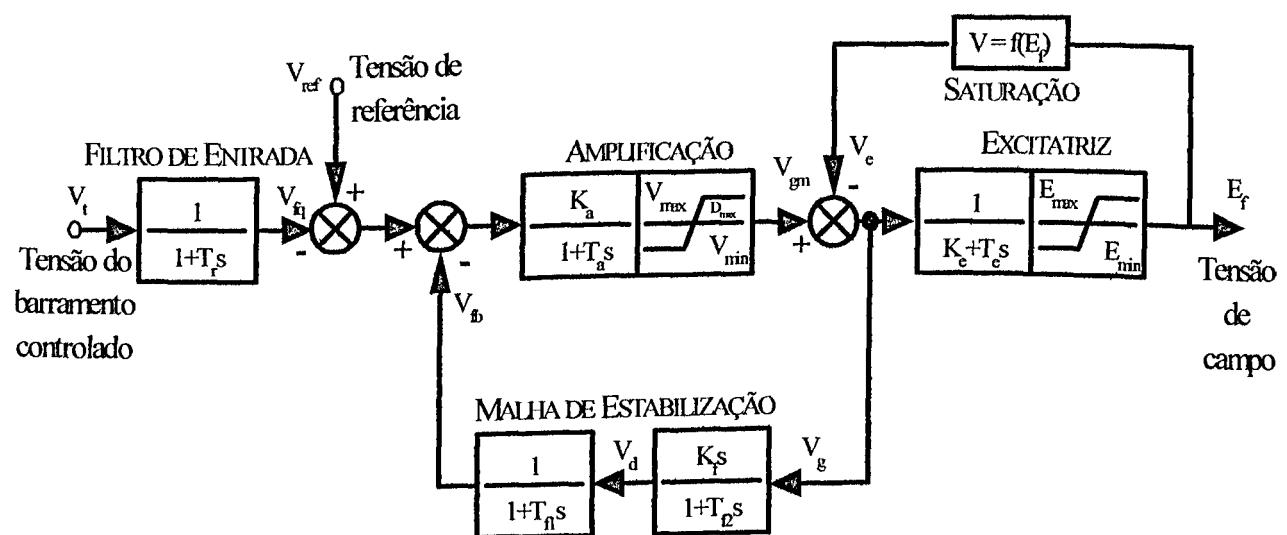


Figura 4.5 – Modelo do regulador de tensão IEEE Tipo II

Tabela 4.3 - Dados dos reguladores de velocidade [31]

Descrição	Simbologia	Valor
Velocidade síncrona de referência - (rad/s)	Wref	377
Ganho do bloco <i>flyballs</i>	G	1
Constante de tempo do bloco <i>flyballs</i> - (s)	Tfb	0,0001
Regulação - (pu)	R	0,02
Constante de tempo - (s)	T1	0,003
Constante de tempo - (s)	T2	0,001
Constante de tempo - (s)	T3	0,002
Constante de tempo - (s)	T4	0,0001
Constante de tempo - (s)	T5	0,002
Potência especificada - (pu)	Pref	0
Potência máxima da turbina - (pu)	Gmax	1,9
Torque nominal - (N.m)	Tnom	70000

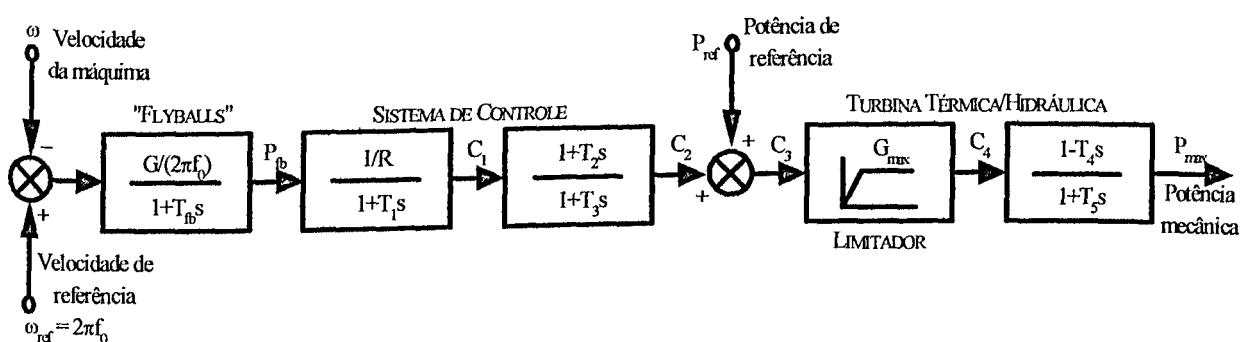


Figura 4.6 – Modelo do regulador de velocidade de turbina térmica/hidráulica

Tabela 4.4 – Dados das cargas

Carga	Potência Aparente (MVA)	Fator de Potência	Freqüência nominal (Hz)	Tensão nominal (kV)
Carga 1	10	0,92	60	69
Carga 2	15	0,92	60	69
Carga 3	10	0,92	60	69

**Tabela 4.5 - Dados das linhas**

Comprimento (km)	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Susceptânci (Ω/km)
10	0,0529	0,529	0,926

**Tabela 4.6 - Dados dos transformadores (conexão Δ-Y)**

Potência (MVA)	Tensão Primário (kV)	Tensão Secundário (kV)	Resistência (%)	Reatância (%)
25	13,8	69	0,01	5,0

**Tabela 4.7 – Dados do STATCOM**

Descrição	Simbologia	Valor	
Tensão no primário do transformador de conexão - (V)	vpr	69	
Tensão no secundário do transformador de conexão - (V)	vss	3,3	
Resistência percentual do transformador de conexão - (%)	rtrafo	0,5	
Reatância percentual do transformador de conexão - (%)	xtrafo	8,0	
Potência nominal do transformador de conexão - (MVA)	sn	35	
Capacitância do capacitor nos terminais CC - (mF)	C	64	
Tensão de referência da barra controlada - (pu)	vac_ref	1,0	
Tensão de referência do capacitor nos terminais CC - (pu)	vdc_ref	1,0	
Tensão CA base na alta tensão- (V)	vbase_at	69000	
Tensão CA base na baixa tensão- (V)	vbase_bt	3300	
Tensão CC base - (V)	vdc_base	10000	
Potência base - (MVA)	sbase	35	
Filtro amortecido de 2 <sup>a</sup> ordem	Resistência - (pΩ)	r1	0,001
	Resistência - (Ω)	r2	0.1872
	Indutância- (μH)	l1	175296
	Capacitância - (μF)	c1	500

## 4.5 – CASOS ESTUDADOS

Os casos processados objetivaram analisar o comportamento dinâmico do sistema munido do STATCOM, diante das perturbações mais severas e comuns, tais como:

Curto-Circuitos, Perdas de Geração com Rejeição de Carga e Perdas de Carga.

Nestas condições, são analisadas várias grandezas obtidas computacionalmente, como por exemplo: tensões em vários pontos do sistema, potência ativa e reativa de geradores e do STATCOM.

*Tabela 4.8 - Casos analisados*

Caso	Distúrbio
01	Curto-circuito trifásico na barra 2 durante 200 ms
02	Perda de geração com rejeição de carga após 200 ms
03	Perda de carga (aproximadamente 28%)
04	Mudança no modo de operação (capacitivo para indutivo)

### 4.5.1 – Análise de Curto-Círculo Trifásico

O distúrbio causado nesta simulação corresponde a um curto-círculo trifásico aplicado a barra 2 do sistema da figura 4.4 onde está conectado o STATCOM, como indicado pela Figura 4.7, através de uma impedância indutiva de  $301,59 \Omega$ , com duração de 200 ms.

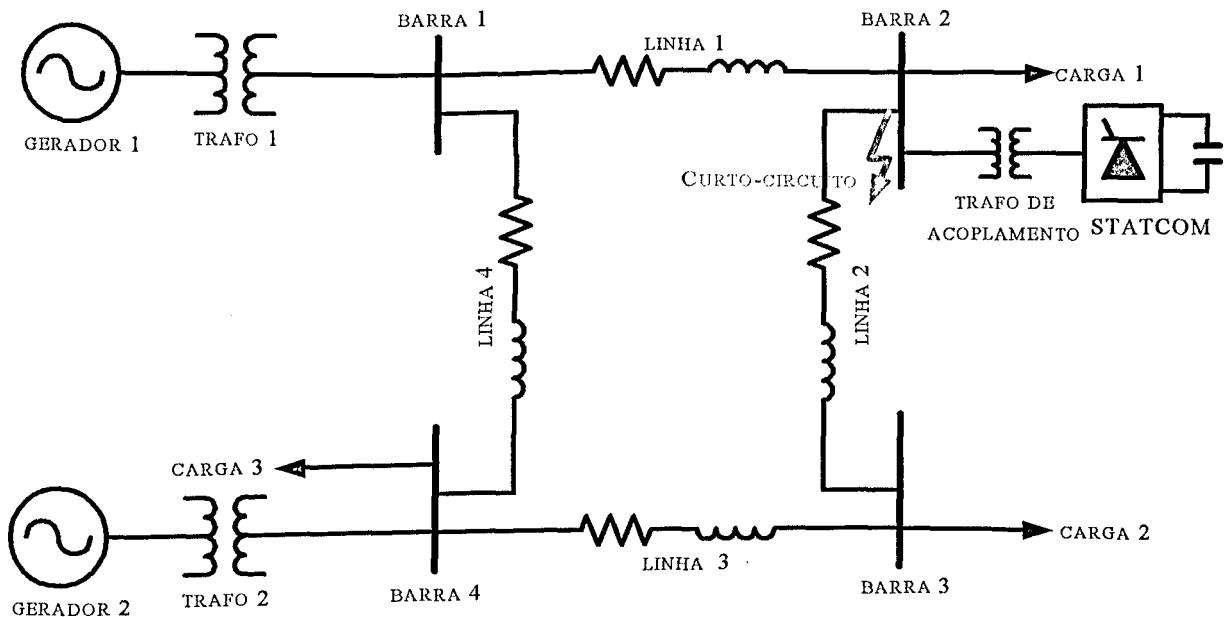


Figura 4.7 – Diagrama unifilar do sistema simulado com curto-circuito na barra 2

Os resultados obtidos, consistem em curvas representativas do comportamento do sistema durante 7 s, começando em 1 s e finalizando em 8 s. O primeiro segundo de simulação foi omitido, pois este incluía oscilações de partida dos geradores, até que o sistema entrasse em regime permanente. Durante o período compreendido entre 1 a 2 s, o STATCOM permaneceu inativo, sendo ligado no instante 2 s. O curto-circuito é aplicado no instante 6 s, tendo duração de 200 ms.

A curva da figura 4.8(a) ilustra o comportamento da tensão na barra 2, onde ocorre o curto-circuito. Nota-se que antes da operação do STATCOM (até 2 s) a tensão da barra está um pouco abaixo de 1 pu (aproximadamente 0,97 pu), porém, com entrada deste equipamento, a tensão eleva-se para o valor desejado (ou de referência do STATCOM) de 1 pu. Observa-se também o curto tempo de resposta do dispositivo em questão. Já no instante de 6 s, início do curto-circuito, a tensão cai, atingindo aproximadamente 0,95 pu, mas devido a ação do compensador, esta volta para o valor de referência.

Outro fato relevante, ocorre logo após a retirada do curto-círcuito em 6,2 s. Como o compensador estava injetando reativos para elevar a tensão, isto produz um pico de aproximadamente 0,05 pu, explicado também pela ação dos reguladores de tensão dos geradores.

A figura 4.9(a) mostra agora o comportamento da tensão na barra 2, **sem** a presença do STATCOM. Observa-se que, na ausência do compensador, a tensão permaneceu em 0,97 pu, e que durante o curto-círcito, a tensão cai para, aproximadamente 0,88 pu, caracterizando uma queda em torno de 12 % na tensão. Vale ressaltar que uma tensão com este valor e com esta duração pode afetar equipamentos e principalmente comprometer processos controlados, caso estes existam no sistema.

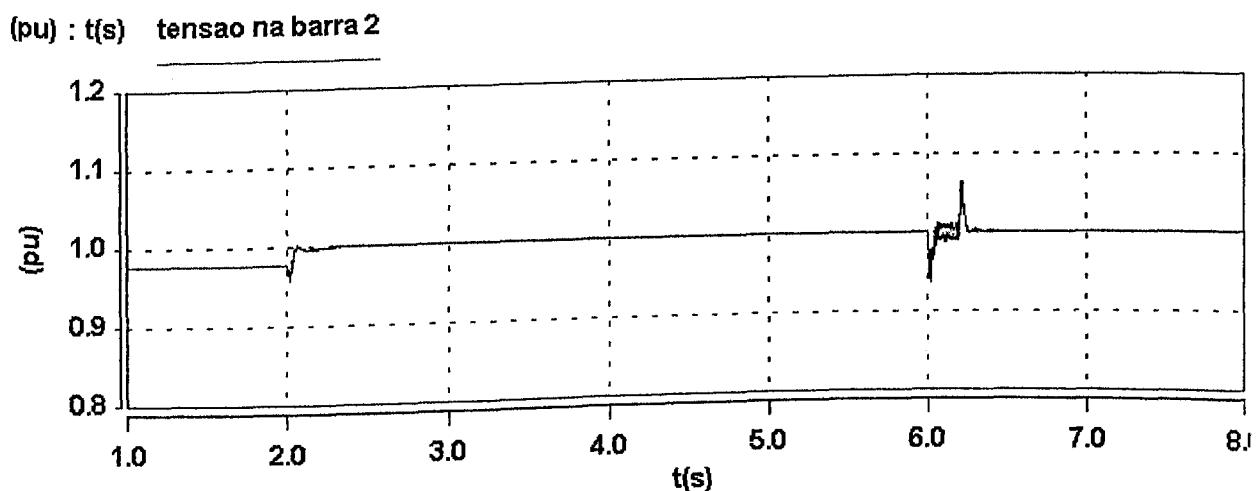


Figura 4.8(a) – Tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado – curto-círcuito

(pu) : t(s) tensao na barra 2

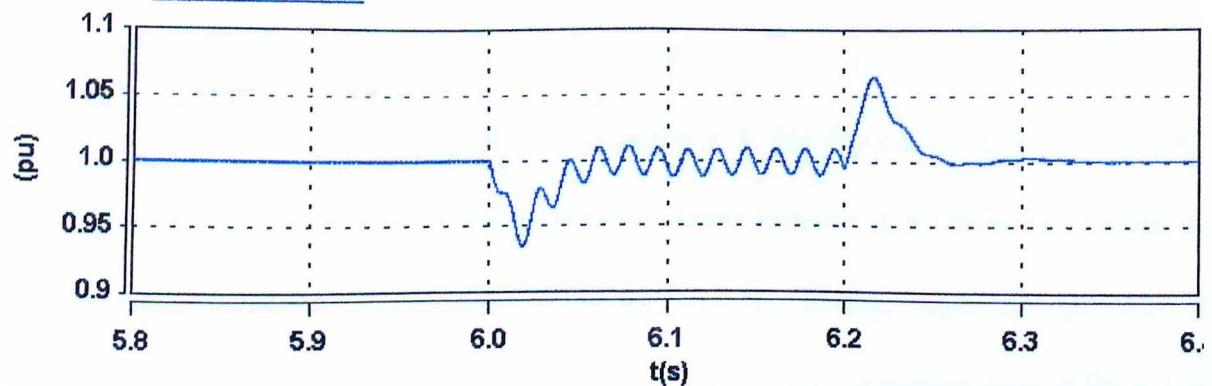


Figura 4.8(b) – Zoom da tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado durante o curto-circuito

(pu) : t(s) tensao na barra 2

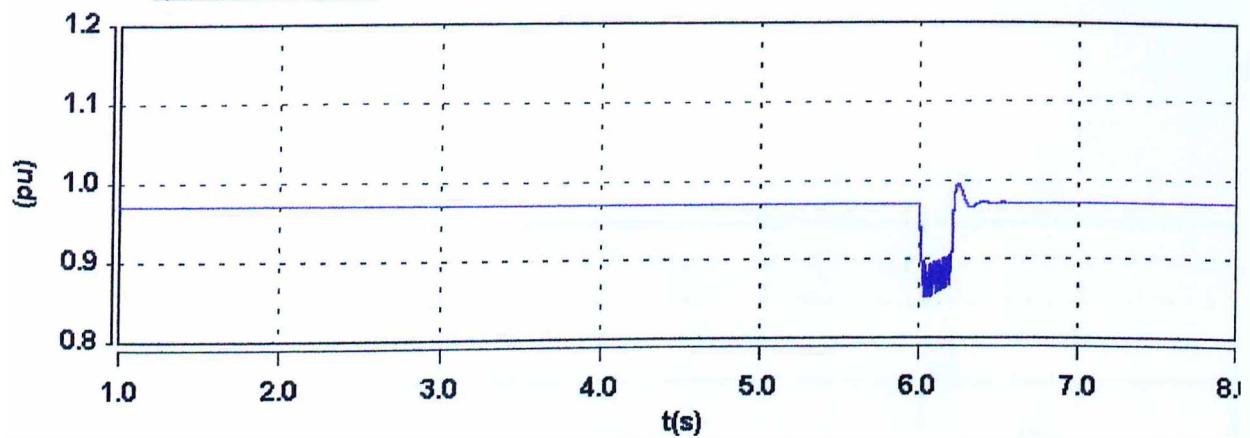


Figura 4.9(a) – Tensão na barra 2 sem a presença do STATCOM – curto-circuito

(pu) : t(s) tensao na barra 2

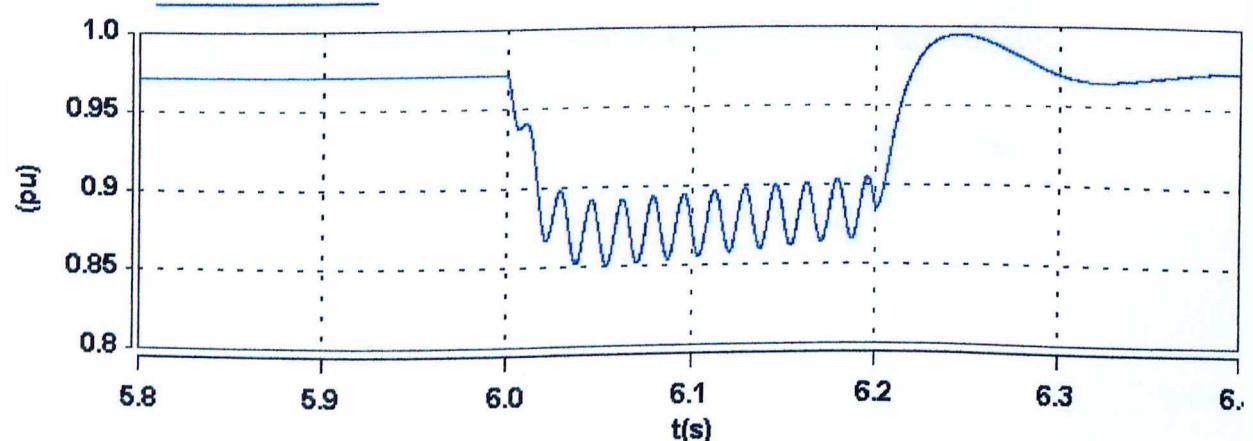


Figura 4.9 (b) – Zoom da tensão na barra 2 sem a presença do STATCOM durante o curto-circuito

A figura 4.10(a) apresenta a tensão na saída do gerador 1 e a figura 4.11(a) apresenta as tensões nas quatro barras. A curva da tensão de saída do gerador 2 foi omitida devido seu comportamento ser similar a do gerador 1. Na figura 4.11(a) está ilustrado o efeito da compensação em todas as barras, como nota-se a melhora no perfil das tensões em todas as barras. Os valores da tensões nas barras, antes da operação do STATCOM, estavam compreendidos entre 0,97 a 0,98 pu, passando para 0,99 a 1 pu com o compensador em operação. Pois como o STATCOM está fornecendo reativos, alivia-se as linhas, diminuindo assim as perdas. Além é claro, de proporcionar a regulação de tensão durante o curto-círcuito.

