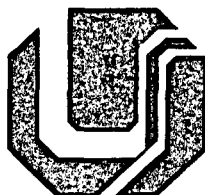


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE
COMPENSADORES ESTÁTICOS AVANÇADOS NO CONTEXTO
DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

WALKYRIA KRYSTHIE ARRUDA GONÇALVES MARTINS

SISBI/UFU



1000205618

JULHO

2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MOU
G21.3
14386 m
145 MEM

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE
COMPENSADORES ESTÁTICOS AVANÇADOS NO CONTEXTO
DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Tese apresentada por Walkyria Krysthie Arruda
Gonçalves Martins à Universidade Federal de
Uberlândia para obtenção do título de Doutora em
Engenharia Elétrica aprovada em 25/07/2002 pela
Banca Examinadora.

José Carlos de Oliveira, PhD (UFU) – Orientador
Vera Lúcia de Souza Franco, Dr-Ing (UFU) – Co-orientadora
Carlos Alberto Mohallem Guimarães, PhD (EFEI)
Adalberto José Batista, Dr (UFG)
José Wilson Resende, PhD (UFU)

**MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE
COMPENSADORES ESTÁTICOS AVANÇADOS NO CONTEXTO
DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

WALKYRIA KRYSTHIE ARRUDA GONÇALVES MARTINS

Tese apresentada por Walkyria Krysthie Arruda Gonçalves Martins à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD
Orientador

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

Ao meu querido esposo Ronan, aos
meus pais Neto e Rosemary e aos
meus irmãos Mytze e Ciro Rodolpho.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e conforto em todos os momentos da vida.

Ao professor José Carlos de Oliveira pela orientação segura, confiança depositada e, principalmente, pela paciência, sensibilidade e compreensão durante as etapas desafiadoras deste trabalho.

À professora Vera Lúcia de Souza Franco pelo suporte, esclarecimentos e sugestões fundamentais.

Ao meu esposo Ronan Marcelo Martins por ser tão companheiro.

À minha família pela compreensão às várias ausências.

Aos amigos Adriano, Edjane, Elmo, Glaucia, Joelma e José Roberto que, com o carinho e as horas agradáveis, nos ajudam a suportar a distância das nossas famílias.

Ao colega Marcelo Fandi pela atenção e presteza.

Aos colegas e professores da pós-graduação pelas discussões e sugestões.

À secretária da pós-graduação Joana pelo apoio nas questões práticas e palavras de conforto nas horas difíceis.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Os sistemas de energia elétrica têm experimentado, nos tempos atuais, problemas com a sua operação, devido à crescente demanda de consumo. Neste particular, os FACTS, através dos seus equipamentos avançados, têm surgido como uma alternativa de grande potencial para o auxílio e/ou otimização dos processos de transferência de energia. Neste contexto surge um equipamento denominado UPFC – *Unified Power Flow Controller*, que consiste da união de dois outros dispositivos (ASVC – *Advanced Static VAR Compensator* e ASC – *Advanced Series Compensator*). Este tem sido apontado como um dos dispositivos mais promissores para utilização nos FACTS. Face ao exposto, e levando-se em consideração os aspectos relacionados com o princípio de funcionamento de tais compensadores avançados, surge esta tese, a qual, dentre outros propósitos, modela e faz uma avaliação da interação entre estes dispositivos na compensação de fenômenos atrelados à Qualidade da Energia Elétrica, bem como dos efeitos da rede de suprimento no desempenho do equipamento. Para tanto, são implementados os modelos representativos, tanto do circuito de potência quanto de controle de tais dispositivos, no simulador SABER, empregando como recurso de modelagem as técnicas no domínio do tempo. Finalmente, a partir destas implementações, são efetuados estudos de casos no sentido de evidenciar as potencialidades das unidades ASVC, ASC e UPFC quando das suas utilizações em uma rede de suprimento com qualidade comprometida.

ABSTRACT

Due to the growing demand of electrical energy, modern electrical systems have faced a variety of operational problems. To solve some of these difficulties, emerges the FACTS concepts and technology. This uses advanced equipments, which provide new ways to control and optimise power transfer from different locations. Focusing on this strategy arises the Unified Power Flow Controller-UPFC, consisting of a ingenious combination of two other well established devices, the Advanced Static Var Compensator-ASVC and the Advanced Series Compensator-ASC. The result is a promising equipment to enhance FACTS applications. Considering this as quite a new product, it is found relevant to carry on investigations in order to achieve a better understanding of its physical principles and performance under system conditions associated to power systems ideal and non ideal conditions. This is the main target for this thesis, i.e, UPFC modelling and equipment/system behaviour under power quality problems. The power units as well as the control models are implemented into the SABER time domain simulator and many studies are performed in order to emphasize the individual and overall equipment parts (ASVC, ASC and UPFC) under the established system conditions.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xxv
LISTA DE SÍMBOLOS	xxvii
 CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	01
1.2 O CONTEXTO DA PRESENTE TESE	02
1.3 O ESTADO DA ARTE	04
1.4 AS CONTRIBUIÇÕES DESTA TESE	07
1.5 A ESTRUTURA DA TESE	10
 CAPÍTULO II – SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS – FACTS	
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
2.2 O PROBLEMA	15
2.3 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DOS FACTS NO CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA	20
2.3.1 O COMPENSADOR PARALELO IDEAL	20
2.3.2 O COMPENSADOR SÉRIE IDEAL	23
2.3.3 O CONTROLADOR DE ÂNGULO DE FASE IDEAL	25
2.3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS CONTROLADORES IDEAIS DE FLUXO DE POTÊNCIA	28
2.4 EQUIPAMENTOS BASEADOS NA TECNOLOGIA DOS FACTS	29
2.4.1 CONTROLADORES DE FLUXO DE POTÊNCIA BASEADOS EM TIRISTORES	30
2.4.1.1 – Equipamentos para compensação paralela	31

2.4.1.2 – Equipamentos para compensação da reatância série	33
2.4.1.3 – Equipamentos defasadores	35
2.4.2 CONTROLADORES DE FLUXO DE POTÊNCIA AVANÇADOS	37
2.4.2.1 – Compensador Estático Avançado (ASVC)	38
2.4.2.2 – Compensador Série Avançado (ASC)	39
2.4.2.3 – Controlador de Fluxo de Potência Unificado (UPFC)	41
2.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A TEORIA VETORIAL	43
2.5.1 REPRESENTAÇÃO VETORIAL DE GRANDEZAS TRIFÁSICAS	43
2.5.1.1 – Representação vetorial no sistema ortogonal estacionário (d-q)	46
2.5.1.2 – Representação vetorial no sistema ortogonal síncrono (α - β)	48
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
 CAPÍTULO III – COMPENSADOR ESTÁTICO PARALELO AVANÇADO - ASVC	
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	54
3.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS COMPENSADORES ESTÁTICOS PARALELOS AVANÇADOS - ASVC	56
3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ASVC	57
3.3.1 TENSÃO e_p EM FASE COM A TENSÃO DO SISTEMA CA v_s	58
3.3.2 TENSÃO e_p ADIANTADA DA TENSÃO DO SISTEMA CA v_s	59
3.3.3 TENSÃO e_p ATRASADA DA TENSÃO DO SISTEMA CA v_s	60
3.4 ANÁLISE VETORIAL DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DO ASVC	62
3.5 SISTEMA DE CONTROLE DO ASVC	68
3.6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO ASVC NO SIMULADOR SABER	72
3.6.1 UNIDADE DE POTÊNCIA_P	75
3.6.2 UNIDADE DE MEDIÇÃO_P	76

3.6.3 UNIDADE DE CONTROLE_P	80
3.6.4 UNIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE PULSOS_P	82
3.7 ESTUDOS DE CASOS	86
3.7.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO	86
3.7.2 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS	90
3.7.3 RESULTADOS OBTIDOS	91
3.7.3.1 – Caso 1 – Regulação de tensão através do ASVC	91
3.7.3.2 – Caso 2 – Afundamento de tensão sem a presença do ASVC	96
3.7.3.3 – Caso 3 – Afundamento de tensão com a presença do ASVC	98
3.7.3.4 – Caso 4 – Elevação de tensão sem a presença do ASVC	102
3.7.3.5 – Caso 5 – Elevação de tensão com a presença do ASVC	105
3.7.3.6 – Quadro resumo comparativo	109
3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
 CAPÍTULO IV – COMPENSADOR ESTÁTICO SÉRIE AVANÇADO - ASC	
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	113
4.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS COMPENSADORES SÉRIE AVANÇADOS - ASC	115
4.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ASC	116
4.3.1 REGULAÇÃO DA TENSÃO TERMINAL	118
4.3.2 COMPENSAÇÃO DA REATÂNCIA SÉRIE	119
4.3.3 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO DEFASAMENTO ANGULAR	120
4.4 ANÁLISE VETORIAL DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DO ASC	122

4.5 EXPRESSÕES ANALÍTICAS PARA AS COMPONENTES DO VETOR DA TENSÃO INJETADA PELO ASC	129
4.5.1 MODO 1: REGULAÇÃO DA TENSÃO TERMINAL	129
4.5.2 MODO 2: COMPENSAÇÃO DA REATÂNCIA SÉRIE	130
4.5.3 MODO 3: CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO DEFASAMENTO ANGULAR	131
4.6 SISTEMA DE CONTROLE DO ASC	132
4.6.1 MALHA DE CONTROLE DA TENSÃO TERMINAL	132
4.6.2 MALHA DE CONTROLE DA REATÂNCIA SÉRIE	133
4.6.3 MALHA DE CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO DEFASAMENTO ANGULAR	134
4.6.4 MALHA DE CONTROLE COMPLETA DO ASC	135
4.7 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO ASC NO SABER	137
4.7.1 UNIDADE DE POTÊNCIA_S	140
4.7.2 UNIDADE DE MEDIÇÃO LOCAL_S	141
4.7.3 UNIDADE DE MEDIÇÃO REMOTA_S	145
4.7.4 UNIDADE DE CONTROLE_S	146
4.7.5 UNIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE PULSOS_S	149
4.8 ESTUDOS DE CASOS	151
4.8.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO	151
4.8.2 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS	155
4.8.3 RESULTADOS OBTIDOS	156
4.8.3.1 – Caso 1 – Regulação de tensão através do ASC (Controle: Modo 1)	156
4.8.3.2 – Caso 2 – Afundamento de tensão com a presença do ASC (Controle: Modo 1)	161
4.8.3.3 – Caso 3 – Elevação de tensão com a presença do ASC (Controle: Modo 1)	166

4.8.3.4 – Caso 4 – Compensação da reatância série através do ASC (Controle: Modo 2)	170
4.8.3.5 – Caso 5 – Monitoração e controle da reatância série através do ASC (Controle: Modo 2)	173
4.8.3.6 – Caso 6 – Controle do fluxo de potência ativa através do ASC (Controle: Modo 3)	176
4.8.3.7 – Quadro resumo comparativo	181
4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	182
 CAPÍTULO V – CONTROLADOR DE FLUXO DE POTÊNCIA UNIFICADO - UPFC	
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	185
5.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS CONTROLADORES DE FLUXO DE POTÊNCIA UNIFICADOS - UPFC	187
5.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO UPFC	189
5.4 ANÁLISE VETORIAL DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DO UPFC	191
5.5 SISTEMA DE CONTROLE DO UPFC	192
5.6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO UPFC NO SABER	193
5.7 ESTUDOS DE CASOS	196
5.7.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO	196
5.7.2 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS	200
5.7.3 RESULTADOS OBTIDOS	201
5.7.3.1 – Caso 1 – Regulação de tensão através do UPFC (Controle Conversor 2: Modo 1)	201
5.7.3.2 – Caso 2 – Monitoração/controle da reatância série através do UPFC (Controle Conversor2:Modo 2)	208
5.7.3.3 – Caso 3 – Controle do fluxo de potência ativa através do UPFC (Controle Conversor 2: Modo 3)	213

5.7.3.4 – Quadro resumo comparativo	219
5.8 AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DO UPFC FACE A OUTROS DISTÚRBIOS DE QUALIDADE	220
5.8.1 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS	221
5.8.2 RESULTADOS OBTIDOS	222
5.8.2.1 – Caso 1 – Afundamento trifásico de tensão com presença do UPFC	222
5.8.2.2 – Caso 2 – Afundamento monofásico de tensão sem a presença do UPFC	226
5.8.2.3 – Caso 3 – Afundamento monofásico de tensão com a presença do UPFC	227
5.8.2.4 – Caso 4 – Afundamento trifásico de tensão com presença do UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica	230
5.8.2.5 – Caso 5 – Afundamento trifásico de tensão com presença do UPFC sem unidades de filtragem	234
5.8.2.6 – Quadros resumo comparativos	239
5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	241
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES GERAIS	245
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	251

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Representação de duas barras interligadas por uma linha de transmissão	16
Figura 2.2	– Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação)	17
Figura 2.3	– Representação de um sistema de potência simples	18
Figura 2.4	– Compensador paralelo ideal conectado ao meio de uma linha de transmissão	21
Figura 2.5	– Diagrama fasorial do sistema com compensação paralela	21
Figura 2.6	– Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação (A) e com compensação paralela (B))	22
Figura 2.7	– Compensador série ideal conectado ao meio de uma linha de transmissão	23
Figura 2.8	– Diagrama fasorial do sistema com compensação série	24
Figura 2.9	– Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação (A) e com compensação série (B, C e D))	25
Figura 2.10	– Defasador ideal conectado na barra emissora da linha de transmissão	26
Figura 2.11	– Diagrama fasorial do sistema com defasador	26
Figura 2.12	– Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação (A) e com defasador (B e C))	27
Figura 2.13	– Característica da potência transferida da barra “s” para a	28

barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação (A), com compensação paralela (B), com compensação série (C) e com defasador (D))	
Figura 2.14 – Esquema de conexão de um RCT ao sistema de potência	31
Figura 2.15 – Esquema de conexão de um CCT ao sistema de potência	32
Figura 2.16 – Esquema de conexão de um SVC ao sistema de potência	33
Figura 2.17 – Esquema de conexão de um TSSC em uma linha de transmissão	34
Figura 2.18 – Esquema de conexão de um TCSC em uma linha de transmissão	34
Figura 2.19 – Esquema de conexão de um defasador em um sistema de potência	36
Figura 2.20 – Conversor no qual se baseia os compensadores avançados	37
Figura 2.21 – Esquema de conexão de um ASVC em um sistema de potência	38
Figura 2.22 – Diagrama fasorial e modos de operação de um ASVC	39
Figura 2.23 – Esquema de conexão de um ASC em uma linha de transmissão	40
Figura 2.24 – Diagrama fasorial e modos de operação de um ASC	40
Figura 2.25 – Esquema de conexão de um UPFC em um sistema de potência	42
Figura 2.26 – Representação vetorial de uma variável trifásica	44
Figura 2.27 – Exemplo de uma trajetória vetorial	45
Figura 2.28 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal estacionário	46
Figura 2.29 – Decomposição do vetor de corrente em relação ao vetor de tensão	48

Figura 2.30	– Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal síncrono	49
Figura 3.1	– Esquema de conexão de um ASVC em um sistema de potência	57
Figura 3.2	– Diagrama fasorial para o ASVC absorvendo (a) e gerando (b) potência reativa	58
Figura 3.3	– Diagrama fasorial para o ASVC fornecendo potência ativa: absorvendo (a) e gerando (b) potência reativa	60
Figura 3.4	– Diagrama fasorial para o ASVC absorvendo potência ativa: absorvendo (a) e gerando (b) potência reativa	61
Figura 3.5	– Circuito equivalente trifásico simplificado do ASVC	62
Figura 3.6	– Vetores das tensões e correntes do ASVC	66
Figura 3.7	– Diagrama de blocos do sistema de controle do ASVC proposto neste trabalho com magnitude e ângulo da tensão e_p controlados	70
Figura 3.8	– Esquema de conexão de um ASVC em um sistema de potência	72
Figura 3.9	– Diagrama esquemático do modelo geral do ASVC implementado	74
Figura 3.10	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Unidade_Potência_P do ASVC implementado	75
Figura 3.11	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Unidade_Medição_P do ASVC implementado	77
Figura 3.12	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Transformação_Vetorial_Normalização_P	78
Figura 3.13	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Unidade_Control_P do ASVC implementado	81
Figura 3.14	– Diagrama de blocos do <i>template</i>	83

	Unidade_Distribuição_Pulsos_P	do	ASVC
	implementado		
Figura 3.15	– Sinais de comparação para o disparo das chaves		84
Figura 3.16	– Diagrama unifilar do sistema simulado		87
Figura 3.17	– Detalhamento do arranjo do ASVC no contexto do sistema simulado		89
Figura 3.18	– Tensão entre fases na barra B2 – regulação de tensão		92
Figura 3.19	– Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de cada intervalo) – regulação de tensão		92
Figura 3.20	– Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – regulação de tensão		93
Figura 3.21	– Potência reativa entre o ASVC e o sistema CA – regulação de tensão		93
Figura 3.22	– Tensão nos terminais do capacitor do ASVC ($V_{base}=15kV$) – regulação de tensão		94
Figura 3.23	– Potência ativa entre o ASVC e o sistema CA – regulação de tensão		95
Figura 3.24	– Tensão entre fases na barra B2 – afundamento de tensão sem ASVC		96
Figura 3.25	– Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de cada intervalo) – afundamento de tensão sem ASVC		97
Figura 3.26	– Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – afundamento de tensão sem ASVC		97
Figura 3.27	– Tensão entre fases na barra B2 – afundamento de tensão com ASVC		98
Figura 3.28	– Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de cada intervalo) – afundamento de tensão com ASVC		99
Figura 3.29	– Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – afundamento		100

de tensão com ASVC	
Figura 3.30 – Potência reativa entre o ASVC e o sistema CA – 100	
afundamento de tensão com ASVC	
Figura 3.31 – Tensão nos terminais do capacitor do ASVC 101	
($V_{base}=15kV$) – afundamento de tensão com ASVC	
Figura 3.32 – Potência ativa entre o ASVC e o sistema CA – 101	
afundamento de tensão com ASVC	
Figura 3.33 – Tensão entre fases na barra B2 – elevação de tensão sem 102	
ASVC	
Figura 3.34 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de 103	
cada intervalo) – elevação de tensão sem ASVC	
Figura 3.35 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – elevação de 104	
tensão sem ASVC	
Figura 3.36 – Tensão entre fases na barra B2 – elevação de tensão com 105	
ASVC	
Figura 3.37 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de 106	
cada intervalo) – elevação de tensão com ASVC	
Figura 3.38 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – elevação de 107	
tensão com ASVC	
Figura 3.39 – Potência reativa entre o ASVC e o sistema CA – 107	
elevação de tensão com ASVC	
Figura 3.40 – Tensão nos terminais do capacitor do ASVC 108	
($V_{base}=15kV$) – elevação de tensão com ASVC	
Figura 3.41 – Potência ativa entre o ASVC e o sistema CA – elevação 108	
de tensão com ASVC	
Figura 4.1 – Esquema de conexão de um ASC em uma linha de 116	
transmissão	
Figura 4.2 – Diagrama fasorial e modos de operação de um ASC 117	

Figura 4.3	– Diagrama fasorial para o ASC na regulação (aumento (a) e redução (b)) da tensão terminal	118
Figura 4.4	– Diagrama fasorial para o ASC na compensação série indutiva (a) e capacitiva (b)	119
Figura 4.5	– Diagrama fasorial para o ASC no controle do fluxo de potência através do defasamento angular: atrasando v_o (a) e adiantando v_o (b) com relação a v_s	121
Figura 4.6	– Circuito equivalente trifásico simplificado do ASC	122
Figura 4.7	– Vetores das tensões e correntes do ASC	125
Figura 4.8	– Diagrama de blocos da malha de controle completa do ASC	135
Figura 4.9	– Esquema de conexão do ASC em um sistema de potência	137
Figura 4.10	– Configuração do filtro capacitivo	138
Figura 4.11	– Diagrama esquemático do modelo geral do ASC implementado	139
Figura 4.12	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Unidade_Potência_S do ASC implementado	140
Figura 4.13	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Unidade_Medição_Local_S do ASC implementado	142
Figura 4.14	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Transformação_Vetorial_Normalização_SL	143
Figura 4.15	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Unidade_Medição_Remota_S do ASC implementado	145
Figura 4.16	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Unidade_Control_S do ASC implementado	146
Figura 4.17	– Diagrama de blocos do <i>template</i> Unidade_Distribuição_Pulsos_S do ASC	150

implementado	
Figura 4.18 – Diagrama unifilar do sistema simulado	152
Figura 4.19 – Detalhamento do arranjo do ASC no contexto do sistema simulado	153
Figura 4.20 – Tensão entre fases na barra B22 – regulação de tensão	157
Figura 4.21 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos de cada intervalo) – regulação de tensão	157
Figura 4.22 – Tensão eficaz na barra B22 ($V_{base}=69kV$) – regulação de tensão	158
Figura 4.23 – Tensão injetada pelo ASC – regulação de tensão	159
Figura 4.24 – Tensões antes, depois e injetada pelo ASC – regulação de tensão	159
Figura 4.25 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – regulação de tensão	160
Figura 4.26 – Tensão entre fases na barra B22 – afundamento de tensão com ASC	161
Figura 4.27 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos de cada intervalo) – afundamento de tensão com ASC	162
Figura 4.28 – Tensão eficaz na barra B22 ($V_{base}=69kV$) – afundamento de tensão com ASC	163
Figura 4.29 – Tensão injetada pelo ASC – afundamento de tensão com ASC	163
Figura 4.30 – Tensões antes, depois e injetada pelo ASC – afundamento de tensão com ASC	164
Figura 4.31 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – afundamento de tensão com ASC	164
Figura 4.32 – Tensão entre fases na barra B22 – elevação de tensão com ASC	166

- Figura 4.33 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos de 167
cada intervalo) – elevação de tensão com ASC
- Figura 4.34 – Tensão eficaz na barra B22 ($V_{base}=69kV$) – elevação de 168
tensão com ASC
- Figura 4.35 – Tensão injetada pelo ASC – elevação de tensão com 168
ASVC
- Figura 4.36 – Tensões antes, depois e injetada pelo ASC – elevação de 169
tensão com ASC
- Figura 4.37 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – elevação de 169
tensão com ASC
- Figura 4.38 – Reatância série da LT2 ($Z_{base}=136\Omega$) – compensação 170
reatância série
- Figura 4.39 – Tensão injetada pelo ASC – compensação reatância 171
série
- Figura 4.40 – Tensão injetada pelo ASC e corrente na LT2 – 171
compensação reatância série
- Figura 4.41 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – compensação 172
reatância série
- Figura 4.42 – Reatância série da LT2 ($Z_{base}=136\Omega$) – monitoração e 173
controle da reatância série
- Figura 4.43 – Tensão injetada pelo ASC – monitoração e controle da 174
reatância série
- Figura 4.44 – Tensão injetada pelo ASC e corrente na LT2 – 174
monitoração e controle da reatância série
- Figura 4.45 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – monitoração e 175
controle da reatância série
- Figura 4.46 – Potência ativa na LT2 – controle do fluxo de potência 176
através do ângulo de carga

Figura 4.47	– Tensão injetada pelo ASC – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga	177
Figura 4.48	– Tensões antes, depois e injetada pelo ASC (Intervalo II) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga	178
Figura 4.49	– Tensões antes, depois e injetada pelo ASC (Intervalo III) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga	178
Figura 4.50	– Ângulo entre as tensões nas barras B2 e B22 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga	179
Figura 4.51	– Ângulo entre as tensões nas barras B22 e B3 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga	180
Figura 4.52	– Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga	180
Figura 5.1	– Esquema de conexão de um UPFC em um sistema de potência	187
Figura 5.2	– Circuito equivalente de um sistema de transmissão controlado por UPFC	191
Figura 5.3	– Esquema de conexão do UPFC em um sistema de potência	193
Figura 5.4	– Diagrama esquemático do modelo geral do UPFC implementado	195
Figura 5.5	– Diagrama unifilar do sistema simulado	197
Figura 5.6	– Detalhamento do arranjo do UPFC no contexto do sistema simulado	198
Figura 5.7	– Tensão entre fases na barra B22 – regulação de tensão	202
Figura 5.8	– Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos de cada intervalo) – regulação de tensão	202

Figura 5.9	– Tensão eficaz na barra B22 ($V_{base}=69kV$) – regulação de tensão	203
Figura 5.10	– Tensão injetada pelo Conversor 2 – regulação de tensão	204
Figura 5.11	– Tensões antes, depois e injetada pelo Conversor 2 – regulação de tensão	204
Figura 5.12	– Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – regulação de tensão	205
Figura 5.13	– Potência reativa entre o Conversor 1 e o sistema CA – regulação de tensão	206
Figura 5.14	– Tensão nos terminais do capacitor do UPFC ($V_{base}=15kV$) – regulação de tensão	207
Figura 5.15	– Reatância série da LT2 ($Z_{base}=136\Omega$) – monitoração e controle da reatância série	208
Figura 5.16	– Tensão injetada pelo Conversor 2 do UPFC – monitoração e controle da reatância série	209
Figura 5.17	– Tensão injetada pelo Conversor 2 do UPFC e corrente na LT2 – monitoração e controle da reatância série	210
Figura 5.18	– Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – monitoração e controle da reatância série	210
Figura 5.19	– Potência reativa entre o Conversor 1 e o sistema CA – monitoração e controle da reatância série	211
Figura 5.20	– Tensão nos terminais do capacitor do UPFC ($V_{base}=15kV$) – monitoração e controle da reatância série	212
Figura 5.21	– Potência ativa na LT2 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga	213
Figura 5.22	– Tensão injetada pelo Conversor 2 do UPFC – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga	214
Figura 5.23	– Tensões antes, depois e injetada pelo Conversor 2 do	215

- UPFC (**Intervalo II**) – controle do fluxo de potência
através do ângulo de carga
- Figura 5.24 – Tensões antes, depois e injetada pelo Conversor 2 do 215
UPFC (**Intervalo III**) – controle do fluxo de potência
através do ângulo de carga
- Figura 5.25 – Ângulo entre as tensões nas barras B2 e B22 – controle 216
do fluxo de potência através do ângulo de carga
- Figura 5.26 – Ângulo entre as tensões nas barras B22 e B3 – controle 216
do fluxo de potência através do ângulo de carga
- Figura 5.27 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – controle do 217
fluxo de potência através do ângulo de carga
- Figura 5.28 – Potência reativa entre o Conversor 1 e o sistema CA – 218
controle do fluxo de potência através do ângulo de carga
- Figura 5.29 – Tensão nos terminais do capacitor do UPFC 218
($V_{base}=15kV$) – controle do fluxo de potência através do
ângulo de carga
- Figura 5.30 – Tensão entre fases na barra B2 – afundamento trifásico 222
de tensão com UPFC
- Figura 5.31 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do 223
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com
UPFC
- Figura 5.32 – Tensão entre fases na barra B22 – afundamento trifásico 223
de tensão com UPFC
- Figura 5.33 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do 224
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com
UPFC
- Figura 5.34 – Corrente injetada na barra B2 (três últimos ciclos do 225
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com

UPFC

- Figura 5.35 – Tensões entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do 226
Intervalo II) – afundamento monofásico de tensão sem
UPFC
- Figura 5.36 – Tensões entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do 227
Intervalo II) – afundamento monofásico de tensão com
UPFC
- Figura 5.37 – Tensões entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do 228
Intervalo II) – afundamento monofásico de tensão com
UPFC
- Figura 5.38 – Correntes injetadas na barra B2 (três últimos ciclos do 229
Intervalo II) – afundamento monofásico de tensão com
UPFC
- Figura 5.39 – Tensão entre fases na barra B2 – afundamento trifásico 230
de tensão com UPFC e sistema com 5% de distorção
harmônica
- Figura 5.40 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do 231
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com
UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica
- Figura 5.41 – Tensão entre fases na barra B22 – afundamento trifásico 231
de tensão com UPFC e sistema com 5% de distorção
harmônica
- Figura 5.42 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do 232
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com
UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica
- Figura 5.43 – Corrente injetada na barra B2 (três últimos ciclos do 233
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com
UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica

- Figura 5.44 – Tensão entre fases na barra B2 – afundamento trifásico 234
de tensão com UPFC (sem filtro)
- Figura 5.45 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do 235
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com
UPFC (sem filtro)
- Figura 5.46 – Espectro harmônico da tensão entre fases na barra B2 235
(três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento
trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)
- Figura 5.47 – Tensão entre fases na barra B22 – afundamento trifásico 236
de tensão com UPFC (sem filtro)
- Figura 5.48 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do 236
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com
UPFC (sem filtro)
- Figura 5.49 – Espectro harmônico da tensão entre fases na barra B22 237
(três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento
trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)
- Figura 5.50 – Corrente injetada na barra B2 (três últimos ciclos do 238
Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com
UPFC (sem filtro)
- Figura 5.51 – Espectro harmônico da corrente injetada na barra B2 238
(três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento
trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Carregamentos associados às Impedâncias de Surto e Limites Térmicos para níveis de tensão de 230kV até 1100kV	17
Tabela 2.2	– Capacidade nominal das linhas de transmissão da figura 2.3	18
Tabela 3.1	– Dados para simulação das linhas de transmissão	88
Tabela 3.2	– Dados para simulação das cargas	88
Tabela 3.3	– Dados para simulação do ASVC	89
Tabela 3.4	– Identificação dos casos simulados	90
Tabela 3.5	– Quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas	109
Tabela 4.1	– Seleção do modo de operação do ASC	136
Tabela 4.2	– Dados para simulação do ASC	154
Tabela 4.3	– Identificação dos casos simulados	155
Tabela 4.4	– Quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas	181
Tabela 5.1	– Dados para simulação do UPFC	199
Tabela 5.2	– Identificação dos casos simulados	200
Tabela 5.3	– Quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas	219
Tabela 5.4	– Identificação dos casos simulados	221
Tabela 5.5	– Valores rms e fator de desequilíbrio das tensões entre fases na barra B2	226
Tabela 5.6	– Valores rms, distorções harmônicas e fator de desequilíbrio das tensões entre fases nas barras B2 e	228

B22

- Tabela 5.7 – Valores rms e distorções harmônicas das correntes 229
injetadas na barra B2
- Tabela 5.8 – Quadro resumo comparativo das principais grandezas 239
monitoradas nos Casos 1 a 3
- Tabela 5.9 – Quadro resumo comparativo das principais grandezas 240
monitoradas nos Casos 1 e 4

LISTA DE SÍMBOLOS

- p – relação entre as frequências de chaveamento e fundamental do sistema
- ϕ – ângulo entre os vetores de tensão e corrente
- ω – frequência em rad/s
- θ – ângulo de transformação
- ω_b – frequência base em rad/s
- Z_{base} – impedância base
- δ_{or} – defasamento entre os vetores de tensão \mathbf{v}_o e \mathbf{v}_r
- θ_r – ângulo de fase da tensão V_r
- θ_s – ângulo de fase da tensão V_s
- δ_{so} – defasamento entre os vetores de tensão \mathbf{v}_s e \mathbf{v}_o
- δ_{sr} – ângulo entre as tensões nas barras “s” e “r” ($\theta_s - \theta_r$), ou defasamento entre os vetores de tensão \mathbf{v}_s e \mathbf{v}_r
- $|\mathbf{v}|$ – módulo do vetor da tensão ($\mathbf{v} = v_d + jv_q$)
- $|\mathbf{v}_o|$ – módulo do vetor da tensão do sistema CA à jusante do ASC
- $|\mathbf{v}_s|$ – módulo do vetor da tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do ASVC (ou à montante do ASC) tomado como referência do sistema ortogonal síncrono
- $|\mathbf{v}_o|_{ref}$ – referência para o módulo do vetor da tensão do sistema CA à jusante do ASC
- $|\mathbf{v}_s|_{ref}$ – referência para o módulo do vetor da tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do ASVC
- C – capacitância em Farad
- e – tensão nos terminais trifásicos do conversor em p.u.
- e_δ – vetor de regulação do ângulo de fase

- $e_{\delta\alpha}$ – componente da tensão e_{δ} no eixo rotativo α
- $e_{\delta\beta}$ – componente da tensão e_{δ} no eixo rotativo β
- e' – tensão nos terminais trifásicos do conversor em Volt
- e_{base} – tensão nos terminais trifásicos do conversor base
- e_m – vetor de regulação da tensão terminal
- $e_{m\alpha}$ – componente da tensão e_m no eixo rotativo α
- $e_{m\beta}$ – componente da tensão e_m no eixo rotativo β
- e_o – vetor da tensão nos terminais trifásicos do conversor do ASC
- $e_{o\alpha}$ – componente da tensão e_o no eixo rotativo α
- $e_{o\beta}$ – componente da tensão e_o no eixo rotativo β
- e_{oa} – tensão na fase a dos terminais trifásicos do conversor do ASC
- e_{ob} – tensão na fase b dos terminais trifásicos do conversor do ASC
- e_{oc} – tensão na fase c dos terminais trifásicos do conversor do ASC
- e_p – vetor da tensão nos terminais trifásicos do conversor do ASVC
- $e_{p\alpha}$ – componente da tensão e_p no eixo rotativo α
- $e_{p\beta}$ – componente da tensão e_p no eixo rotativo β
- e_{pa} – tensão na fase a dos terminais trifásicos do conversor do ASVC
- e_{pb} – tensão na fase b dos terminais trifásicos do conversor do ASVC
- e_{pc} – tensão na fase c dos terminais trifásicos do conversor do ASVC
- e_s – vetor da tensão injetada em série pelo ASC
- $e_{s\alpha}$ – componente da tensão e_s no eixo rotativo α
- $e_{s\beta}$ – componente da tensão e_s no eixo rotativo β
- e_{sa} – tensão injetada em série pelo ASC na fase a da linha
- e_{sb} – tensão injetada em série pelo ASC na fase b da linha
- e_{sc} – tensão injetada em série pelo ASC na fase c da linha
- e_x – vetor de compensação da reatância série
- $e_{x\alpha}$ – componente da tensão e_x no eixo rotativo α

- $e_{x\beta}$ – componente da tensão e_x no eixo rotativo β
- i – vetor de corrente
- i – corrente em p.u.
- i' – corrente em Ampère
- $i_{a,b,c}$ – componentes da corrente nas fases a , b e c
- i_{base} – corrente base
- $i_{d,q}$ – componentes da corrente nos eixos estacionários d e q
- i_l – vetor da corrente na linha de transmissão controlada pelo ASC
- $i_{l,abc}$ – conjunto das correntes trifásicas na linha de transmissão controlada pelo ASC
- i_{la} – corrente na fase a da linha de transmissão controlada pelo ASC
- i_{lb} – corrente na fase b da linha de transmissão controlada pelo ASC
- i_{lc} – corrente na fase c da linha de transmissão controlada pelo ASC
- i_{ld} – componente da corrente i_l no eixo estacionário d
- i_{lq} – componente da corrente i_l no eixo estacionário q
- $i_{l\alpha}$ – componente da corrente i_l no eixo rotativo α
- $i_{l\beta}$ – componente da corrente i_l no eixo rotativo β
- i_o – vetor da corrente nos terminais trifásicos do conversor do ASC
- $i_{o,abc}$ – conjunto das correntes trifásicas do conversor do ASC
- i_{oa} – corrente na fase a do conversor do ASC
- i_{ob} – corrente na fase b do conversor do ASC
- i_{oc} – corrente na fase c do conversor do ASC
- i_{od} – componente da corrente i_o no eixo estacionário d
- i_{oq} – componente da corrente i_o no eixo estacionário q
- $i_{o\alpha}$ – componente da corrente i_o no eixo rotativo α
- $i_{o\beta}$ – componente da corrente i_o no eixo rotativo β
- i_p – vetor da corrente do ramo entre o ASVC e o sistema CA
- $i_{p,abc}$ – conjunto das correntes trifásicas no ramo entre o ASVC e o sistema

CA

- i_{pa} – corrente na fase a do ramo entre o ASVC e o sistema CA
- i_{pb} – corrente na fase b do ramo entre o ASVC e o sistema CA
- i_{pc} – corrente na fase c do ramo entre o ASVC e o sistema CA
- i_{pd} – componente da corrente i_p no eixo estacionário d
- i_{pq} – componente da corrente i_p no eixo estacionário q
- $i_{p\alpha}$ – componente da corrente i_p no eixo rotativo α
- $i_{p\beta}$ – componente da corrente i_p no eixo rotativo β
- $i_{\alpha,\beta}$ – componentes da corrente nos eixos rotativos α e β
- k – um número inteiro e positivo (1, 2, 3,...)
- k_δ – fator de compensação do ângulo de fase
- $k_{i,m}$ – ganho do integrador do controlador PI da magnitude de v_o
- $k_{i,x}$ – ganho do integrador do controlador PI da reatância série
- $k_{i,\delta}$ – ganho do integrador do controlador PI do ângulo de fase
- k_m – fator de compensação da magnitude de v_o
- $k_{p,m}$ – ganho proporcional do controlador PI da magnitude de v_o
- $k_{p,x}$ – ganho proporcional do controlador PI da reatância série
- $k_{p,\delta}$ – ganho proporcional do controlador PI do ângulo de fase
- k_x – fator de compensação da reatância série
- L – indutância em Henry
- L_l – indutância da linha de transmissão controlada pelo ASC em Henry
- L_p – indutância do ramo entre o ASVC e o sistema CA em Henry
- m – um número inteiro e positivo (quando k for par, então, m é ímpar e vice-versa)
- m_p – relação entre o módulo da tensão trifásica do ASVC e a tensão no barramento CC (fator de modulação)
- n – ordem harmônica
- p – potência ativa instantânea

- P – potência que flui da barra “s” para a barra “r”
- p_l – fluxo de potência ativa na linha de transmissão controlada pelo ASC
- p_{lref} – referência para o fluxo de potência ativa na linha de transmissão controlada pelo ASC
- p_p – fluxo de potência ativa entre o ASVC e o sistema CA
- q – potência reativa instantânea
- q_p – fluxo de potência reativa entre o ASVC e o sistema CA
- r – resistência em p.u.
- R – resistência em Ohm
- r_l – resistência da linha de transmissão controlada pelo ASC em p.u.
- R_l – resistência da linha de transmissão controlada pelo ASC em Ohm
- r_p – resistência do ramo entre o ASVC e o sistema CA em p.u.
- R_p – resistência do ramo entre o ASVC e o sistema CA em Ohm
- s – taxa de compensação imposta ao sistema através dos compensadores série
- u_s – vetor unitário com a mesma direção de v_s
- V – magnitude das tensões V_s , V_r e V_m
- v – vetor de tensão
- v – tensão em p.u.
- v' – tensão em Volt
- $v_{a,b,c}$ – componentes da tensão nas fases a , b e c
- v_{base} – tensão base
- v_c – tensão nos terminais do capacitor
- v_{cref} – referência para a tensão nos terminais do capacitor
- $v_{d,q}$ – componentes da tensão nos eixos estacionários d e q
- v_o – vetor da tensão do sistema CA à jusante do ASC
- $v_{o\alpha}$ – componente da tensão v_o no eixo rotativo α

- $v_{o\beta}$ – componente da tensão v_o no eixo rotativo β
- $v_{o,abc}$ – conjunto das tensões trifásicas à jusante do ASC
- v_{oa} – tensão da fase a à jusante do ASC
- v_{ob} – tensão da fase b à jusante do ASC
- v_{oc} – tensão da fase c à jusante do ASC
- v_{od} – componente da tensão v_o no eixo estacionário d
- v_{oq} – componente da tensão v_o no eixo estacionário q
- V_r – magnitude da tensão na barra “r”
- v_r – vetor da tensão do terminal receptor da linha controlada pelo ASC
- $v_{r\alpha}$ – componente da tensão v_r no eixo rotativo α
- $v_{r\beta}$ – componente da tensão v_r no eixo rotativo β
- $v_{r,abc}$ – conjunto das tensões trifásicas no terminal receptor da linha controlada pelo ASC
- v_{ra} – tensão da fase a no terminal receptor da linha controlada pelo ASC
- v_{rb} – tensão da fase b no terminal receptor da linha controlada pelo ASC
- v_{rc} – tensão da fase c no terminal receptor da linha controlada pelo ASC
- v_{rd} – componente da tensão v_r no eixo estacionário d
- v_{rq} – componente da tensão v_r no eixo estacionário q
- V_s – magnitude da tensão na barra “s”
- v_s – vetor da tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do ASVC (ou à montante do ASC)
- $v_{s\alpha}$ – componente da tensão v_s no eixo rotativo α
- $v_{s\beta}$ – componente da tensão v_s no eixo rotativo β
- $v_{s,abc}$ – conjunto das tensões trifásicas no ponto de acoplamento do ASVC (ou à montante do ASC)
- v_{sa} – tensão da fase a do sistema CA no ponto de acoplamento do ASVC (ou à montante do ASC)
- v_{sb} – tensão da fase b do sistema CA no ponto de acoplamento do ASVC

- (ou à montante do ASC)
- v_{sc} – tensão da fase c do sistema CA no ponto de acoplamento do ASVC
(ou à montante do ASC)
- v_{sd} – componente da tensão v_s no eixo estacionário d
- v_{sq} – componente da tensão v_s no eixo estacionário q
- $v_{\alpha,\beta}$ – componentes da tensão nos eixos rotativos α e β
- x – reatância indutiva em p.u.
- x_c – reatância capacitiva em p.u.
- x_l – reatância indutiva da linha de transmissão controlada pelo ASC em p.u.
- x_{lref} – referência para a reatância efetiva da linha de transmissão controlada pelo ASC
- x_p – reatância indutiva do ramo entre o ASVC e o sistema CA em p.u.
- ϕ_p – ângulo entre a tensão do sistema (v_s) no ponto de acoplamento do ASVC e a tensão nos terminais trifásicos do conversor (e_p)
- ϕ_s – ângulo entre a tensão do sistema (v_s), na barra à montante do ASC, e a tensão injetada pelo mesmo (e_s)
- ϕ_o – ângulo entre a tensão injetada pelo ASC (e_s) e a corrente da linha (i_l)
- α_{il} – ângulo entre a tensão do sistema (v_s), na barra à montante do ASC e a corrente da linha (i_l)
- meg – terminologia utilizada no SABER para referir ao multiplicador “mega”

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o passar dos tempos, os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, tendem a operar, muito próximos de seus limites de carregamento. Este fato é decorrente da sempre crescente demanda de energia elétrica e da postergação de investimentos na ampliação dos sistemas de transmissão, devido a questões econômicas e, até mesmo, ambientais.

Reconhecendo este quadro, e com o desenvolvimento de dispositivos semicondutores com capacidade de bloqueio (GTO – *Gate Turn-off Thyristor*) de alta potência e alta velocidade de operação, emergiram na década de 80 as primeiras publicações a respeito dos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). A finalidade desses equipamentos é proporcionar alternativas de transporte de energia elétrica pelos sistemas de potência em operação, elevando o carregamento até seus limites térmicos e garantindo, simultaneamente, dentre outros fatores, a sua confiabilidade. Com base nesta evolução, diversos trabalhos contribuíram para o desenvolvimento de modernos equipamentos, como ASVC (*Advanced Static var Compensator*), ASC (*Advanced Series Compensator*) e UPFC (*Unified Power Flow Controller*), destinados às compensações paralela, série e unificada, respectivamente, em que este último engloba, também, a função de defasador [1].

Além destes aspectos, vale a pena destacar que o emprego cada vez maior de cargas eletrônicas sofisticadas, com controles microprocessados, tem obrigado os fornecedores de energia elétrica a manter um alto padrão de qualidade do suprimento energético. Assim, de uma forma geral, o serviço de fornecimento de energia elétrica é considerado como sendo de boa qualidade, quando garante, a custos viáveis, o funcionamento adequado, seguro e confiável de equipamentos e processos industriais, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas. Dessa forma, qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica caracteriza uma rede elétrica com qualidade comprometida. Reconhecendo-se, portanto, a grande importância que o assunto Qualidade da Energia Elétrica assumiu no cenário elétrico atual, vários estudos, pesquisas e desenvolvimentos vêm sendo conduzidos com o intuito de conhecer, assegurar ou mesmo melhorar os padrões de qualidade requeridas ao bom funcionamento dos sistemas elétricos [2].

1.2 O CONTEXTO DA PRESENTE TESE

As análises relacionadas com a operação dos compensadores avançados, bem como quaisquer estudos envolvendo grandes sistemas elétricos de potência, dependem, quase que inteiramente, da simulação digital do comportamento dinâmico dos mesmos. A simulação implica na existência de modelos matemáticos para uma grande variedade de componentes, do conhecimento de dados dos diversos parâmetros que constituem um sistema de potência e, finalmente, de bons programas de computador. Tais *softwares* devem ser dedicados a simulações específicas, tais como: fluxo de carga, harmônicos, transitórios eletromagnéticos, etc.. Assim, diante da crescente

necessidade de tais análises, é extremamente interessante que uma única ferramenta computacional seja capaz de realizar os mais diferentes estudos associados à engenharia elétrica. Neste particular, destaca-se o simulador SABER que, além de uma variada biblioteca, propicia, através de uma linguagem própria (Mast), a modelagem de qualquer componente eletro-eletrônico, mecânico, etc., no domínio do tempo. Além disso, o SABER possui características como grande versatilidade gráfica, capacidade de interconexão com rotinas elaboradas em outras linguagens de programação (C e Fortran) e manipulação dos resultados de saída, que permitem a execução de estudos mais complexos e análises mais ricas.

Assim, reconhecendo esses aspectos e uma vez que os compensadores avançados tendem a se tornar cada vez mais difundidos, surge a idéia desta tese, a qual, na sua essência, encontra-se voltada para a implementação computacional destes dispositivos no simulador SABER e a análise de seu desempenho frente aos problemas de qualidade. Para atingir estes objetivos, no entanto, é necessário que questões a respeito dos seus princípios de funcionamento e estratégias de controle sejam detalhadamente esclarecidas. Ainda, se por um lado os compensadores avançados proporcionam o aumento da confiabilidade de um sistema de transmissão, uma maior manipulação e controle do fluxo de potência e, também, da qualidade da energia fornecida pelo mesmo, através da solução de problemas como afundamentos e elevações de tensão, transitórios, etc., por outro, a operação de tais equipamentos pode resultar na degradação de outros itens, tais como harmônicos. Dessa forma, assim como para qualquer outra fonte geradora de distúrbios, tais efeitos devem ser observados.

Diante do exposto, os efeitos dos referidos equipamentos devem ser analisados, quando os mesmos se encontram submetidos a uma rede de suprimento com comprometimento do padrão de qualidade, tais como:

afundamentos e elevações de tensão, distorções harmônicas, desequilíbrios, etc.

Deve-se ressaltar que, através da implementação dos modelos dos compensadores avançados no simulador SABER, além dos estudos relacionados com os seus desempenhos e com a qualidade da energia elétrica no sistema como um todo, podem ser executadas, também, avaliações de diferentes topologias no circuito de potência, estratégias de controle e tipo de chaveamento para tais equipamentos.

1.3 O ESTADO DA ARTE

Apesar do tema FACTS, no âmbito dos compensadores avançados, ser recente, várias pesquisas e publicações têm sido encontradas e, portanto, neste momento, torna-se necessário relatar os resultados do trabalho de levantamento bibliográfico executado.

- ***Quanto à classificação dos dispositivos FACTS***

Diversas concepções de dispositivos e as vantagens de se empregar os sistemas de transmissão flexíveis, são brevemente comentadas em [1], [3], [4] e [7], assim como alguns requisitos a serem atendidos durante o planejamento da introdução de controladores FACTS no sistema são abordados em [8]. Nesse sentido, as referências [3], [4] e [7] mostram um resumo dos equipamentos FACTS fundamentados em tiristores convencionais, quais sejam, RCT (Reator Controlado a Tiristores), 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. Além disso, as mesmas referências fazem uma comparação entre tais compensadores convencionais e aqueles baseados em GTO, que compõem a geração avançada dos FACTS, quais sejam, ASVC (*Advanced Static var Compensator*), ASC (*Advanced Series Compensator*) e UPFC (*Unified Power Flow Controller*).

- ***Quanto ao princípio de funcionamento, modelagem e controle***

Os conceitos e princípios básicos de funcionamento dos compensadores avançados série, paralelo e unificado, citados anteriormente, são discutidos em [3], [5] e [6]. Apesar de uma abordagem detalhada sobre a construção deste último equipamento (UPFC) ser efetuada ao longo desta tese, vale a pena comentar, neste ponto, que o mesmo proporciona regulação de tensão, controle do ângulo de fase e impedância da linha, através de dois inversores de alta potência, interconectados por um capacitor comum.

As referências [7] e [9 – 17] são unânimes quanto aos aspectos referentes à modelagem e controle dos compensadores avançados através da teoria vetorial e potência instantânea [18]. Mais especificamente, as referências [11] e [9], abordam uma estratégia de controle do fluxo de potência paralelo do ASVC, a qual também é empregada para as duas pontes do UPFC apresentado em [10] e [12 – 14]. Nesse sentido, verifica-se que, muito se tem estudado sobre as melhores estratégias, no tocante à velocidade de operação e desacoplamento entre os controles das potências ativa e reativa, para tais compensadores avançados [42].

- ***Quanto às unidades em operação***

Um ponto a ser ressaltado neste momento é que, os estudos, análises e considerações executados para o ASVC são estendidos ao UPFC, mesmo em casos práticos. Isso é verificado através das publicações sobre a instalação do protótipo de um ASVC, também conhecido como STATCOM (*Static Compensator*), de ± 100 Mvar baseado em GTO através da parceria entre o EPRI (*Electric Power Research Institute*), a TVA (*Tennessee Valley Authority*) e o WSTC (*Westinghouse Science and Technology Center*), nos Estados Unidos por volta de 1996 [19]. Em 1997, a AEP (*American Electric Power*) juntamente com o EPRI e a Westinghouse se encarregaram do desenvolvimento e instalação do primeiro UPFC de alta potência no mundo (cada ponte inversora de ± 160 MVA). Entretanto, primeiramente, foi posta em funcionamento a ponte inversora paralela, tratada como um STATCOM de ± 160 MVA. Apenas, em 1998 a ponte série, também de ± 160 MVA, foi habilitada, operando como parte do UPFC [20 – 23]. Embora se saiba que outros arranjos foram instalados à posteriori, não foram encontradas publicações que relatem ou dêem informações sobre os mesmos.

- ***Quanto aos motivos de utilização***

As motivações para os desenvolvimentos supracitados surgiram por conta da necessidade de se aumentar as capacidades de transmissão nas linhas, prover suporte de tensão [20] e proporcionar amortecimentos para as constantes oscilações encontradas nas referidas localidades [19]. Também com este último propósito, ou seja, amortecer as oscilações e melhorar a estabilidade transitória dos sistemas de potência através da utilização dos compensadores avançados, surgem as referências [24 – 30], as quais fazem

uso de unidades UPFC, e a referência [40], que propõe a associação do STATCOM a um armazenador de energia do tipo SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*). As publicações [31] e [32] enfatizam as restrições práticas de operação do UPFC, durante condições transitórias.

Além disso, os artigos [33] e [34] sugerem o emprego tanto do UPFC quanto do STATCOM, respectivamente, para a compensação de Flicker proveniente da operação de fornos a arco.

- ***Quanto à injeção de harmônicos no sistema***

De um modo geral, percebe-se que as publicações indicam preocupações quanto à injeção de harmônicos no sistema por parte dos compensadores avançados. Nesse sentido, os estudos giram em torno de variadas topologias para os mesmos, sejam elas baseadas em conversores de seis e doze pulsos, multi-níveis ou PWM [26], [19], [5], [35] e [41].

1.4 AS CONTRIBUIÇÕES DESTA TESE

As contribuições deste trabalho podem ser resumidas da seguinte forma:

- Na direção em que se encontram os estudos e pesquisas envolvendo os compensadores avançados, verifica-se que, em primeiro lugar, é necessário se disponibilizar uma estrutura computacional que permita a simulação das mais variadas topologias e versões de controle para tais equipamentos. Diante disso, uma das contribuições desta tese se encontra na implementação, no

simulador SABER, dos circuitos de potência e controle dos seguintes compensadores: compensador paralelo avançado, ou ASVC, compensador série avançado, ou ASC, e controlador de fluxo de potência unificado, ou UPFC. A disponibilização de recursos como o aqui proposto tem por meta principal a capacitação técnica nacional, visto que tal produto, a médio ou longo prazo, se fará presente no sistema elétrico brasileiro. E, quando isto ocorrer, o país deverá apresentar competência local para os estudos de avaliação de desempenho e eficácia dos dispositivos, antes das decisões finais de compromisso e compra de uma tecnologia, até então, 100% importada.

- Apesar do material bibliográfico apresentar variadas alternativas de controle para os compensadores avançados, alguns detalhes, para que os mesmos sejam executados, necessitam de maiores esclarecimentos. Diante disso, esta tese contribui no sentido de apresentar os pormenores a respeito das malhas de controle e implementação de cada um dos dispositivos enfocados, as quais são baseadas nos seus princípios básicos de funcionamento. Neste contexto, a teoria vetorial se apresenta como ferramenta de base, e, seus fundamentos e aplicação são didaticamente apresentados no corpo deste documento.
- Uma vez implementadas e testadas as diferentes unidades constituintes do modelo, procede-se, na seqüência, aos estudos de desempenho do equipamento através do processamento de situações típicas. Estas investigações serão desenvolvidas com vistas a confirmar as potencialidades dos compensadores em questão, não

apenas no controle do fluxo de potência dos sistemas de transmissão, mas também no controle de itens de qualidade como afundamentos e elevações de tensão. Assim procedendo, será possível atender uma lacuna existente na literatura, qual seja, a exploração das potencialidades dos compensadores de última geração no cenário da qualidade da energia.

- Ainda, com relação a aspectos de qualidade da energia, análises preliminares sobre injeções de harmônicos no sistema, por parte dos ASVC, ASC e UPFC, e como tais dispositivos se comportam frente a tensões desequilibradas, podem ser efetuadas. As conclusões destes estudos, apesar de restritas às topologias do circuito de potência, sistema de filtragem e controle empregados, servirão de motivação e base para pesquisas específicas nessas áreas.
- Uma análise ausente na literatura, e que será também contemplada nesta tese, está relacionada com as vantagens da utilização de unidades UPFC sobre aquelas do tipo ASC no controle do fluxo de potência.
- Além das contribuições supracitadas, esta tese avança, ainda, no sentido de prover um material didático, que reúne informações fundamentais para o entendimento da modelagem do UPFC e das respectivas implementações computacionais efetuadas.

1.5 A ESTRUTURA DA TESE

Para atingir as metas propostas, além de um capítulo introdutório, esta tese será desenvolvida obedecendo a seguinte estrutura.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS – FACTS

Este capítulo terá por objetivo abordar os principais aspectos relacionados aos sistemas de transmissão CA flexíveis, de uma maneira geral e, com isso, identificar exatamente em que área, ou em que geração dos FACTS este trabalho será desenvolvido. Isso envolverá a identificação dos problemas encontrados nos sistemas de transmissão convencionais, as possíveis soluções ideais para tais problemas, e a apresentação dos equipamentos fundamentados nesta tecnologia, os quais estão classificados por tipo de compensação e geração de semicondutores empregados. Por motivos didáticos, a teoria vetorial será também sintetizada nesta etapa da tese.

CAPÍTULO III

COMPENSADOR ESTÁTICO PARALELO AVANÇADO – ASVC

O principal objetivo deste capítulo é apresentar todo o processo de implementação, tanto do circuito de potência como de controle, do compensador estático avançado (ASVC), na plataforma computacional

denominada SABER. Antes, porém, serão feitas abordagens sobre o seu princípio de funcionamento, a sua modelagem matemática, utilizando a teoria vetorial, uma vez que nela se baseia toda a malha de controle empregada na sua operação, a qual, também, é descrita na sequência. De posse dos modelos representativos do ASVC e da filosofia de controle a ser empregada, o processo de implementação no SABER, propriamente dito, é documentado enfocando as *templates* desenvolvidas nesta tese. Finalmente, as análises de desempenho das referidas implementações do equipamento são efetuadas através de estudos de casos.

CAPÍTULO IV

COMPENSADOR ESTÁTICO SÉRIE AVANÇADO – ASC

Da mesma forma que para o ASVC, neste capítulo será descrito o princípio de funcionamento dos ASCs. Serão apresentados os modelos matemáticos que regem tal funcionamento, para que deles sejam deduzidas as estratégias de controle adotadas para tais compensadores. Em seguida, será apresentado todo o processo de implementação, tanto do circuito de potência como de controle, de um compensador série avançado, na plataforma computacional SABER. Ainda, como meio de se analisar o desempenho dos modelos implementados, serão executados alguns estudos de casos, utilizando, para tanto, um sistema elétrico típico e próprio à utilização do dispositivo aqui considerado.

CAPÍTULO V

CONTROLADOR DE FLUXO DE POTÊNCIA UNIFICADO – UPFC

Neste capítulo, serão efetuadas as considerações teóricas e sobre a implementação computacional do controlador de fluxo de potência unificado (UPFC), tanto do circuito de potência como de controle, no simulador SABER. Além disso, serão executados estudos de casos, em um sistema típico, a fim de se analisar o desempenho dos modelos implementados sob diversas condições de suprimento.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS

Finalmente, este capítulo destina-se a apresentar as principais discussões e conclusões finais da tese como um todo. Além disso, serão ressaltadas questões associadas às contribuições efetivas deste trabalho, bem como algumas sugestões para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS – FACTS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Por razões diversas, a maioria, senão todo o universo do suprimento elétrico, está interligado. Tais interconexões são feitas a fim de se minimizar o número de centros de geração necessários, visando atender uma grande diversidade de cargas, com um certo grau de confiabilidade. Se houvesse apenas sistemas radiais, seriam necessários muito mais recursos de geração para suprir a carga com a mesma confiabilidade. Sob esse aspecto e sob o ponto de vista econômico, a transmissão é uma alternativa para um novo e grande investimento em unidades geradoras, apesar de nenhuma conclusão ter sido, até agora, categórica a respeito de qual seja a proporção ótima entre ambas.

Via de regra, à medida que a transferência de potência (demanda e atendimento da mesma) cresce, o sistema fica mais complexo tornando-se, assim, menos confiável, com controles inadequados, além de não haver uma utilização de todo o potencial das linhas de transmissão.

Diante desses fatos e buscando soluções alternativas para o problema de suprimento elétrico, o EPRI (*Electric Power Research Institute*), juntamente com algumas concessionárias dos EUA, propôs o conceito de FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), que é uma filosofia de

transporte de energia elétrica por Sistemas de Transmissão CA Flexíveis. Esta é uma tendência do futuro baseada na ciência dos semicondutores [1], já que com o avanço da eletrônica de potência, além dos dispositivos convencionais existentes, atualmente podem ser encontrados os “GTOs” (*Gate Turn Off Thyristor*). Essas chaves possuem nível de isolamento em até 6kV e capacidade de condução de corrente de 4 kA [36], permitindo o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos para sistemas de potência mais elevada.

Isso posto, pode-se dizer que os dois principais objetivos da tecnologia FACTS são:

- controlar o fluxo de potência nas linhas de transmissão;
- permitir o carregamento seguro das linhas até suas plenas capacidades térmicas.

Deve-se ressaltar, entretanto, que tal tecnologia não abole a necessidade de linhas de transmissão adicionais ou de uma elevação no nível da tensão daquelas que já tiverem atingido o limite da capacidade térmica. Além disso, a avaliação das perdas juntamente com o custo, oriundos dos equipamentos FACTS, podem levar à conclusão de que as formas convencionais de expansão do sistema elétrico de potência são as melhores alternativas.

Dentro deste contexto, este capítulo terá por meta abordar os principais aspectos relacionados aos sistemas de transmissão CA flexíveis de uma maneira geral e, com isso, identificar exatamente em que área, ou em que geração, dos FACTS este trabalho será desenvolvido. Assim, a estrutura adotada para a discussão sobre tais aspectos envolve as seguintes etapas:

- identificação de alguns problemas encontrados nos sistemas de transmissão convencionais;
- exposição das possíveis soluções ideais para a problemática supramencionada;

- apresentação dos equipamentos fundamentados na tecnologia FACTS, os quais estão classificados por tipo de compensação e geração de semicondutores empregados;
- explanação breve a respeito da teoria vetorial, que consiste de uma ferramenta largamente utilizada na modelagem e controle dos dispositivos FACTS, a ser empregada no presente trabalho.

2.2 O PROBLEMA

Apesar de todo o aparato eletrônico e de comunicação existente, a maioria dos sistemas elétricos de potência atuais são controlados mecanicamente, ou seja, operam com compensações de reativos fixas ou chaveadas mecanicamente, juntamente com transformadores defasadores e reguladores de tensão. Estas estratégias têm por finalidade otimizar as impedâncias das linhas, minimizar as variações de tensão e controlar o fluxo de potência em regime permanente ou em condições de lentas variações de carga. Os problemas dinâmicos são tratados através do sobre-dimensionamento do sistema, introduzindo-se generosas margens de estabilidade para que o mesmo se recupere com êxito de contingências como faltas, saídas de geradores ou linhas de transmissão e falhas de equipamentos. Tudo isso resulta em uma sub-utilização dos sistemas de transmissão, além das desvantagens como a de que os dispositivos mecânicos tendem a se desgastar mais rapidamente, quando comparados com aqueles estáticos e, sobretudo, possuem uma baixa velocidade de atuação frente às referidas situações peculiares. Daí o fato de que, sob o ponto de vista dinâmico e até mesmo de regime permanente, o sistema se torna incontrolável, fazendo com

que os engenheiros de planejamento e operação do sistema aprendam a conviver com uma realidade que, obviamente, implicará em custos elevados.