(pu) : t(s) tensao na saida do gerador1

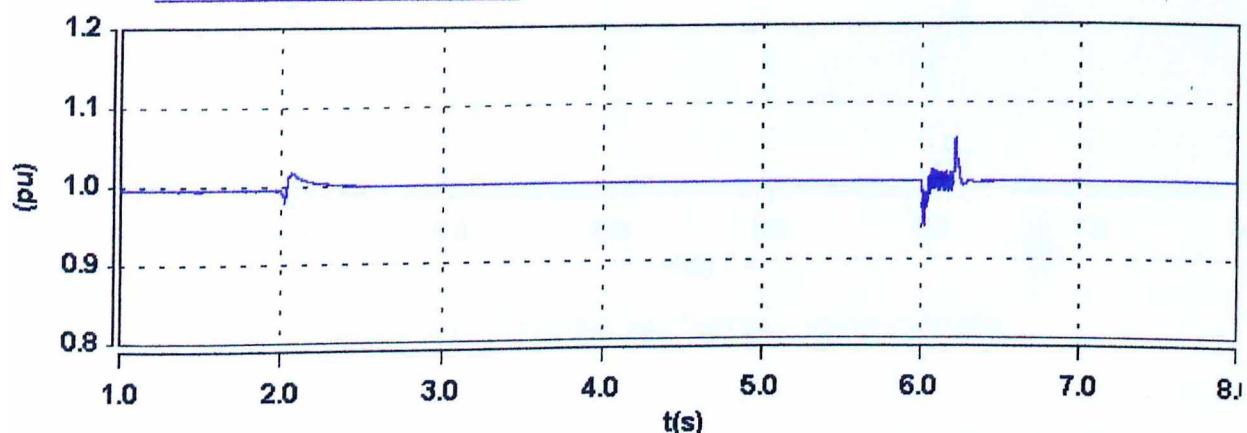


Figura 4.10(a) – Tensão terminal do gerador 1 – curto-círcuito

(pu) : t(s) tensão na saída do gerador 1

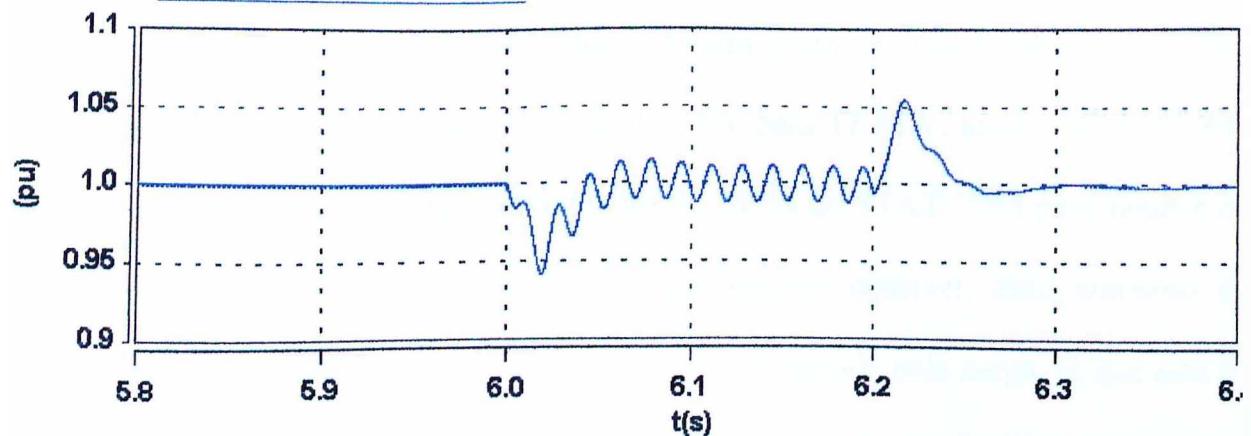


Figura 4.10(b) – Zoom da tensão terminal do gerador 1 durante o curto-circuito

(pu) : t(s) tensão na barra 1      tensão na barra 2      tensão na barra 3      tensão na barra 4

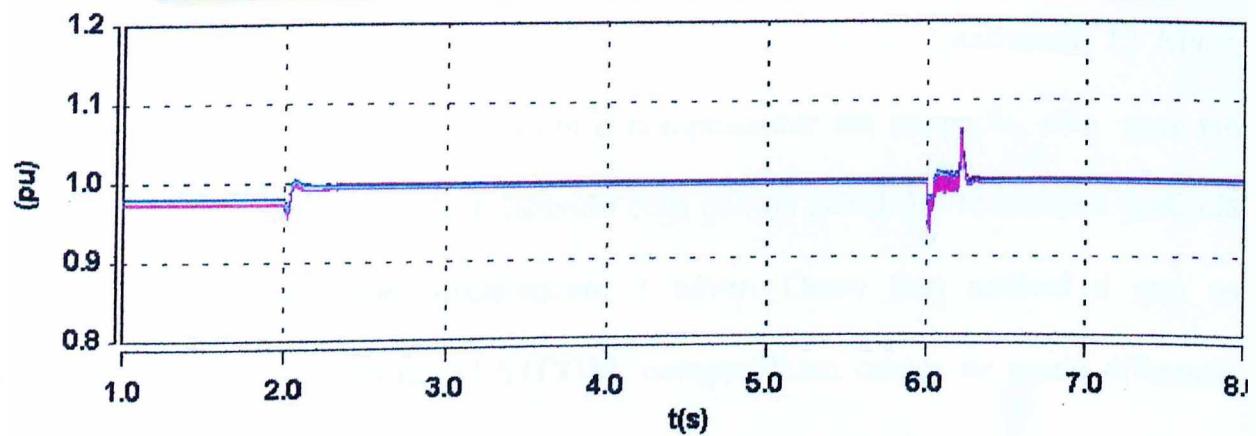


Figura 4.11(a) – Tensões nas barras – curto-circuito

(pu) : t(s) tensão na barra 1      tensão na barra 2      tensão na barra 3      tensão na barra 4

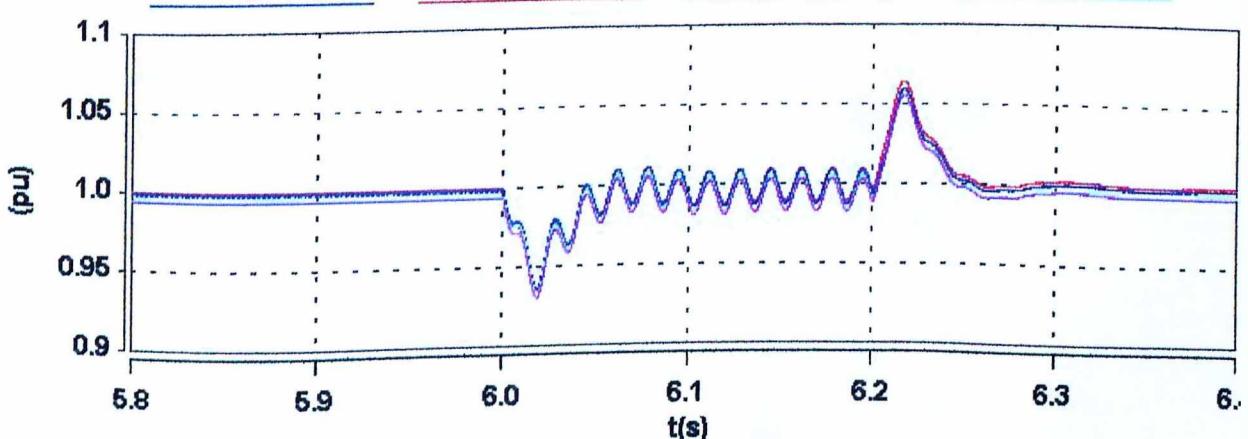


Figura 4.11(b) – Zoom das tensões nas barras durante o curto-circuito

As figuras 4.12(a) e 4.13(a) mostram as potências ativa (MW) e reativa (Mvar) fornecidas pelos geradores, respectivamente. Como pode ser observado, a potência ativa fornecida pelos geradores aumenta de 15 MW para 17 MW, após o STATCOM entrar em operação em 2 s, devido o consumo de ativos do STATCOM para manter o capacitor carregado num nível de tensão mais estável possível. Este aumento é justificado também pelo aumento da potência ativa consumida pela carga, já que esta é modelada por impedância constante, ou seja, com o incremento da tensão, aumenta também a potência ativa consumida pelas cargas. Por outro lado, a potência reativa diminui, devido ao fornecimento de reativos pelo STATCOM, aliviando os geradores. Nota-se que cada gerador fornece aproximadamente 6 Mvar, totalizando 12 Mvar, antes da operação do STATCOM. Com o compensador em operação, este gera em torno de 10 Mvar (figura 4.14(a)), fazendo com que os geradores reduzem a potência reativa fornecida para aproximadamente 2 Mvar. Outro fato notável é que os geradores, com a operação do STATCOM, compartilham cargas de modo diferente. Isto pode ser explicado porque o gerador 2 tem uma carga próxima aos seus terminais, fato que não acontece com o gerador 1, cuja carga mais próxima é a carga 1 conectada a barra 2, na qual o STATCOM também está conectado e, portanto, fornecendo reativos para esta carga.

(MW) : t(s) potencia ativa do gerador 1      potencia ativa do gerador 2

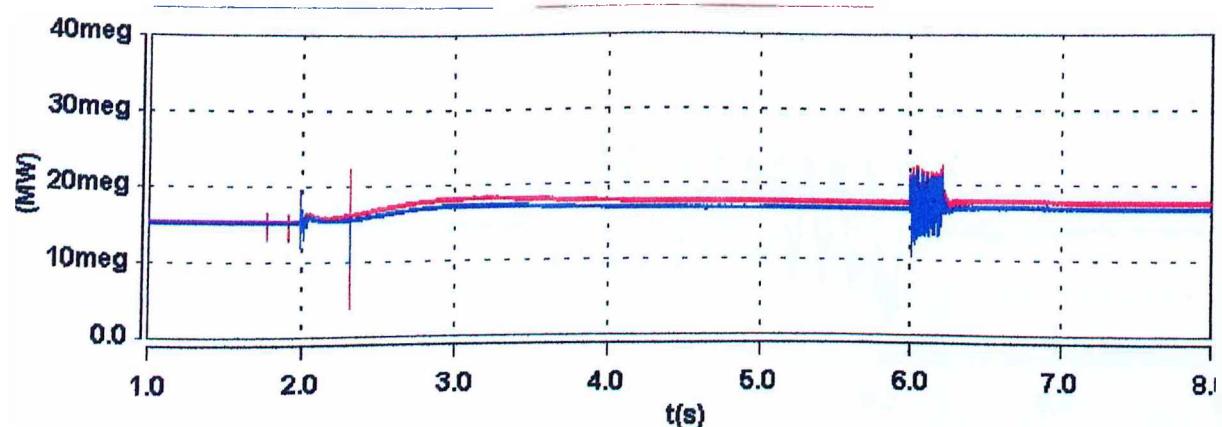


Figura 4.12(a) – Potência Ativa fornecida pelos geradores – curto-circuito

(MW) : t(s) potencia ativa do gerador 1      potencia ativa do gerador 2

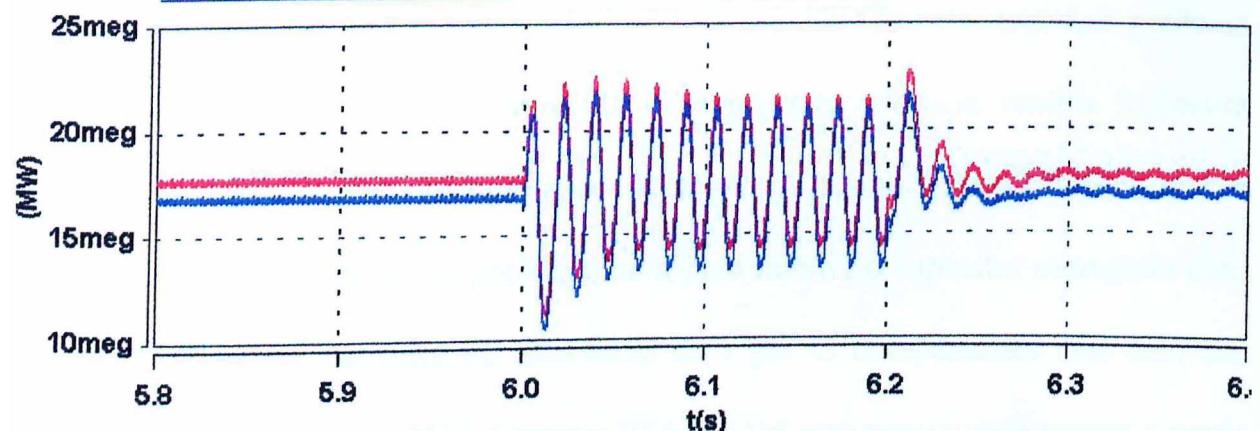


Figura 4.12(b) – Zoom da potência Ativa fornecida pelos geradores durante o curto-circuito

(Mvar) : t(s) potencia reativa do gerador 1      potencia reativa do gerador 2

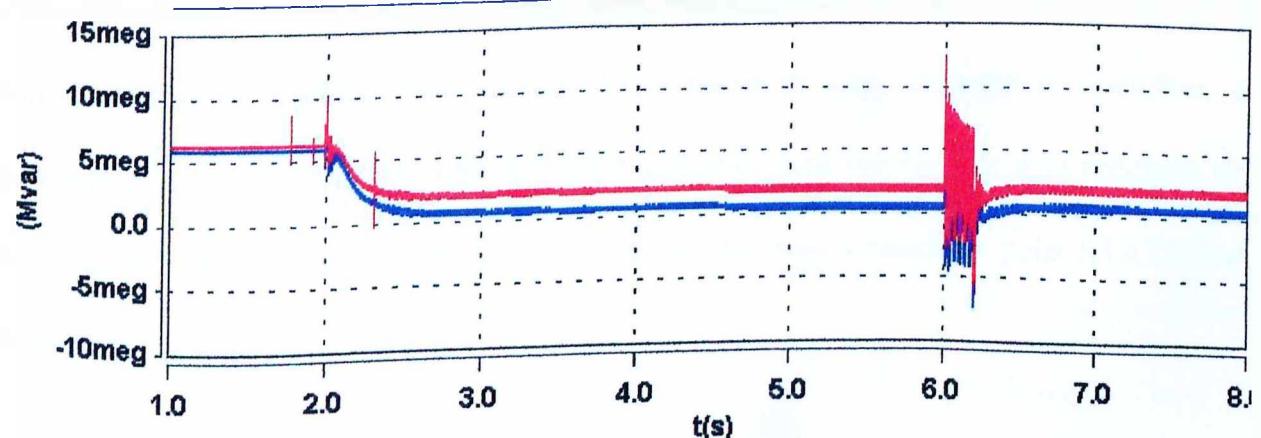


Figura 4.13(a) – Potência Reativa fornecida pelos geradores – curto-circuito

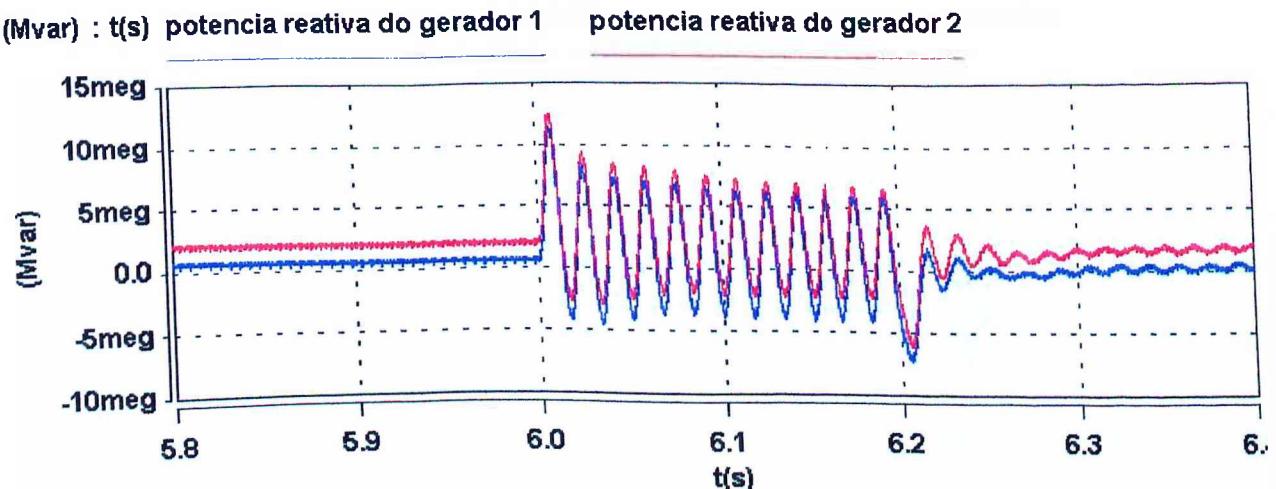


Figura 4.13(b) – Zoom da potência Reativa fornecida pelos geradores durante o curto-círcito

Seguindo a convenção adotada no capítulo III para o STATCOM, isto é, a potência ativa consumida é positiva e a fornecida é negativa, a potência reativa fornecida positiva e a potência reativa consumida negativa. A figura 4.14(a) mostra que o compensador opera consumindo potência ativa para manter o capacitor carregado com uma tensão constante no valor de referência de 1 pu. O compensador está com um consumo pouco superior a 2 MW. Como o STATCOM está regulando a tensão a partir de 2 s, já que a tensão está abaixo de 1 pu, discutido anteriormente, este fornece reativos para elevar a tensão até o valor de referência. O montante de reativos fornecido pelo STATCOM é ligeiramente superior a 10 Mvar para realizar a compensação em regime permanente. Note também que, durante o distúrbio, a potência reativa fornecida pelo STATCOM aumenta para manter a tensão regulada no valor de referência. Nesta situação a média de reativos fornecidos pelo STATCOM situa-se em torno de 25 Mvar.

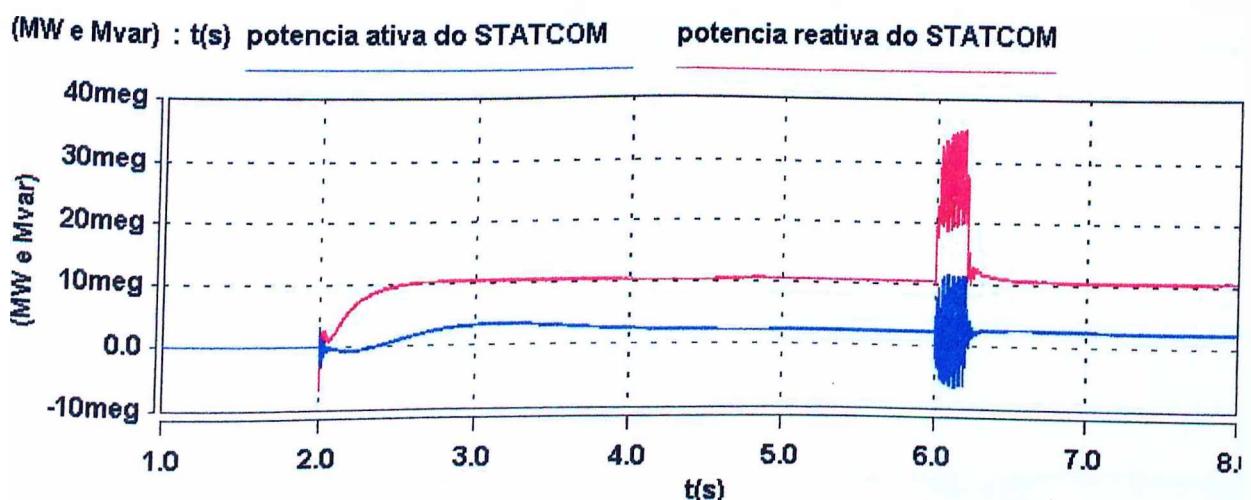


Figura 4.14(a) – Potência Ativa e Reativa do STATCOM – curto-círcuito

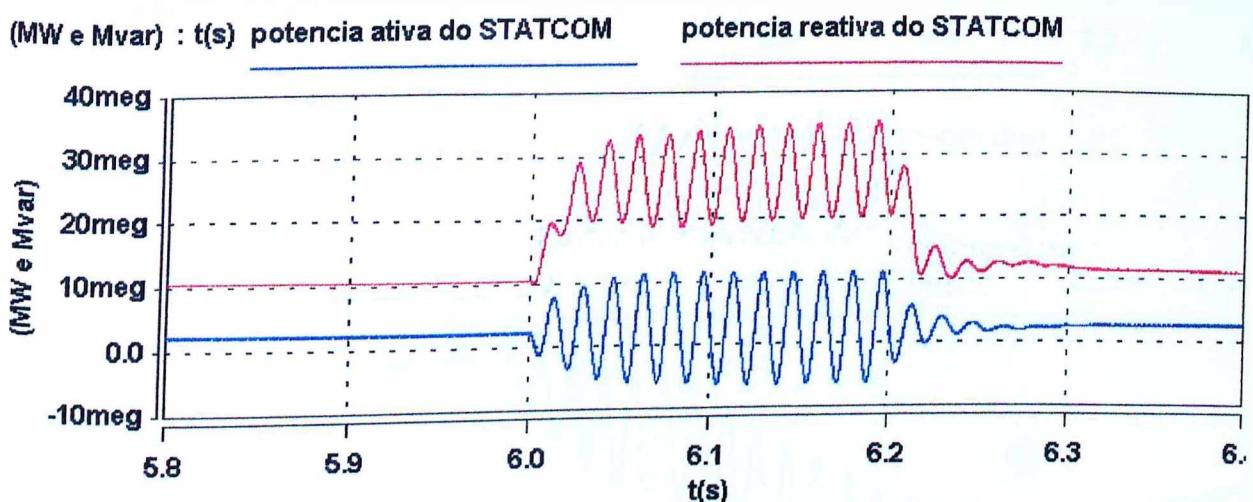


Figura 4.14(b) – Zoom da potência Ativa e Reativa do STATCOM durante o curto-círcuito

A figura 4.15(a) mostra o comportamento da tensão CC do capacitor em pu, sendo este capacitor inicialmente pré-carregado com uma tensão de 1 pu, como pode ser observado até o instante de 2 s. Quando o STATCOM entra em operação a tensão cai atingindo 0,83 pu, em seguida retorna ao valor de referência (1 pu). Esta queda é justificada pelo fornecimento de reativos pelo STATCOM e também pela oscilação natural do sistema devido a entrada de um dispositivo de compensação. Durante o

curto-circuito a tensão do capacitor sofre uma pequena queda, atinge 0,98 pu, mas, logo em seguida, retorna ao valor de referência.