A fim de melhor visualizar tal incontabilidade do sistema, seja a linha de transmissão teórica da figura 2.1:

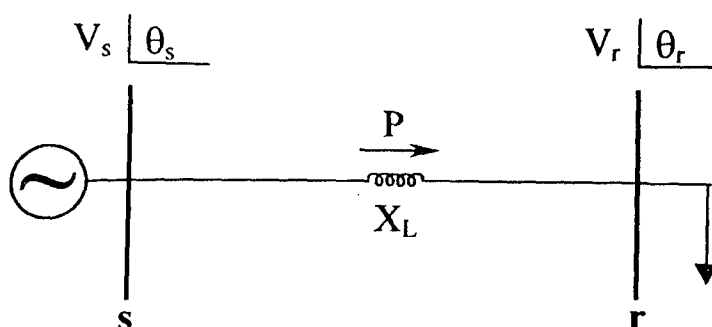


Figura 2.1 – Representação de duas barras interligadas por uma linha de transmissão

O fluxo de potência através dessa linha, desprezando-se a resistência, é uma função do ângulo de carga, da magnitude das tensões nos terminais e da impedância da linha, como mostra a equação (2.1).

$$P = \frac{V_s V_r}{X_L} \sin \delta_{sr} \quad (2.1)$$

em que:

- P – potência que flui da barra “s” para a barra “r”
- V_s – magnitude da tensão na barra “s”
- V_r – magnitude da tensão na barra “r”
- δ_{sr} – ângulo de carga ($\theta_s - \theta_r$)
- θ_s – ângulo de fase da tensão V_s
- θ_r – ângulo de fase da tensão V_r
- X_L – impedância da linha

Verifica-se então que, não havendo controle algum sobre tais parâmetros, o comportamento da potência elétrica que flui da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} obedece à curva apresentada na figura 2.2.

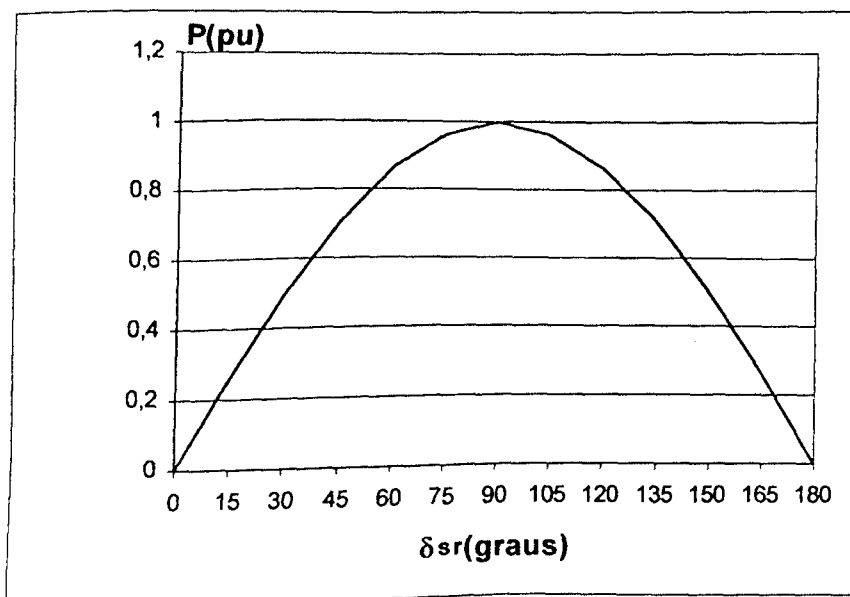


Figura 2.2 - Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação)

Da figura 2.2 observa-se que a máxima potência está associada ao ângulo de carga de 90° , e uma elevação desse ângulo, causada pelo aumento do carregamento da linha, implica na instabilidade do sistema de transmissão.

Na tabela 2.1 é mostrada uma relação de valores típicos de Carregamentos associados às Impedâncias de Surto (SIL - *Surge Impedance Loading*). Estes são equivalentes à potência máxima transferida para se ter estabilidade, para diferentes classes de tensão de linhas aéreas a 60Hz [1].

Tabela 2.1 – Carregamentos associados às Impedâncias de Surto e Limites Térmicos para níveis de tensão de 230kV até 1100kV

Tensão (kV)	SIL (MW)	Limite Térmico Típico (MW)
230	150	400
345	400	1200
500	900	2600
765	2200	5400
1100	5200	24000

Da tabela anterior, verifica-se que os valores de SIL estão bem abaixo do limite térmico de carregamento da linha, o que caracteriza a sub-utilização da mesma.

Outra situação onde o controle do fluxo de potência se faz necessário, é na distribuição do mesmo entre as linhas de um determinado sistema de acordo com uma certa conveniência. Um exemplo disso pode ser obtido do sistema em anel, formado por duas barras geradoras e uma de carga [1], ilustrado na figura 2.3. As potências nominais das linhas são mostradas na tabela 2.2.

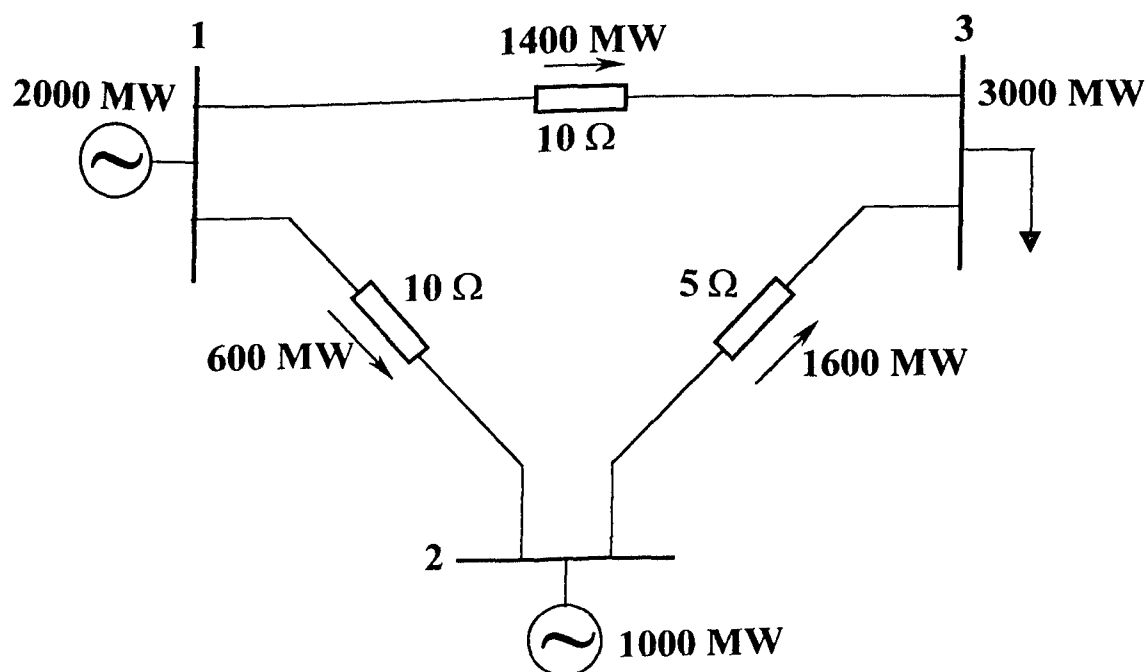


Figura 2.3 – Representação de um sistema de potência simples

Tabela 2.2 – Capacidade nominal das linhas de transmissão da figura 2.3

Trecho	Capacidade Nominal (MW)
1 – 3	2000
1 – 2	1000
2 – 3	1250

Na figura 2.3, a distribuição de potências estabelecida entre as linhas, mostra a sub-utilização dos trechos 1-3 e 1-2 e, por outro lado, o sobrecarregamento do ramo 2-3, quando comparadas com suas capacidades nominais.

Em ambas as situações apresentadas, constata-se a necessidade de uma alteração nos parâmetros, e consequentemente na operação, dos circuitos de transmissão, a fim de se obter um melhor aproveitamento dos mesmos. Devido a isso, a tecnologia dos FACTS se torna cada vez mais atrativa, uma vez que o seu emprego proporciona alguns benefícios como:

- maior controle do fluxo de potência através de rotas de transmissão pré-designadas;
- menor impacto ambiental, comparado com outras técnicas alternativas de expansão do sistema de transmissão;
- carregamentos seguros das linhas de transmissão, que podem atingir níveis próximos de seus limites térmicos de operação;
- maior habilidade em transferir potência entre redes interligadas, podendo então diminuir a margem de reserva de geração, que é tipicamente em torno de 18%, passando a 15% ou menos;
- prevenção contra o efeito “cascata”, haja visto que, com um controle mais apurado do fluxo de potência, diante de alguma necessidade de atuação da operação para sanar algum problema, tal providência pode ser tomada de maneira mais eficiente;
- amortecimento das oscilações dos sistemas de potência, que podem causar danos a equipamentos e/ou limitar a capacidade de transmissão do sistema.

Para atingir tais metas, os equipamentos FACTS empregam técnicas de compensação paralela e/ou série para o controle do fluxo de potência, cujos princípios básicos de funcionamento são explanados na próxima seção.

2.3 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DOS FACTS NO CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA

Como visto anteriormente, o fluxo de potência estabelecido em uma linha de transmissão (Equação 2.1) é função dos seguintes parâmetros:

- impedância equivalente;
- magnitude das tensões nos terminais da linha de transmissão;
- ângulo de fase entre as tensões nos terminais da LT.

Assim, para se controlar tal fluxo de potência, são empregados os dispositivos baseados na tecnologia FACTS, que atuam no sentido de alterar os parâmetros supracitados, de acordo com uma necessidade predeterminada. A operação de tais dispositivos é baseada nos princípios de compensação paralela e série e de controle do ângulo de fase, as quais são apresentadas, de forma ideal, nas subseções seguintes.

2.3.1 O COMPENSADOR PARALELO IDEAL

Com a finalidade de explicar o princípio básico de operação de um compensador paralelo, é utilizado um simples sistema CA, o qual é mostrado na figura 2.4, composto por duas máquinas ideais interligadas por uma linha de transmissão, cujas perdas são desprezadas.

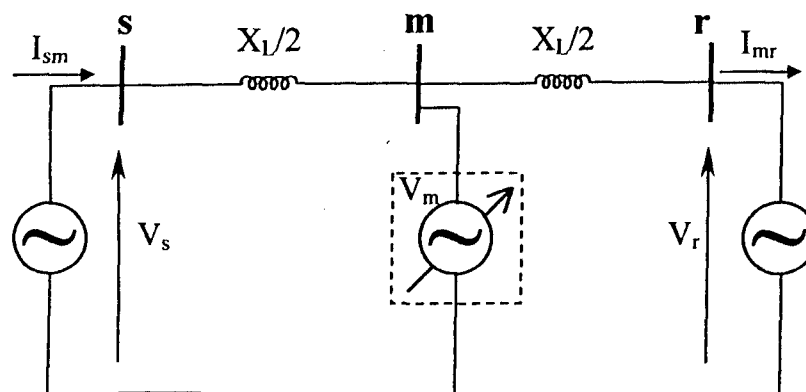


Figura 2.4 – Compensador paralelo ideal conectado ao meio de uma linha de transmissão

Para a presente análise, é assumido que as tensões V_s e V_r possuem a mesma magnitude (V) e estão defasadas por um ângulo δ_{sr} .

Na figura 2.4, observa-se que, ao meio da linha encontra-se conectada uma fonte de tensão paralela controlada, cujo objetivo é ajustar o fluxo de potência em um valor preestabelecido. Nessas condições, o diagrama fasorial, referente ao sistema em estudo, é apresentado na figura 2.5, considerando ainda que, a tensão V_m tem a mesma magnitude que V_s e V_r .

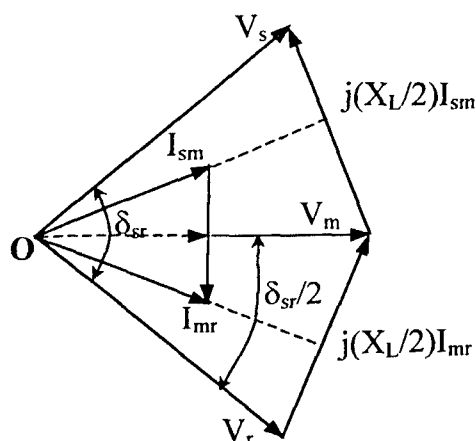


Figura 2.5 – Diagrama fasorial do sistema com compensação paralela

Baseando-se na figura 2.5, é possível concluir que, quando a diferença angular entre as tensões V_s e V_m é " $\delta_{sr}/2$ ", o fasor da corrente de linha está em quadratura com a queda de tensão na reatância de cada semi-trecho de linha. Em consequência disso, não existe fluxo de potência ativa através da fonte de tensão controlada.

Neste caso, a potência transmitida da barra “s” para a barra “r” é determinada pela equação (2.2).

$$P = 2 \frac{V^2}{X_L} \sin\left(\frac{\delta_{sr}}{2}\right) \quad (2.2)$$

onde:

V – magnitude das tensões V_s , V_r e V_m

Para efeito de comparação, as características P versus δ_{sr} do sistema de duas barras sem compensação, ditada pela equação (2.1), e com compensação, descrita pela equação (2.2), são traçadas na figura 2.6.

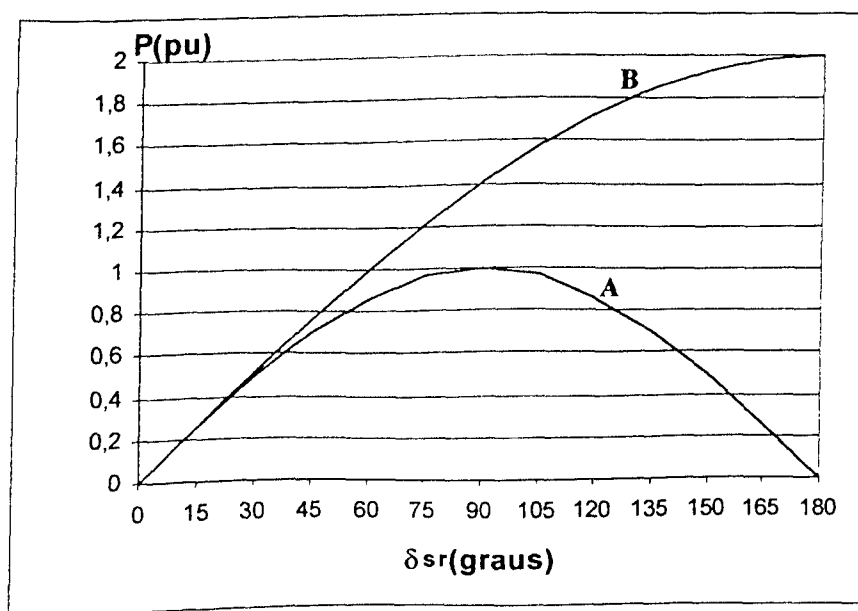


Figura 2.6 – Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação (A) e com compensação paralela (B))

Observando-se o gráfico, é possível verificar que, com a presença da fonte de tensão ideal controlada como meio de compensação paralela, há um incremento tanto na margem de estabilidade do sistema, bem como na máxima potência transmitida pela linha de transmissão.

2.3.2 O COMPENSADOR SÉRIE IDEAL

Da mesma forma que na seção anterior, neste caso é utilizado um simples sistema CA, para a análise do princípio básico de operação de um compensador série, o qual é mostrado na figura 2.7.

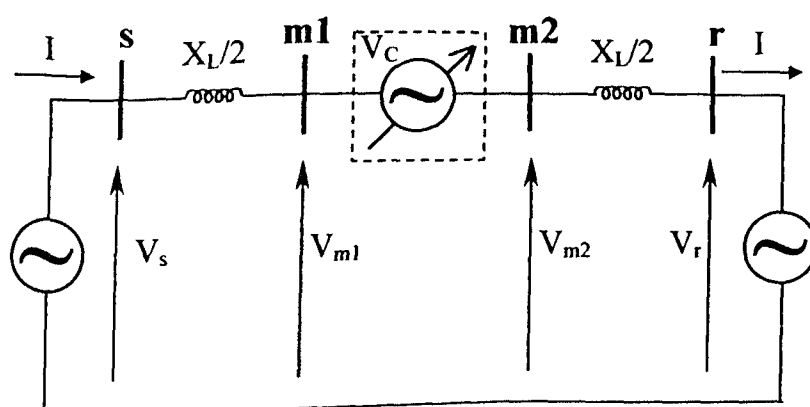


Figura 2.7 – Compensador série ideal conectado ao meio de uma linha de transmissão

O sistema da figura 2.7 é composto por duas máquinas interligadas por uma linha de transmissão, onde está conectado um compensador série ideal representado pela fonte de tensão V_C . Este último tem por meta controlar o fluxo de potência na linha, através da “variação da reatância equivalente” ou “reatância efetiva” da mesma.

Nesta análise, as mesmas condições de contorno foram adotadas, ou seja, as perdas são desprezadas, as tensões V_s e V_r possuem a mesma magnitude (V) e estão defasadas por um ângulo de carga δ_{sr} . Com isso, o diagrama fasorial, referente ao sistema da figura 2.7, é apresentado na figura 2.8.

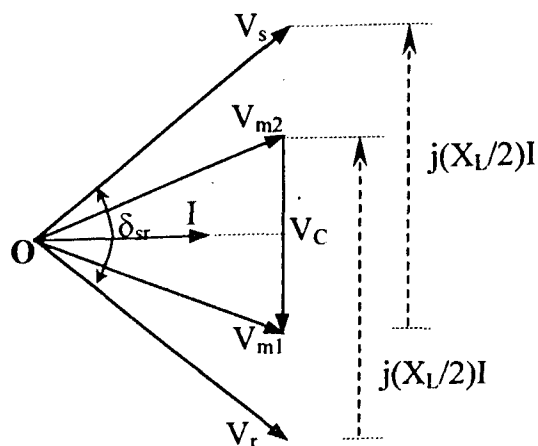


Figura 2.8 – Diagrama fasorial do sistema com compensação série

Para a situação ilustrada no diagrama anterior, assume-se que a fonte de tensão V_c esteja realizando compensação capacitiva e, com isso, a corrente de linha encontra-se adiantada em 90° da mesma. Isso caracteriza, também, a ausência de potência ativa, fornecida ou absorvida pela referida fonte.

Ainda, com relação à figura 2.7, a potência através da linha de transmissão é dada pela equação (2.3).

$$P = \frac{V^2}{X_L(1-s)} \sin \delta_{sr} \quad (2.3)$$

onde:

s – taxa de compensação imposta ao sistema através do compensador série definida por:

$$s = \frac{X_c}{X_L} \quad , \quad (0 \leq s \leq 1) \quad (2.4)$$

A equação 2.3 permite concluir que, a máxima potência transferida pode ser elevada consideravelmente, com a compensação série, o que é visto, também, através da figura 2.9.

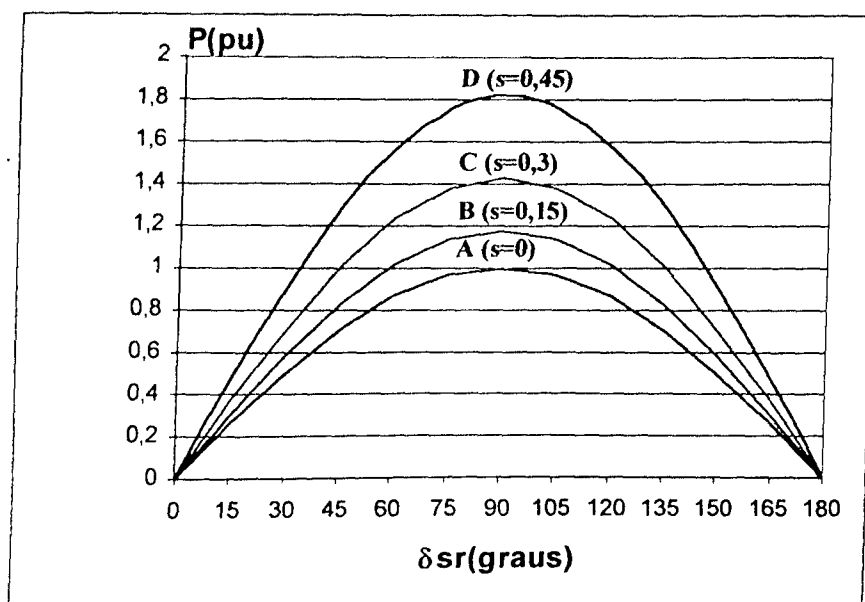


Figura 2.9 – Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação (A) e com compensação série (B, C e D))

Da figura 2.9, observa-se que, o ângulo para o qual ocorre a máxima potência transmissível é de 90° , independente do valor adotado para o fator “s” e, conseqüentemente, do valor máximo de P. Deve-se ressaltar que, quando o valor de “s” é zero, a curva característica corresponde, exatamente, àquela do sistema sem compensação.

2.3.3 O CONTROLADOR DE ÂNGULO DE FASE IDEAL

O controlador de ângulo de fase, pode ser considerado como uma variante dos compensadores série. Isso porque, através do mesmo tipo de conexão com o sistema (série), proporciona a alteração da defasagem angular das tensões nos terminais das linhas.

Assim, com vistas a discutir a atuação destes controladores, é considerado o sistema apresentado na figura 2.10, o qual é composto por duas máquinas interligadas por uma linha de transmissão.

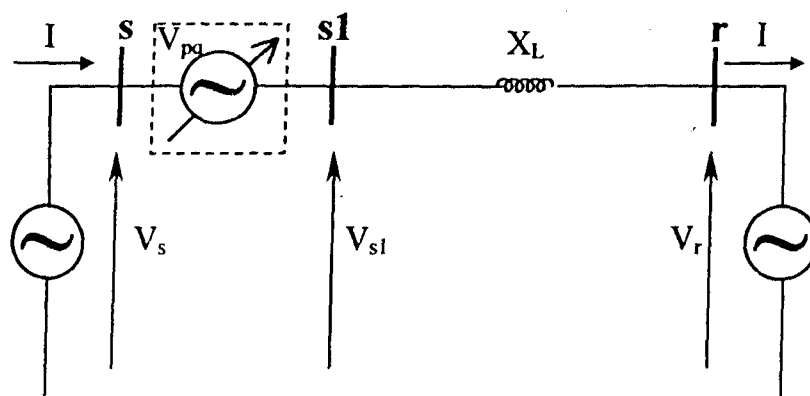


Figura 2.10 – Defasador ideal conectado na barra emissora da linha de transmissão

Além disso, encontra-se conectada junto à barra “s”, uma fonte de tensão controlada que tem por objetivo alterar o ângulo de fase no referido terminal, acarretando, portanto, em uma variação na diferença angular entre as barras “s” e “r” e, conseqüentemente, no controle do fluxo de potência correspondente.

Novamente, desprezando-se as perdas no sistema da figura 2.10 e considerando que as tensões V_s , V_{sl} e V_r possuem a mesma magnitude (V), o respectivo diagrama fasorial é apresentado na figura 2.11.

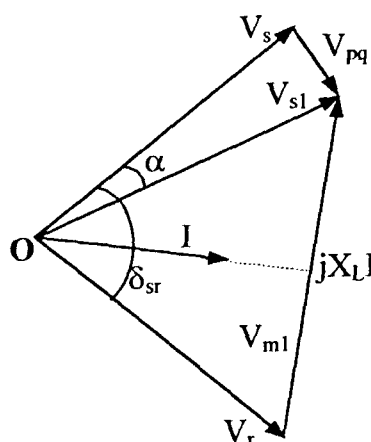


Figura 2.11 – Diagrama fasorial do sistema com defasador

A figura 2.11 mostra o fasor V_{pq} , produzido pelo controlador, que pode ter sua magnitude e ângulo de fase variados em relação à corrente de linha I ,

possibilitando, assim, a absorção ou o fornecimento de potência tanto ativa quanto reativa. Além disso, na mesma figura pode-se verificar que, o ângulo de carga entre os terminais da linha de transmissão é dado por $(\delta_{sr} - \alpha)$, em que o controle do fluxo de potência é efetuado através da variação do ângulo α . Isso é constatado, também, através da seguinte expressão:

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta_{sr} - \alpha) \quad (2.5)$$

onde:

α – ângulo de controle

Baseando-se na equação 2.5, pode-se traçar as características P versus δ_{sr} , do sistema compensado pelo controlador de ângulo de fase, mostradas na figura 2.12.

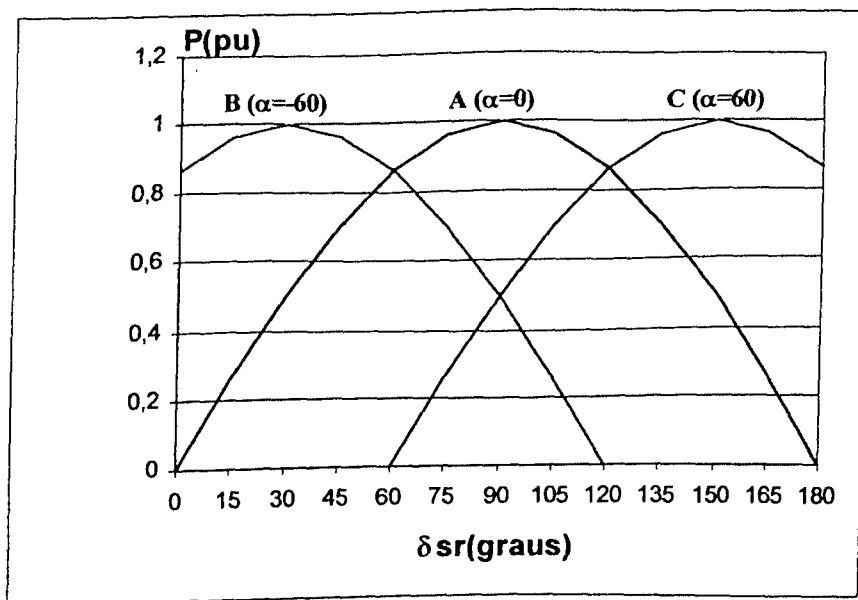


Figura 2.12 – Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação (A) e com defasador (B e C))

Com base na equação 2.5 e na figura 2.12 pode-se dizer que, mantendo-se a diferença $(\delta_{sr} - \alpha)$ próxima de 90° é possível transportar a máxima

potência através da linha, para valores de δ_{sr} acima de 90° , sem comprometer a estabilidade do sistema. Tal constância na diferença ($\delta_{sr} - \alpha$) é obtida variando-se o ângulo α à medida que ocorre uma alteração do δ_{sr} . Obviamente que, o limite dessa variação do ângulo α é que determina a potência do equipamento [36]. Ainda, da figura 2.12 ressalta-se que, quando o valor de “ α ” é zero, a curva característica corresponde, exatamente, àquela do sistema sem compensação.

2.3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS CONTROLADORES IDEAIS DE FLUXO DE POTÊNCIA

A figura 2.13 mostra uma comparação entre as características P versus δ_{sr} , geradas através das compensações efetuadas com os três tipos de controladores ideais apresentados nas subseções anteriores, juntamente com aquela obtida sem compensação alguma.

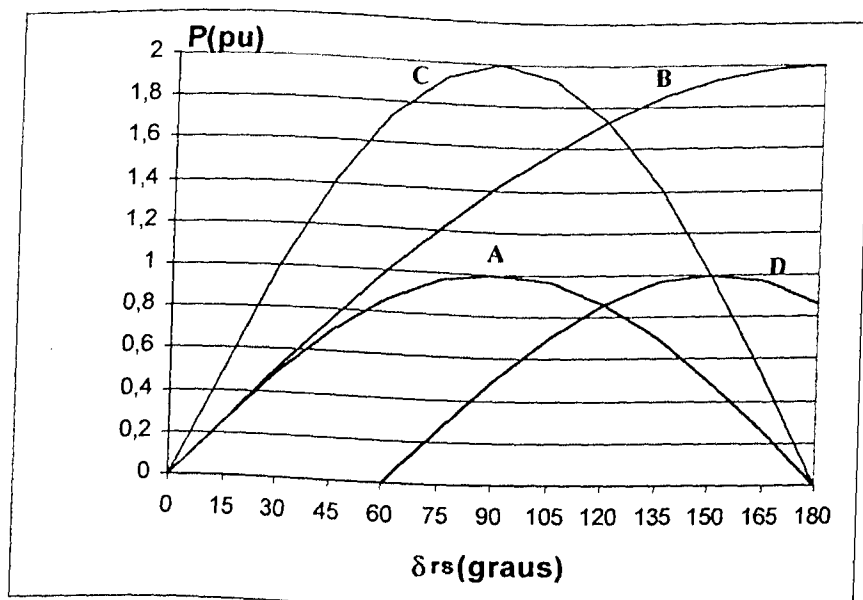


Figura 2.13 – Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação (A), com compensação paralela (B), com compensação série (C) e com defasador (D))

Da figura anterior pode-se constatar que, a melhor estratégia de compensação depende do propósito de controle do fluxo de potência em um determinado sistema, ou seja:

- para que a capacidade de transmissão de uma linha seja elevada, a compensação série, através do controle da impedância equivalente do ramo, é a melhor escolha;
- já, a opção mais indicada para se aumentar a margem de estabilidade do sistema é a compensação paralela;
- por outro lado, no caso de interligações de sistemas onde ocorrem excessivas variações nos ângulos de fase, a adoção de um controle de fluxo de potência através de defasadores se mostra a melhor alternativa.

2.4 EQUIPAMENTOS BASEADOS NA TECNOLOGIA DOS FACTS

Como já dito anteriormente, os equipamentos que empregam a tecnologia dos FACTS são destinados a controlar o fluxo de potência de um sistema através dos seguintes parâmetros: tensão, ângulo de fase e impedância. Diante disso, tais dispositivos são agrupados em três categorias, de acordo com as suas finalidades e conexão ao sistema, sejam elas:

- equipamentos para compensação paralela;
- equipamentos para compensação série;
- equipamentos defasadores.

Além disso, o universo dos FACTS engloba equipamentos que empregam elementos semicondutores tais como tiristores, GTOs, IGBTs, MOSFETs, entre outros. Dessa forma, um outro critério adotado para classificação de tais dispositivos está relacionado com o tipo de chave utilizada e, conseqüentemente, quanto à filosofia de operação dos mesmos. Nesse contexto, tal classificação é dada por:

- controladores de fluxo de potência baseados na tecnologia a tiristores;
- controladores de fluxo de potência avançados.

Face a isto, nas subseções seguintes, são apresentados alguns dos principais dispositivos FACTS, de acordo com as categorias em que estes se enquadram.