(pu) : t(s) tensao no capacitor

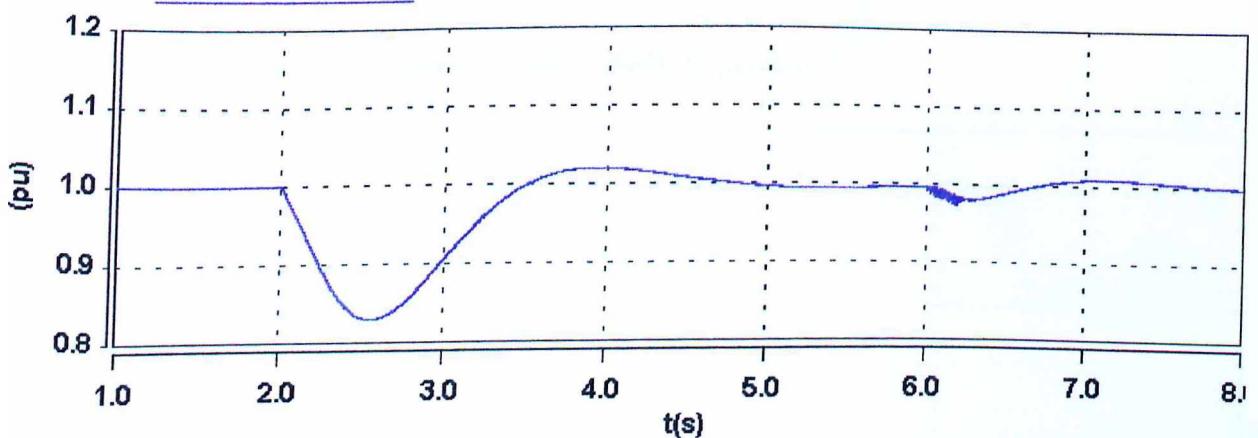


Figura 4.15(a) – Tensão CC do capacitor – curto-circuito

(pu) : t(s) tensao no capacitor

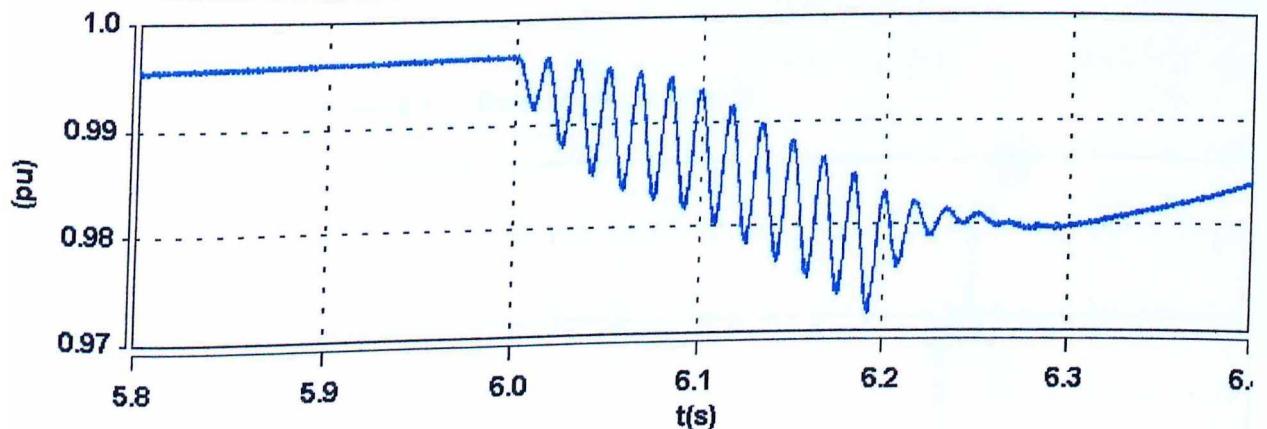


Figura 4.15(b) – Zoom da tensão CC do capacitor durante o curto-circuito

O comportamento das velocidades dos geradores é mostrado na figura 4.16. Na figura 4.17(a) têm-se as freqüências na barra 1 e 3 (barras de geração). As velocidades dos geradores praticamente não sofrem variações permanecendo em torno de 370 rad/s. Nota-se que as freqüências nas barras 2 e 4 foram omitidas visto os comportamentos similares aos das barras 1 e 3. Os resultados evidenciam que, com a presença do curto-

círcuito, a freqüência tende a cair, atingindo 59,4 Hz e, após a retirada do mesmo, se eleva atingindo 60,7 Hz. Isto ocorre por um período de tempo muito pequeno, retornando em seguida ao valor nominal de 60 Hz.

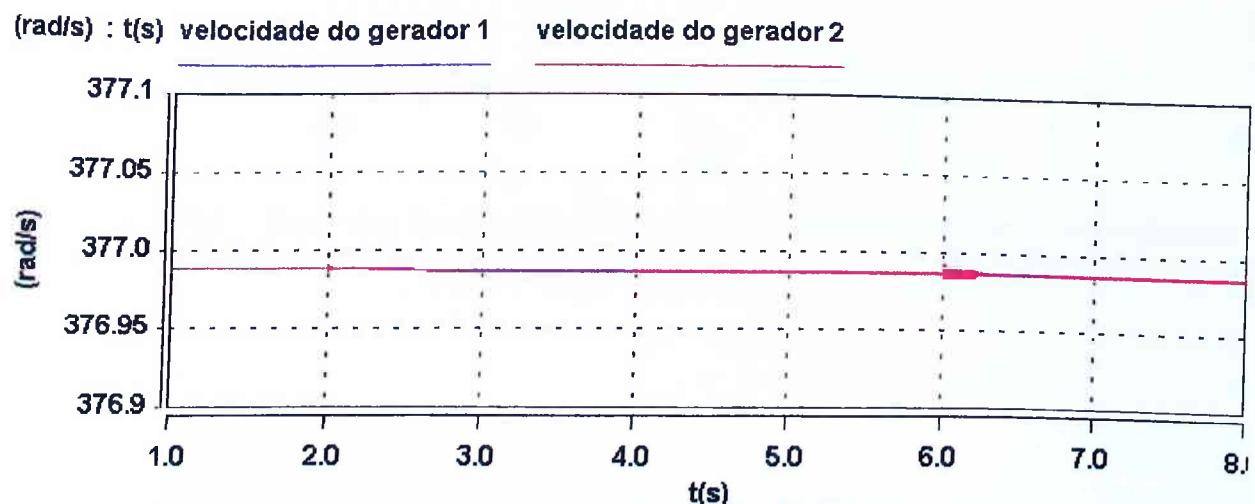


Figura 4.16 – Velocidades dos geradores síncronos – curto-círcuito

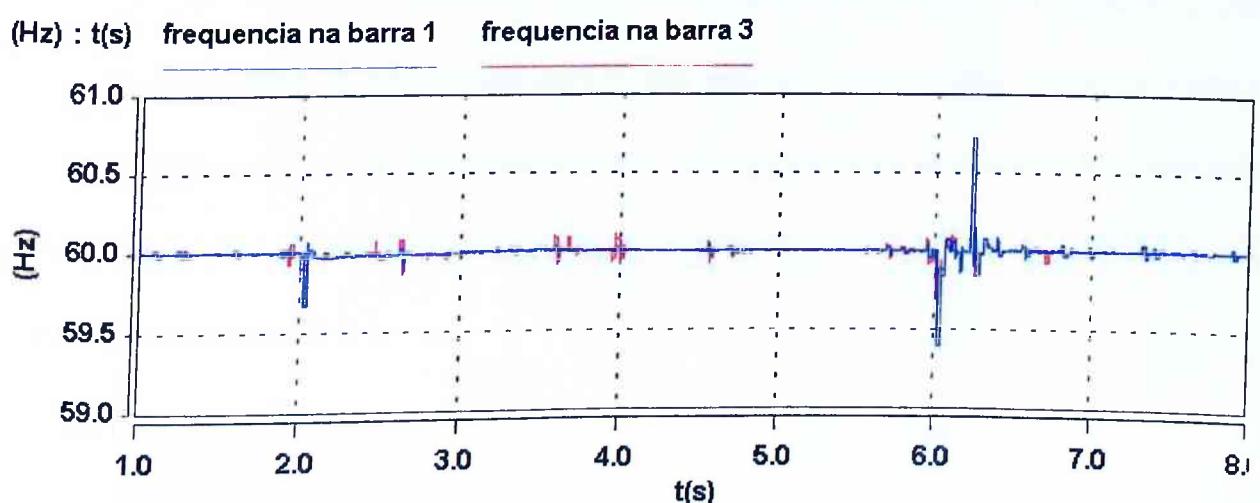


Figura 4.17(a) - Freqüências das barras de geração – curto-círcuito

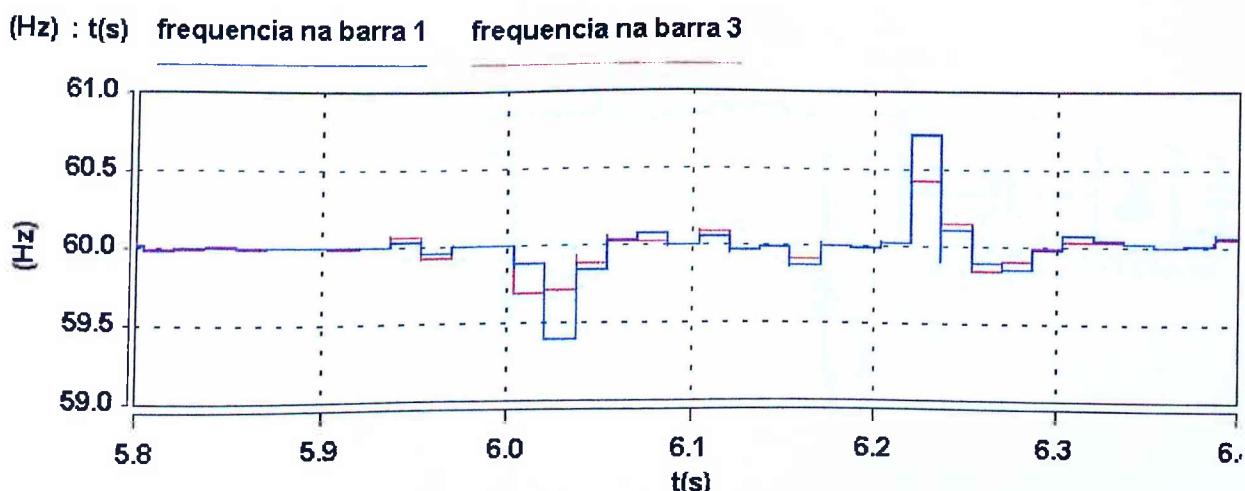


Figura 4.17(b) – Zoom das freqüências das barras de geração durante o curto-circuito

#### 4.5.2 – Análise de Perda de Geração com Rejeição de Carga

Nesta etapa do trabalho, o distúrbio aplicado corresponde a perda do gerador 2, que está conectado à barra 4, no instante de 6 s. Em seguida, após 200ms, rejeita-se a carga 2 de 15 MVA, a qual está conectada à barra 3. A figura 4.18 destaca os locais destas ocorrências. Além destas considerações, é importante ressaltar que o STATCOM, é inserido no sistema em 2 s.

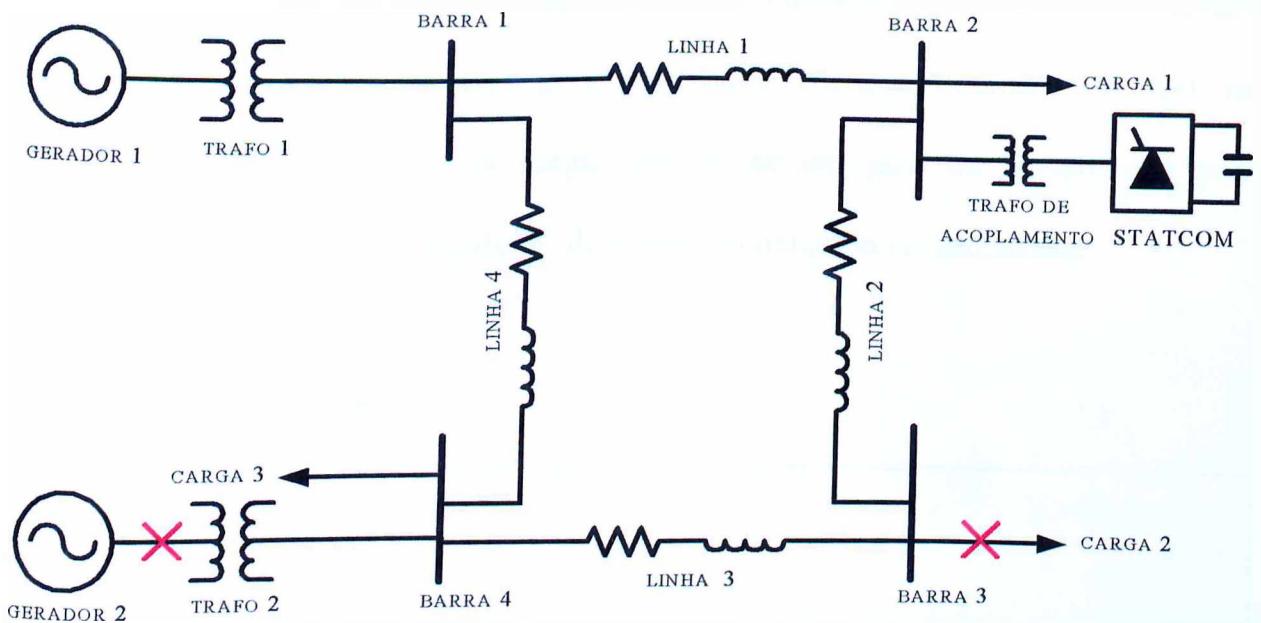


Figura 4.18 – Diagrama unifilar do sistema simulado ilustrando a perda do gerador 2 e a carga 2 rejeitada

Observa-se na figura 4.19(a), após o STATCOM entrar em operação, que a tensão do barramento se eleva para a tensão de referência (1 pu), isto é, melhorando o perfil de tensão em regime permanente, que estava em torno de 0,97 pu. Em 6 s, momento da perda do gerador, esta tensão tende a cair, atingindo o valor de 0,96 pu, mas devido a ação do compensador, a tensão recupera-se, e é mantida no valor desejado até o instante da rejeição da carga 2 de 15 MVA. No instante 6,2 s com a rejeição de carga, a tensão cresce rapidamente, atingindo 1,03 pu, retornando ao valor de referência logo em seguida.

Adotando o mesmo procedimento realizado na análise do curto-circuito, a figura 4.20(a) apresenta o comportamento da tensão da barra 2, **sem** a presença do STATCOM, comprovando, assim, a principal característica do compensador, isto é, a regulação de tensão. Nota-se que além da tensão ficar abaixo de 1 pu em regime

permanente, pois não tem compensação, e durante o intervalo entre a perda do gerador e a rejeição da carga a tensão cai e permanece em aproximadamente 0,91 pu. Novamente, após a rejeição da carga, percebe-se um pico na tensão, que pode ser justificado pela presença do regulador de tensão da máquina remanescente.

(pu) : t(s) tensão na barra 2

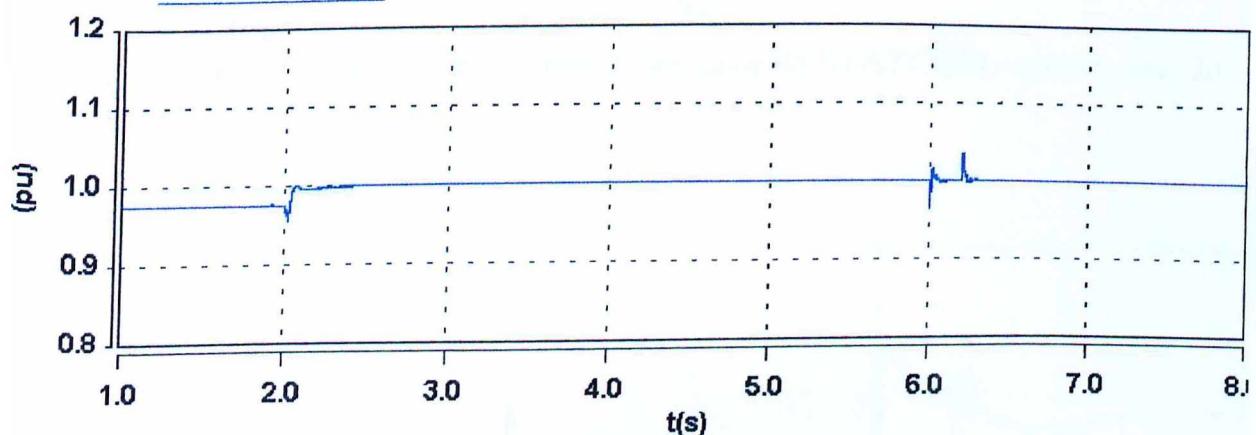


Figura 4.19(a) – Tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado – perda geração

(pu) : t(s) tensão na barra 2

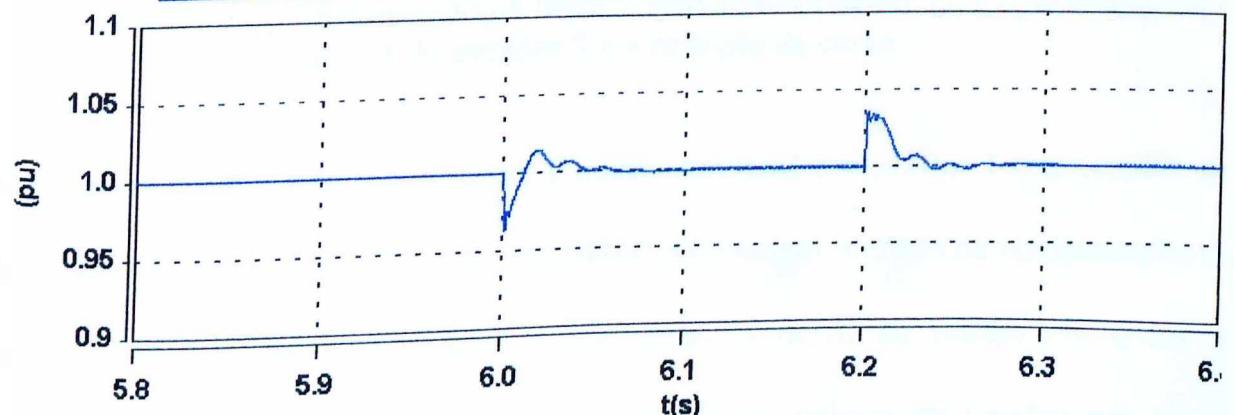


Figura 4.19(b) – Zoom da tensão na barra 2 durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

(pu) : t(s) tensão na barra 2

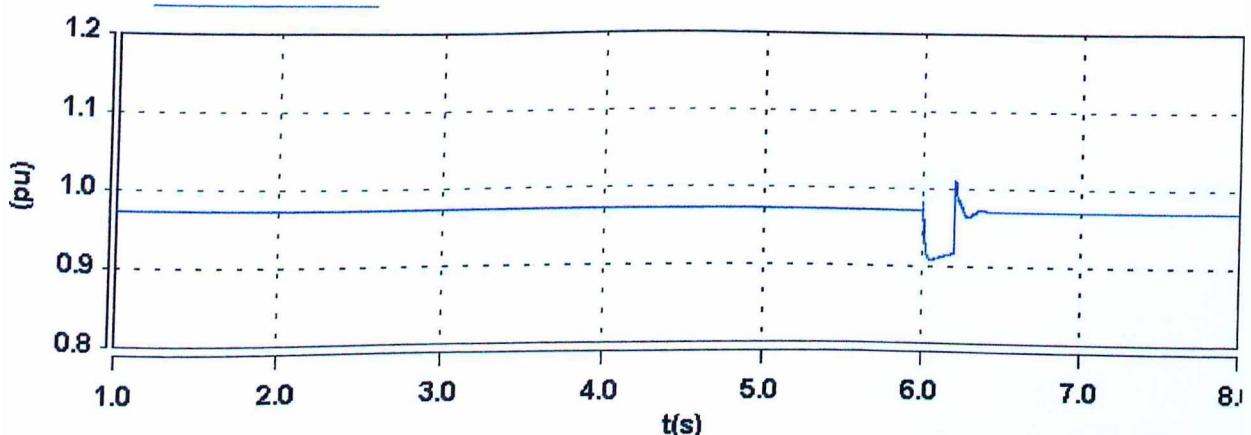


Figura 4.20(a) – Tensão na barra 2 sem a presença do STATCOM – perda geração

(pu) : t(s) tensão na barra 2

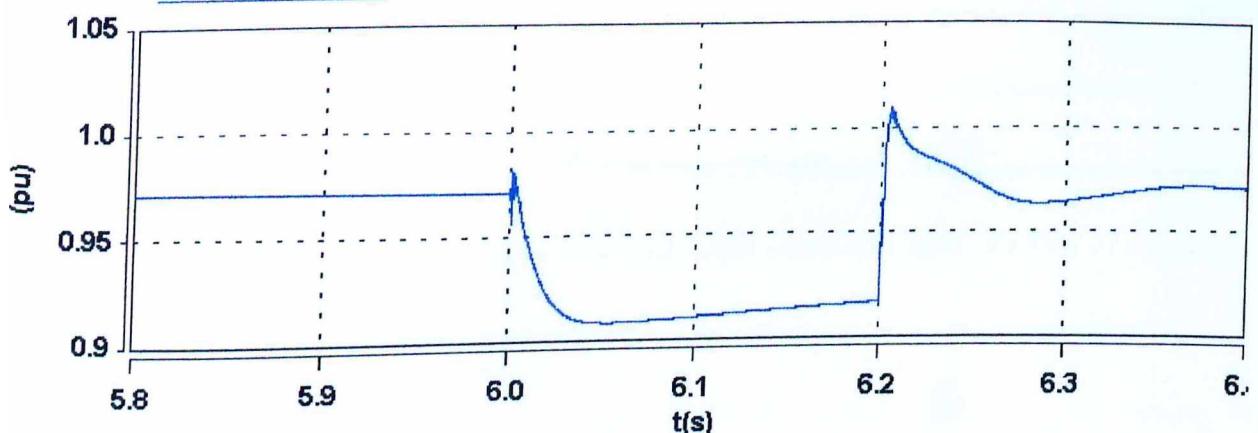


Figura 4.20(b) – Zoom da tensão na barra 2 sem a presença do STATCOM durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

As figuras 4.21(a) e 4.22(a) mostram a tensão terminal do gerador 1 e as tensões nas quatro barras, respectivamente. Os resultados evidenciam o efeito da compensação em todas as tensões das barras, com a melhoria do perfil de tensão em todos os barramentos. Mais um vez pode-se observar que os valores da tensões nas barras estavam, antes da início da compensação, entre 0,97 e 0,98 pu. Com a entrada em operação do STATCOM as tensões passam para aproximadamente 1 pu.

(pu) :  $t(s)$  tensão na saída do gerador 1

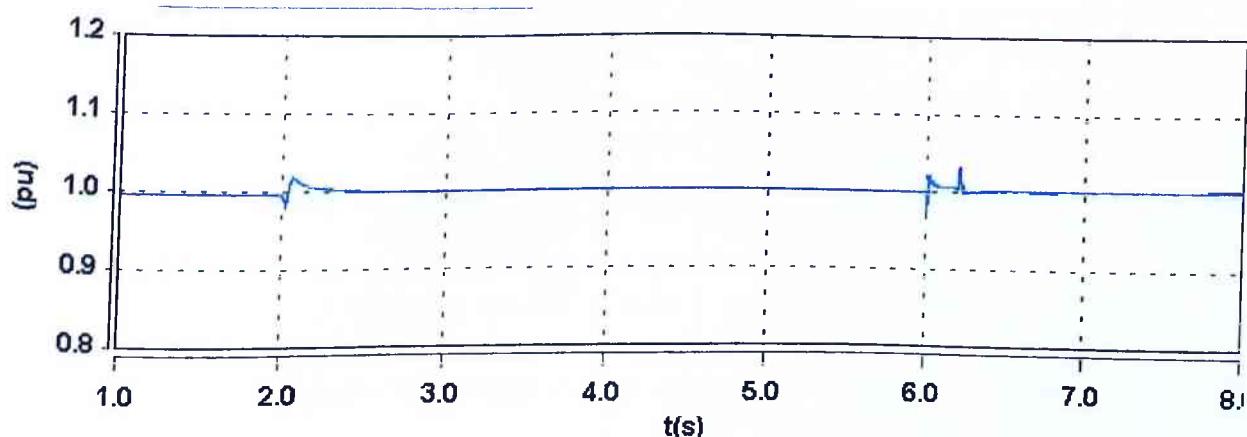


Figura 4.21(a) – Tensão terminal do gerador 1 – perda geração

(pu) :  $t(s)$  tensão na saída do gerador 1

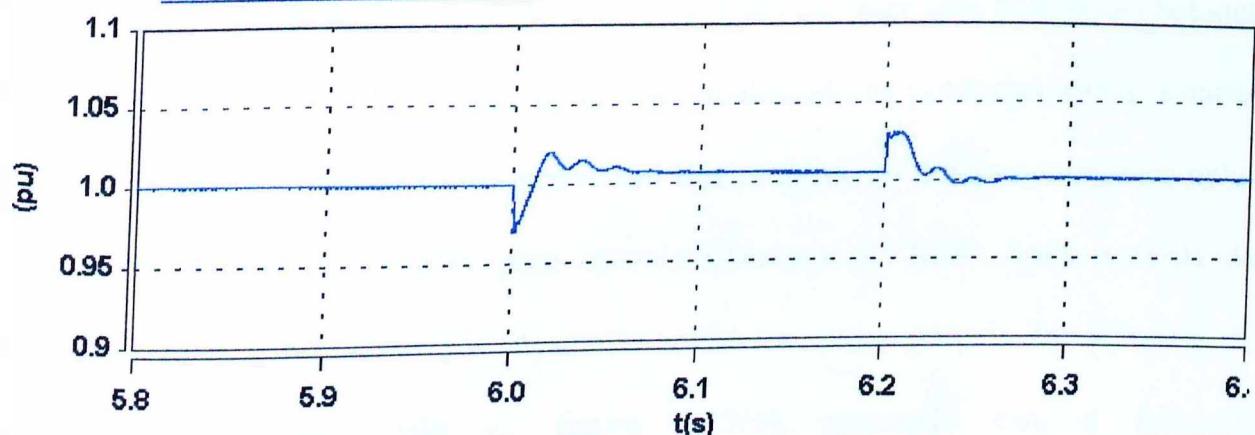


Figura 4.21(b) – Zoom da tensão terminal do gerador 1 durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

(pu) :  $t(s)$  tensão na barra 1      tensão na barra 2      tensão na barra 3      tensão na barra 4

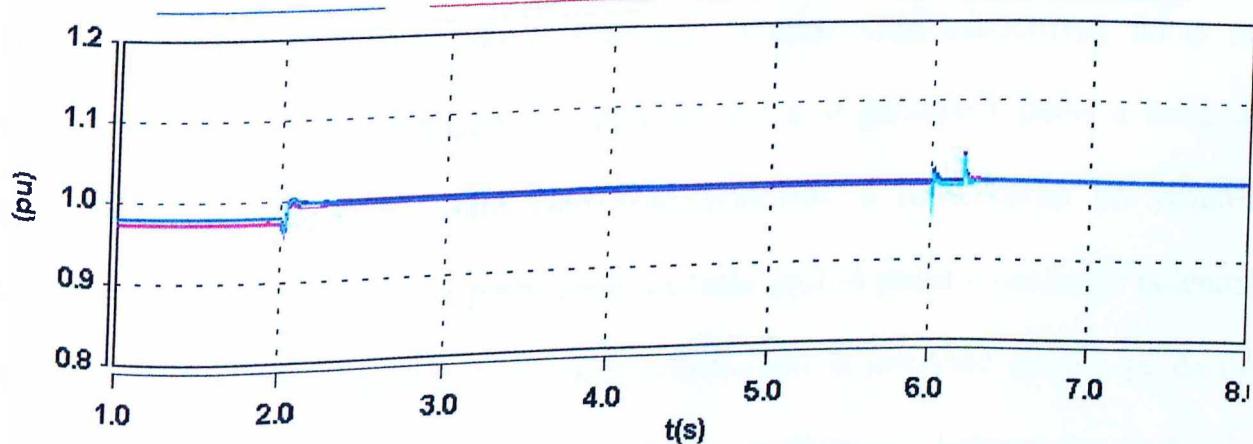


Figura 4.22(a) – Tensões nas barras – perda geração

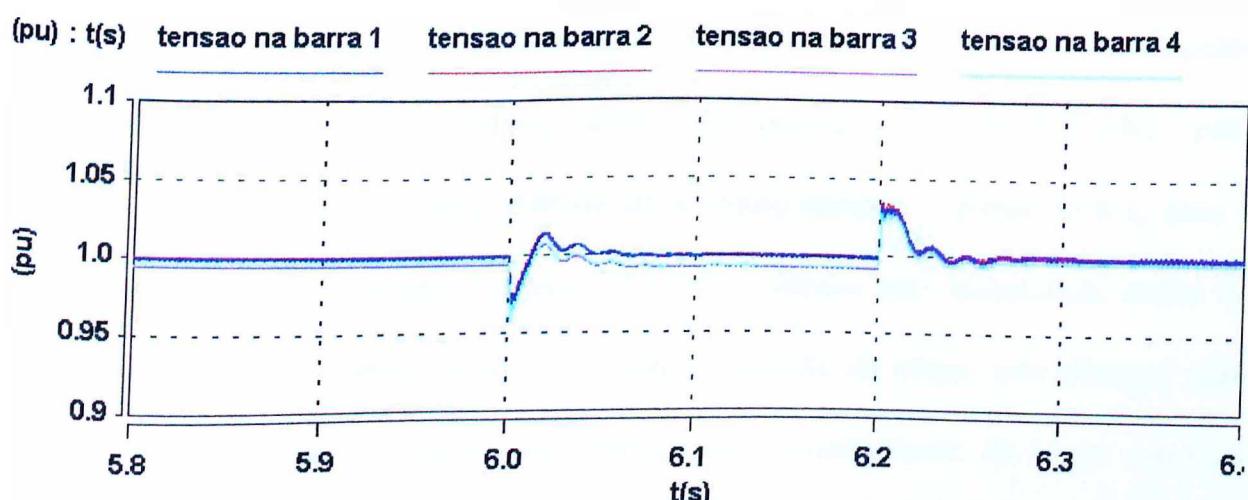


Figura 4.22(b) – *Zoom* das tensões nas barras durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

De posse das figuras 4.23(a), 4.24(b) e 4.25(c), pode-se fazer uma análise do balanço das potências ativas e reativas. Primeiramente analisando as potências ativas, nota-se que, com a entrada do STATCOM, houve um ligeiro aumento dos fornecimentos pelos geradores, passando de 15 MW para aproximadamente 17 MW. Após a perda do gerador 2 em 6 s, o gerador remanescente assume a maior parcela da demanda de potência ativa, como visto na figura 4.23(a), passando este a fornecer aproximadamente 29 MW. A figura 4.25(a) mostra que durante o intervalo de tempo compreendido entre a perda do gerador e a rejeição da carga, o compensador fornece aproximadamente 4 MW de potência ativa para o sistema (potência ativa negativa implica STATCOM alimentando o sistema), comprovando afirmativas feitas no capítulo anterior. Após a rejeição da carga em 6,2 s, o gerador 1 passa a fornecer aproximadamente 20 MW, valor este correspondente a nova carga do sistema acrescida do STATCOM, que a partir deste instante (6,2 s) passa a consumir potência ativa para recarregar o capacitor (descarregado durante o intervalo entre a perda do gerador 2 e a rejeição da carga da carga 2). Agora, analisando o balanço das potências

reativas, figura 4.24(a), verifica-se uma queda na potência reativa total fornecida pelos geradores, passando de 12 Mvar, antes da operação do STATCOM, para aproximadamente 2 Mvar, com a entrada deste equipamento. A partir de 6 s, com a perda do gerador 2, a máquina 1 passa a fornecer também uma quantidade maior de reativos, em torno de 4 Mvar, e em 6,2 s com a rejeição da carga, este diminui para cerca de 1,5 Mvar. Já o compensador fornece aproximadamente 10 Mvar antes da perda do gerador, e aproximadamente 5 Mvar após a rejeição da carga, visto que, com a perda do gerador e a rejeição da carga, o sistema apresenta uma nova configuração, o que implica em um novo ponto de operação.

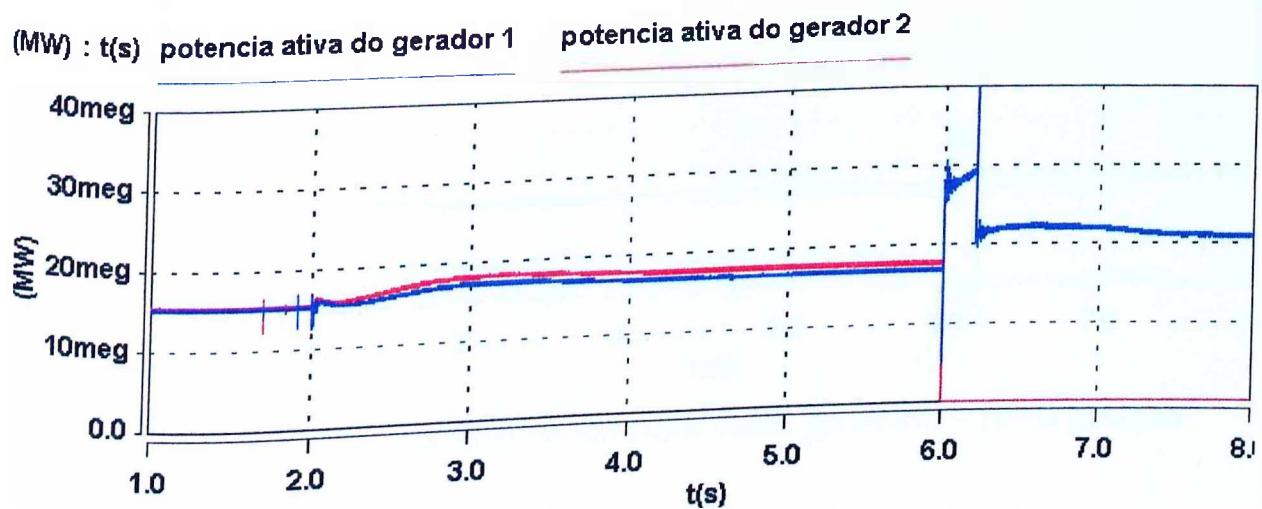


Figura 4.23(a) – Potência Ativa fornecida pelos geradores – perda geração

(MW) : t(s) potencia ativa do gerador1 potencia ativa do gerador2

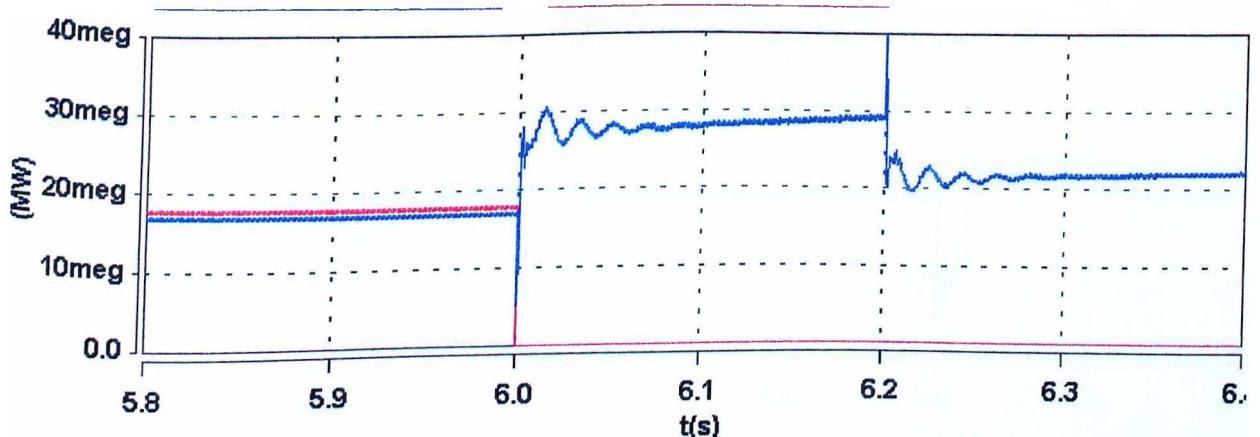


Figura 4.23(b) – Zoom da potência Ativa fornecida pelos geradores durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

(Mvar) : t(s) potencia reativa do gerador 1 potencia reativa do gerador 2

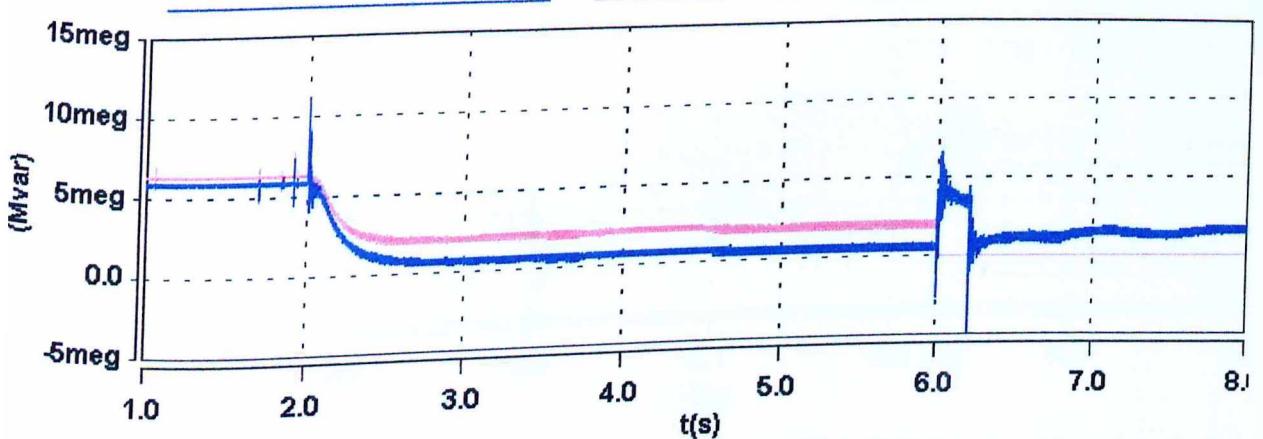


Figura 4.24(a) – Potência Reativa fornecida pelos geradores – perda geração

(Mvar) : t(s) potencia reativa do gerador 1 potencia reativa do gerador 2

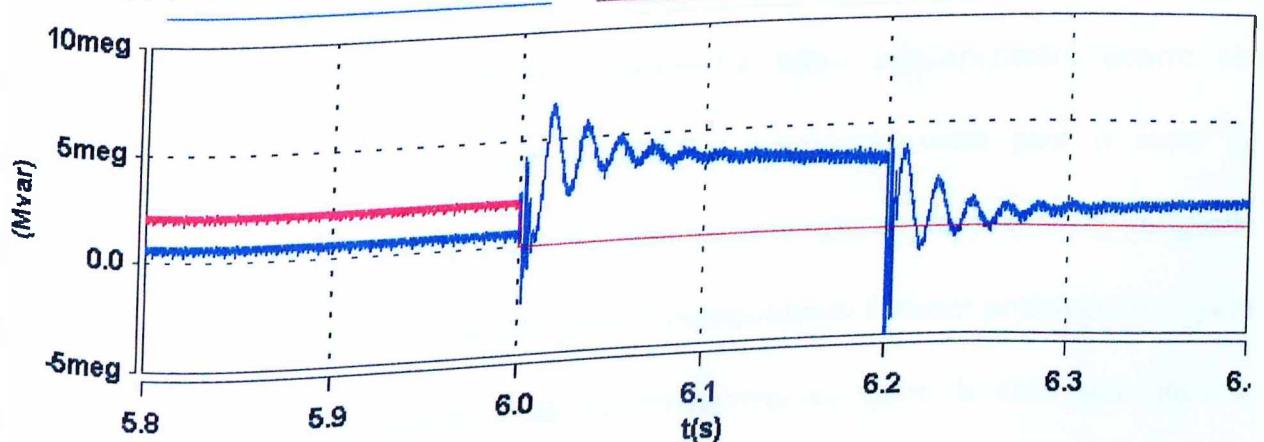


Figura 4.24(b) – Zoom da potência Reativa fornecida pelos geradores durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