2.4.1 CONTROLADORES DE FLUXO DE POTÊNCIA BASEADOS EM TIRISTORES

Atualmente, a maioria dos controladores de fluxo de potência utilizados, ou propostos, empregam tiristores convencionais (os quais não possuem capacidade intrínseca de bloqueio) nos arranjos de compensação envolvendo capacitores, indutores e defasadores. Isso porque, quando comparados com os meios mecânicos para o chaveamento, os tiristores apresentam uma resposta bem mais rápida e, ainda, são operados através de sofisticados controles, que se traduz em maior precisão.

Todos os equipamentos, com exceção dos defasadores, que adotam esta filosofia, possuem a característica comum de que a potência reativa necessária à compensação é gerada ou absorvida por bancos de capacitores e/ou ou reatores tradicionais. Nesse caso, os tiristores são utilizados, apenas,

para o controle da impedância representativa de tais equipamentos, no contexto do sistema, quando submetidos a um determinado valor de tensão.

A seguir são comentados, de forma breve, alguns dos equipamentos enquadrados nesta categoria, de acordo com o tipo de compensação.

2.4.1.1 – Equipamentos para compensação paralela

A) Reator Controlado a Tiristores (RCT)

A figura 2.14 mostra um esquema básico de um RCT, o qual tem por objetivo controlar o perfil de tensão na barra onde se encontra conectado, via maior ou menor absorção de reativos.

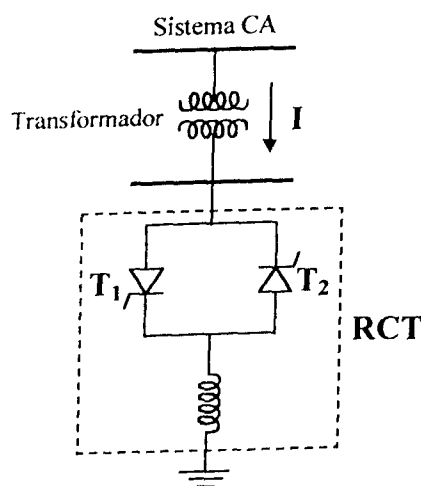


Figura 2.14 – Esquema de conexão de um RCT ao sistema de potência

Tal controle de reativos é feito através do ângulo de disparo dos dois tiristores, conectados em anti-paralelo e em série com o reator, que determina a passagem de maior ou menor quantidade de corrente pelo mesmo. Este procedimento acarreta apreciável conteúdo harmônico na corrente drenada pelo RCT, para um ângulo de disparo diferente de 90° [37]. A fim de se minimizar tais inconvenientes, emprega-se transformadores estrela-delta para conexão dos RCTs ao sistema, bem como filtros passivos [3].

B) Capacitor Chaveado a Tiristores (CCT)

Na figura 2.15 é ilustrado um arranjo da conexão de um CCT a um barramento CA o qual, também, compreende dois tiristores em anti-paralelo em série com um banco de capacitores.

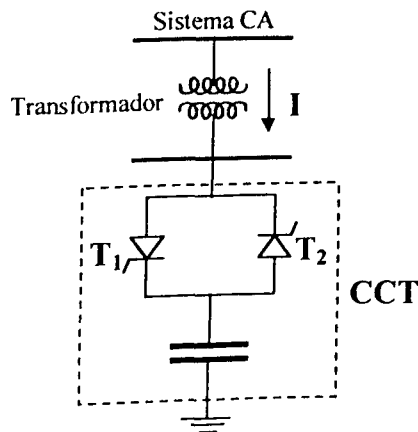


Figura 2.15 – Esquema de conexão de um CCT ao sistema de potência

Na figura 2.15, os tiristores são ligados, somente, quando a tensão no barramento CA passa por zero. Portanto, as condições de operação possíveis para o banco de capacitores são: ligado ou desligado, ou seja, condução plena ou corrente nula. Com isso, a corrente circulante através do CCT se apresenta com características senoidais [36].

C) Compensador Estático de Reativos (CE)

A utilização de um dos equipamentos abordados nos itens (A) e (B), permite, apenas, a compensação indutiva ou capacitiva. Contudo, na maioria das aplicações, ambas as estratégias são requeridas, dependendo da situação do sistema em um determinado instante. Devido a essa necessidade, surge o

Compensador Estático de Reativos (CE), ou SVC (*Static var Compensator*), cujo circuito básico é mostrado na figura 2.16.

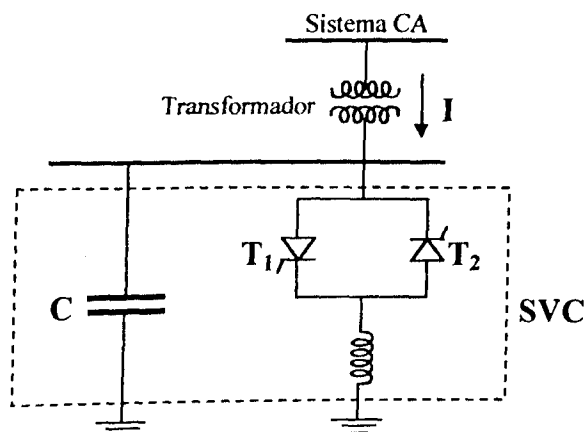


Figura 2.16 – Esquema de conexão de um SVC ao sistema de potência

Da figura 2.16 tem-se que, o arranjo de um SVC consiste da conexão de um RCT em paralelo com um banco de capacitores fixo, ou chaveado a tiristores, cuja potência é definida em função do máximo de reativos a ser suprido.

2.4.1.2 – Equipamentos para compensação da reatância série

A) Capacitor Série Chaveado a Tiristores (TSSC)

O controle da reatância série de uma linha de transmissão pode ser obtido através da utilização de um TSSC, que é compreendido por um conjunto de capacitores (conectados entre si em série e/ou paralelo) chaveados por dois tiristores em anti-paralelo, como mostra a figura 2.17 [7].

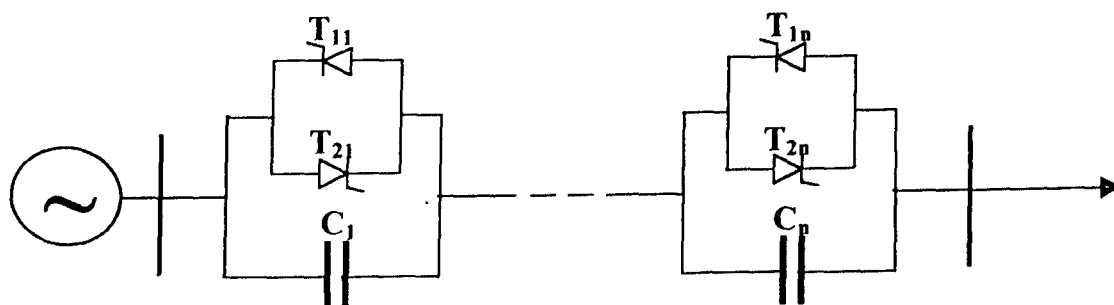


Figura 2.17 – Esquema de conexão de um TSSC em uma linha de transmissão

Nos sistemas apresentados na figura 2.17, quando os tiristores estão bloqueados, o TSSC é visto pelo sistema como um capacitor série convencional. Uma vez disparadas tais chaves semi-condutoras, os capacitores correspondentes são curto-circuitados. Este método de compensação possui a vantagem de ser muito simples. Entretanto, tal modo de operação, que compreende apenas dois níveis de condução dos capacitores, não permite um controle contínuo do fluxo de potência, mesmo quando são utilizadas várias unidades capacitivas, como mostrado na figura 2.17.

B) Capacitor Série Controlado a Tiristores (TCSC)

A figura 2.18 apresenta o esquema básico de um TCSC, que consiste de um capacitor de valor fixo ligado em paralelo com um Reator Controlado a Tiristores (RCT).

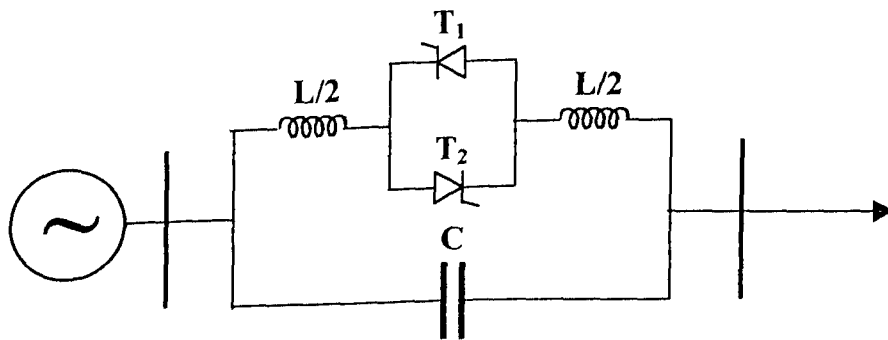


Figura 2.18 – Esquema de conexão de um TCSC em uma linha de transmissão

Este tipo de compensador, ao contrário do TSSC, permite um controle contínuo da impedância equivalente formada entre o capacitor e o reator, através do ângulo de disparo dos tiristores em anti-paralelo. Assim, quando as chaves estão bloqueadas ($\alpha = 180^\circ$), o TCSC se comporta como um capacitor série convencional. Por outro lado, com os tiristores conduzindo completamente ($\alpha = 90^\circ$), o TCSC se comporta como uma indutância de pequeno valor. Diante disso, para se variar a reatância equivalente desde indutiva até capacitiva, continuamente, o ângulo de disparo dos tiristores deve operar entre 90° e 180° .

2.4.1.3 – Equipamentos defasadores

Estes equipamentos atuam no sentido de alterar o defasamento angular das tensões entre as barras às quais estão conectados. Um diagrama simplificado de um dispositivo defasador típico é mostrado na figura 2.19.

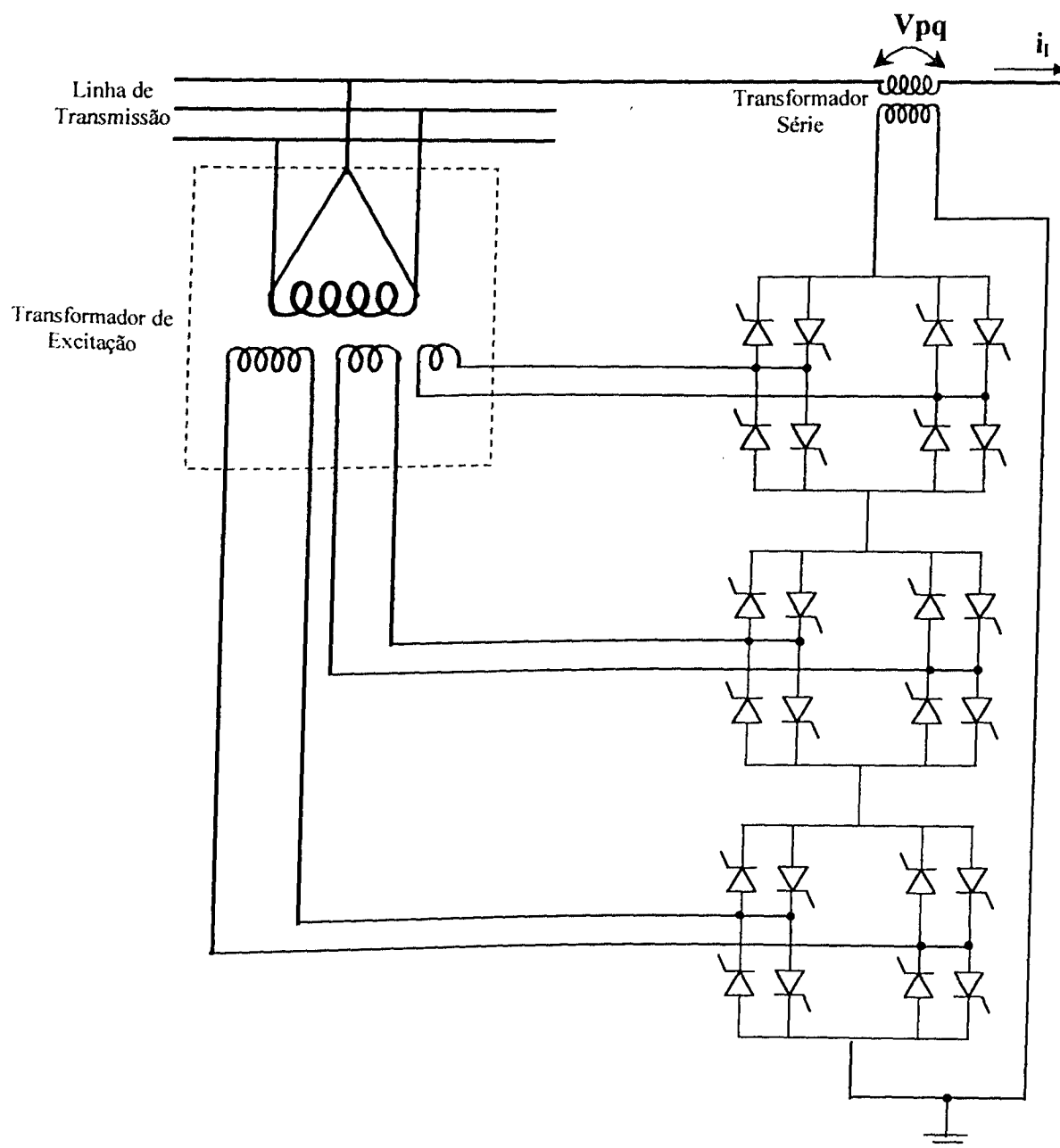


Figura 2.19 – Esquema de conexão de um defasador em um sistema de potência

Como mostra a figura anterior, o controle do ângulo de fase é obtido através do disparo de um conjunto de tiristores, que proporciona a injeção de uma tensão V_{pq} em série com a linha de transmissão. Tal tensão, em quadratura com aquela do barramento controlado V_s , tem sua magnitude variada de acordo com a necessidade de avanço ou atraso do referido ângulo [7].

2.4.2 CONTROLADORES DE FLUXO DE POTÊNCIA AVANÇADOS

A evolução dos dispositivos semicondutores com comutação forçada para altas potências, como GTOs e IGBTs, tem permitido o desenvolvimento de conversores (VSI), como mostrado na figura 2.20, para aplicação aos sistemas CA flexíveis. Esta estratégia caracteriza o princípio de funcionamento dos controladores de fluxo de potência avançados.

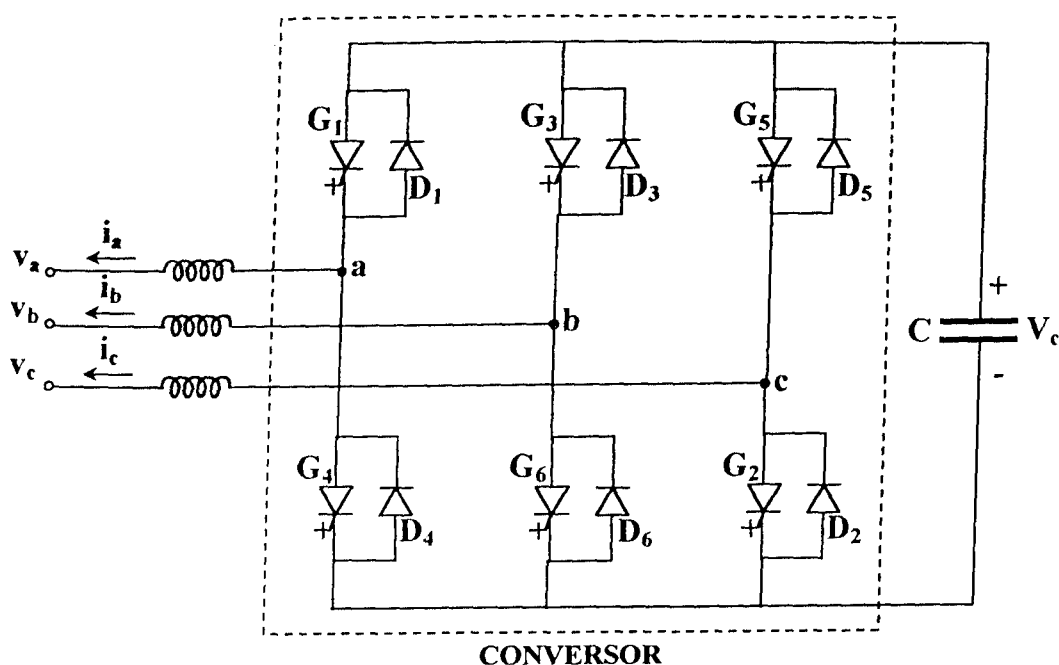


Figura 2.20 – Conversor no qual se baseia os compensadores avançados

Assim, quando comparada aos métodos tradicionais de compensação baseados em tiristores, a presente filosofia de FACTS apresenta características de desempenho bastante elevadas. Além disso, os controladores de fluxo de potência avançados oferecem um potencial único de troca de potência ativa com o sistema CA, simultânea e independentemente do processo de compensação reativa [5], desde que conectados a algum armazenador de energia. Devido a esses fatos, é que as perspectivas de uso e investigações relacionadas com tais equipamentos se fazem cada vez mais reais e necessárias.

Dentre os equipamentos empregadores desta concepção, encontram-se as versões avançadas dos compensadores paralelo, série e defasadores, abordados anteriormente, os quais são comentados a seguir.

2.4.2.1 – Compensador Estático Avançado (ASVC)

Nos compensadores estáticos de reativos convencionais (CE ou SVC), descritos na seção anterior, os tiristores funcionam simplesmente como elementos de controle e a variação do ângulo de disparo de tais dispositivos altera a potência reativa gerada ou absorvida por elementos passivos, sejam eles capacitores e reatores, respectivamente.

Os ASVCs (*Advanced Static var Compensators*), também, são equipamentos que proporcionam o intercâmbio de potência reativa. Todavia, estes fazem uso de uma fonte de tensão controlada, baseada em conversores a GTO, como aquele mostrado na figura 2.20, conectado em paralelo com o sistema CA (Figura 2.21).

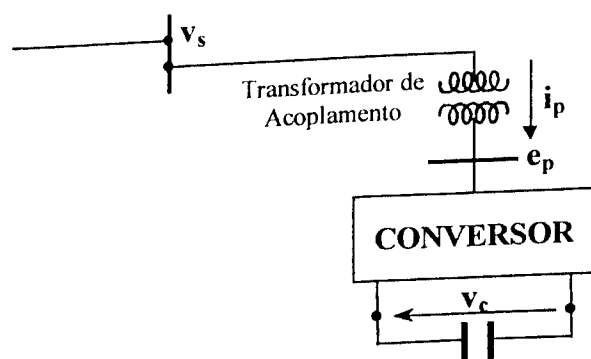


Figura 2.21 – Esquema de conexão de um ASVC em um sistema de potência

O ASVC gera, na sua saída, uma tensão trifásica e_p com amplitude e ângulo de fase controláveis, de forma análoga a um compensador síncrono rotativo, dando origem a uma corrente i_p , trocada com o sistema para prover a

compensação determinada pelo controle. A representação gráfica disso é feita no diagrama fasorial mostrado na figura 2.22.

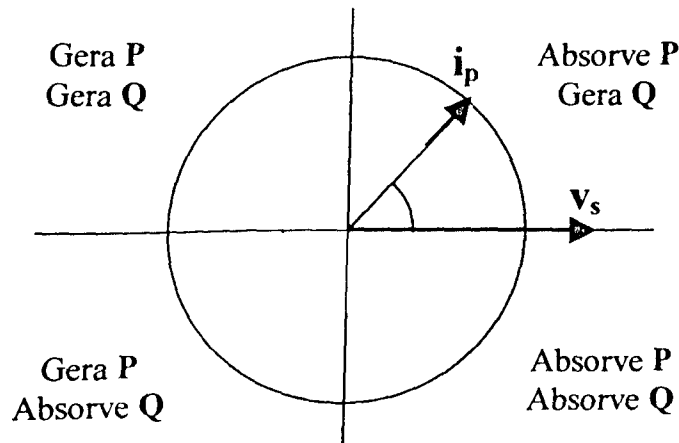


Figura 2.22 – Diagrama fasorial e modos de operação de um ASVC

Devido à possibilidade da corrente no ASVC poder se situar em qualquer quadrante do diagrama da figura 2.22, tal compensador provê, ainda, a troca de potência ativa com o sistema.

2.4.2.2 – Compensador Série Avançado (ASC)

Da mesma forma que o ASVC, o ASC (*Advanced Series Compensator*) faz uso de uma fonte de tensão controlada (VSI), a qual é conectada em série com a linha de transmissão, como ilustra a figura 2.23.

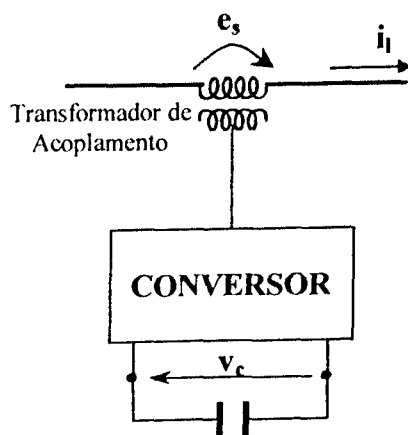


Figura 2.23 – Esquema de conexão de um ASC em uma linha de transmissão

Os modos de operação do compensador série avançado são ilustrados na figura 2.24, onde verifica-se a possibilidade de intercâmbio, tanto de potência ativa quanto reativa, entre o mesmo e o sistema CA, dependendo do defasamento entre a tensão série injetada e a corrente na linha de transmissão.

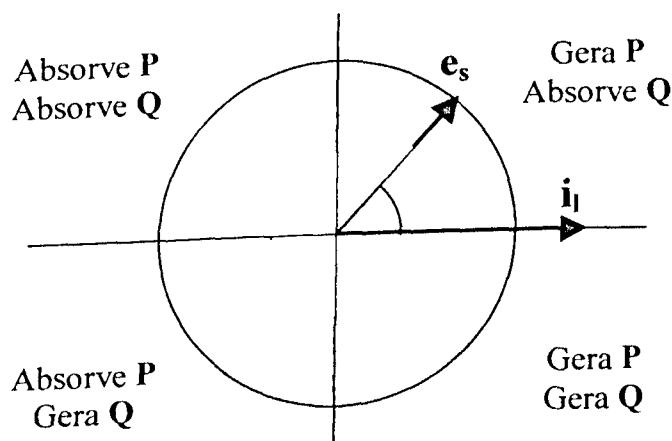


Figura 2.24 – Diagrama fasorial e modos de operação de um ASC.

Da figura anterior, se a tensão injetada pela fonte de tensão estiver em fase com a corrente da linha, então existirá fluxo apenas de potência ativa entre o compensador e o sistema. Vale ressaltar que, este fluxo de potência ativa ocorrerá se o capacitor estiver conectado a algum dispositivo armazenador de energia. Por outro lado, se a referida tensão estiver em

quadratura (adiantada ou atrasada) com tal corrente, haverá troca apenas de potência reativa (indutiva ou capacitiva). Neste último caso, o ASC opera como um Capacitor Série Controlado a Tiristores (TCSC), visto anteriormente na seção 2.4.1.2.

2.4.2.3 – Controlador de Fluxo de Potência Unificado (UPFC)

Os transformadores defasadores controlados a tiristores convencionais provêm a variação do ângulo da tensão na barra controlada através da injeção de uma tensão em quadratura com a mesma, cuja magnitude varia, de uma forma discreta, através da variação dos tapes no transformador. Com isso, uma vez que a relação angular entre tal tensão e a corrente de linha é arbitrária, o defasador deve estar apto a trocar (fornecer ou absorver) tanto potência ativa como reativa com o sistema CA. Entretanto, como tal transformador não possui tal capacidade interna, qualquer necessidade de fornecimento de potência por parte do defasador para o sistema, a fim de gerar a tensão injetada, deve ser atendida pelo próprio sistema. O mesmo raciocínio se aplica para o caso do defasador precisar absorver alguma potência. Assim, para evitar as variações de tensão, associadas a tais situações, este tipo de defasador requer o suporte de tensão proporcionado por uma fonte de reativos controlável, tal como um ASVC.

Do exposto se conclui que, o controle do ângulo de fase através de dispositivos avançados do tipo fonte de tensão controlável (VSI), se mostra uma estratégia fundamentalmente diferente das vistas até o momento. Assim, o princípio básico para o controle da referida grandeza é fundamentado na união dos compensadores avançados paralelo (ASVC) e série (ASC). O equipamento resultante de tal construção é denominado Controlador de Fluxo

de Potência Unificado ou UPFC (*Unified Power Flow Controller*), cujo esquema de conexão com o sistema CA é mostrado na figura 2.25.

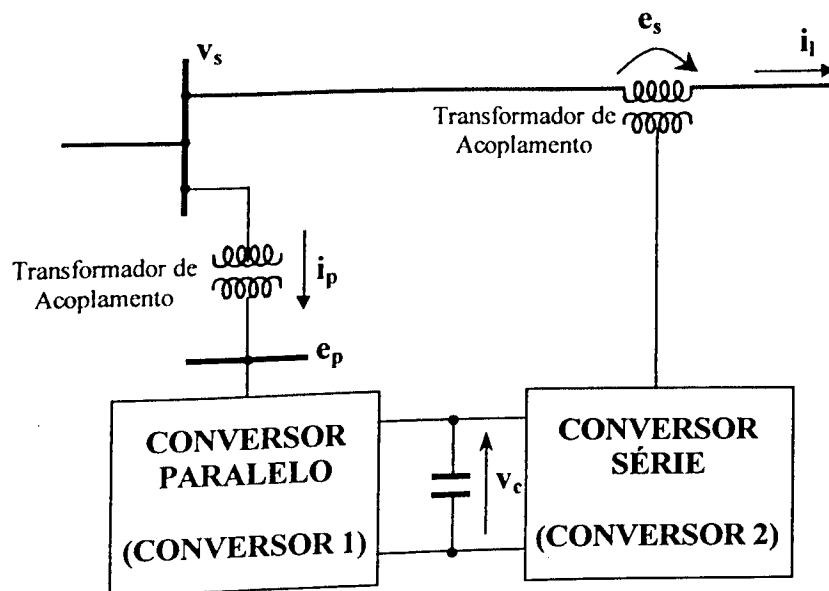


Figura 2.25 – Esquema de conexão de um UPFC em um sistema de potência

Como pode ser visto na figura anterior, o UPFC é constituído por dois conversores do tipo VSI, alimentados a partir da mesma fonte de corrente contínua. Desse modo, o Conversor 1 fornece a potência ativa requerida pelo Conversor 2 e além disso, provê a compensação paralela de reativos. Já o Conversor Série gera, por si só, a potência reativa necessária à compensação série.

Face a isso, torna-se evidente que, além de controlar o ângulo de fase, o UPFC desempenha as mesmas funções executadas pelos ASVCs e ASCs separadamente, o que caracteriza uma das suas principais vantagens.

2.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A TEORIA VETORIAL

Há muito tempo, o controle vetorial tem sido usado em máquinas elétricas e, atualmente, vem sendo largamente aplicado à análise e controle de sistemas de potência. Nesse contexto, o uso de vetores é muito útil para a 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 três 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 dos compensadores avançados tratados nesta tese, e visando um melhor entendimento sobre o assunto, esta seção mostra em linhas gerais o conceito da transformação vetorial para grandezas genéricas.

2.5.1 REPRESENTAÇÃO VETORIAL DE GRANDEZAS TRIFÁSICAS

Pode-se dizer 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 2.26[11].

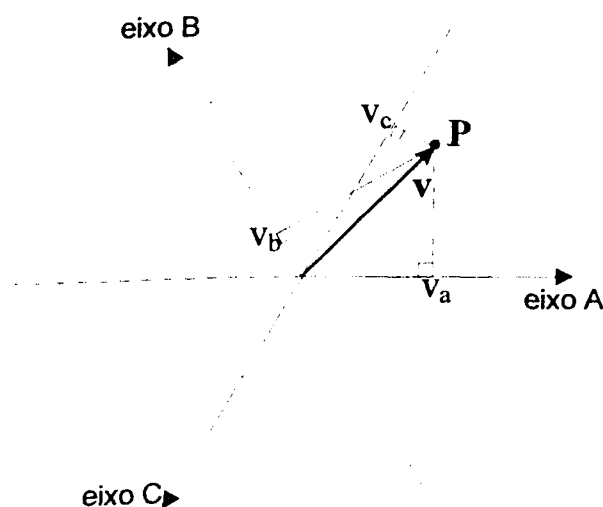


Figura 2.26 – Representação vetorial de uma variável trifásica

Na figura acima, a linha traçada 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 2.27 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.

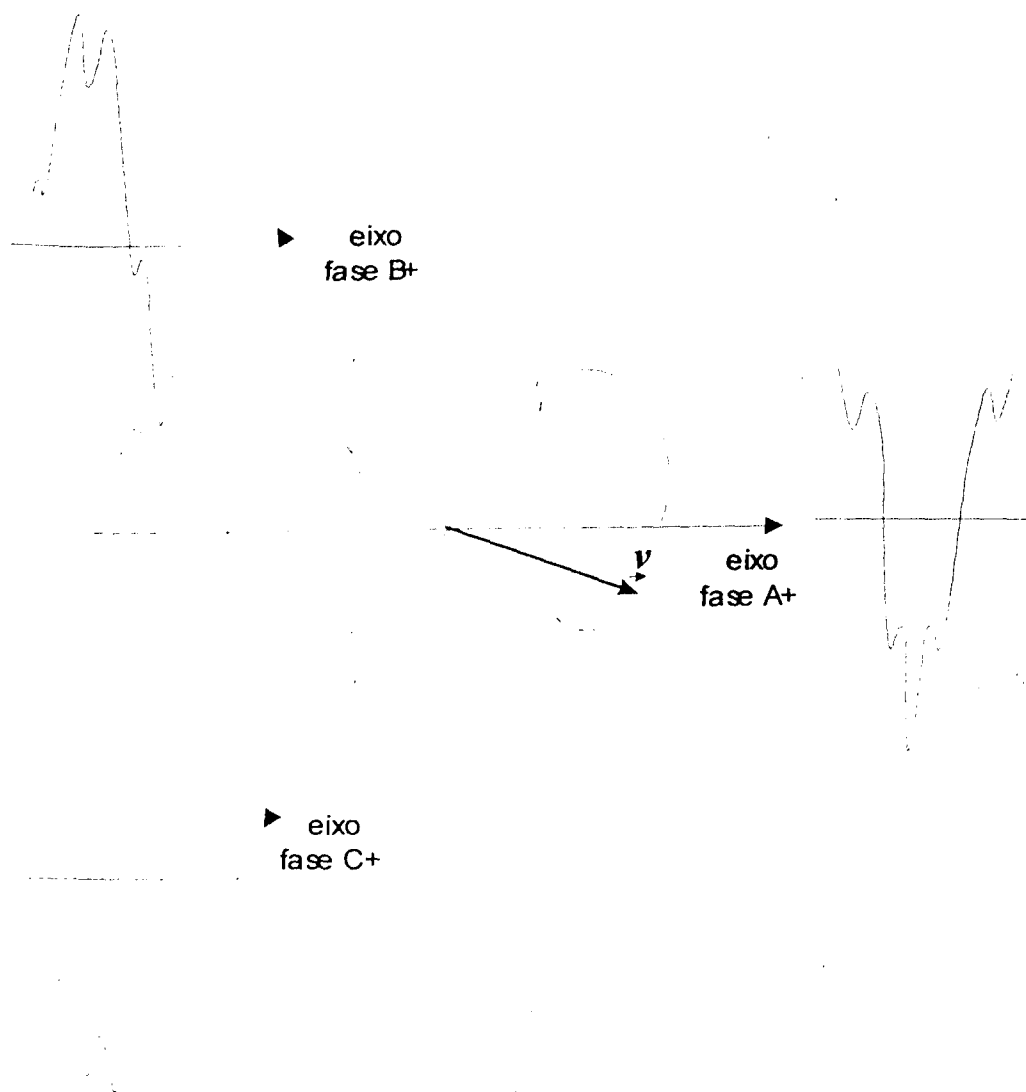


Figura 2.27 – Exemplo de uma trajetória vetorial

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.