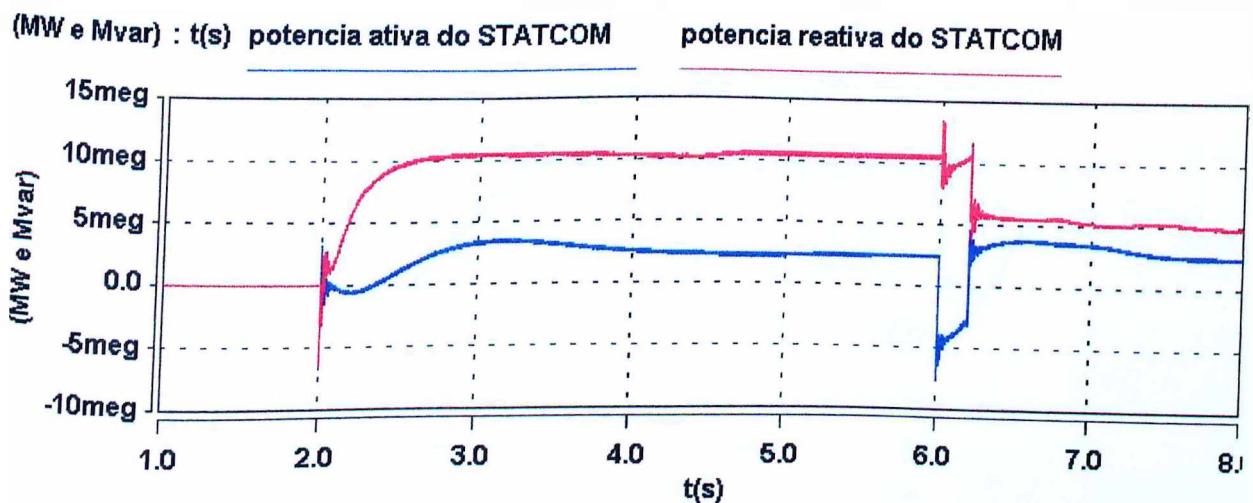


Figura 4.25(a) – Potência Ativa e Reativa do STATCOM – perda geração

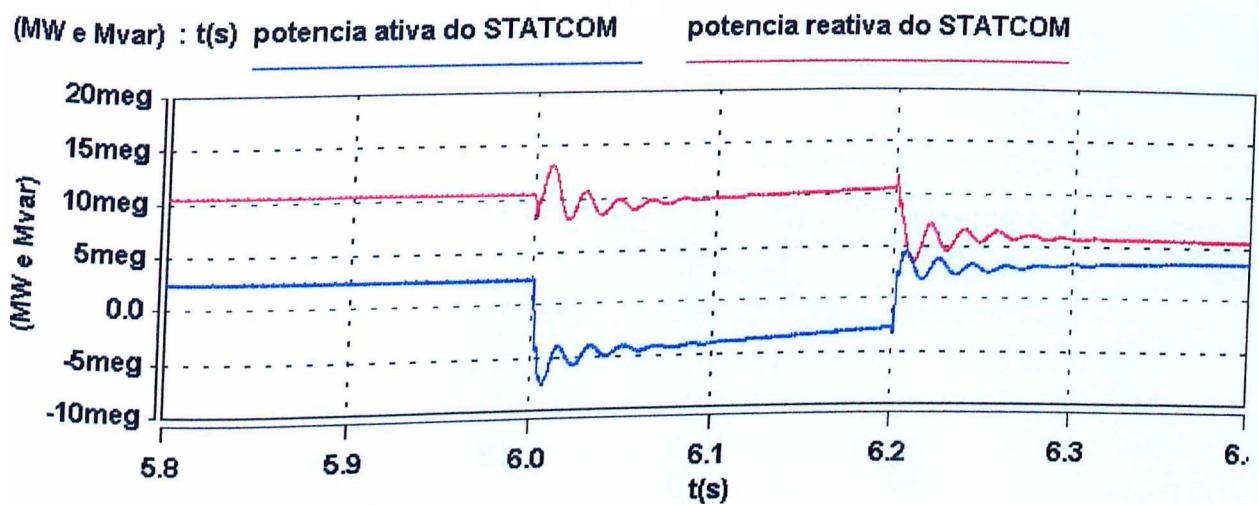


Figura 4.25(b) – Zoom da potência Ativa e Reativa do STATCOM durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

A figura 4.26(a) ilustra o comportamento da tensão CC do capacitor. Como pode ser observado, no instante em que o compensador entra em operação, ocorre um decréscimo na tensão do capacitor, a qual, na seqüência volta para o valor de referência (1 pu). No instante da perda do gerador, a tensão cai rapidamente, atingindo 0,8 pu, devido a descarga do capacitor, pois o equipamento fornece potência ativa para o sistema conforme mencionado. Esta tensão retorna ao valor de referência após a rejeição da carga.

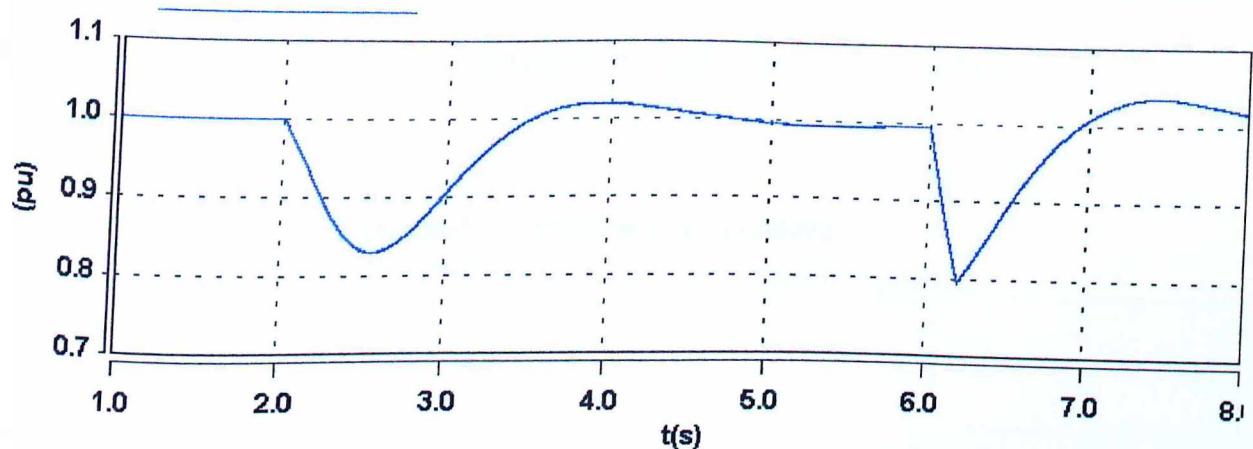
(pu) :  $t(s)$  tensão no capacitor

Figura 4.26(a) – Tensão CC do capacitor – perda geração

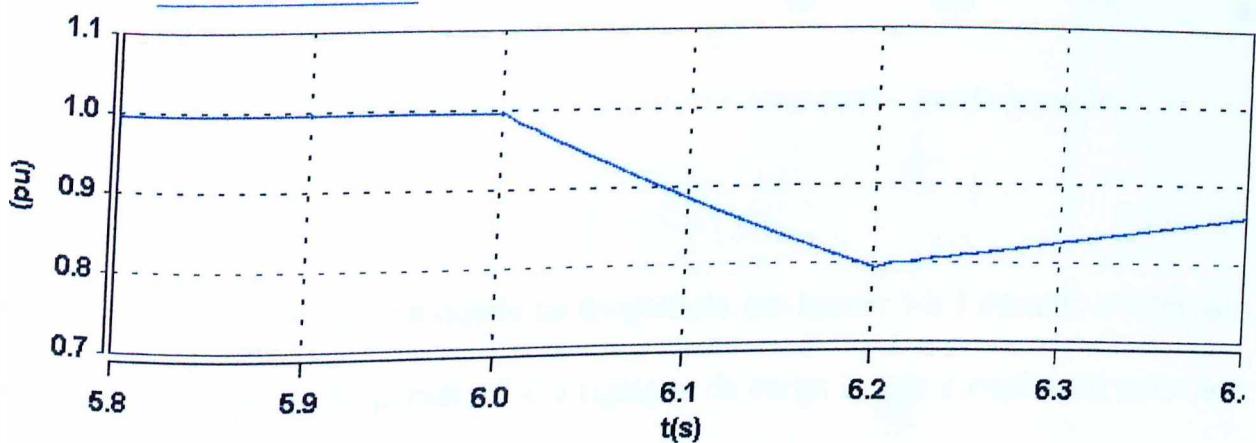
(pu) :  $t(s)$  tensão no capacitor

Figura 4.26(b) – Zoom da tensão CC do capacitor durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

A figura 4.27 mostra o comportamento das velocidades dos dois geradores, durante o intervalo de estudo. Nota-se que, durante o intervalo entre a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2, a velocidade do gerador 1 apresenta um queda praticamente insignificante, esta ligeira variação ocorre devido ao fato que esta unidade assume a carga do sistema, mas retorna ao valor anterior após a rejeição. A velocidade do gerador 2 sofre também um pequeno acréscimo após retirado do sistema, pois ele é

desconectado, passando a operar a vazio. Estas variações tão pequenas são justificadas pelo fato que os geradores estão dotados de reguladores de velocidade.

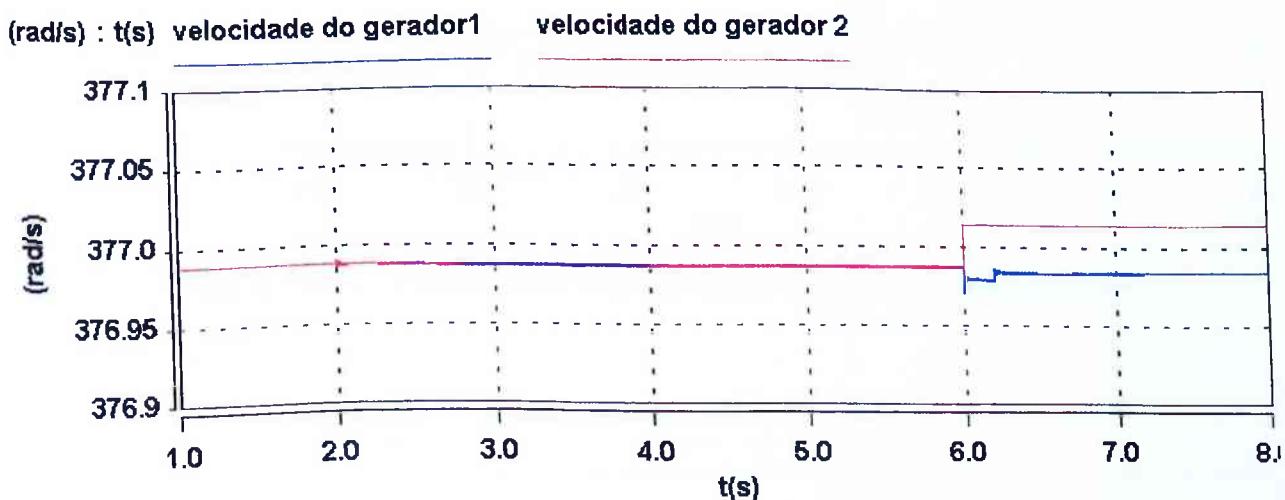


Figura 4.27 – Velocidades dos geradores síncronos – perda geração

Na figura 4.28(a) observa-se a queda na freqüência nas barras 1 e 3 durante o intervalo de tempo entre a perda do gerador 2 e a rejeição de carga 2, isto é explicado pelo fato que o gerador remanescente passa a operar com uma carga maior. As freqüências nas outras barras foram omitidas por apresentar comportamentos similares. Os valores das freqüências durante o intervalo compreendido entre a perda do gerador e a rejeição da carga são de aproximadamente 59,8 Hz. Nota-se que nos instantes da perda do gerador e rejeição da carga, as freqüências dos barramentos 1 e 3 atingiram 61,2 Hz e 61,5 Hz respectivamente.

(Hz) : t(s) frequencia na barra 1 frequencia na barra 3

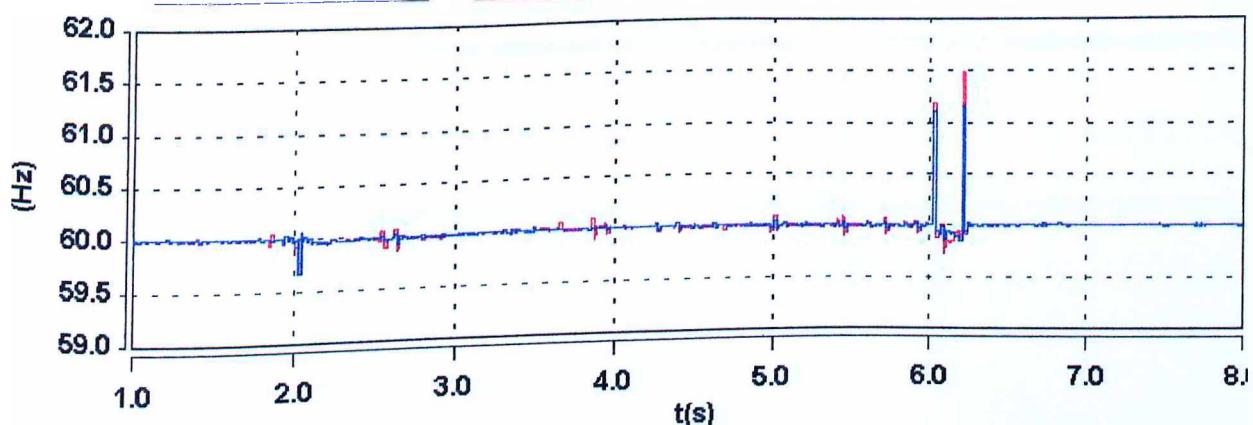


Figura 4.28(a) - Freqüências das barras de geração – perda geração

(Hz) : t(s) frequencia na barra 1 frequencia na barra 3

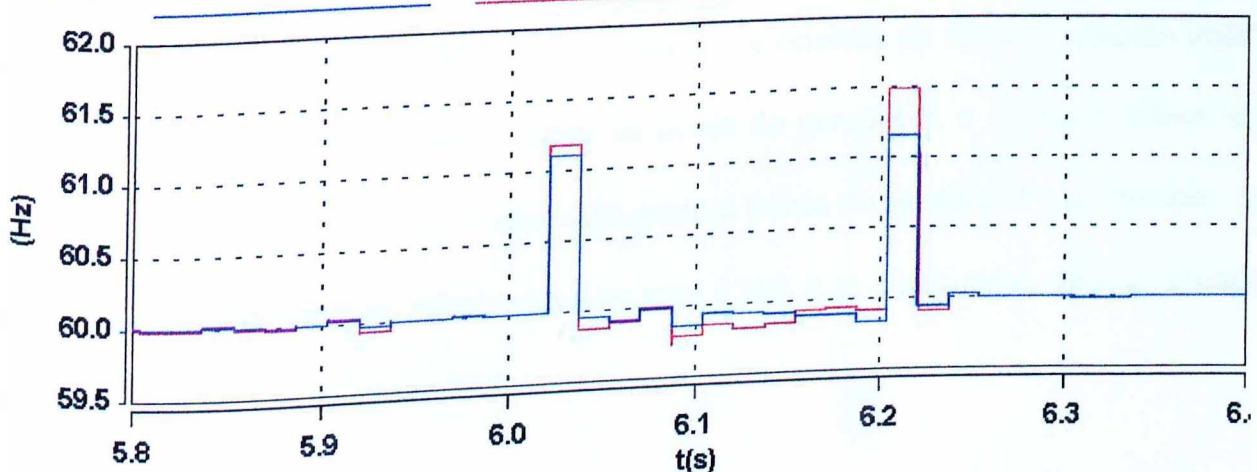


Figura 4.28(b) – Zoom das freqüências das barras de geração durante a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2

A figura 4.29 mostra as potências, ativa e reativa, da carga 1, modelada por impedância constante. A potência ativa consumida pela carga 1 passa de 8,7 MW para aproximadamente 9,1 MW, enquanto a potência reativa consumida pela carga 1 passa de 3,8 Mvar para 3,9 Mvar, devido a elevação da tensão proporcionada pelo STATCOM. As curvas referentes as outras cargas foram omitidas devido a comportamentos similares.

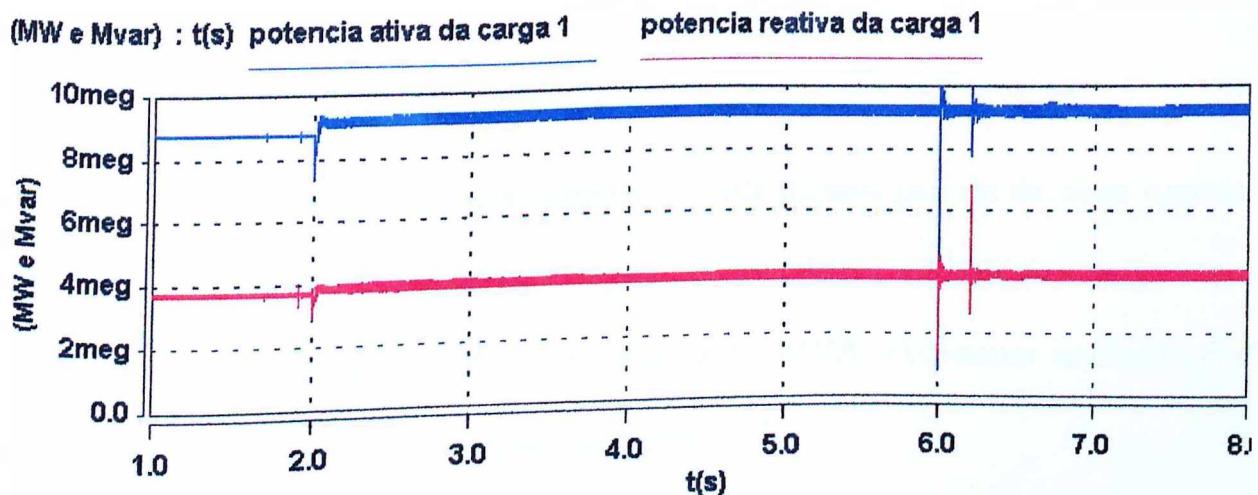


Figura 4.29 – Potências Ativa e Reativa consumida pela carga 1 – perda geração

A figura 4.30 apresenta as correntes trifásicas fornecidas pelo gerador 1, evidenciando o intervalo de tempo entre a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2, quando então o gerador 1 ficou sobrecarregado. Antes da perda do gerador 2, a corrente possui um valor eficaz de 702 A, durante o intervalo entre a perda do gerador 2 e a rejeição da carga 2 o valor da corrente eficaz eleva-se para 1210 A e, finalmente, após a retirada da carga 2, este valor cai para 877 A.

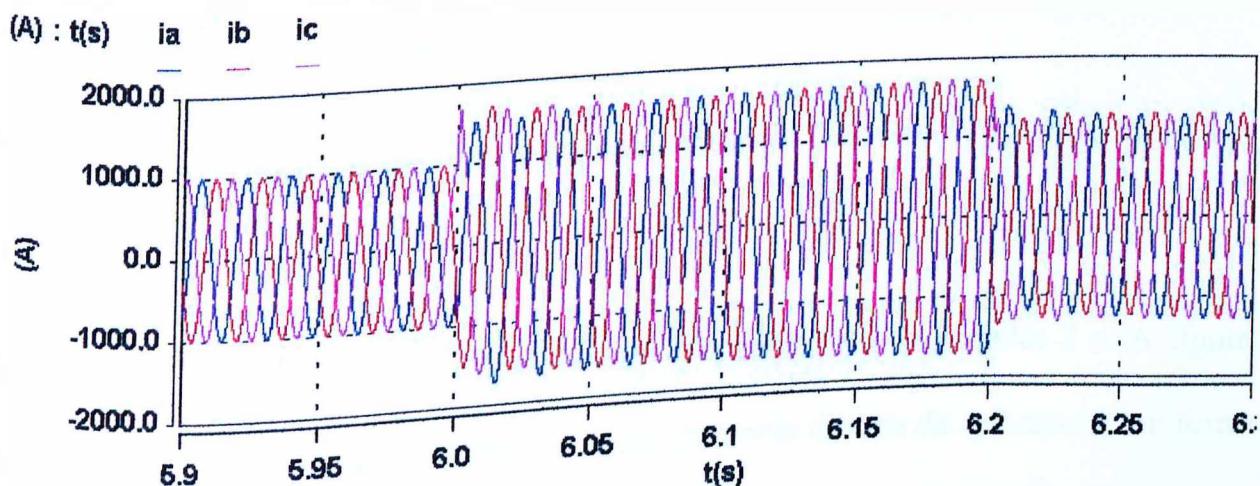


Figura 4.30 – Correntes na armadura do gerador 1 – perda geração

### 4.5.3 – Análise de Perda de Carga

O distúrbio simulado neste caso corresponde a perda de uma parcela da carga suprida. Como o sistema em estudo possui três cargas, no instante 6 s, elimina-se a carga 3 que está conectada à barra 4, a qual corresponde a 10 MVA. O sistema analisado é o mesmo dos casos anteriores, e indicado na figura 4.31.

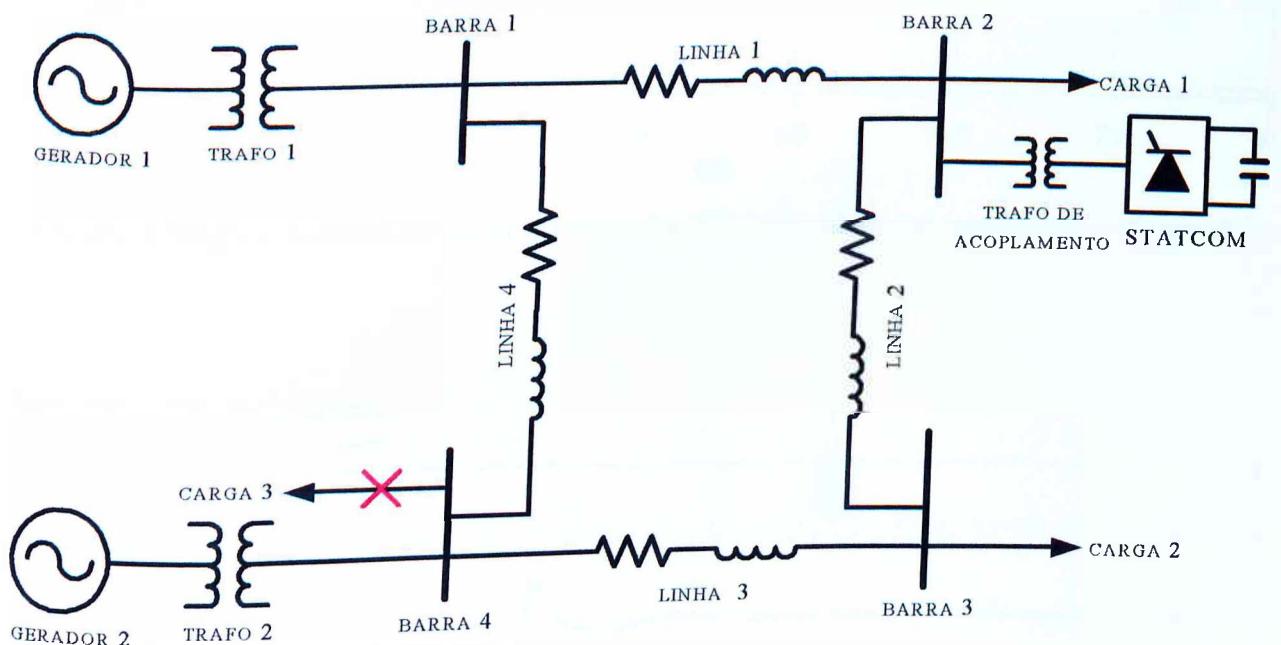


Figura 4.31 – Diagrama unifilar do sistema simulado ilustrando a perda da carga 3

Novamente, o STATCOM fica inicialmente inoperante, até o instante 2 s. A figura 4.32(a) mostra que a tensão da barra 2 está ligeiramente abaixo da referência, em torno de 0,97 pu, com a entrada do compensador em 2 s, esta se eleva para o valor de referência de 1 pu. Já a figura 4.33(a) ilustra o comportamento da tensão terminal do gerador 1. Devido a similaridade, a tensão do gerador 2 foi omitida. A figura 4.34(a)

mostra o efeito da compensação na melhoria dos perfis das tensões em todas as barras do sistema. Os valores das tensões nos quatro barramentos são os mesmos daqueles encontrados nos casos anteriores.

(pu) : t(s) tensao na barra 2

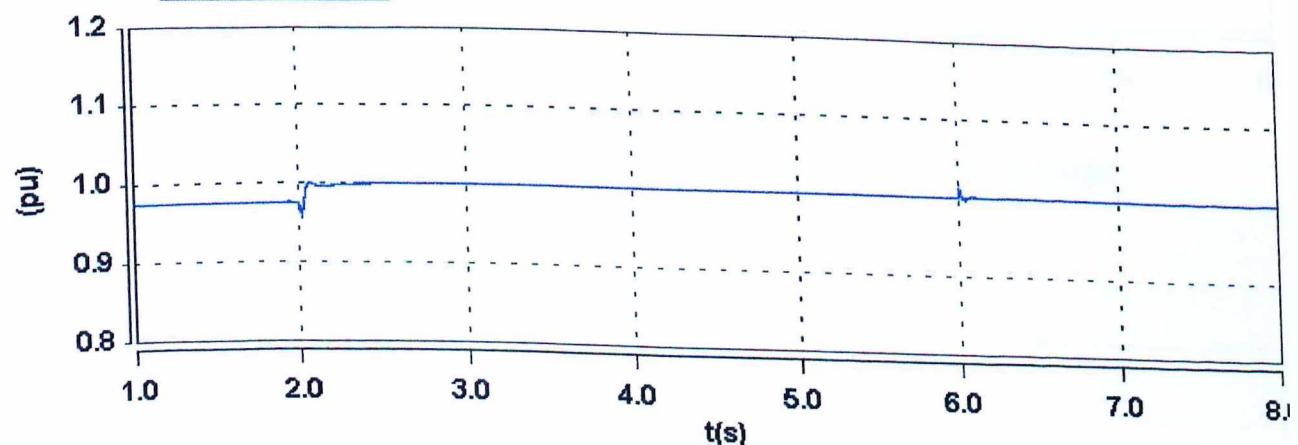


Figura 4.32(a) – Tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado – perda de carga

(pu) : t(s) tensao na barra 2

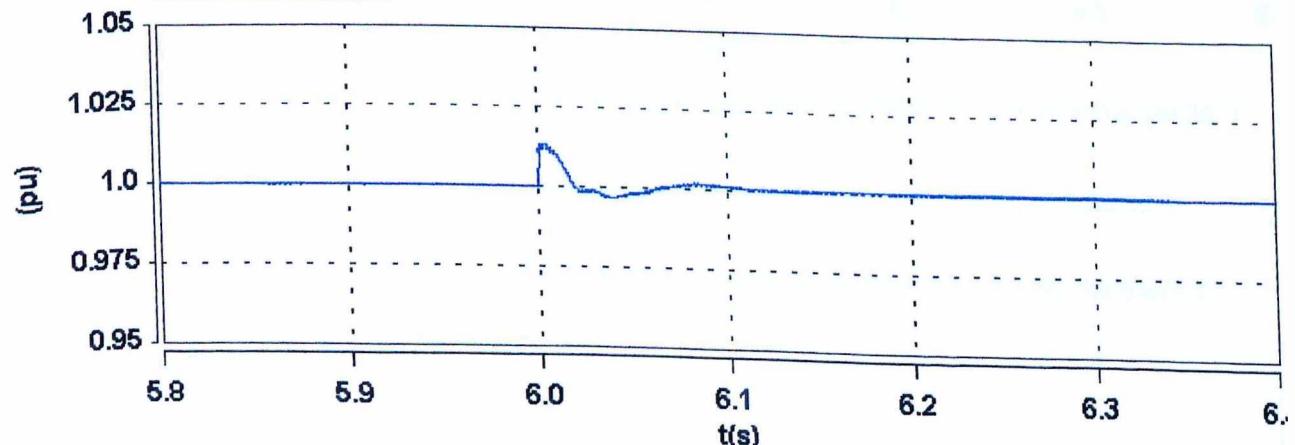


Figura 4.32(b) – Zoom da tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado durante a perda da carga 3

(pu) :  $t(s)$  tensão na saída do gerador 1

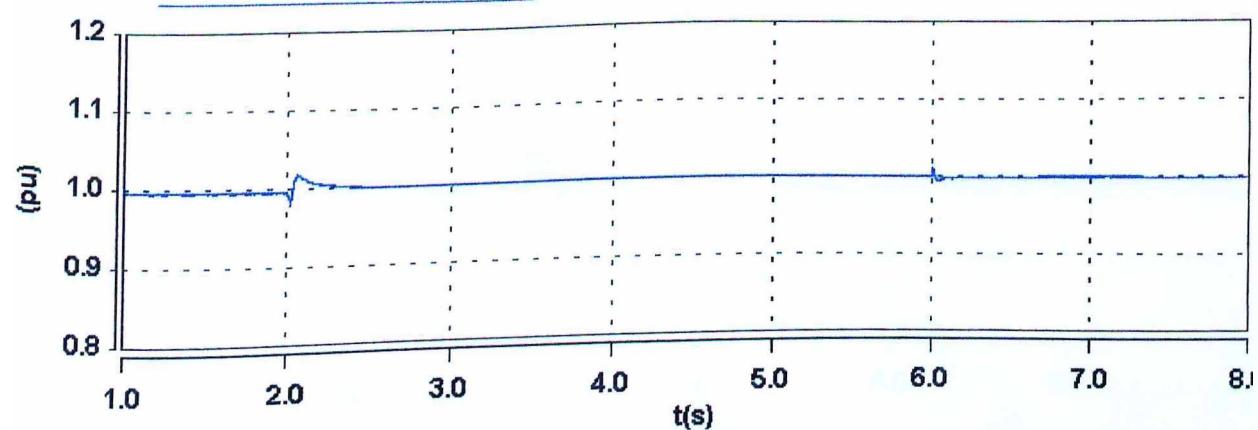


Figura 4.33(a) – Tensão terminal do gerador 1 – perda de carga

(pu) :  $t(s)$  tensão na saída do gerador 1

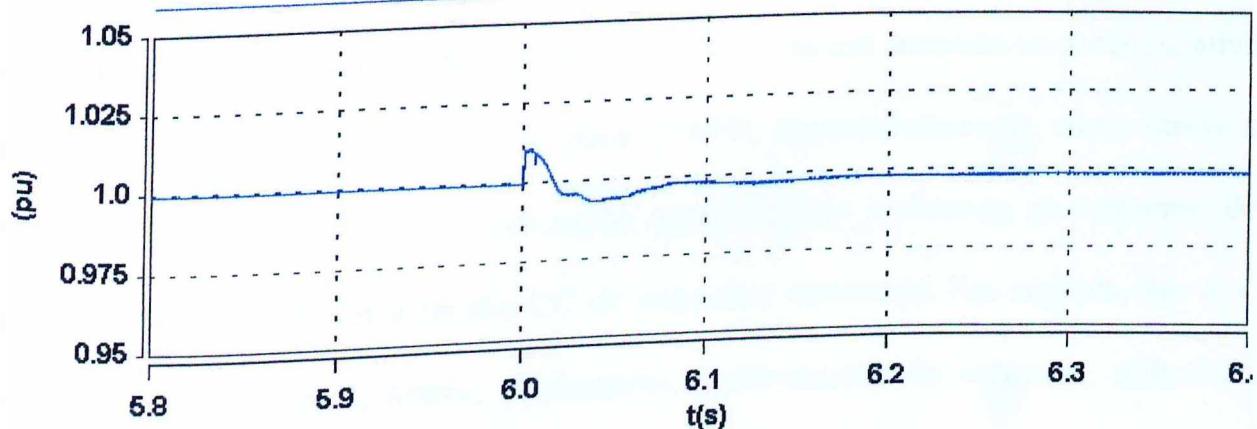


Figura 4.33(b) – Zoom da tensão terminal do gerador 1 durante a perda da carga 3

(pu) :  $t(s)$  tensão na barra 1      tensão na barra 2      tensão na barra 3      tensão na barra 4

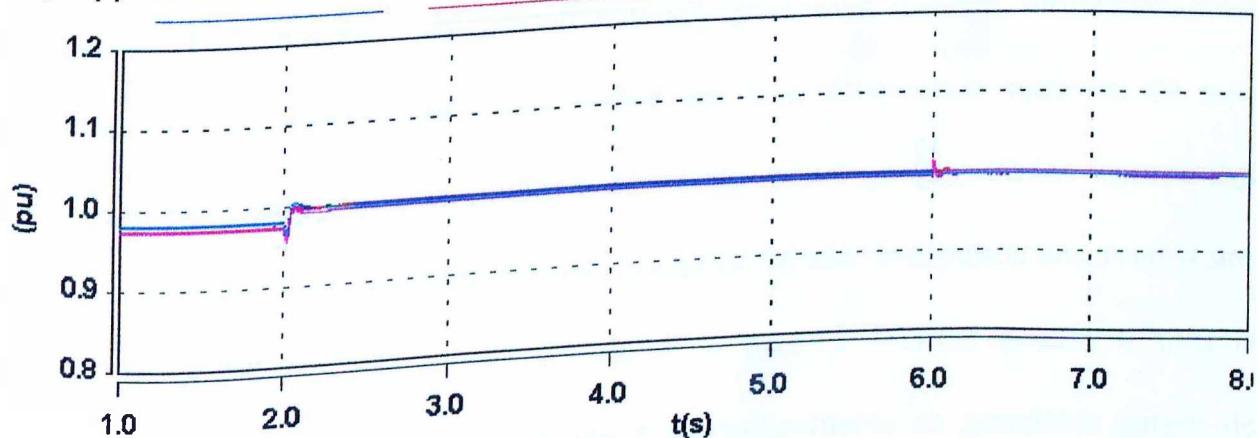


Figura 4.34(a) – Tensões nas barras – perda de carga

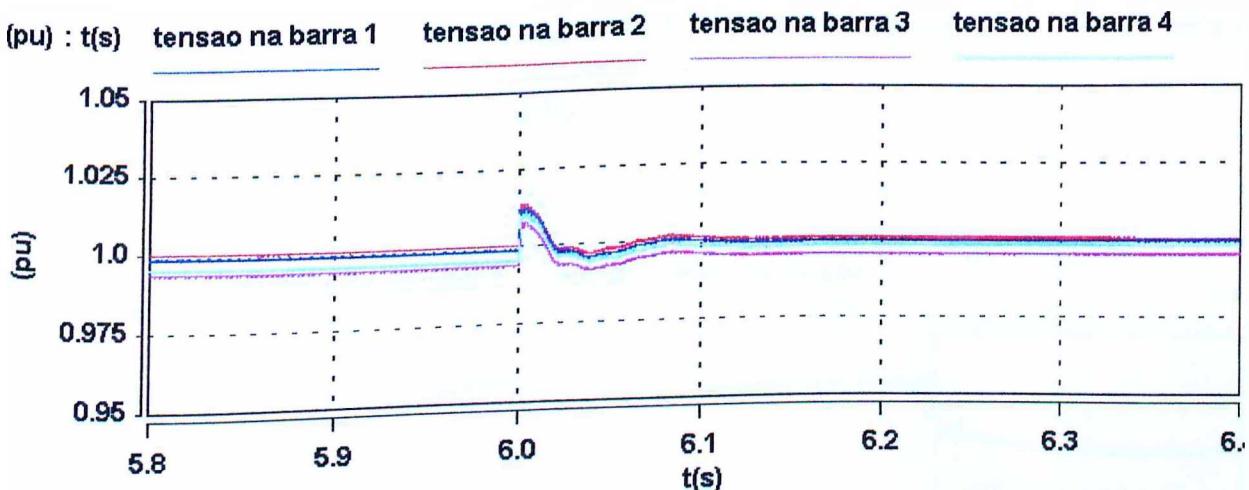


Figura 4.34(b) – *Zoom* das tensões nas barras durante a perda da carga 3

A análise subsequente refere-se ao balanço de potência entre as cargas, geradores e o compensador. Em 2 s, com a entrada do STATCOM, há um aumento na potência ativa fornecida pelos geradores, de 15 MW para 17 MW, aproximadamente, como ilustra a figura 4.35(a). Este fato já foi comentado anteriormente e deve-se ao consumo do compensador para manter a tensão CC do capacitor constante. Em seguida, em 6 s, com a perda da carga 3, houve, obviamente, a diminuição do consumo, reduzindo assim a necessidade da potência ativa gerada. Para esta nova situação, cada gerador passa a fornecer aproximadamente 13 MW.

A figura 4.36(a) mostra o comportamento das potências reativas fornecidas pelos geradores. Com a entrada do compensador em 2 s, fornecendo reativos, há uma diminuição na correspondente potência fornecida pelos geradores. Os valores dos reativos fornecidos pelos geradores e pelo STATCOM são os mesmos observados nos dois casos anteriores, até o instante de 6 s, pois o sistema possui a mesma configuração. Após a perda da carga em 6 s, praticamente os geradores param de

fornecer reativos para o sistema, já que o STATCOM fornece cerca de 8 Mvar para o sistema, conforme indica a figura 4.37(a).