2.5.1.1 – 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 corrente mostrados na figura 2.28.

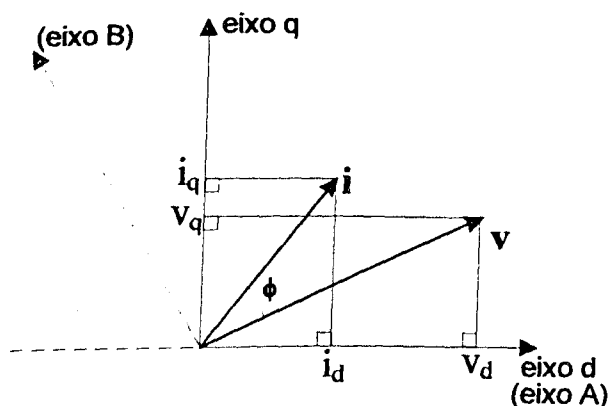


Figura 2.28 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal estacionário

Com isso, a transformação das variáveis de fase (tensão e corrente) para as coordenadas d e q é feita através das equações (2.6) e (2.7), respectivamente:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

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

e a matriz de conversão C é dada pela equação (2.8).

$$[C] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Um ponto a ser ressaltado é que a matriz de conversão C empregada considera o sistema de sequência zero.

Supondo que a figura 2.28 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 (2.9):

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2.9)$$

Utilizando as equações (2.6) até (2.8), a mesma potência ativa instantânea dada por (2.9) pode ser escrita em termos das grandezas d e q , como mostra a equação (2.10):

$$p = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) = \frac{3}{2} |v| \cdot |i| \cos \phi \quad (2.10)$$

onde:

- p – potência ativa instantânea
- V – vetor de tensão
- I – vetor de corrente
- ϕ – ângulo entre os vetores de tensão e corrente

Da equação (2.10) 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, o que pode ser verificado, também, pela figura 2.29.

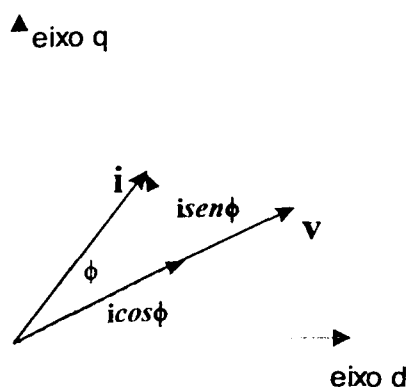


Figura 2.29 – Decomposição do vetor de corrente em relação ao vetor de tensão

Por outro lado, a componente do vetor de corrente que está em quadratura com o vetor de tensão pode ser removida sem que a potência varie e, por isso, é a responsável pela transmissão da potência reativa instantânea [11], que é dada pela equação (2.11).

$$q = \frac{3}{2} (v_d i_q - v_q i_d) = \frac{3}{2} |v| \cdot |i| \sin \phi \quad (2.11)$$

onde:

q – potência reativa instantânea

2.5.1.2 – Representação vetorial no sistema ortogonal síncrono (α - β)

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, e chamado de α , coincida com a direção do referido vetor de tensão de referência do sistema, e o eixo q (agora referido como β) esteja em quadratura com o mesmo. A coincidência do vetor da tensão de referência com o eixo α ($|\mathbf{v}| = v_\alpha$) implica na sua componente em quadratura ser nula ($v_\beta = 0$). Isso é melhor visualizado através da figura 2.30 e das demonstrações seguir:

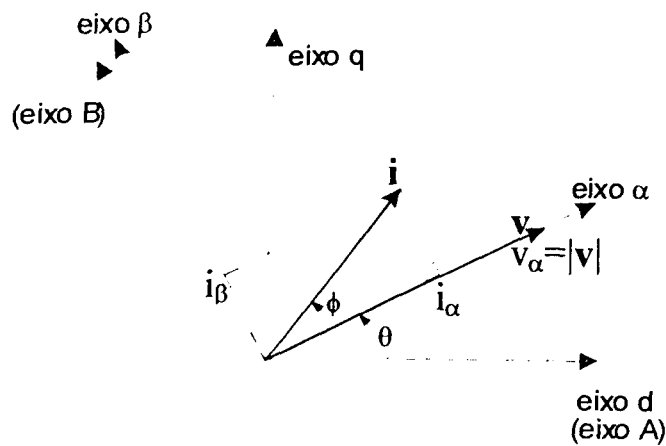


Figura 2.30 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal síncrono

Da figura anterior, verifica-se que a componente i_α responde pela potência ativa instantânea e a componente i_β pela potência reativa instantânea.

Os eixos α e β não são estacionários, ou seja, seguem a trajetória do vetor da tensão de referência. Assim, as coordenadas α e β , dentro desse sistema de referência rotativo na velocidade síncrona, são dadas pelas seguintes transformações (equações (2.12) e (2.13)):

$$\begin{bmatrix} |\mathbf{v}| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

onde:

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

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

e a matriz de conversão C_1 é dada pela equação (2.14) a seguir:

$$[C_1] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

onde:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_q}{v_d} \right) \quad (2.15)$$

em que as componentes v_d e v_q são obtidas pela equação (2.6)

Fazendo as devidas substituições, as equações (2.10) e (2.11) se transformam nas relações (2.16) e (2.17), a seguir:

$$p = \frac{3}{2} |\mathbf{v}| i_{\alpha} \quad (2.16)$$

$$q = \frac{3}{2} |\mathbf{v}| i_{\beta} \quad (2.17)$$

Das equações acima, observa-se que, no sistema de referência síncrono, apenas a componente de corrente i_β transporta a potência reativa instantânea, já a componente i_α é a responsável pela transmissão da potência ativa instantânea [9].

Entretanto, se \mathbf{v} não for o vetor de referência \mathbf{e} , portanto, tiver as componentes v_α e v_β diferentes de zero, as equações (2.16) e (2.17) se tornam:

$$p = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (2.18)$$

$$q = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha) \quad (2.19)$$

Sob condições balanceadas de regime permanente, as coordenadas dos vetores de tensão e corrente no sistema de referência síncrono são grandezas constantes. Isso faz com que a análise vetorial seja uma ferramenta muito útil para o controle de sistemas trifásicos[7].

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo, de caráter informativo, foi desenvolvido no sentido de proporcionar uma visão geral a respeito do tema FACTS. Para tanto, inicialmente, foram apresentados os problemas atuais relacionados com a expansão e controle de sistemas elétricos de potência juntamente com exemplos simplificados ilustrando a necessidade de aplicação da filosofia de sistemas de transmissão flexíveis.

Com o objetivo de verificar os benefícios alcançados pelos processos de compensação, tanto paralela quanto série, utilizados pelos equipamentos FACTS, foram discutidos três recursos, com características ideais, empregados no controle dos parâmetros determinantes no transporte de energia, a saber: magnitude das tensões terminais, impedância equivalente e ângulo de carga. Destas análises constatou-se que, os compensadores paralelos e série atuam como mecanismos de alteração da “impedância equivalente ou efetiva da linha”, possibilitando o aumento da capacidade de transmissão da mesma. Por outro lado, observou-se que os defasadores controlam o ângulo entre as tensões nos terminais da linha, melhorando a estabilidade dos sistemas e, conseqüentemente, proporcionando carregamentos a ângulos de transmissão maiores que 90° .

Outro propósito deste capítulo foi fazer um levantamento e apresentar as características, de maneira sucinta, dos equipamentos que empregam a filosofia dos FACTS, com o intuito de identificar a área de pesquisa desta tese. Nesse contexto, pertencendo a uma primeira geração de compensadores, pode-se citar os dispositivos baseados em tiristores convencionais, quais sejam: RCT, CCT e CE para compensação paralela, TSSC e TCSC para compensação da reatância série e os transformadores defasadores. Ainda, compondo a geração dos compensadores avançados, baseados em conversores

de potência, encontram-se dispositivos do tipo ASVC para compensação paralela, ASC para compensação série e UPFC, o qual efetua o controle do fluxo de potência de maneira unificada. Isso posto, ressalta-se que, apenas nos capítulos subsequentes é que serão tratados, de forma detalhada, tais compensadores estáticos avançados, contemplando aspectos como: funcionamento físico, análise vetorial, sistema de controle, implementação computacional no simulador SABER e desempenho perante uma rede de energia com distúrbios associados com a perda de qualidade do sistema elétrico.

Finalmente, como ferramenta de análise, modelagem e controle, foram apresentados os principais conceitos da teoria vetorial, já que a mesma será amplamente empregada neste trabalho.

Uma vez alcançados os objetivos propostos, as principais contribuições oferecidas por este capítulo são listadas a seguir:

- síntese didática sobre a evolução dos compensadores estáticos;
- conceituação física sobre os arranjos e estratégias de compensação;
- verificação dos benefícios alcançados pelos processos de compensação, tanto paralela quanto série, utilizados pelos equipamentos FACTS;
- resumo didático sobre a teoria vetorial.

CAPÍTULO III

COMPENSADOR ESTÁTICO PARALELO AVANÇADO - ASVC

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De um modo geral, a implantação de compensadores estáticos avançados ou ASVC (*Advanced Static var Compensator*) em um sistema de potência é necessariamente antecedida por estudos computacionais, para que o equipamento seja dimensionado e ajustado corretamente. Para tanto, faz-se necessário o conhecimento detalhado do seu princípio de funcionamento, o que é representado através dos seus modelos matemáticos que, neste caso, consistem dos circuitos de potência e controle.

Ademais, para tais estudos são requeridos *softwares* dedicados a simulações específicas, tais como: fluxo de carga, harmônicos, transitórios eletromagnéticos, etc.. Assim, diante da crescente necessidade de tais análises, é extremamente interessante que uma única ferramenta computacional seja capaz de realizar os mais diferentes estudos associados à engenharia elétrica. Neste particular, destaca-se o simulador SABER que, além de uma variada biblioteca, propicia, através de uma linguagem própria (Mast), a modelagem de qualquer componente eletro-eletrônico, mecânico,

etc., no domínio do tempo. Além disso, o SABER possui características como grande versatilidade gráfica, capacidade de interconexão com rotinas elaboradas em outras linguagens de programação (C e Fortran) e manipulação dos resultados de saída, que permitem a execução de estudos mais complexos e análises mais ricas.

Diante do exposto, a principal meta deste capítulo é apresentar todo o processo de implementação, tanto do circuito de potência como de controle, do compensador estático avançado (ASVC), na plataforma computacional denominada SABER. Para tanto, primeiramente, faz-se necessário uma descrição do princípio básico de funcionamento de tal equipamento, para que os objetivos do controle possam ser determinados. Além disso, é abordada a modelagem matemática do ASVC, utilizando a teoria vetorial, uma vez que nela se baseia toda a malha de controle empregada na sua operação, o qual, também, é descrito na sequência. De posse dos modelos representativos do ASVC e da filosofia de controle a ser empregada, o processo de implementação no SABER, propriamente dito, é documentado enfocando os *templates* desenvolvidos nesta tese. Finalmente, as análises de desempenho das referidas implementações do equipamento são efetuadas através de estudos de casos.

3.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS COMPENSADORES ESTÁTICOS PARALELOS AVANÇADOS - ASVC

Como dito no Capítulo II, o compensador estático de reativos avançado ou ASVC (*Advanced Static var Compensator*) se fundamenta no princípio de que, uma ponte conversora possa ser conectada em paralelo a um sistema CA trifásico, com a finalidade de intercambiar, principalmente, potência reativa com o mesmo. Além disso, havendo necessidade de se proceder um amortecimento de oscilações, tal equipamento deve ser conectado a algum tipo de armazenador de energia, como baterias ou grandes capacitores. Estas possibilidades de controle do fluxo de potência, oferecidas pelo ASVC são análogas àquelas proporcionadas pelos condensadores síncronos, as quais resultam em suporte de tensão, aumento da estabilidade transitória, compensação dinâmica de reativos do sistema de transmissão e melhor amortecimento das oscilações [6]. Entretanto, os compensadores estáticos avançados possuem características que sobrepõem as referidas máquinas rotativas, tais como maior velocidade de resposta a alguma solicitação imediata de controle do fluxo de potência por parte do sistema.

Com isso, uma vez que os dispositivos semicondutores de comutação forçada, como GTOs, já se encontram disponíveis com altas capacidades nominais, requeridas pelos sistemas de potência, os compensadores estáticos de reativos avançados, através do emprego de tais chaves, se tornam exeqüíveis.

3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ASVC

Um esquema representativo da conexão de um compensador estático paralelo avançado com o sistema CA, através do qual são feitos os esclarecimentos sobre o seu princípio de funcionamento, é mostrado na figura 3.1.

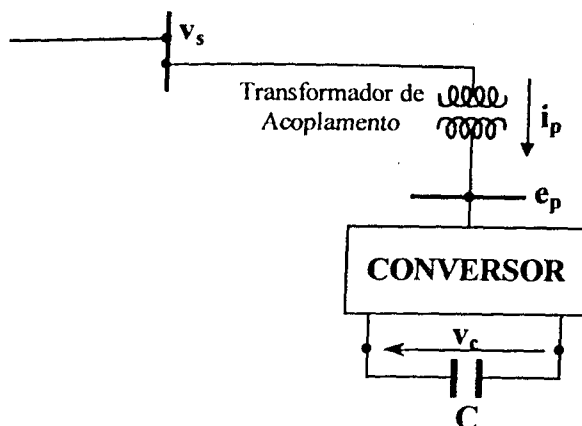


Figura 3.1– Esquema de conexão de um ASVC em um sistema de potência

Na figura:

- v_s – tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do ASVC
- i_p – corrente do ramo entre o ASVC e o sistema CA
- e_p – tensão nos terminais trifásicos do conversor do ASVC
- v_c – tensão nos terminais do capacitor do ASVC

No esquema mostrado na figura anterior é assumido que a impedância do transformador de acoplamento é basicamente reativa, o que normalmente se aproxima da realidade. Além disso, as análises são feitas, considerando-se que nos terminais trifásicos do conversor é gerada uma tensão e_p com as seguintes características:

- tensão e_p em fase com a tensão do sistema CA v_s ;
- tensão e_p adiantada da tensão do sistema CA v_s ;
- tensão e_p atrasada da tensão do sistema CA v_s .

3.3.1 TENSÃO e_p EM FASE COM A TENSÃO DO SISTEMA CA v_s

Quando a tensão e_p está em fase com v_s , a componente ativa da corrente i_p , denominada $i_{p\alpha}$, mostrada na figura 3.1 é nula. Assim, a partir da equação (2.16) no Capítulo II, reescrita em (3.1), pode-se dizer que a potência ativa circulante entre o ASVC e o sistema CA, também é nula.

$$p_p = (3/2) |v_s| i_{p\alpha} \quad (3.1)$$

onde:

p_p – fluxo de potência ativa entre o ASVC e o sistema CA

$|v_s|$ – módulo do vetor da tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do ASVC tomado como referência do sistema ortogonal síncrono

$i_{p\alpha}$ – componente da corrente i_p no eixo rotativo α

Portanto, neste caso, as análises se restringem às magnitudes das referidas tensões, efetuadas através dos diagramas fasoriais apresentados na figura 3.2.

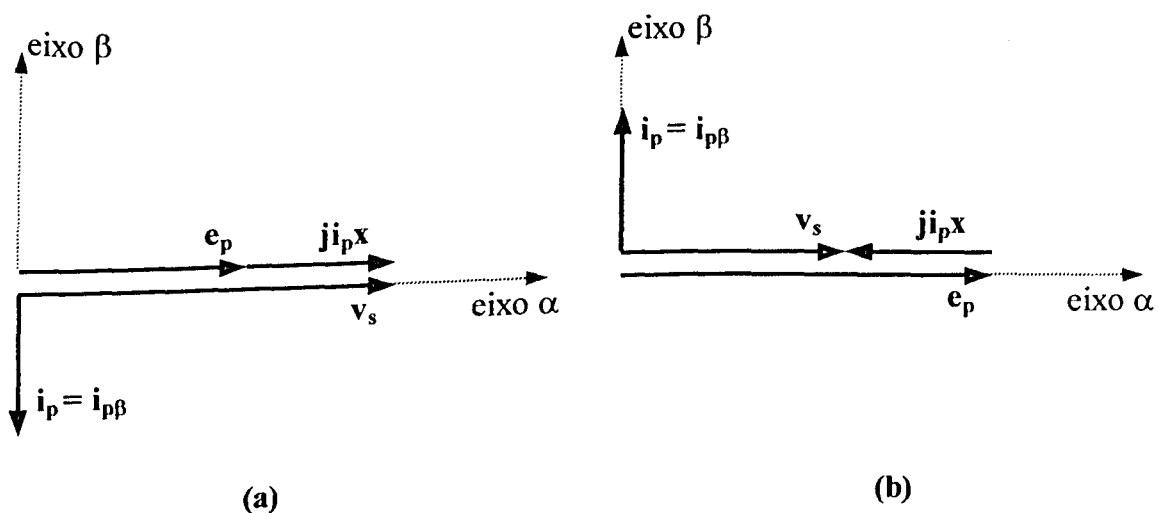


Figura 3.2 – Diagrama fasorial para o ASVC absorvendo (a) e gerando (b) potência reativa

De acordo com a figura 3.2(a), quando $|e_p| < |v_s|$, a componente reativa da corrente, $i_{p\beta}$, é indutiva, visto que a mesma se encontra atrasada da tensão v_s em 90° .

O fluxo de potência reativa q_p entre o sistema CA e o ASVC é obtido através da equação (2.19) do Capítulo II, reescrita em (3.2).

$$q_p = (3/2) |v_s| i_{p\beta} \quad (3.2)$$

onde:

q_p – fluxo de potência reativa entre o ASVC e o sistema CA

$i_{p\beta}$ – componente da corrente i_p no eixo rotativo β

A equação anterior mostra que, se $i_{p\beta}$ é negativa, pois está atrasada de v_s em 90° , o ASVC absorve potência reativa, pois q_p também é negativa.

Por outro lado, como indica a figura 3.2(b), quando $|e_p| > |v_s|$, a componente reativa da corrente, $i_{p\beta}$, é capacitiva, já que a mesma se encontra adiantada da tensão v_s em 90° . Portanto, como mostra a equação (3.2), o ASVC fornece reativos ao sistema CA.

Diante do exposto, constata-se que, para ângulos de defasagem igual a 90° , a potência reativa fornecida ou absorvida pelo compensador estático avançado depende tão apenas da magnitude da tensão e_p em relação a v_s .

3.3.2 TENSÃO e_p ADIANTADA DA TENSÃO DO SISTEMA CA v_s

Quando a tensão e_p se encontra adiantada de v_s (em ângulos inferiores a 90°) a componente ativa da corrente, $i_{p\alpha}$, é negativa, como mostra a figura 3.3.

Assim, baseando-se na equação (3.1), verifica-se que a potência ativa também

é negativa. Isso significa que, tal potência é drenada do barramento CC e fornecida ao sistema CA.

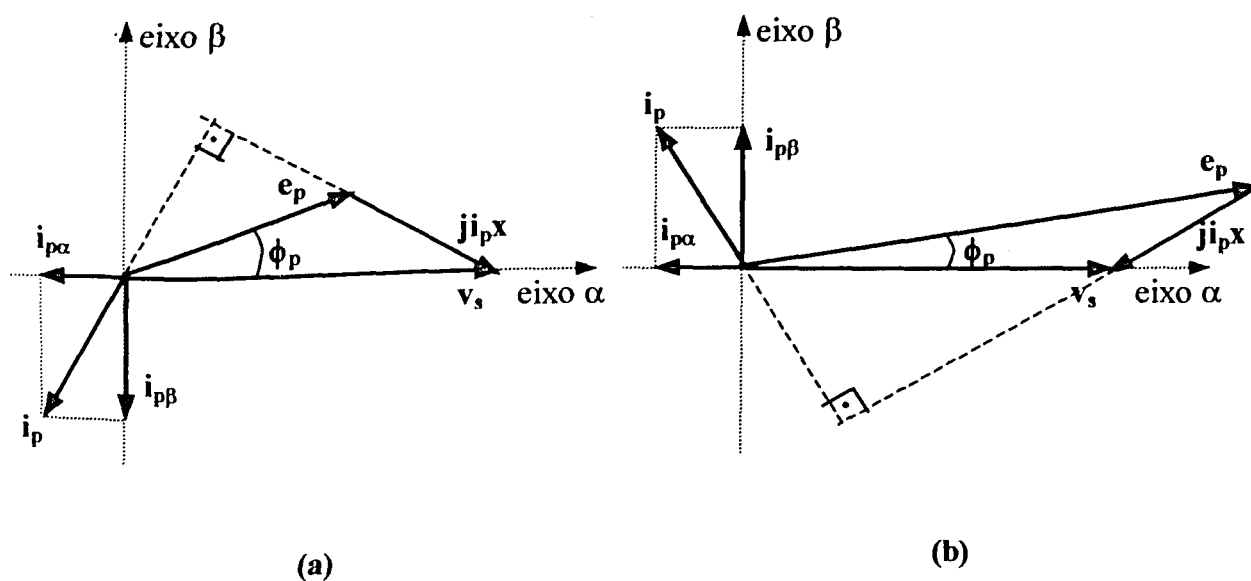


Figura 3.3 – Diagrama fasorial para o ASVC fornecendo potência ativa: absorvendo (a) e gerando (b) potência reativa

Na figura:

ϕ_p – ângulo entre a tensão do sistema (v_s) no ponto de acoplamento do ASVC e a tensão nos terminais trifásicos do conversor (e_p)

Novamente, se $|e_p| < |v_s|$, então $i_{p\beta}$ está atrasada de v_s em 90° , como mostra a figura 3.3(a), e a potência reativa é absorvida do sistema CA. Por outro lado, se $|e_p| > |v_s|$, $i_{p\beta}$ encontra-se avançada de 90° com relação a v_s e, portanto, a potência reativa é fornecida ao sistema CA (figura 3.3(b)).

3.3.3 TENSÃO e_p ATRASADA DA TENSÃO DO SISTEMA CA v_s

Finalmente, quando a tensão e_p se encontra atrasada de v_s , a componente $i_{p\alpha}$, é positiva, como ilustra a figura 3.4.

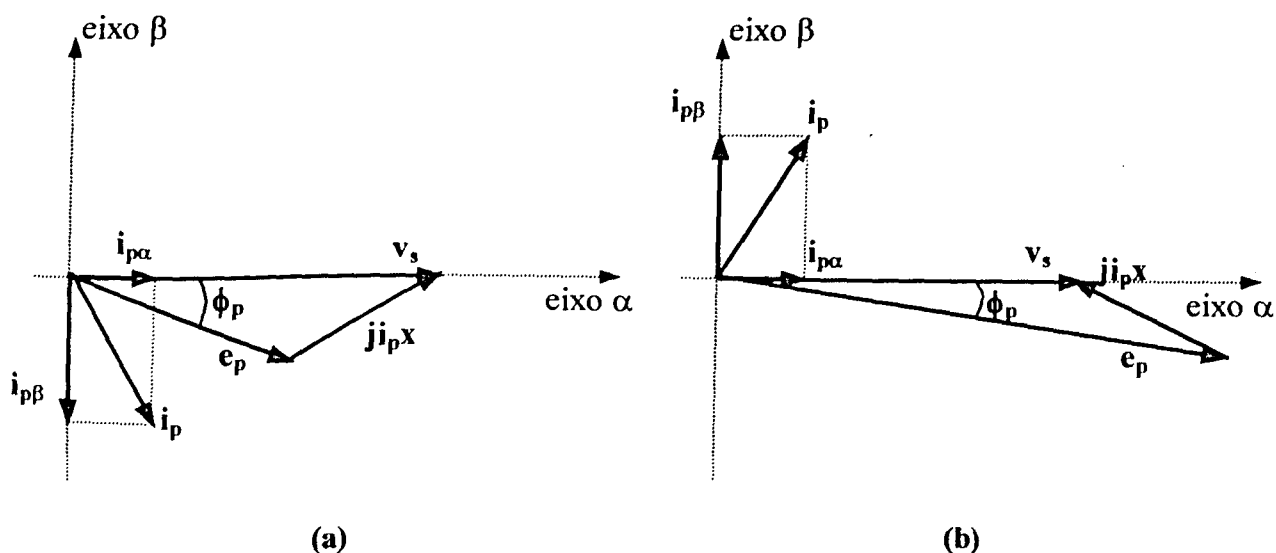


Figura 3.4 – Diagrama fasorial para o ASVC absorvendo potência ativa: absorvendo (a) e gerando (b) potência reativa

Com isso, a potência ativa, definida pela equação (3.1) é positiva e, portanto, absorvida pelo ASVC para manter a tensão no capacitor do elo CC em um patamar constante.

Com relação ao fluxo de potência reativa, as mesmas análises e conclusões efetuadas nas subseções anteriores, se aplicam a este caso e podem ser constatadas nas figura 3.4(a) e 3.4(b).

3.4 ANÁLISE VETORIAL DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DO ASVC

Esta seção aborda a análise matemática e modelagem do circuito de potência de um ASVC, a partir das quais são identificadas as variáveis envolvidas na operação e controle do referido equipamento. Deve-se observar que, os princípios da análise vetorial utilizados nesta seção estão resumidos no Capítulo II.

A figura 3.5 mostra uma representação simplificada do circuito trifásico de potência de um compensador estático avançado, conectado a um barramento do sistema CA. Para esta análise, a indutância e a resistência mostrada na entrada do ASVC representa o transformador de potência utilizado para o acoplamento do equipamento no sistema bem como cabos de conexão presentes neste ramo.

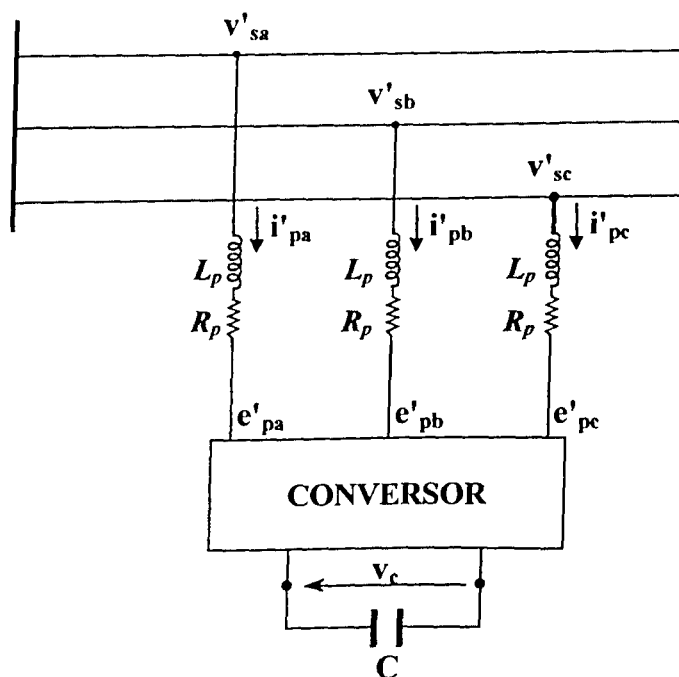


Figura 3.5 – Circuito equivalente trifásico simplificado do ASVC

A partir da figura 3.5, a modelagem trifásica do ASVC é definida pelas equações (3.3) a (3.5), como segue:

$$v_{sa}' - e_{pa}' = L_p d(i_{pa}')/dt + R_p i_{pa}' \quad (3.3)$$

$$v_{sb}' - e_{pb}' = L_p d(i_{pb}')/dt + R_p i_{pb}' \quad (3.4)$$

$$v_{sc}' - e_{pc}' = L_p d(i_{pc}')/dt + R_p i_{pc}' \quad (3.5)$$

Para converter as grandezas para o sistema p.u., utilizou-se a potência base do transformador e as tensões bases nos terminais do mesmo, de acordo com as equações (3.6) a (3.12) a seguir:

$$i = i' / i_{base} \quad (3.6)$$

$$v = v' / v_{base} \quad (3.7)$$

$$e = e' / e_{base} \quad (3.8)$$

$$Z_{base} = v_{base} / i_{base} \quad (3.9)$$

$$x_p = \omega_b L_p / Z_{base} \quad (3.10)$$

$$x_c = 1 / \omega_b C Z_{base} \quad (3.11)$$

$$r_p = R_p / Z_{base} \quad (3.12)$$

Assim, as equações (3.3) a (3.5), transformadas em valores p.u. e rearranjadas na forma matricial, conduzem à equação (3.13).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p \omega_b}{x_p} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-r_p \omega_b}{x_p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-r_p \omega_b}{x_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_b}{x_p} (v_{sa} - e_{pa}) \\ \frac{\omega_b}{x_p} (v_{sb} - e_{pb}) \\ \frac{\omega_b}{x_p} (v_{sc} - e_{pc}) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

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

$$\begin{bmatrix} v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

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

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

onde $[C_1]$ é a matriz de transformação, definida no Capítulo II, e revista em (3.17).

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

em que:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{sq}}{v_{sd}} \right) \quad (3.18)$$

e as componentes da tensão v_s no sistema de eixos estacionários v_{sq} e v_{sd} são obtidas através da transformação a seguir:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

em que $[C]$ é a matriz de transformação dada pela equação (2.8) no Capítulo II.

Os vetores das grandezas do lado CA do compensador estático avançado, decompostos nos eixos do sistema de referência síncrono, podem ser visualizados como indicado na figura 3.6.