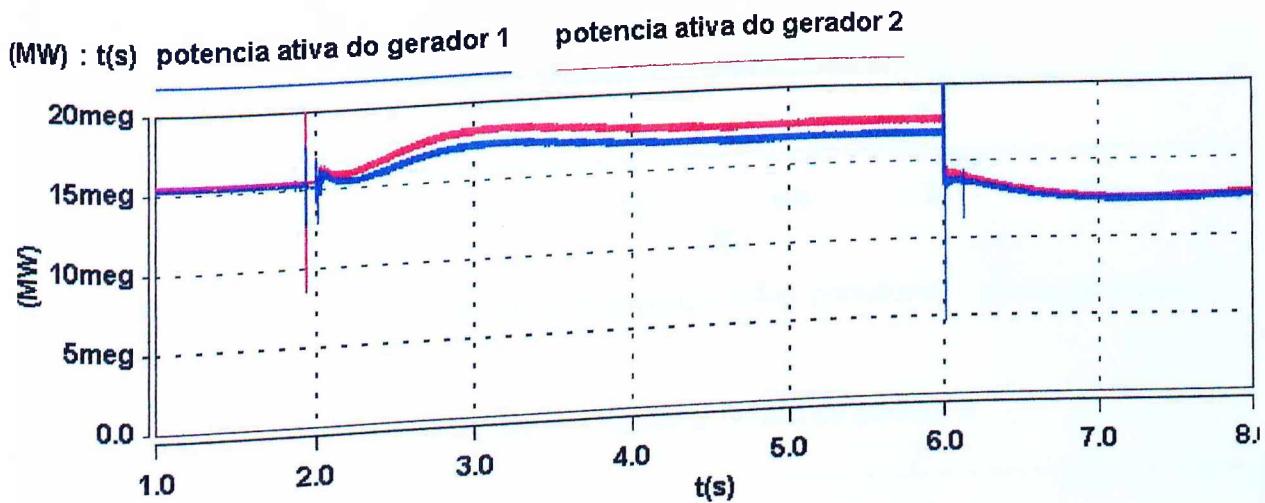


Figura 4.35(a) – Potência Ativa fornecida pelos geradores – perda de carga

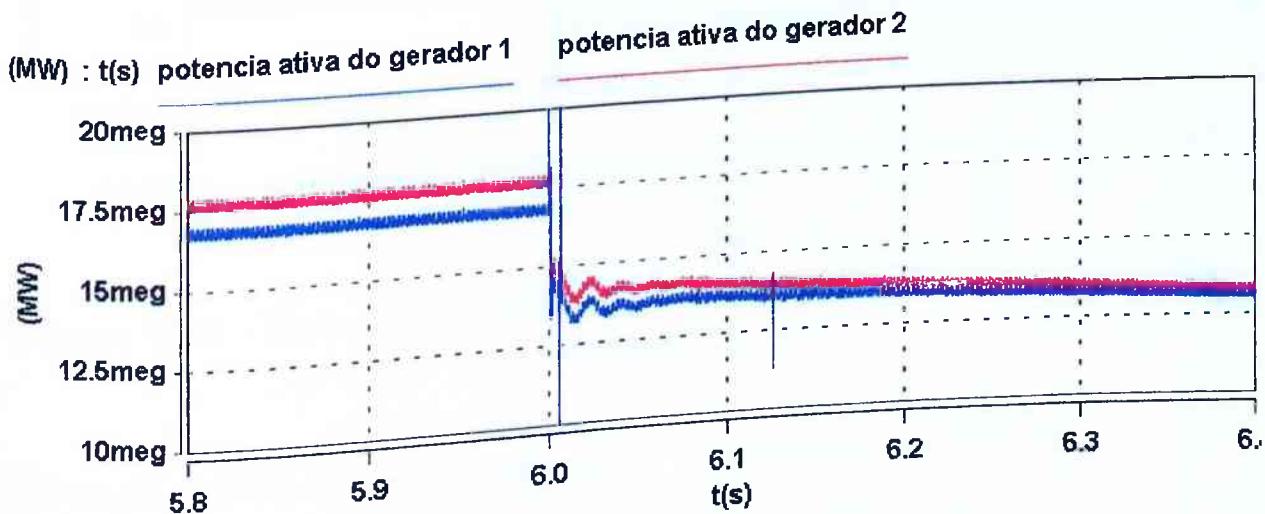


Figura 4.35(b) – Zoom da potência Ativa fornecida pelos geradores durante a perda da carga 3

(Mvar) : t(s) potencia reativa do gerador 1      potencia reativa do gerador 2

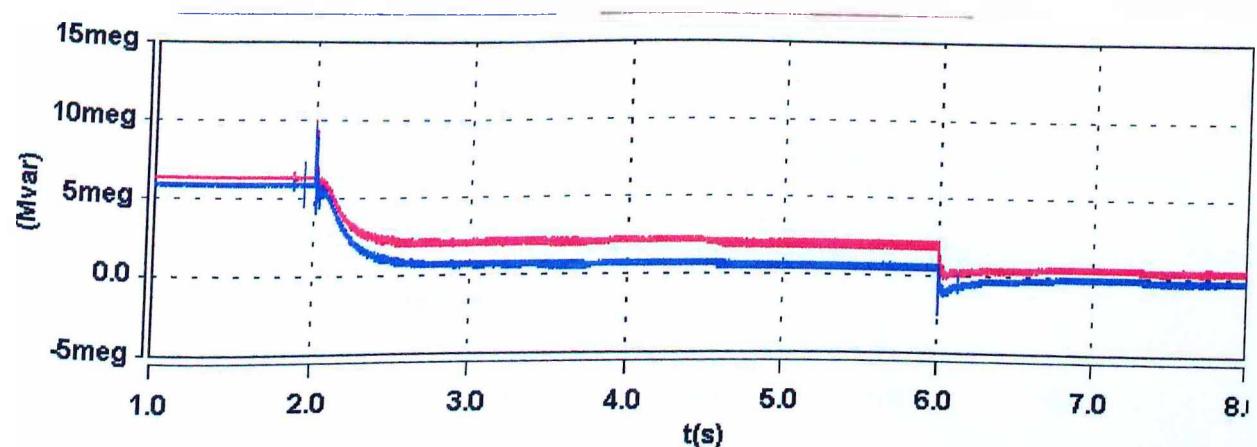


Figura 4.36(a) – Potência Reativa fornecida pelos geradores – perda de carga

(Mvar) : t(s) potencia reativa do gerador 1      potencia reativa do gerador 2

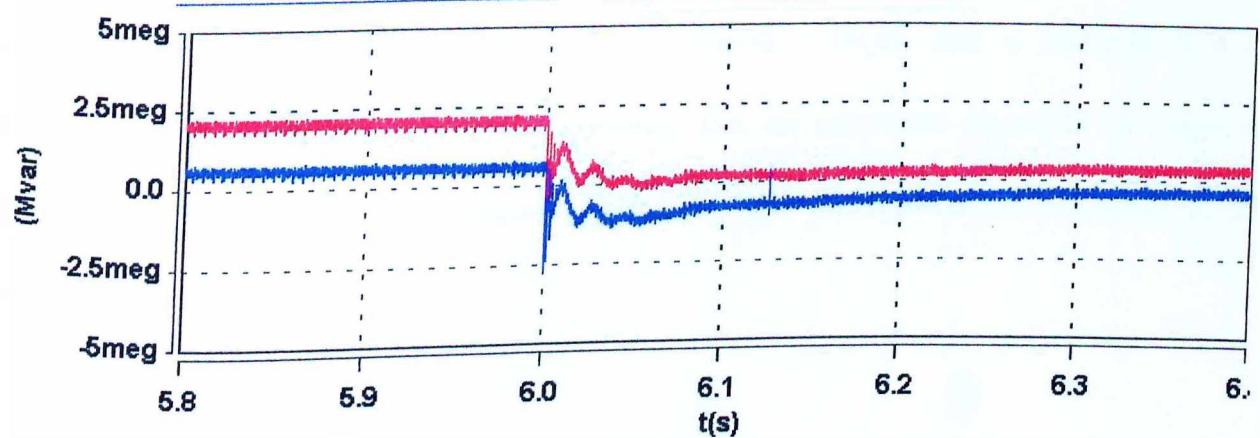


Figura 4.36(b) – Zoom da potência Reativa fornecida pelos geradores durante a perda da carga 3

(MW e Mvar) : t(s) potencia ativa do STATCOM      potencia reativa do STATCOM

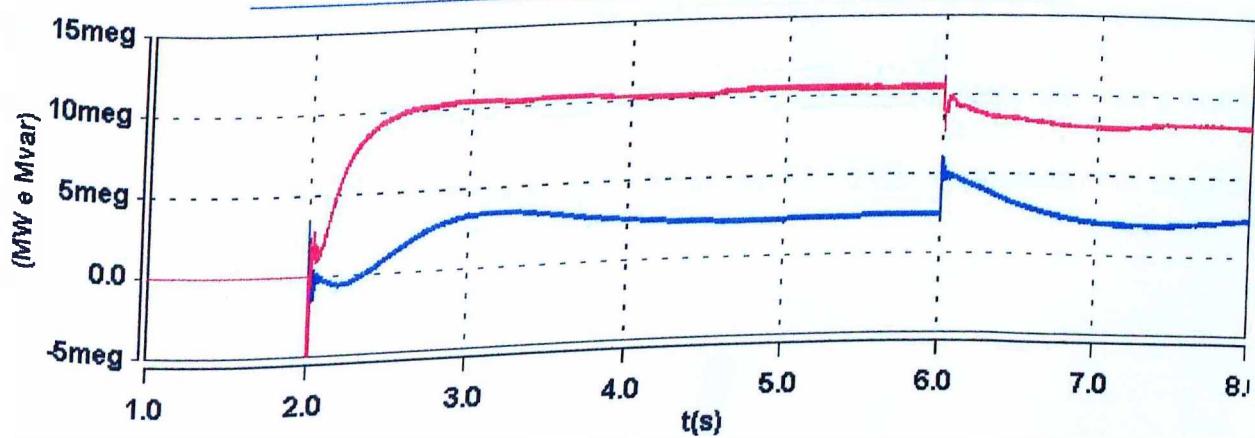


Figura 4.37(a) – Potência Ativa e Reativa do STATCOM – perda de carga

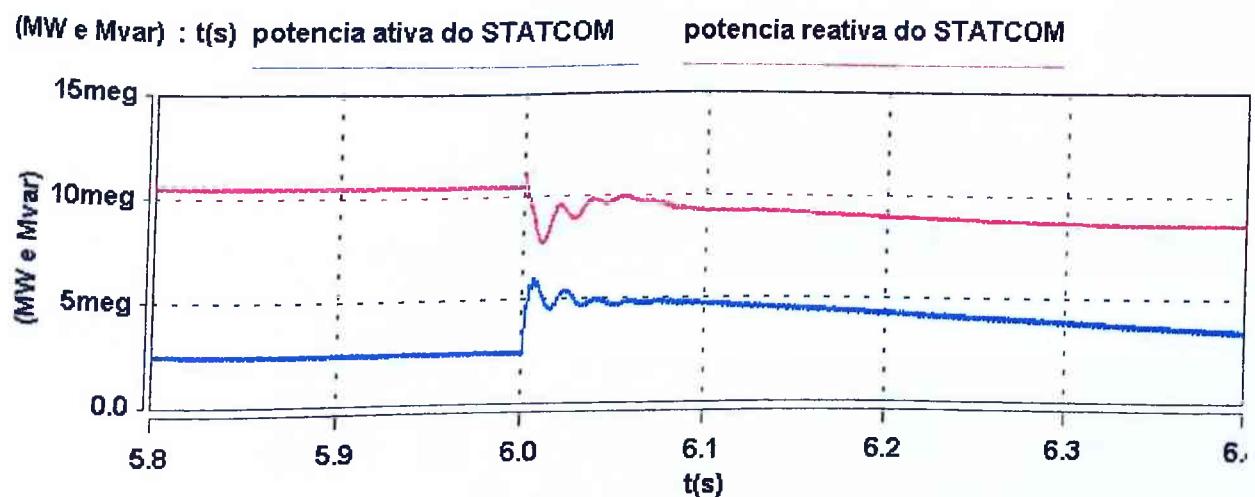


Figura 4.37(b) – *Zoom* da potência Ativa e Reativa do STATCOM durante a perda da carga 3

A tensão CC do capacitor é mostrada na figura 4.38(a). Até o instante 6 s o comportamento é similar aos casos anteriores. Em 6s, momento da perda da carga, a tensão do capacitor sofre um aumento, atingindo 1,09 pu, retornando, em seguida, ao valor de referência.

A figura 4.39 ilustra o desempenho das velocidades dos geradores. Como houve uma diminuição da potência consumida devido a perda de carga, a velocidade tende a se elevar, mas devido a ação dos reguladores de velocidade, o valor de 377 rad/s é mantido. Já a figura 4.40(a) ilustra as freqüências das barras 1 e 3. Novamente, as freqüências da barra 2 e 4 foram omitidas devido a similaridade. Nota-se, com a perda da carga 2 em 6 s, que a freqüência atinge o valor de 60,08 Hz, retornando em seguida ao valor nominal de 60 Hz.

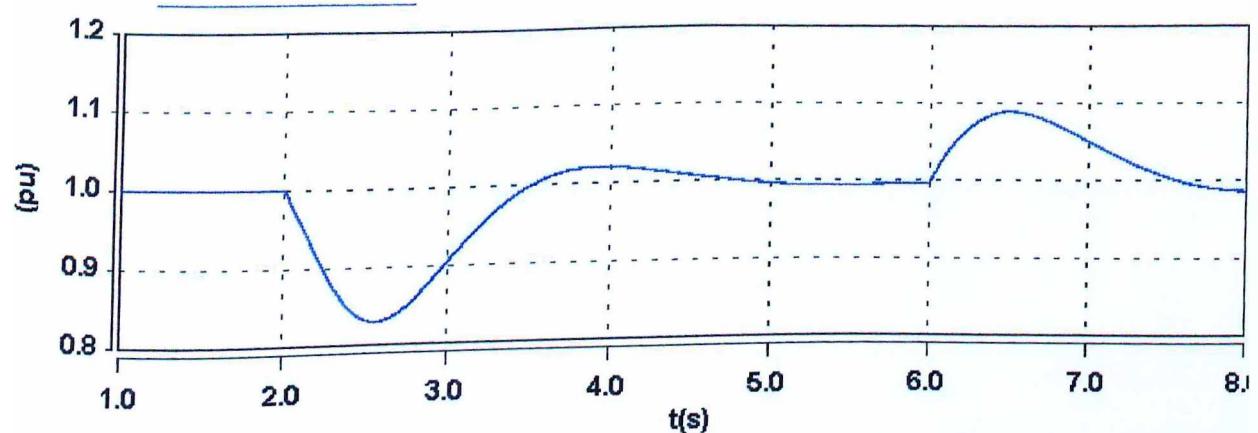
(pu) :  $t(s)$  tensão no capacitor

Figura 4.38(a) – Tensão CC do capacitor – perda de carga

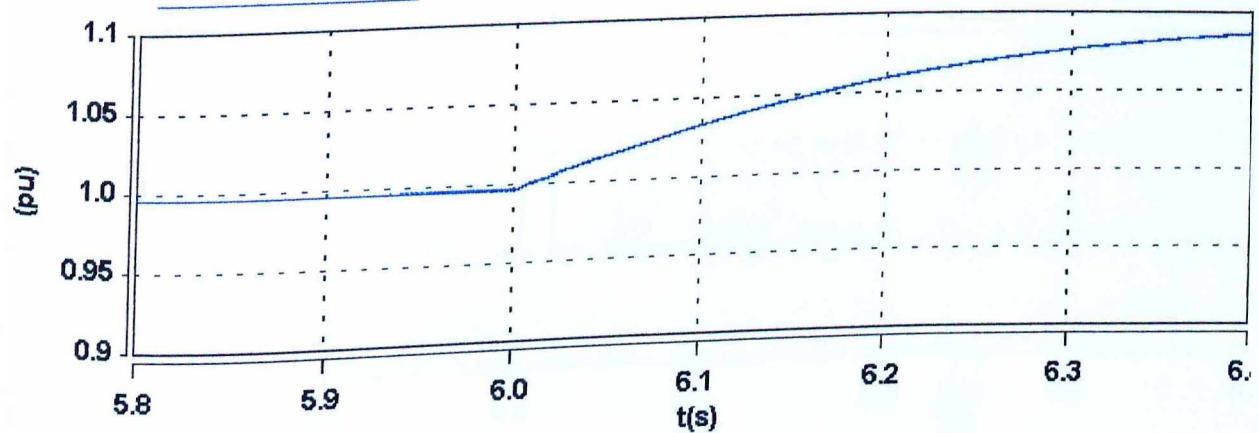
(pu) :  $t(s)$  tensão no capacitor

Figura 4.38(b) – Zoom da tensão CC do capacitor durante a perda da carga 3

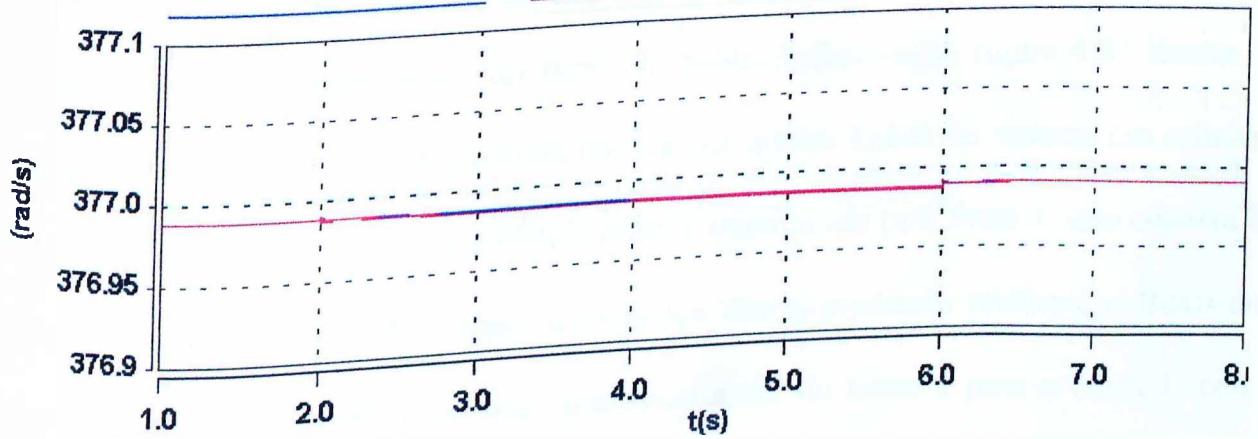
(rad/s) :  $t(s)$  velocidade do gerador 1      velocidade do gerador 2

Figura 4.39 – Velocidades dos geradores síncronos – perda de carga

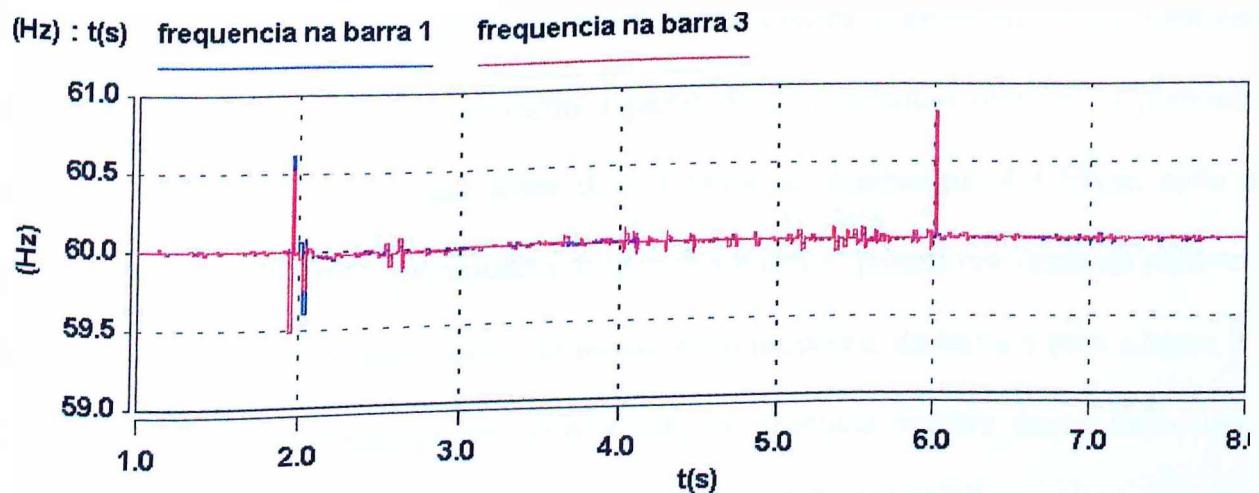


Figura 4.40(a) – Freqüências das barras de geração – perda de carga

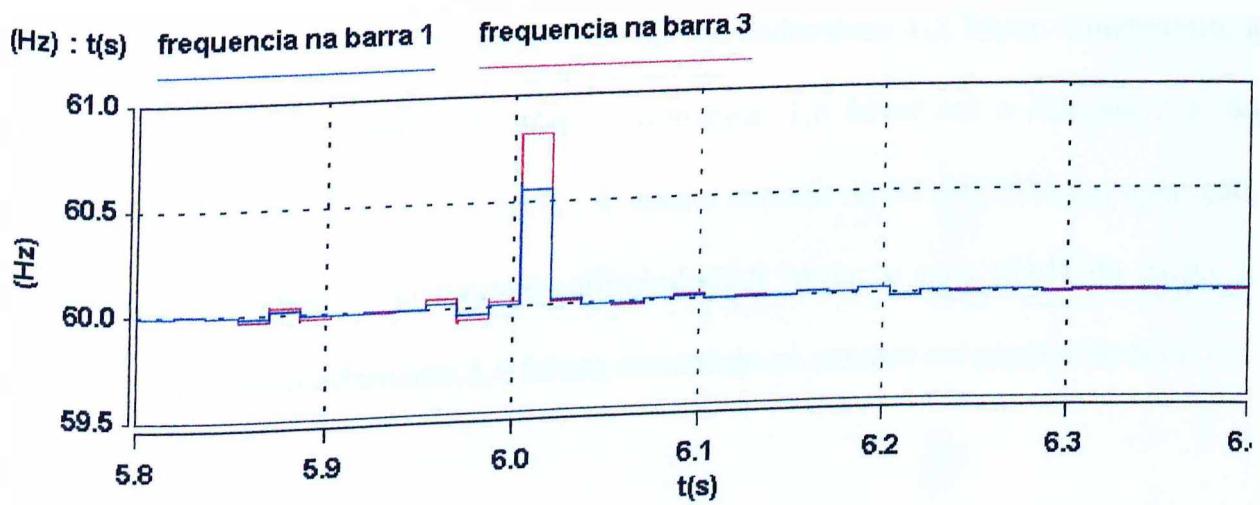


Figura 4.40(b) – Zoom das freqüências das barras de geração durante a perda da carga 3

Conforme relatado no capítulo anterior, o STATCOM proporciona, dentre outras ações, mudança (reorganização) no fluxo de potência reativa. A figura 4.41 ilustra o comportamento dos fluxos de potência reativa nas quatro linhas do sistema em estudo. Antes do STATCOM, até 2 s, a potência reativa transmitida pela linha 1, que conecta a barra 1 à barra 2, é 3,6 Mvar; com a presença deste, injetando reativos, o fluxo de reativos na linha 1 inverte o sentido, passando a ser da barra 2 para a barra 1, com valor de 2,6 Mvar, e, após a retirada da carga em 6 s, de aproximadamente 2 Mvar. O

fluxo de reativos na linha 2, que conecta a barra 2 à barra 3, antes do STATCOM era de 1,8 Mvar, já com este em operação a partir de 2 s injetando reativos, a potência transmitida por esta linha passa a ser de 5,5 Mvar, e, finalmente, 4,5 Mvar, após a perda da carga. A linha 3, que conecta a barra 3 à barra 4, possui um fluxo de reativos inicial igual a 3,7 Mvar, sendo este, devido ao sinal negativo, da barra 4 para a barra 3. Com a entrada em operação do STATCOM, a potência reativa nesta linha vai, praticamente, para zero. Isto se justifica pelo fato do STATCOM fornecer os reativos para a carga 2. Em 6 s, com a retirada desta carga, a potência reativa volta a circular da barra 3 para a barra 4, e o seu valor é de aproximadamente 1,2 Mvar. Finalmente, a linha 4, que conecta a barra 4 à barra 1, transmite 1,8 Mvar até o instante 2 s, no sentido da barra 1 para a barra 4. Após 2 s, com a entrada do STATCOM em operação, a potência reativa sofre um aumento atingindo 2,8 Mvar, e com perda da carga 2, reduz-se para aproximadamente 1,4 Mvar, mantendo-se sempre no mesmo sentido.

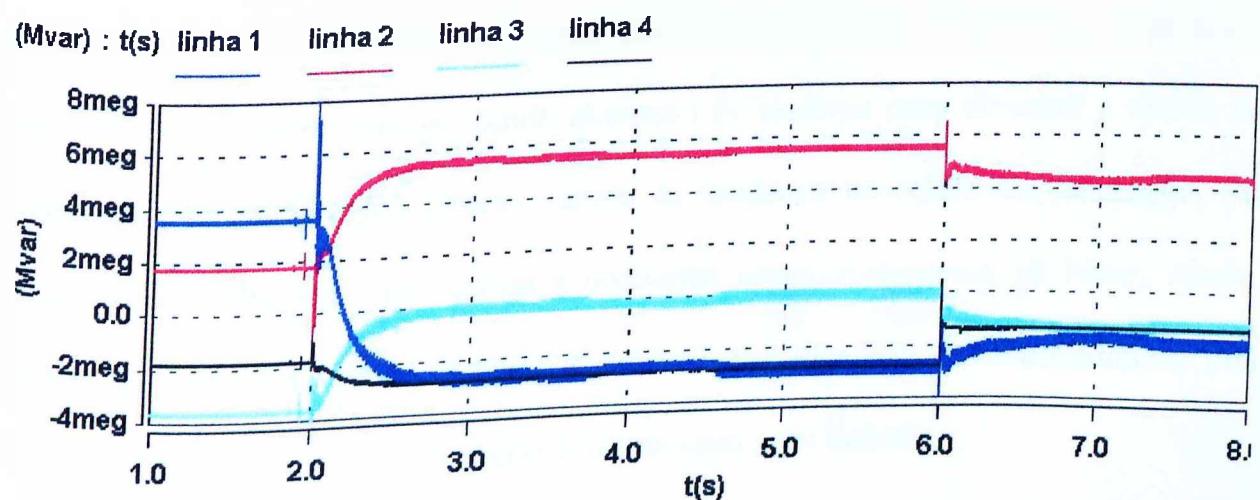


Figura 4.41 – Fluxos de potência reativa nas linhas de transmissão – perda de carga

#### 4.5.4 – Mudança no Modo de Operação

A figura 4.42 ilustra a tensão na barra 2, a qual está conectado o STATCOM, quando da mudança da tensão de referência de 1 pu para 0,95 pu, o que determina uma alteração operacional passando do modo capacitivo para o indutivo. Isto porque, antes o compensador está fornecendo reativos para elevar a tensão para o valor de referência (1 pu). A tensão sem a presença do STATCOM é de 0,97 pu, e no instante 8 s, com a mudança da referência, o compensador consome reativos para reduzir a tensão para o novo valor de referência (0,95 pu). Observa-se pela figura 4.42 que a tensão passa de 1 pu para o novo valor de referência de 0,95 pu.

A figura 4.43 ilustra o comportamento da potência reativa do STATCOM. Até o instante da mudança na referência, a potência reativa está positiva, significando, de acordo com a convenção adotada neste trabalho, que o compensador está fornecendo reativos para o sistema. Em 8 s, após um pequeno período transitório, a potência reativa muda de sinal, caracterizando absorção de reativos para diminuir a tensão no barramento. O STATCOM fornece, antes da mudança na referência da tensão, 8,3 Mvar. Após a alteração, este passa a consumir aproximadamente 18 Mvar. Ainda, através da figura 4.43, pode-se notar que o compensador leva aproximadamente 300 ms para mudar seu modo de operação de capacitivo para indutivo.

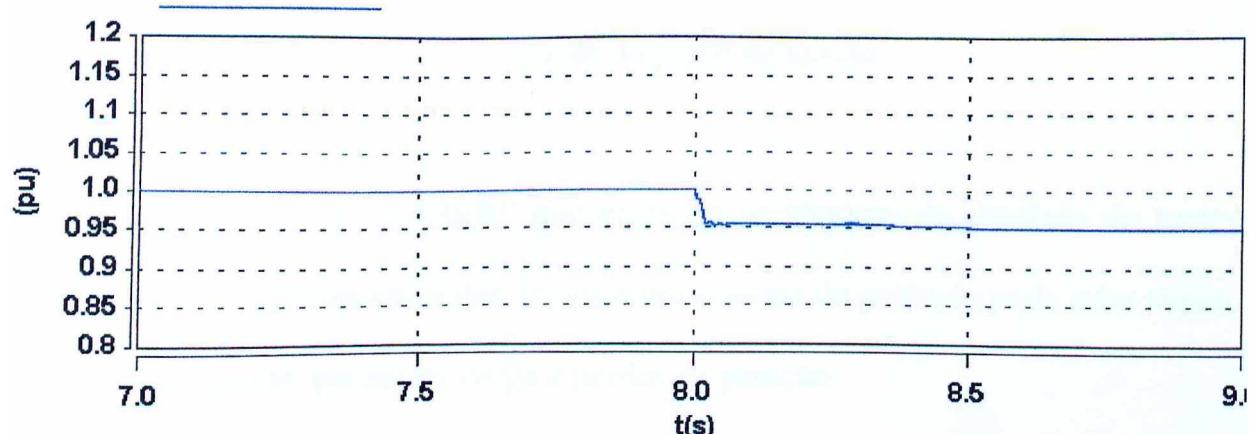
(pu) :  $t(s)$  tensão na barra 2

Figura 4.42 – Tensão na barra 2 na qual o STATCOM está conectado—mudança no modo de operação

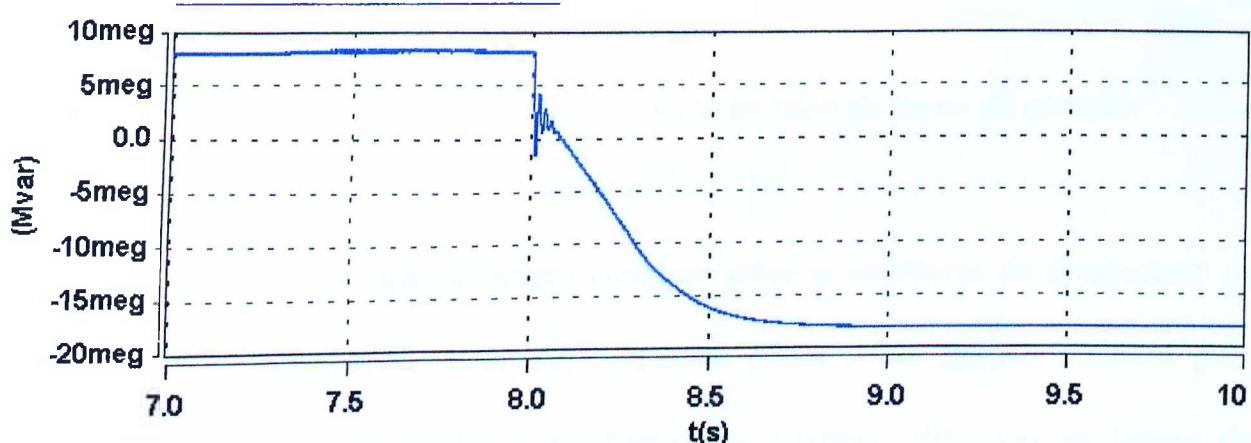
(Mvar) :  $t(s)$  potencia reativa do STATCOM

Figura 4.43 – Potência Reativa do STATCOM—mudança no modo de operação

## 4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O enfoque deste capítulo foi analisar computacionalmente o comportamento de um sistema elétrico simples no qual foi conectado um compensador estático avançado

(STATCOM). De um modo geral, os estudos foram conduzidos de forma a constatar a eficácia do dispositivo quanto ao controle do perfil de tensão.

Utilizando o simulador “SABER” que emprega as técnicas do domínio do tempo, foram estudadas algumas situações às quais um sistema de potência pode estar sujeito, como curto-circuitos, perdas de carga e perdas de geração.

Através dos estudos destes casos pôde-se comprovar a eficiência do compensador na melhoria tanto da estabilidade de regime permanente como, principalmente, da estabilidade transitória, devido ao fornecimento de potência ativa para o sistema, durante os distúrbios, evidenciado principalmente no caso de perda de geração.

Os resultados destes estudos permitem concluir sobre a tendência da diminuição da potência reativa transmitida, uma vez que esta passa a ser gerada também pelo compensador próximo às unidades consumidoras (carga), aliviando as linhas de transmissão e, consequentemente, diminuindo as perdas. Todos estes resultados comprovam a teoria já exposta sobre a influência do STATCOM na melhoria do comportamento dinâmico de um sistema elétrico.

## **Capítulo V**

### **CONCLUSÕES GERAIS**

Embora ao longo desta dissertação terem sido feitas conclusões específicas ao final de cada capítulo, é fundamental uma abordagem compacta do trabalho desenvolvido, a fim de proporcionar uma visão rápida e sucinta do assunto estudado. Deste modo, este capítulo desenvolve-se no sentido de apresentar uma visão global dos capítulos anteriores.

O capítulo II teve por finalidade apresentar uma síntese a respeito da teoria da transmissão CA flexível. Para tanto, inicialmente, foram explanados os conceitos referentes a tecnologia em questão. Também foram feitos alguns comentários referentes a classificação das gerações do equipamentos aplicados aos FACTS, como os princípios básicos de funcionamento. Finalmente, através de um modelo generalizado foram feitas várias análises referentes às mais variadas concepções destes dispositivos, demonstrando a eficiência destes no controle do fluxo de potência.

O capítulo III trouxe, inicialmente, uma abordagem dos conceitos da teoria vetorial, já que esta ferramenta foi utilizada para modelagem e controle do dispositivo estudado neste trabalho. Foi apresentada uma análise detalhada do STATCOM, quanto ao seu

princípio de funcionamento, caracterizando a tensão de saída nos terminais trifásicos para que o suporte de reativos e também de ativos, seja adequado ao controle da tensão no ponto de acoplamento comum entre este equipamento e o sistema. Esta análise foi feita através de diagrama fasoriais ilustrando todas as situações possíveis. Este capítulo também fez um estudo relatando a superioridade do STATCOM sobre o SVC (compensador convencional). Também foi abordado a malha de controle implementada para realização das investigações realizadas neste trabalho, onde o controle da tensão de compensação é baseada na análise vetorial e no princípio de funcionamento do equipamento em questão. Como o equipamento foi todo modelado e implementado computacionalmente, este capítulo informou de forma resumida as vantagens da ferramenta computacional utilizada neste trabalho - o simulador SABER- e as unidades que compõem o STATCOM modelado no simulador.

O capítulo IV realizou uma investigação computacional sobre o comportamento de um sistema hipotético com a presença de um STATCOM, com o propósito de avaliar seus efeitos na melhoria do comportamento dinâmico de um sistema elétrico, diante de alguns distúrbios, como curto-circuito, perda de geração com rejeição de carga, e perda de carga. Todas as simulações foram realizadas através do simulador SABER. No decorrer do capítulo IV, foram discutidos os resultados obtidos, de onde foi possível constatar a eficiência do STATCOM na compensação de sistema elétrico. Pôde-se constatar que o modelo utilizado nesta simulação representou com grande fidelidade o equipamento real, e que um estudo computacional deste tipo, pode antever a verdadeira interação do STATCOM com o sistema.

Frente ao fato de que o STATCOM é um equipamento de concepção recente e ainda muito investigado, pode-se destacar que, uma das contribuições desta dissertação, foi no sentido de apresentar uma abordagem simples e didática a respeito da interação deste equipamento com o sistema.

Tendo em vista o contexto apresentado, pode-se ainda notar a existência de muitas lacunas a serem preenchidas, com relação ao STATCOM. Assim, como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- Estudos relacionados com dimensionamento do STATCOM;
- Configuração e estratégia de chaveamento da ponte inversora, no sentido de se reduzir as injecções harmônicas provocada por tal equipamento;
- Implementação de modelos de filtros ativos na plataforma computacional SABER;
- Desenvolvimento de um protótipo, com vista a comparar resultados experimentais e aqueles oriundos de simulação;
- Pesquisar uma melhor distribuição (otimização) entre os reativos gerados pelo sistema de geração e o STATCOM, para evitar a tendência deste equipamento de compensação assumir praticamente toda a potência reativa requerida pelo sistema elétrico.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] FANDI, M., “Reator Controlado a Tiristores: Modelagem para Análises Sob Condições de Operação em Regimes Permanente e Transitório”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Julho, 1998.
- [2] GONÇALVES, W. K. A., “Modelagem e Análise de Desempenho de Compensadores Estáticos Avançados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”, Exame de Qualificação, Universidade Federal de Uberlândia, Março, 2000.
- [3] SANTOS, S. B., “Análise de Unidades UPFC Sob o Enfoque da Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Fevereiro, 1998.
- [4] GYUGYI, L., “Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, N°. 2, April, 1994, pp. 904-911.
- [5] GYUGYI, L., SCHAUDER, C. D., WILLIANS, S. L., RIETMAN, T. R., TORGERSON, D. R., EDRIS A., “The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, N°. 2, April, 1995, pp. 1085 – 1097.

- [6] SCHAUDER, C., MEHTA, H., "Vector Analysis and Control of Advanced Static Var Compensators", Conference Publication nº 345 of the IEE 5<sup>th</sup> International on AC and DC Power Transmission, London, September, 1991, pp. 266 – 272.
- [7] MORI, S., MATSUNO, K., HASEGAWA, T., OHNISHI, S., TAKEDA, M., SETO, M., MURAKAMI, S., ISHIGURO, F., "Development of a Large Static VAr Generator Using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, Nº. 1, February, 1993, pp. 371 – 377.
- [8] SCHAUDER, C., GERNHARDT, M., STACEY, E., LEMAK, T. GYUGYI, L., CEASE, T. W., EDRIS, A., "Development of a  $\pm 100$  MVar Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Nº. 3, July, 1995, pp. 1486 – 1496.
- [9] EDWARDS, C. W., MATTERN, K. E., NANNER, P. R., GUBERNICK, J., "Advanced Static VAr Generation Employing GTO Thyristors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, Nº. 4, October, 1988, pp. 1622 – 1627.

- [10] SCHAUDER, C., STACEY, E., LUND, M., GYUGYI, L., KOVALSKY, L., KERI A., MEHRABAN, A., EDRIS, A., “AEP UPFC Project: Installation, Commissioning and Operation of The  $\pm 160$  MVA STATCOM (Phase I)”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, N°. 4, October, 1998, pp. 1530 – 1535.
- [11] EDRIS, A., MEHRABAN, A. S., RAHMAN, M., GYUGYI, L., ARABI, S., RIETMAN, T. R., “Controlling the Flow of Real and Reactive Power”, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 1, January, 1998, pp. 20 – 25.
- [12] RENZ, B. A., KERI A., MEHRABAN, A. S., SCHAUDER, C., STACEY, E., KOVALSKY, L., GYUGYI, L., EDRIS, A., “AEP Unified Power Flow Controller Performance”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N°. 4, October, 1999, pp. 1374 – 1381.
- [13] ARSOY, A., LIU, Y., RIBEIRO, P. F., XU, W., “The Impact of Energy Storage On the Dynamic Performance of a Static Synchronous Compensator”, Power Electronic and Motion Control Conference, Proceedings, PIEMC 2000, the third international, Vol. 2, August , 2000, pp. 519 – 524.
- [14] MIHALIC, R., ZUNCO, P., POVH, D., “Improvement of Transient Stability Using Unified Power Flow Controller”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N°. 1, January, 1996, pp. 485 – 491.

- [15] NABAVI-NIAKI, A., IRAVANI, M. R., "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power Systems Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, Nº. 4, November, 1996, pp. 1937 – 1943.
- [16] YONEZAWA, H., SHIMATO, T., TSUKADA, M., IYODA, I., PASERBA, J. J., REED, G., "Study of a STATCOM Application for Voltage Stability Evaluated by Dynamic PV Curves and Time Simulations", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Vol. 2, January, 2000, pp. 1471 – 1476.
- [17] NI, Y., HUANG, Z., CHEN, S., ZHANG, B., "Incorporating UPFC Model Into the Power System Toolbox of the Matlab for Transient Stability Study", TECCON'98 IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, Vol. 2, 1998, pp. 506 – 5091.
- [18] SCHAUDER, C., "STATCOM For Compensation of Large Arc Furnace Installations", IEEE/PES Summer Meeting, July, 1999, pp. 1109 – 1112.
- [19] SAAD SAOUD, Z., LISBOA, M. L., EKANAYAKE, J. B., JENKINS, N., STRBAC, G., "Application of STATCOMs to wind farms", IEE Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, Nº. 5, September, 1998, pp. 511 – 516.

- [20] POWELL, M. T., THANAWALA, H. L., AN, T., JENKINS, N., "Assessment of Two Different STATCOM Configurations for FACTS Application in Power Systems", Power System Technology, Proceedings. POWERCON'98, International Conference, Vol.1, August , 1998, pp. 307 – 312.
- [21] SEN, K. K., "STATCOM – Static Synchronous Compensation: Theory, Modeling, and Applications", Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, January, 1999, pp. 1075 – 1077.
- [22] SEN, K. K., "UPFC – Unified Power Flow Controller: Theory, Modeling, and Applications", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, Nº. 4, October, 1998, pp. 1453 – 1458.
- [23] ANDERSON, P. M., FOUAD, A. A., "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- [24] KUNDUR, P., "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc, 1994
- [25] GUIMARÃES, G. C., "Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos – Parte I.", Universidade Federal de Uberlândia, Janeiro, 2000.
- [26] GUIMARÃES, G. C., "Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos – Parte II.", Universidade Federal de Uberlândia, Agosto, 1998.

- [27] SALERNO, C. H., “Estudo da Estabilidade de Sistemas Elétricos Através do Controle do Fluxo de Potência Ativa Realizado pela Máquina de Indução”, Tese de Doutorado, Universidade de Campinas, Dezembro, 1992.
- [28] GYUGYI, L., “A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems”, AC and DC Power Transmission, International Conference on, 1991, pp. 19 – 26.
- [29] MAKOMBE, T., “An Investigation of a Unified Power Flow Controller”, PhD’s Thesis, UMIST, 1997.
- [30] HINGORANI, N. G., “Flexible AC Transmission System”, IEEE Spectrum, April 1993, pp. 40 – 45.
- [31] Manual dos *Templates* do Projeto de Desenvolvimento – Convênio UFU-Petrobrás, 1997.