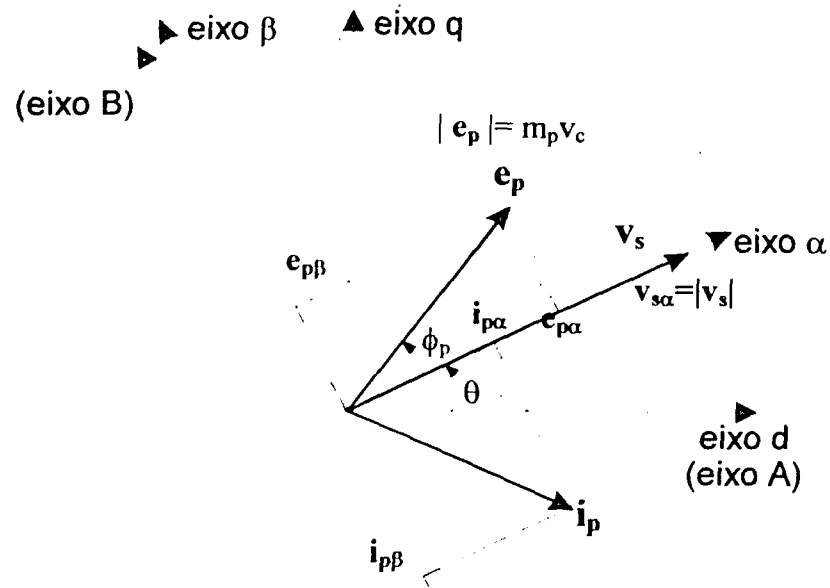


Figura 3.6 – Vetores das tensões e correntes do ASVC

Com as transformações vetoriais executadas, a equação (3.13) pode ser escrita no sistema de referência síncrono, como mostra a equação (3.20) [7].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{p\alpha} \\ i_{p\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p \omega_b}{x_p} & \omega \\ -\omega & \frac{-r_p \omega_b}{x_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{p\alpha} \\ i_{p\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_b}{x_p} (|v_s| - e_{p\alpha}) \\ -\frac{\omega_b}{x_p} e_{p\beta} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

onde:

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

Finalmente, pode-se dizer que a equação (3.20) é o modelo matemático do circuito de potência do ASVC, em p.u. e no sistema de referência síncrono.

Como indicado na figura 3.6, $|\mathbf{e}_p| = m_p v_c$, onde m_p é a relação entre o módulo da tensão trifásica do ASVC e a tensão no barramento CC. Assim, as componentes do vetor \mathbf{e}_p podem ser obtidas através das equações (3.22) e (3.23).

$$e_{p\alpha} = m_p v_c \cos \phi_p \quad (3.22)$$

$$e_{p\beta} = m_p v_c \sin \phi_p \quad (3.23)$$

onde ϕ_p é a diferença angular entre os vetores da tensão nos terminais trifásicos do conversor 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 ϕ_p podem ser variados, através das técnicas de chaveamento existentes, para proporcionar uma certa tensão desejada nos terminais trifásicos do ASVC.

3.5 SISTEMA DE CONTROLE DO ASVC

Em essência, o principal objetivo do sistema de controle do ASVC implementado neste trabalho consiste em controlar o módulo da tensão v_s do barramento CA, ao qual o equipamento encontra-se conectado, mantendo-se a tensão v_c no capacitor constante.

Este alvo pode ser alcançado alterando-se o fluxo das potências reativa e ativa, entre o ASVC e o sistema CA, através das componentes $i_{p\beta}$ e $i_{p\alpha}$ do vetor de corrente i_p , respectivamente. Isto pode ser confirmado, aplicando-se a análise feita no Capítulo II, 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 ASVC e, se a direção do vetor da tensão no ponto de conexão do equipamento for coincidente com a direção do eixo α , do sistema de referência síncrono, a componente $i_{p\beta}$ da referida corrente transporta a potência reativa instantânea e a componente $i_{p\alpha}$ é a responsável pelo fluxo da potência ativa instantânea [9]”.

Assim, as equações (3.1) e (3.2) são reescritas em (3.24) e (3.25), respectivamente.

$$p_p = \frac{3}{2} |v_s| i_{p\alpha} \quad (3.24)$$

$$q_p = \frac{3}{2} |v_s| i_{p\beta} \quad (3.25)$$

Com relação às equações (3.24) e (3.25), e de acordo com as análises efetuadas na seção 3.3, são feitas as seguintes afirmativas:

Condição		ASVC
$p > 0$	\Rightarrow	absorve potência ativa
$p < 0$	\Rightarrow	fornece potência ativa
$q > 0$	\Rightarrow	fornece potência reativa
$q < 0$	\Rightarrow	absorve potência reativa

Diante do exposto, constata-se que para se controlar o fluxo das potências ativa e reativa no ASVC, deve-se atuar nas correntes $i_{p\alpha}$ e $i_{p\beta}$, respectivamente. Tais correntes podem ser alteradas operando-se apropriadamente o conversor, 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 (3.20), para que $i_{p\alpha}$ e $i_{p\beta}$, se estabeleçam em valores adequados à compensação desejada.

Neste ponto, portanto, deve-se estabelecer uma estratégia de controle que, a partir do valor medido de v_s , a ser controlado, determine o vetor de tensão e_p que deva ser gerado pelo conversor, de modo que tal grandeza medida permaneça no (ou acompanhe o) seu valor de referência. Com este propósito, as referências [7, 9 a 15] 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 conversor;
- controle apenas do ângulo de fase do vetor de tensão nos terminais trifásicos do conversor.

Na estratégia adotada pelas referências [9 e 11], tanto a magnitude quanto o ângulo de fase do vetor da tensão (e_p) nos terminais trifásicos do conversor do ASVC, são variados com a finalidade de se atingir o objetivo de controle. A implicação disto é que, além de se controlar a tensão do barramento CA, obtém-se um controle da tensão nos terminais do capacitor nos terminais CC do referido conversor. Por outro lado, a filosofia de controle

empregada pelas referências [9 e 7] é baseada na alteração, apenas, do ângulo de fase do vetor de tensão e_p , já que nessas publicações não é exigida a manutenção da tensão CC nos terminais do capacitor em um valor constante.

A malha de controle definida neste trabalho atua sobre o ângulo de fase e na magnitude do vetor de tensão nos terminais trifásicos do conversor, uma vez que uma tensão constante nos terminais do capacitor é requerida. Tal exigência com relação ao controle desta grandeza se deve ao fato de que, além de ser uma prática comum para a operação deste equipamento, este mesmo modelo de ASVC será utilizado como a unidade paralela do Controlador de Fluxo de Potência Unificado (UPFC) a ser apresentado no Capítulo V. Nesse sentido, tal ponte paralela deve prover uma tensão constante nos terminais do capacitor o qual consiste, também, de um elo CC com a unidade série.

O presente método de controle fundamenta-se, basicamente, nas análises dos diagramas fasoriais efetuadas na seção 3.3, e encontra-se esquematizado na figura 3.7.

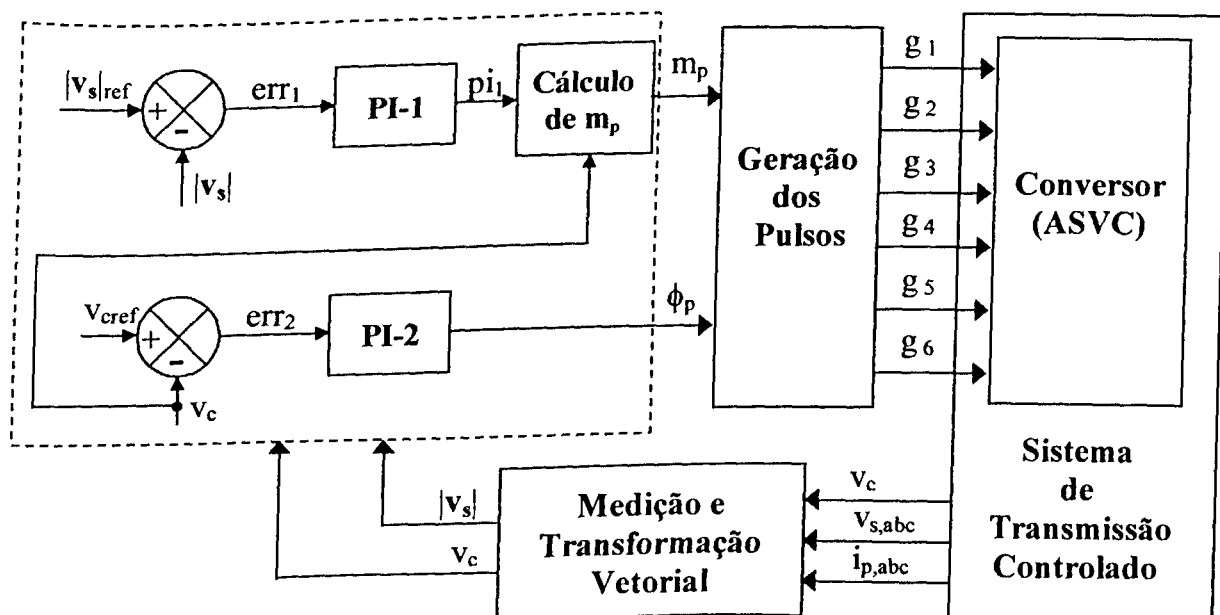


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do sistema de controle do ASVC proposto neste trabalho com magnitude e ângulo da tensão e_p controlados

A figura anterior mostra que, uma vez medido o módulo $|v_s|$ da tensão no barramento controlado pelo ASVC, 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 conversor uma tensão e_p , cuja magnitude define o novo fluxo de reativos necessário para que o módulo da tensão no barramento CA seja equiparado com o valor de referência.

À medida que $|v_s|$ é corrigido, 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 tensão e_p no lado trifásico do conversor. O defasamento entre as tensões e_p e v_s 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.

Um maior detalhamento a respeito das etapas desta malha de controle é feito na próxima seção, que descreve todo o processo de implementação efetuado.

3.6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO ASVC NO SIMULADOR SABER

Como mencionado, o simulador SABER possui uma grande variedade de componentes elétricos, tais como elementos passivos, fontes alternadas e contínuas, chaves, etc. Além disso, permite a criação de 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 ASVC descrito anteriormente e reproduzido na figura 3.8.

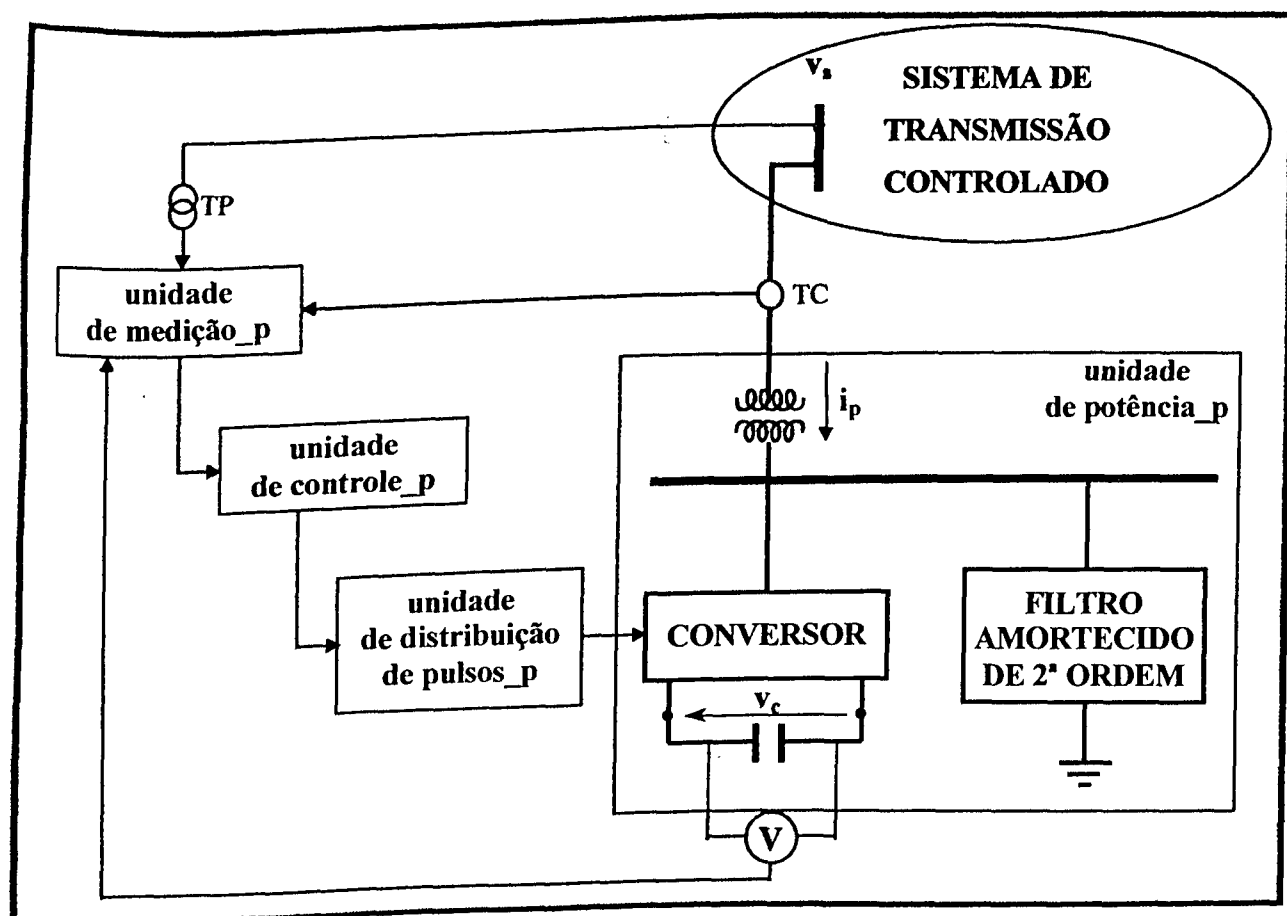


Figura 3.8 – Esquema de conexão de um ASVC em um sistema de potência

Verifica-se na figura anterior a presença de um filtro amortecido de 2ª ordem, que se justifica devido ao tipo de conversor utilizado, ou seja, VSI com chaveamento do tipo PWM. Neste caso, é possível prever que, devido ao seu funcionamento, tal equipamento injetará correntes harmônicas no sistema cujas ordens envolvidas obedecem a equação (3.26)[39].

$$n = kp \pm m \quad (3.26)$$

Onde:

- n – ordem harmônica
- p – relação entre as frequências 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 frequências de chaveamento encontram-se por volta de 1kHz, o surgimento de harmônicos ocorre a partir de ordens mais elevadas. Daí o motivo de se escolher um sistema de filtragem como aquele mostrado na figura 3.8.

O processo de implementação do modelo do ASVC exibido na figura 3.8 é descrito nesta seção, enfatizando os *templates* desenvolvidos neste trabalho. Nesse sentido, a exposição do modelo implementado do compensador avançado é feita através das suas partes componentes, que consistem das quatro unidades principais mostradas na figura 3.9, onde também são destacados os sinais de intercâmbio entre as mesmas.

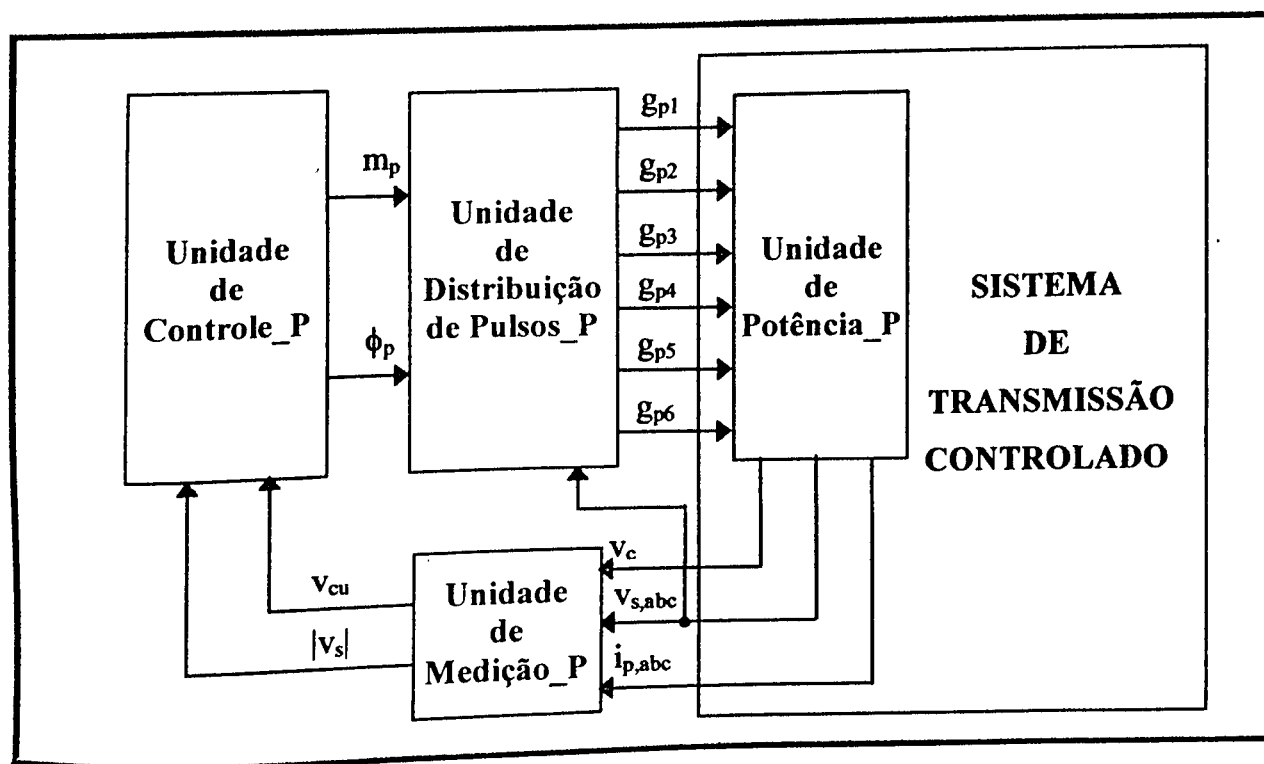


Figura 3.9 – Diagrama esquemático do modelo geral do ASVC implementado

Baseando-se na figura 3.9, pode-se dizer que cada unidade (Potência_P, Medição_P, Controle_P e Distribuição de Pulsos_P) é caracterizada por suas funções, as quais são detalhadas nas subseções seguintes.

3.6.1 UNIDADE DE POTÊNCIA_P

A Unidade de Potência_P é composta pelo transformador de acoplamento entre o ASVC e o sistema, pelas chaves componentes do conversor, pelo capacitor utilizado nos terminais CC e por elementos passivos adicionais (resistores e 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 às chaves da ponte conversora foram desenvolvidos em trabalhos anteriores [38]. Com isso, a modelagem da Unidade de Potência_P consiste na conexão de tais elementos de modo a se obter a topologia adequada (figura 3.10).

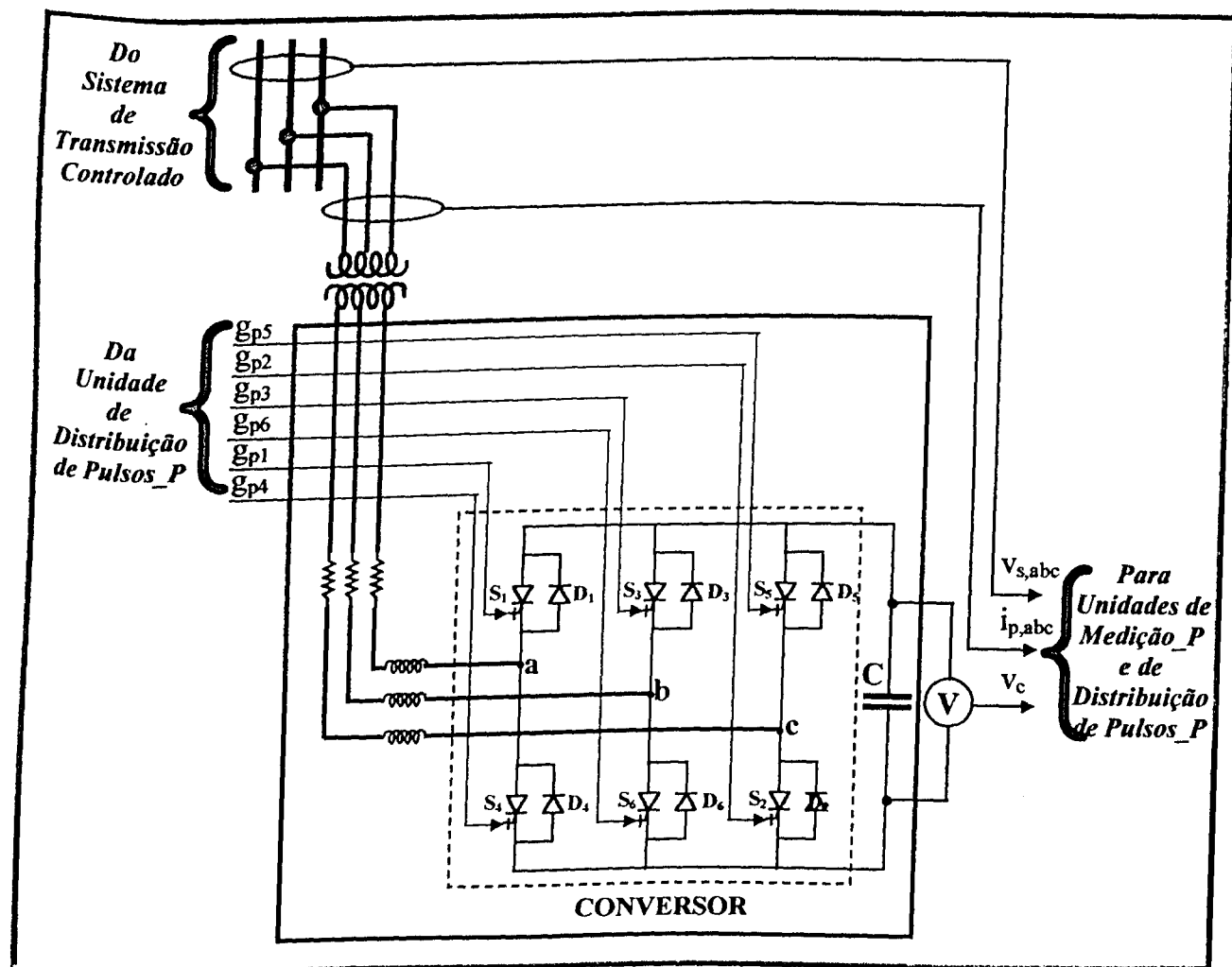


Figura 3.10 – Diagrama de blocos do *template* Unidade_Potência_P do ASVC implementado

Destaca-se ainda que, na Unidade de Potência_P encontra-se o filtro amortecido comentado anteriormente, cujo *template* representativo também foi desenvolvido em trabalhos anteriores [38]. Todavia, na figura anterior este componente foi omitido, uma vez que o mesmo não permuta informações com outras unidades.

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 tais compensadores, sob as mais diferentes condições de suprimento.

3.6.2 UNIDADE DE MEDIÇÃO_P

Esta unidade é dedicada à aquisição das tensões trifásicas no ponto de acoplamento do ASVC, das correntes trifásicas nos ramos de ligação do equipamento com o sistema e da tensão do capacitor nos terminais de corrente contínua do conversor, como mostram as figuras 3.8 a 3.10. 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_P no formato requerido pela mesma.

O *template* desenvolvido neste trabalho, que representa a referida unidade no simulador SABER é denominado por **Unidade_Medição_P**, cujo diagrama de blocos é exibido na figura 3.11. Vale observar que, os blocos deste diagrama consistem, também, de *templates* construídos durante o desenvolvimento do presente trabalho.

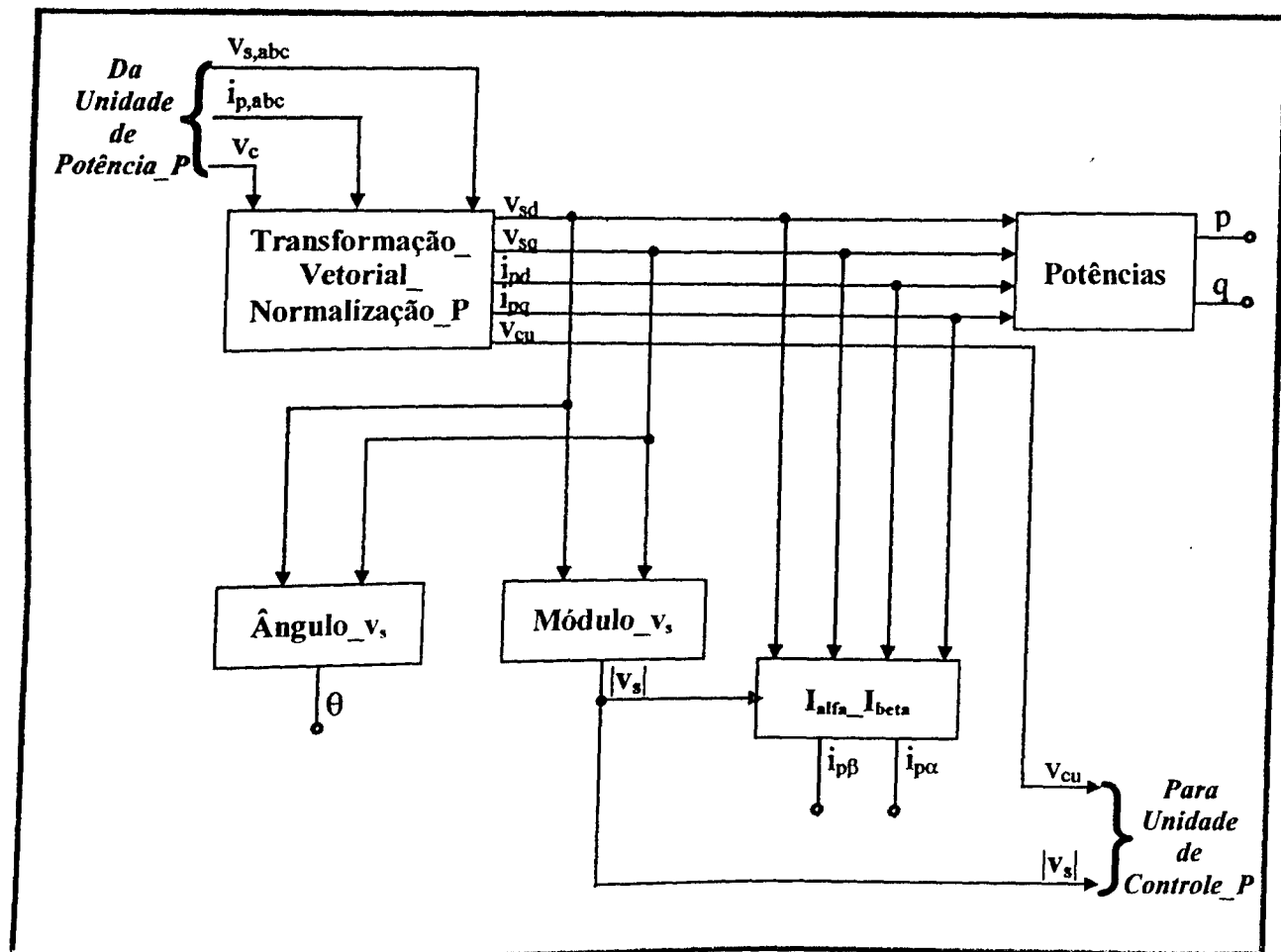
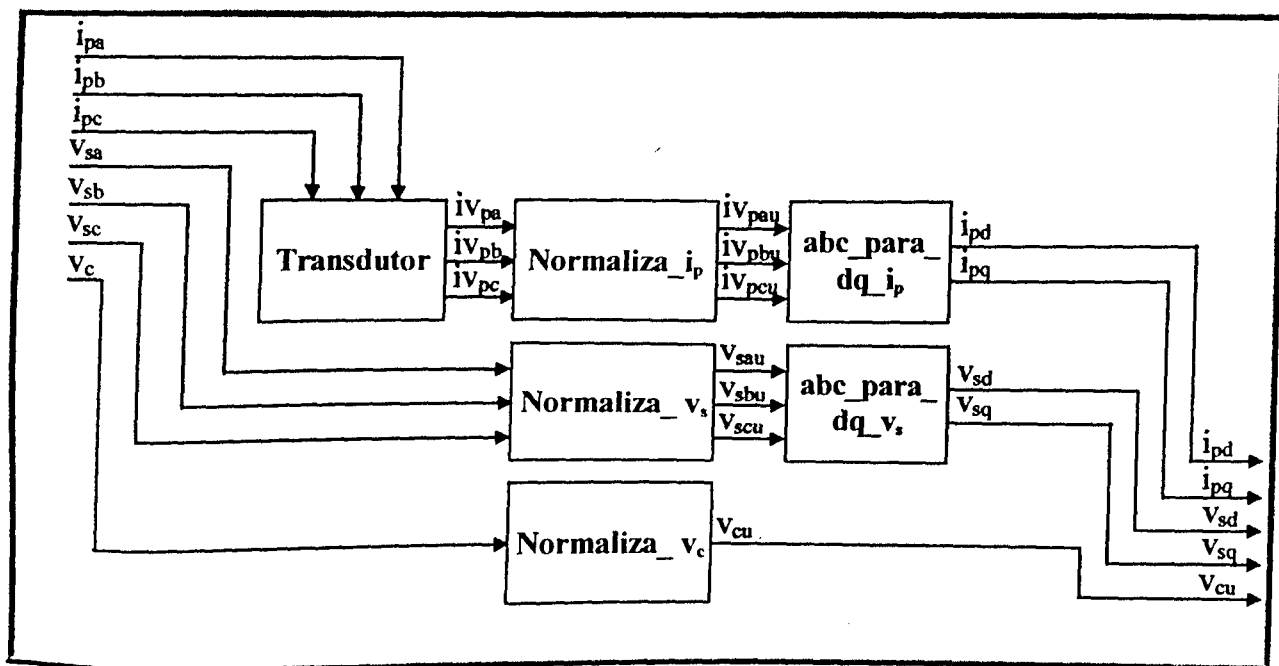


Figura 3.11 – Diagrama de blocos do *template* Unidade_Mediação_P do ASVC implementado

Do diagrama anterior pode-se identificar 5 *templates* que compõem a Unidade de Mediação_P, cujas funções são descritas na sequência:

- **Transformação_Vetorial_Normalização_P:** o diagrama de blocos evidenciando as funções deste template é mostrado na figura 3.12. 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 3.12 – Diagrama de blocos do *template* Transformação_Vetorial_Normalização_P

Tais correntes, assim como as tensões V_{sa} , V_{sb} e V_{sc} , são normalizadas nos *templates* **Normaliza_ i_p** e **Normaliza_ v_s** , respectivamente, de acordo com as equações (3.27) e (3.28).

$$iV_{pu} = \frac{iV_p}{S_{p_base} \sqrt{3} V_{ca_base}} \quad (3.27)$$

$$V_{su} = \frac{V_s}{V_{ca_base}} \quad (3.28)$$

Sendo que os valores base para potência (S_{p_base}) e tensão (V_{ca_base}) são fornecidos pelo usuário na entrada de dados do ASVC. Na sequência, as tensões e correntes trifásicas normalizadas (V_{sau} , V_{sbu} , V_{scu} , iV_{pau} , iV_{pbu} e iV_{pcu}) são transformadas para grandezas do sistema ortogonal estacionário (V_{sd} , V_{sq} , i_{pd} e i_{pq}), conforme o procedimento apresentado no Capítulo II (equações 2.6 e 2.7), através dos respectivos *templates* **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 (3.29) que está contida no *template* **Normaliza_ v_c** .

$$v_{cu} = \frac{v_c}{v_{c_base}} \quad (3.29)$$

- **Módulo_ v_s** : calcula o módulo do vetor da tensão (v_s) na barra controlada através das suas componentes v_{sd} e v_{sq} e da equação (3.30).

$$|v_s| = \sqrt{v_{sd}^2 + v_{sq}^2} \quad (3.30)$$

- **Ângulo_ v_s** : calcula o ângulo do vetor da tensão (v_s) na barra controlada através das suas componentes v_{sd} e v_{sq} e da equação (3.31).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{sq}}{v_{sd}} \right) \quad (3.31)$$

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

- **Potências**: a partir dos sinais de tensão e corrente (v_{sd} , v_{sq} , i_{pd} e i_{pq}), calcula as potências ativa (p) e reativa (q) intercambiadas entre o ASVC e o sistema CA utilizando, para tanto, as equações (3.32) e (3.33). Assim como o ângulo θ , estes sinais de potência não são emitidos para outro *template*.

$$p = \frac{3}{2} (v_{sd} i_{pd} + v_{sq} i_{pq}) \quad (3.32)$$

$$q = \frac{3}{2} (v_{sd} i_{pq} - v_{sq} i_{pd}) \quad (3.33)$$

- **I_{alfa_Ibeta}**: computa as componentes $i_{p\alpha}$ e $i_{p\beta}$ da corrente entre o ASVC e o sistema CA através das equações (3.34) e (3.35). Estas grandezas, também, são visualizadas apenas neste *template*.

$$i_{p\alpha} = \frac{(v_{sd}i_{pd} + v_{sq}i_{pq})}{|v_s|} \quad (3.34)$$

$$i_{p\beta} = \frac{(v_{sd}i_{pq} - v_{sq}i_{pd})}{|v_s|} \quad (3.35)$$

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

3.6.3 UNIDADE DE CONTROLE_P

Esta unidade, representada pelo *template* **Unidade_Control_P**, comporta a malha de controle discutida na seção 3.5, cuja saída consiste dos sinais necessários à geração dos pulsos do conversor. O diagrama de blocos representativo deste modelo é mostrado na figura 3.13.

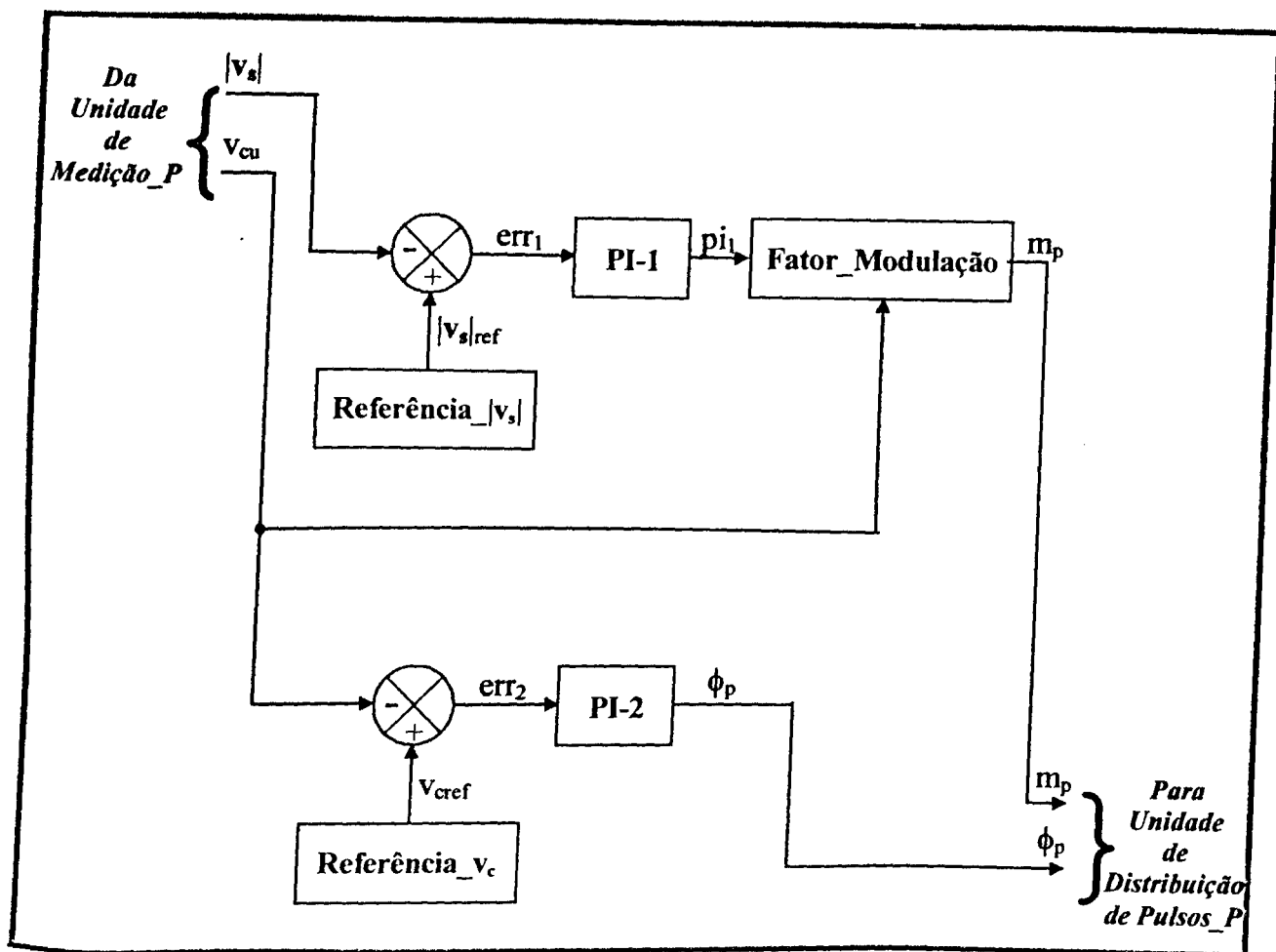


Figura 3.13 – Diagrama de blocos do *template* Unidade_Control_P do ASVC implementado

Observando a figura 3.13 constata-se a presença de duas malhas independentes para o controle do módulo da tensão CA $|v_s|$ (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 $|v_s|$, proveniente da Unidade de Medição_P, com o valor de referência, oriundo do *template* **Referência_** $|v_s|$ que gera um sinal constante estipulado pelo usuário. O erro resultante de tal comparação (err_1) é enviado para o bloco proporcional/integral (**PI-1**) que altera a sua saída (pi_1) no sentido de suprimir o referido erro ($|v_s| = |v_s|_{ref}$). Este sinal pi_1 é processado pelo *template* **Fator_Modulação**, através da equação (3.36) [39], de modo que o resultado seja o próprio fator de modulação (m_p) requerido para a supressão do erro err_1 .

$$m_p = 2 \frac{\pi_1 (v_{ca_base} \sqrt{3})}{v_{cu} (v_{c_base})} \quad (3.36)$$

Vale observar que, na equação anterior, as grandezas v_{ca_base} e v_{c_base} são as mesmas utilizadas no *template* **Transformação_Vetorial_Normalização_P** da Unidade de Medição_P 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 (err_2) que, neste caso é a entrada do controlador (**PI-2**). O produto deste último bloco (ϕ_p) corresponde ao defasamento necessário à tensão entregue pelo conversor, 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 (ϕ_p) são enviados à Unidade de Distribuição de Pulsos_P.

3.6.4 UNIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE PULSOS_P

A partir dos sinais enviados por **Unidade_Control_P**, a presente unidade, representada no simulador SABER pelo *template* **Unidade_Distribuição_Pulsos_P**, produz os pulsos necessários ao disparo das chaves na ponte conversora. Para melhor visualização da topologia e funcionamento deste *template*, a figura 3.14 traz o seu respectivo diagrama de blocos.

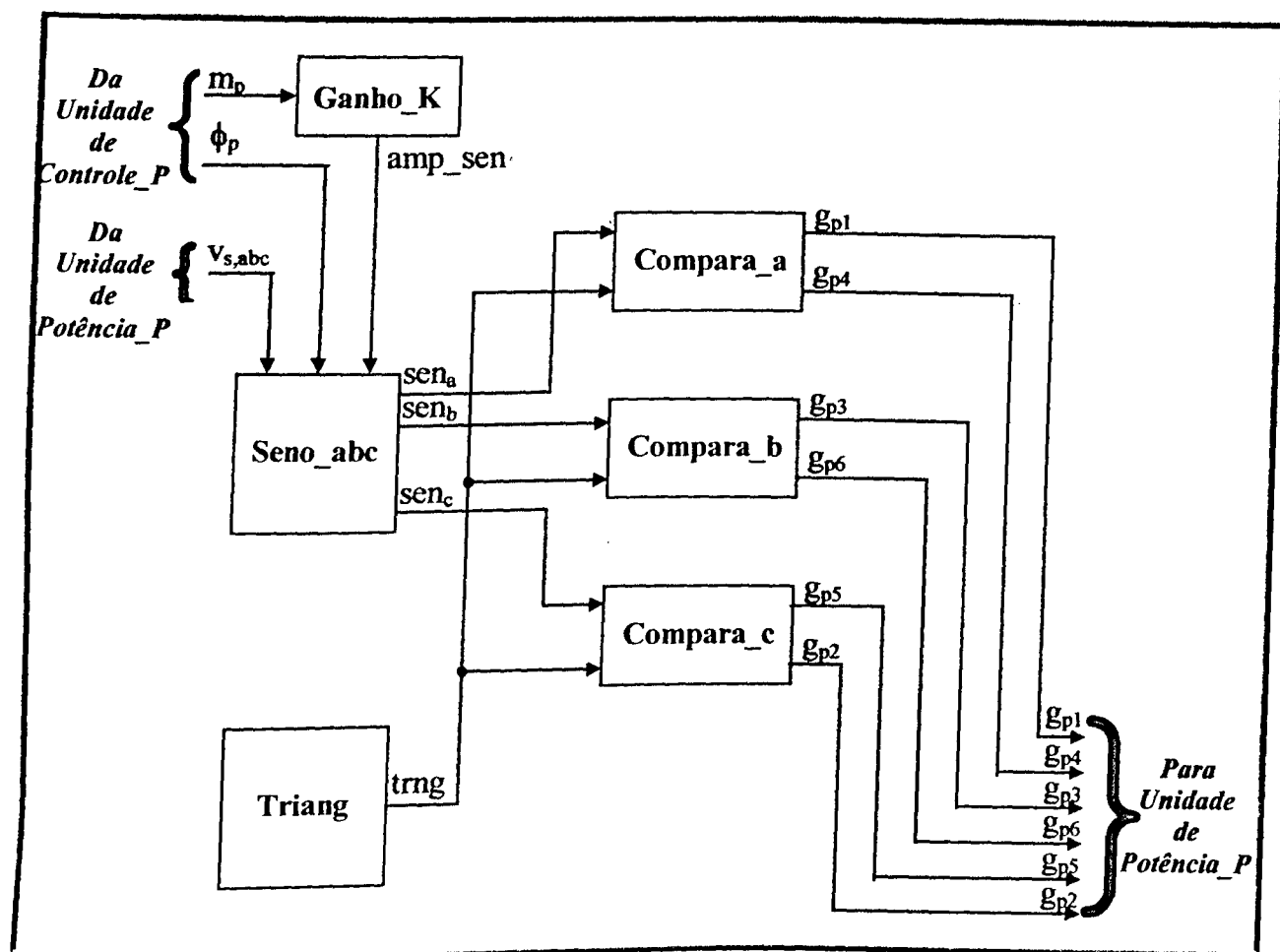


Figura 3.14 – Diagrama de blocos do template *Unidade_Distribuição_Pulsos_P* do ASVC implementado

O chaveamento da ponte conversora emprega a técnica de PWM senoidal, que consiste da comparação de uma onda triangular de alta frequência (portadora) com uma onda senoidal (senóide de controle) à frequência industrial (60 ou 50Hz) para a geração dos pulsos. A figura 3.15 ilustra a situação em que a onda triangular tem frequência de 1,8kHz e amplitude igual a amp_tri , enquanto as ondas senoidais, defasadas entre si de 120 graus, possuem frequência de 60Hz e amplitudes iguais a amp_sen .

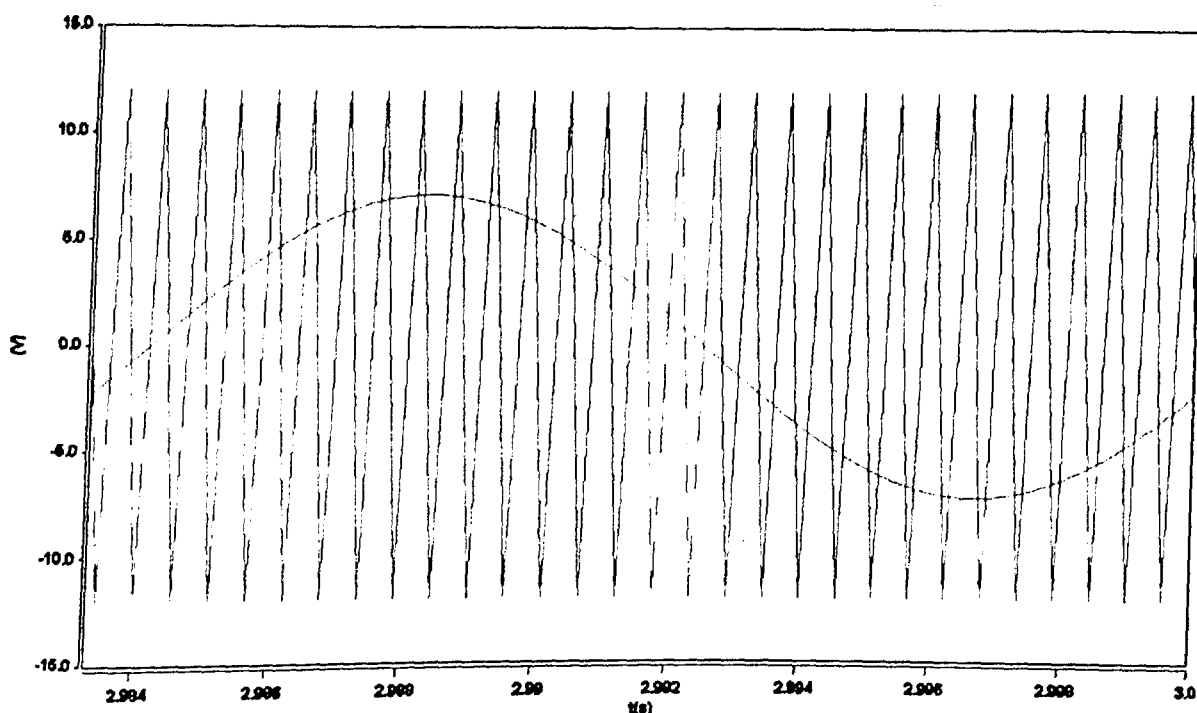


Figura 3.15 – Sinais de comparação para o disparo das chaves

O mesmo fator de modulação (m_p), definido anteriormente na equação (3.36), também equivale à relação entre as amplitudes das ondas senoidais e da onda triangular, como informa a equação (3.37).

$$m_p = \frac{\text{amp_sen}}{\text{amp_tri}} \quad (3.37)$$

Devido a isso, o sinal m_p , oriundo do *template* **Unidade_Control_P**, 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 graus, a serem geradas nas suas saídas. É necessário ressaltar que, o sinal ϕ_p , enviado por **Unidade_Control_P**, define o defasamento entre a senóide de controle da fase “a” (sen_a) e a tensão da mesma fase no barramento ao qual o ASVC está conectado. Já o *template*

Triang produz na sua saída (**trng**) a referida onda portadora cujas amplitude (**amp_tri**) e frequência 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 3.14. Assim, a lógica implementada no *template* **Compara_a** consiste em:

```
SE (sena > trng) ENTÃO
    gp1 = 1      # chave S1 (Unidade_Potência_P) fechada
    gp4 = 0      # chave S4 (Unidade_Potência_P) aberta
SENÃO
    gp1 = 0      # chave S1 (Unidade_Potência_P) aberta
    gp4 = 1      # chave S4 (Unidade_Potência_P) fechada
FIM_SE
```

O mesmo algoritmo acima é aplicado aos *templates* **Compara_b** e **Compara_c**, resguardando-se a relação entre as senóides de controle e os respectivos sinais de gatilho.

3.7 ESTUDOS DE CASOS

Esta seção é voltada para os estudos relacionados com o desempenho operacional do ASVC no sentido de compensar condições diversas na rede de suprimento, tais como afundamentos e elevações momentâneos e equilibrados de tensão e, ainda, prover a regulação desta grandeza no barramento CA ao qual encontra-se conectado. Para tanto, serão feitas simulações computacionais de um sistema elétrico que, apesar de fictício, representa um complexo típico para o emprego do compensador estático em questão, cujo modelo e implementação computacional foram apresentados nas subseções anteriores.

3.7.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO

A figura 3.16 ilustra o diagrama unifilar do complexo elétrico simulado, o qual, como se vê, consiste de uma porção em anel de um sistema interligado, onde nas barras B1 e B4 encontra-se o restante do sistema representado por fontes de tensão e níveis de curto-circuito, os quais são denominados por CONCESS_1 e CONCESS_4, respectivamente.

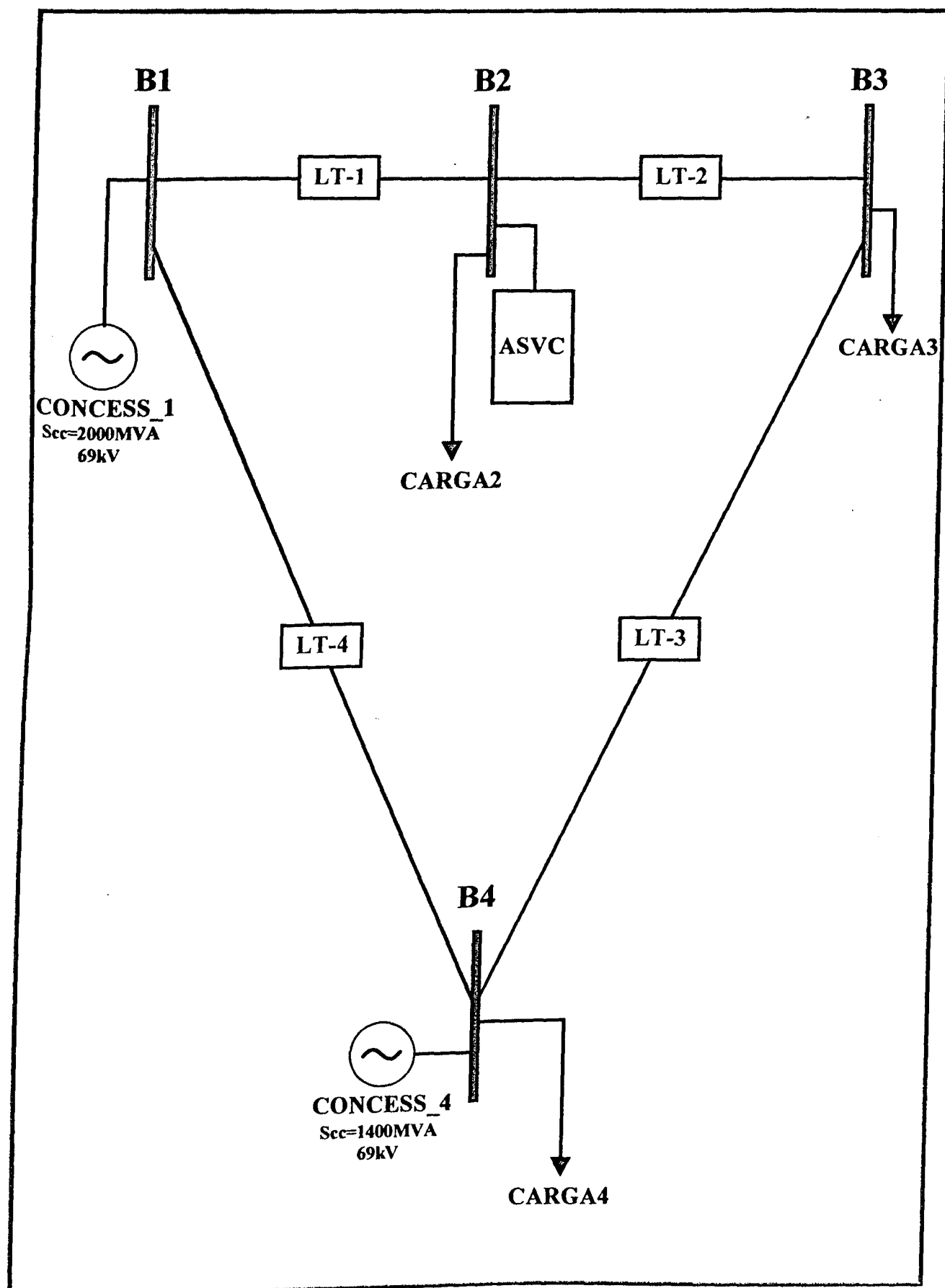


Figura 3.16 – Diagrama unifilar do sistema simulado

A interligação do anel é feita através de quatro linhas (LT1, LT2, LT3 e LT4), cujos dados encontram-se na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados para simulação das linhas de transmissão

Linha	Resistência [Ω]	Indutância [mH]	Linha	Resistência [Ω]	Indutância [mH]
LT1	1,0	60,0	LT3	2,0	150,0
LT2	1,0	90,0	LT4	1,0	90,0

Com relação às cargas, estas se encontram alocadas nas barras B2, B3 e B4 e seus dados são fornecidos na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados para simulação das cargas

Carga	Barra	Potência Nominal [MVA]	Fator de Potência	Tensão Nominal [kV]
CARGA2	B2	20,0	0,92	69
CARGA3	B3	40,0	0,95	69
CARGA4	B4	15,0	0,92	69

O ASVC foi conectado na barra B2, já que estudos preliminares indicaram ser esta a barra mais fragilizada sob o ponto de vista de sustentação de tensão. Desse modo, um detalhe do arranjo utilizado para este equipamento no contexto do sistema simulado é mostrado na figura 3.17, e as informações necessárias à simulação do mesmo são listadas na tabela 3.3.

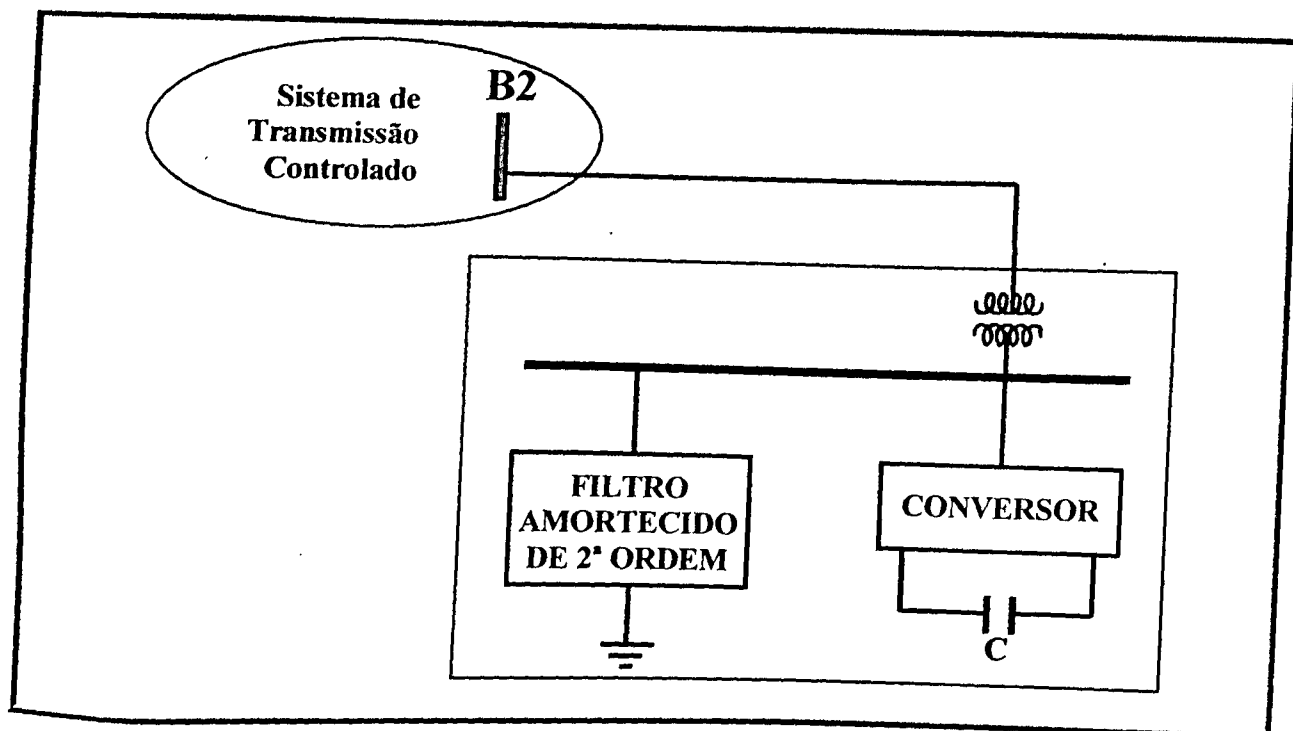


Figura 3.17 – Detalhamento do arranjo do ASVC no contexto do sistema simulado

Tabela 3.3 – Dados para simulação do ASVC

Dados de entrada		Valor	Unidade
Tensão no primário do transformador de conexão		69	[kV]
Tensão no secundário do transformador de conexão		3,3	[kV]
Resistência percentual do transformador de conexão		0,5	[%]
Reatância percentual do transformador de conexão		8	[%]
Potência nominal do transformador de conexão		35	[MVA]
Capacitância do capacitor nos terminais CC		128	[mF]
Tensão nominal do capacitor nos terminais CC		15	[kV]
Tensão CA base		69	[kV]
Tensão CC base		15	[kV]
Potência base		35	[MVA]
Frequência de chaveamento do conversor		1,8	[kHz]
Filtro amortecido de 2ª ordem	R1	0,001	[pΩ]
	R2	0,1872	[Ω]
	L1	17,5296	[μH]
	C1	500	[μF]

3.7.2 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

A partir do arranjo físico e características dos componentes elétricos apresentados na seção anterior, procedeu-se a um conjunto de estudos que podem ser agrupados em cinco casos identificados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Identificação dos casos simulados

Caso	Objetivo	Descrição		
		Intervalo I	Intervalo II	Intervalo III
		1,8 – 2 s	2 – 3 s	3 – 4 s
1	Verificar o desempenho do ASVC na regulação da tensão na barra controlada (B2) ao acompanhar um determinado valor de referência	Operação do sistema em condições normais, estando o ASVC com a tensão de referência CA igual à tensão original do barramento ($V_{s_ref}=0,91\text{ pu}$)	Em 2s a tensão CA de referência do ASVC é alterada para 1pu. ($V_{s_ref}=1,0\text{ pu}$)	Em 3s a tensão CA de referência do ASVC é retornada para o valor original do barramento ($V_{s_ref}=0,91\text{ pu}$)
2	Observar o comportamento do sistema quando submetido a um afundamento momentâneo de tensão sem a presença do ASVC	Operação do sistema em condições normais (sem ASVC)	Em 2s é aplicado um afundamento de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (sem ASVC)	Em 3s o afundamento de 10% é eliminado da barra B2 (sem ASVC)
3	Observar o comportamento do sistema quando submetido a um afundamento momentâneo de tensão com a presença do ASVC	Operação do sistema em condições normais (com ASVC)	Em 2s é aplicado um afundamento de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (com ASVC)	Em 3s o afundamento de 10% é eliminado da barra B2 (com ASVC)
4	Observar o comportamento do sistema quando submetido a uma elevação momentânea de tensão sem a presença do ASVC	Operação do sistema em condições normais (sem ASVC)	Em 2s é aplicada uma elevação de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (sem ASVC)	Em 3s a elevação de 10% é eliminada da barra B2 (sem ASVC)
5	Observar o comportamento do sistema quando submetido a uma elevação momentânea de tensão com a presença do ASVC	Operação do sistema em condições normais (com ASVC)	Em 2s é aplicada uma elevação de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (com ASVC)	Em 3s a elevação de 10% é eliminada da barra B2 (com ASVC)

3.7.3 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados apresentados a seguir exibem as tensões na barra B2 (ponto de acoplamento entre o ASVC e o sistema CA) e nos terminais do capacitor do ASVC, bem como a potência reativa oriunda da operação deste equipamento, as quais foram encontradas para as situações descritas anteriormente. Vale ressaltar que, as grandezas referentes ao ASVC serão mostradas, obviamente, apenas quando o mesmo se encontrar presente no sistema (Casos 1, 3 e 5).

Diante do exposto, tais resultados são agrupados, também, em cinco conjuntos de acordo com os casos simulados.

3.7.3.1 – Caso 1 – Regulação de tensão através do ASVC

Como mencionado na tabela 3.4, o presente caso objetiva verificar o desempenho do ASVC na regulação da tensão na barra controlada (B2) ao acompanhar um determinado valor de referência. Para tanto, aos 2 segundos de simulação, tal valor é elevado de 0,91p.u. (tensão original do barramento sem a presença do ASVC) para 1,0p.u, onde é mantido durante 1 segundo. Aos 3 segundos a mesma referência é reduzida para o referido valor original de tensão no barramento, a fim de se enfatizar a alta possibilidade de manipulação desta grandeza.

Em face deste cenário, a figura 3.18 ilustra o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B2 (ponto de acoplamento comum entre o ASVC e o sistema CA), durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s). Já a figura 3.19 apresenta um “zoom” da mesma grandeza nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação, a saber: 1,8 a 2s, 2 a 3s e 3 a 4s.

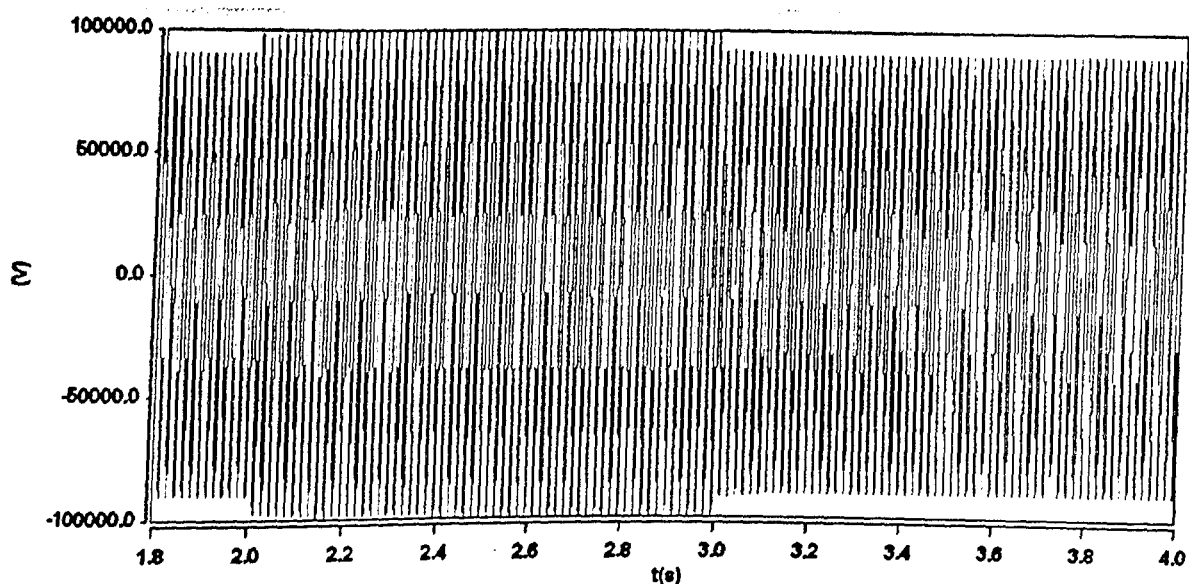


Figura 3.18 – Tensão entre fases na barra B2 – regulação de tensão

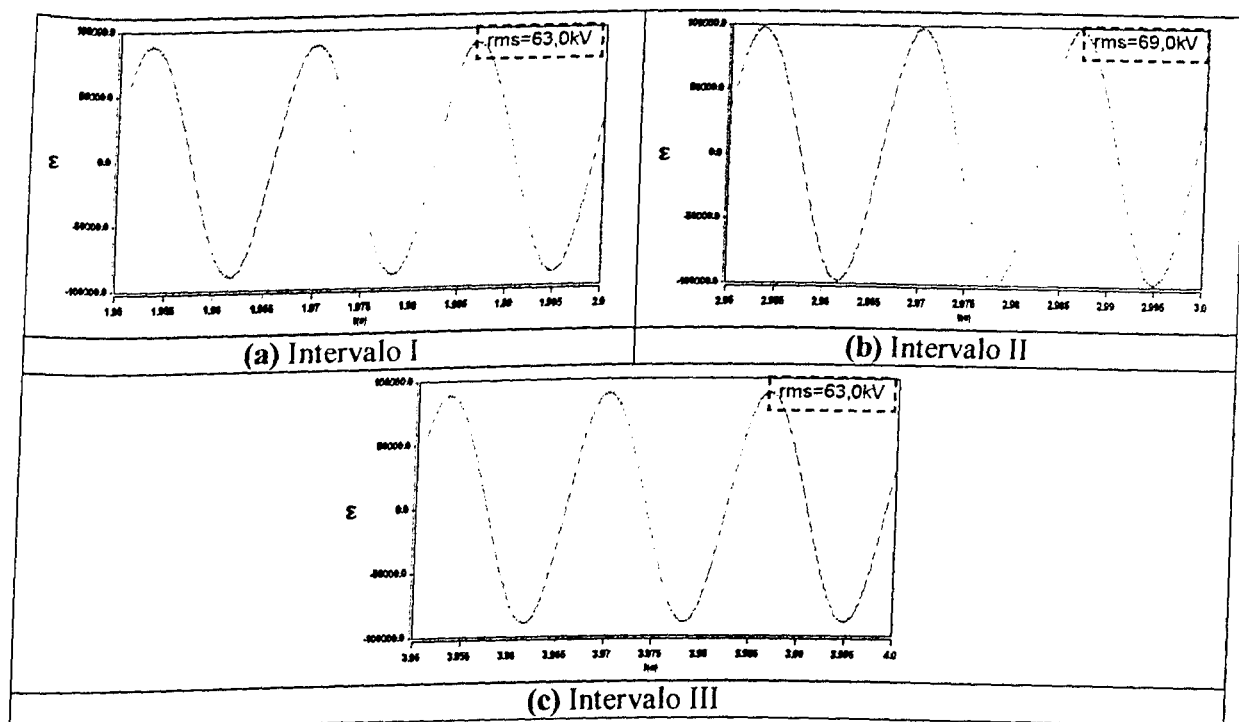


Figura 3.19 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de cada intervalo) – regulação de tensão

Das figuras 3.18 e 3.19 verifica-se que, a tensão eficaz na barra B2 encontra-se em níveis relativamente baixos (63kV) até que, a partir de 2s, acompanhando a referência do ASVC, tal grandeza controlada passa a apresentar o valor de 69kV (1p.u. da tensão nominal do barramento). Uma

redução nesse valor eficaz é observada a partir de 3s devido, mais uma vez, a alteração do patamar de referência do compensador. Tais fatos podem ser melhor visualizados na figura 3.20, que mostra o comportamento da tensão eficaz na barra B2 juntamente com a referência do ASVC.

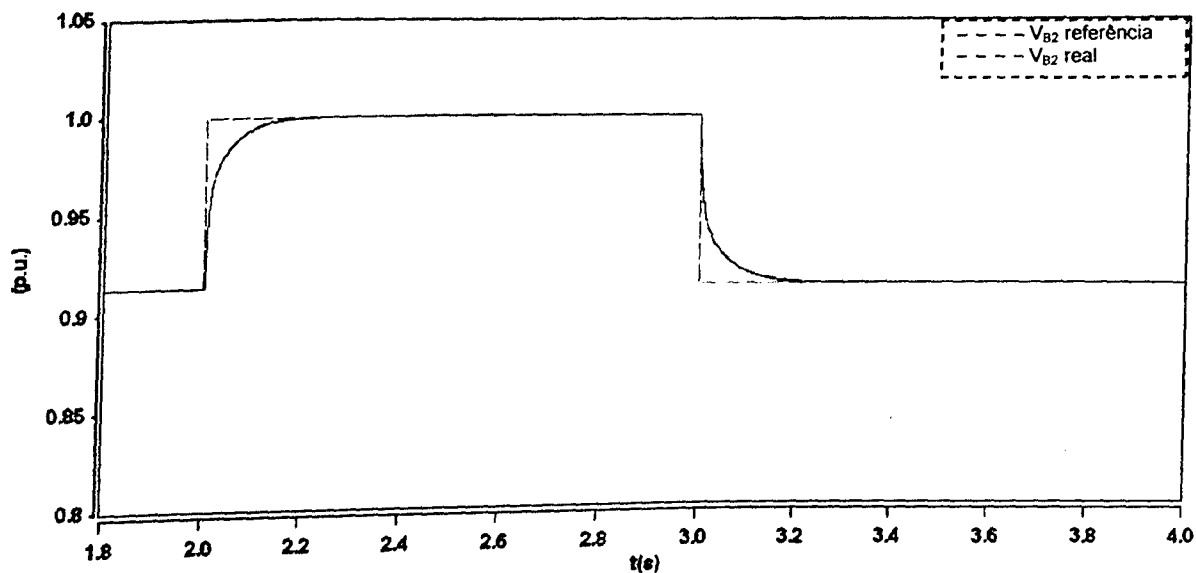


Figura 3.20 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69$ kV) – regulação de tensão

A figura 3.21 ilustra o fluxo de potência reativa entre o ASVC e o sistema CA para que a presente regulação de tensão seja efetuada.

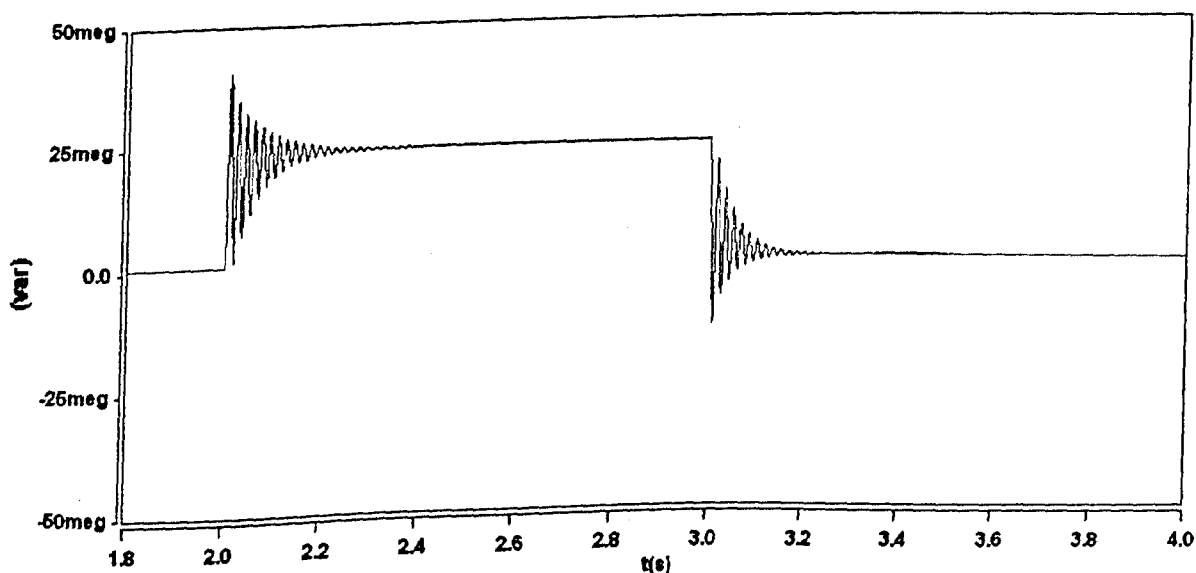


Figura 3.21 – Potência reativa entre o ASVC e o sistema CA – regulação de tensão

Da figura anterior pode-se verificar uma injeção de potência reativa de 24,5Mvar, por parte do compensador estático, durante o intervalo em que uma elevação da tensão no barramento é requerida (**Intervalo II**). Um outro aspecto a ser observado é que, tal potência reativa apresenta uma oscilação transitória nos instantes que se sucedem as manobras. Este comportamento se deve a oscilações da corrente presente no ramo de conexão paralela já que, como constatado nas figuras 2.18 e 2.20, a tensão controlada no ponto de acoplamento do equipamento com o sistema se apresenta bastante estável. De fato, este comportamento estável da referida tensão foi um dos requisitos para o ajuste dos ganhos dos controladores proporcional/integral utilizados.

A figura 3.22 mostra a tensão V_c nos terminais do capacitor do ASVC.

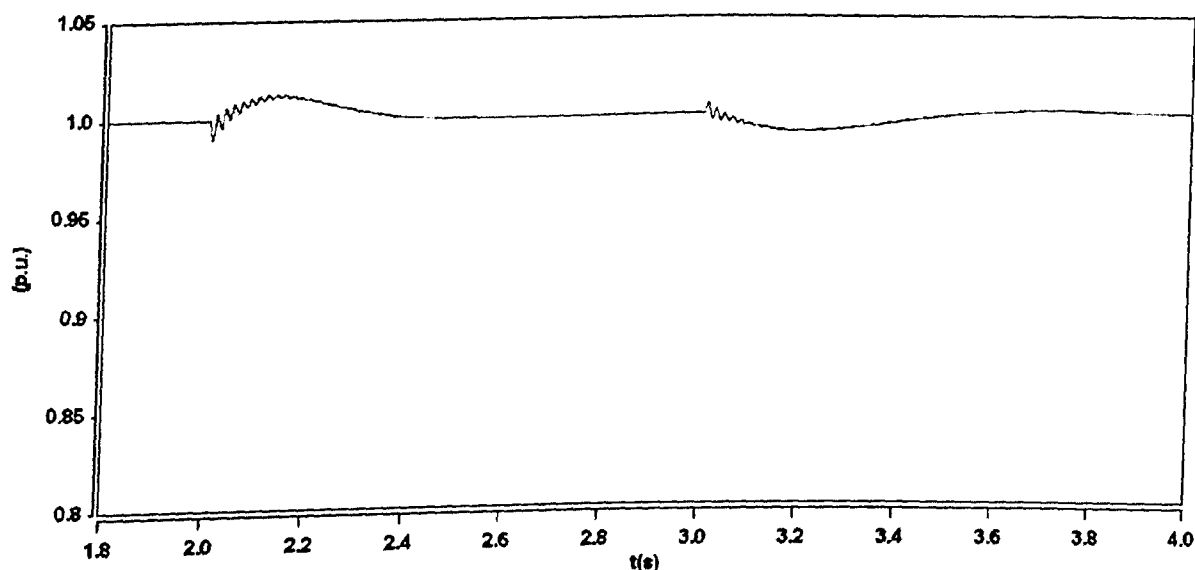


Figura 3.22 – Tensão nos terminais do capacitor do ASVC ($V_{base}=15kV$) – regulação de tensão

O gráfico acima evidencia que, apesar da ocorrência de algumas oscilações ($\pm 0,01$ p.u.) nos instantes em que a referência de tensão CA é alterada, o controle utilizado é eficaz na manutenção da tensão V_c em 1,0p.u..

Para que isso ocorra, verifica-se uma alteração no fluxo de potência ativa entre o ASVC e o sistema CA, o qual pode ser constatado na Figura 3.23.

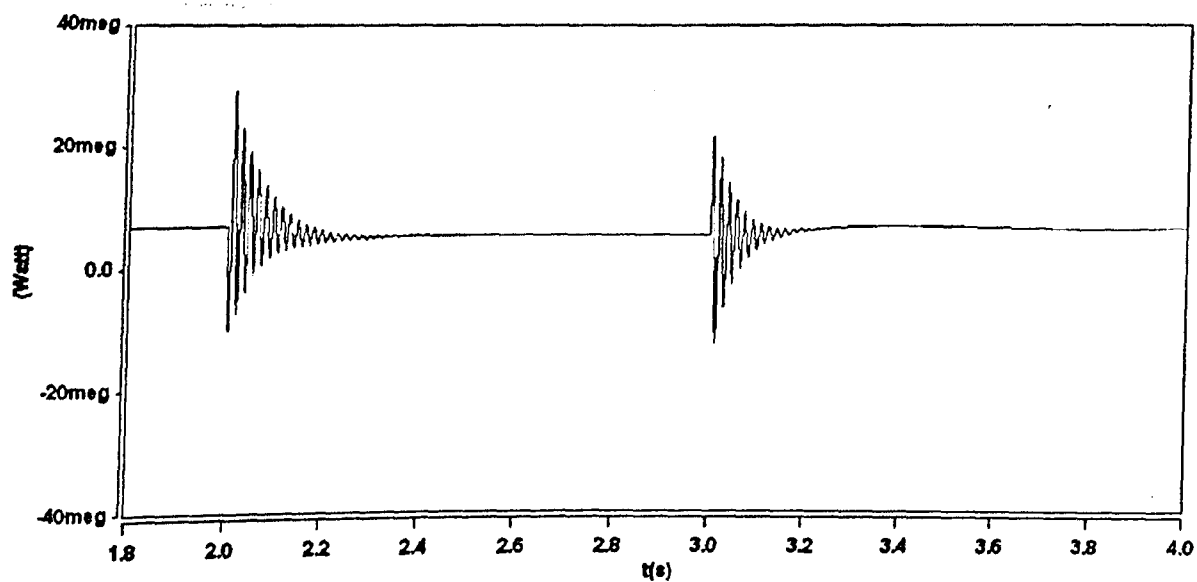


Figura 3.23 – Potência ativa entre o ASVC e o sistema CA – regulação de tensão

3.7.3.2 – Caso 2 – Afundamento de tensão sem a presença do ASVC

O objetivo deste caso é observar o comportamento da tensão na barra B2 quando o sistema sob análise é submetido a um afundamento momentâneo de tensão e encontra-se desprovido da compensação através do ASVC. Dessa forma, em $t = 2\text{s}$ aplica-se tal distúrbio no referido barramento com magnitude e duração iguais a 10% e 1 segundo, respectivamente.

O resultado de tais manobras é indicado na figura 3.24 que ilustra o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B2 durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s). Além disso, a figura 3.25 apresenta um “zoom” da mesma grandeza nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação.

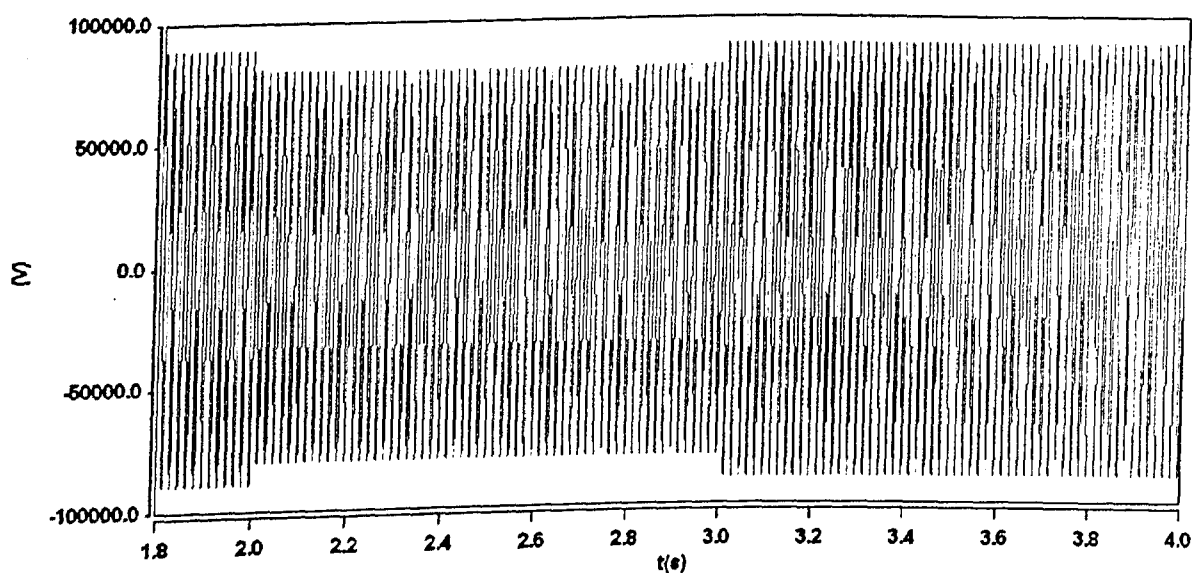


Figura 3.24 – Tensão entre fases na barra B2 – afundamento de tensão sem ASVC

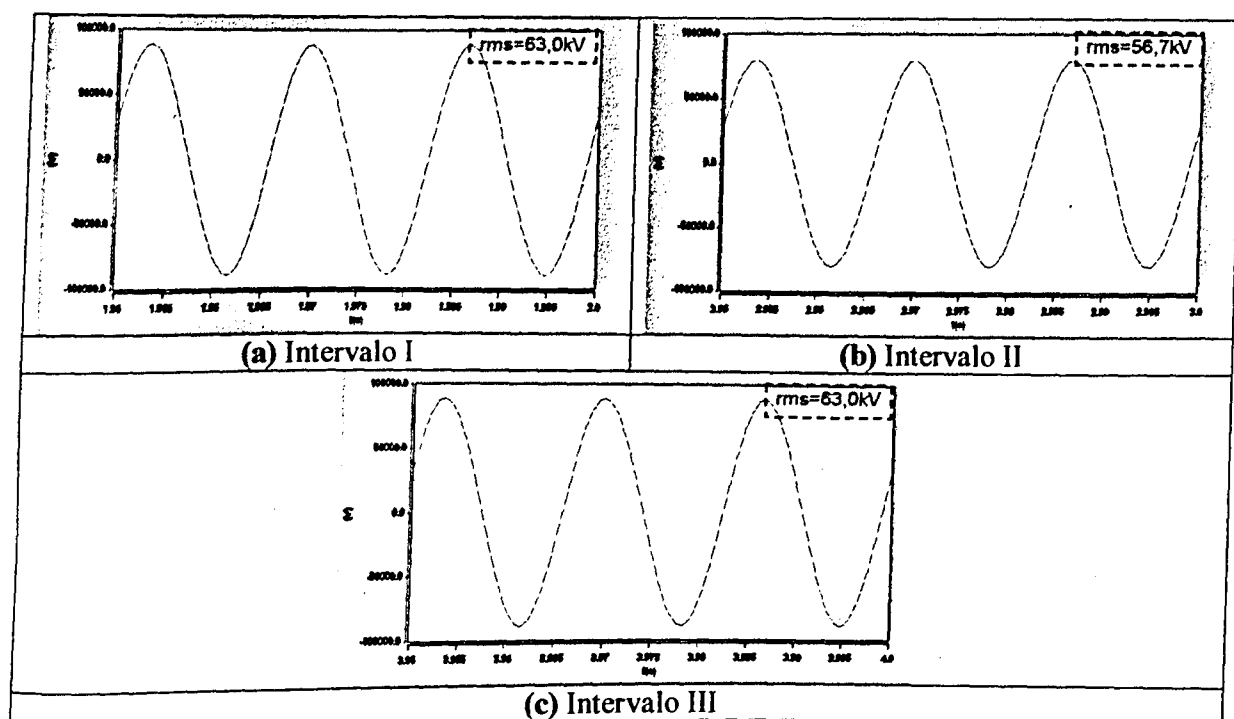


Figura 3.25 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de cada intervalo) – afundamento de tensão sem ASVC

Das figuras 3.24 e 3.25 observa-se que, como não há um controle da tensão barra B2, tal valor, que já se encontrava em 63kV (0,91p.u.), cai para 56,7kV (0,82p.u.) durante a aplicação do afundamento. Esta tensão retoma o seu valor original, apenas, quando o referido distúrbio é eliminado em $t = 3s$. Isto pode ser constatado, também, pela figura 3.26.

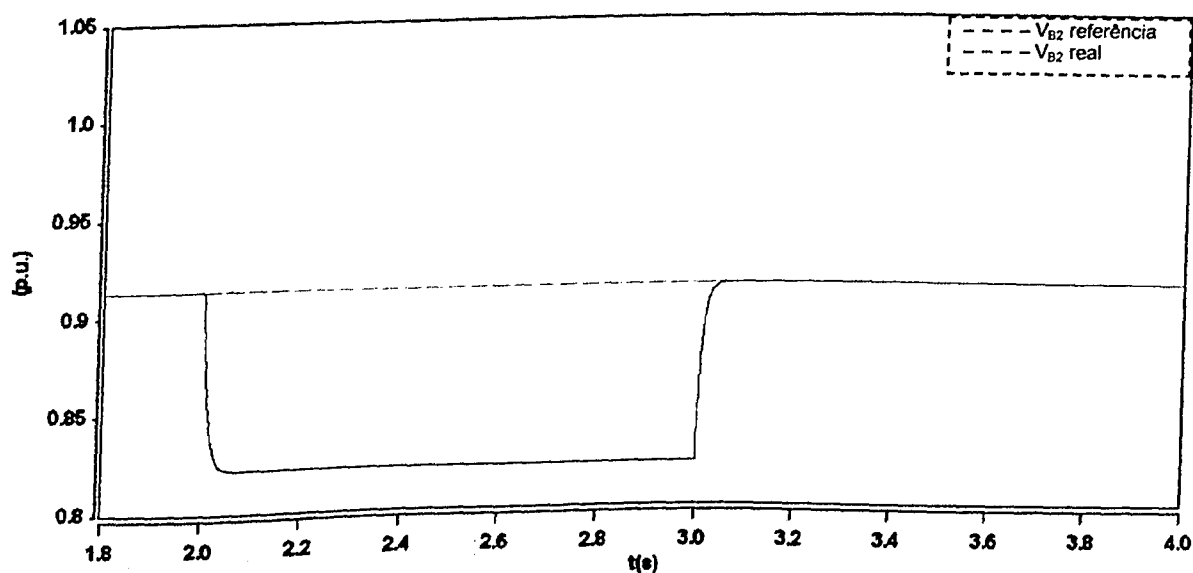


Figura 3.26 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – afundamento de tensão sem ASVC

3.7.3.3 – Caso 3 – Afundamento de tensão com a presença do ASVC

Assim como na seção anterior, o comportamento da tensão na barra B2 é analisado quando, aos 2 segundos de simulação, o sistema sob análise é submetido a um afundamento momentâneo de tensão de 10% e duração de 1 segundo. Neste caso, todavia, o compensador estático está presente, o que caracteriza uma tensão controlada no referido barramento.

Com isso, a figura 3.27 exibe o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B2 durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s) e, de forma complementar, a figura 3.28 fornece um “zoom” da mesma grandeza nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação.

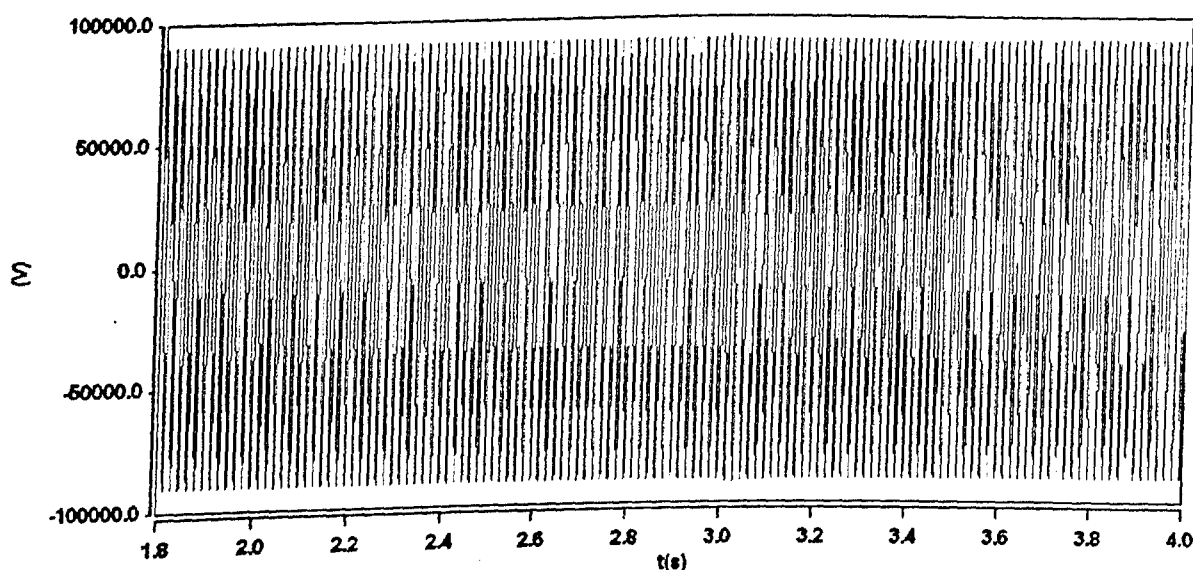


Figura 3.27 – Tensão entre fases na barra B2 – afundamento de tensão com ASVC

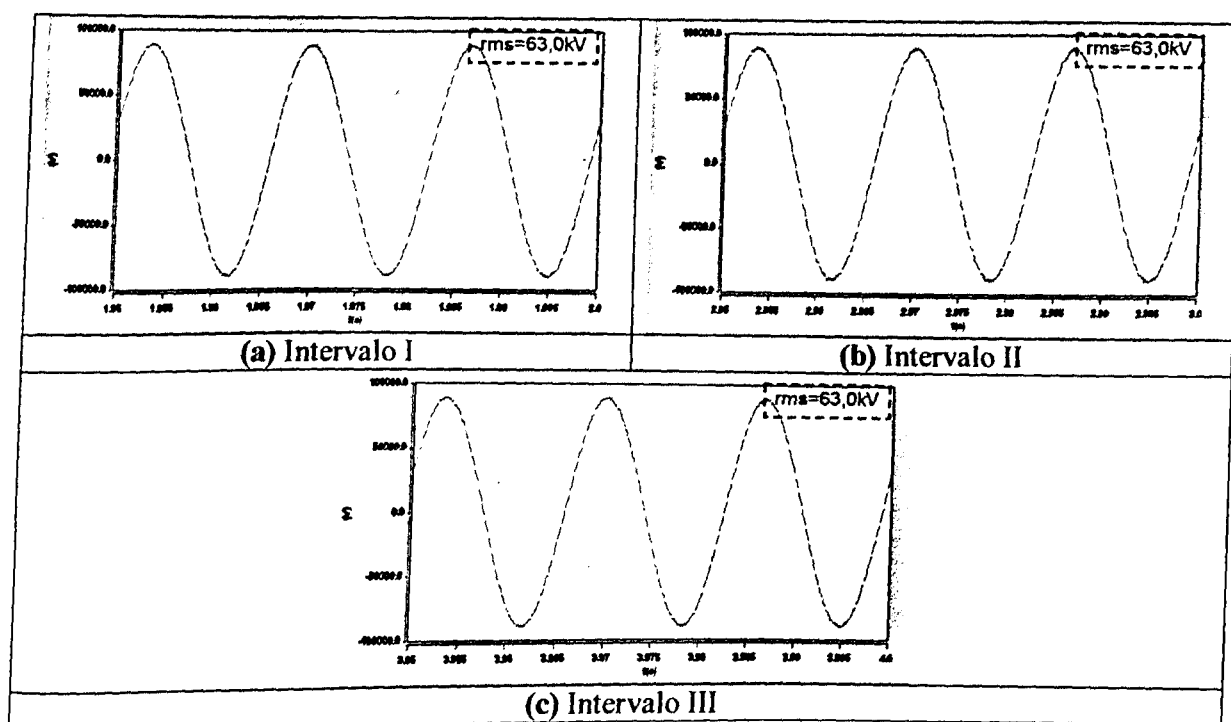


Figura 3.28 –Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de cada intervalo) – afundamento de tensão com ASVC

Das figuras 3.27 e 3.28 pode se constatar a nítida eficácia do compensador avançado em manter a tensão na barra B2 em um valor constante 63kV (0,91p.u.), mesmo durante a imposição de um afundamento sobre a mesma. Além disso, verifica-se na figura 3.29 que, apenas de uma forma transitória, tal grandeza experimenta um valor de 0,9p.u. em $t = 2s$, que pode ser considerado irrisório se comparado com seu valor original e com a magnitude do afundamento de tensão. Quando o distúrbio é eliminado em $t = 3s$, é possível observar uma pequena elevação (0,93 p.u.) na tensão monitorada, o que não representa maiores inconvenientes.

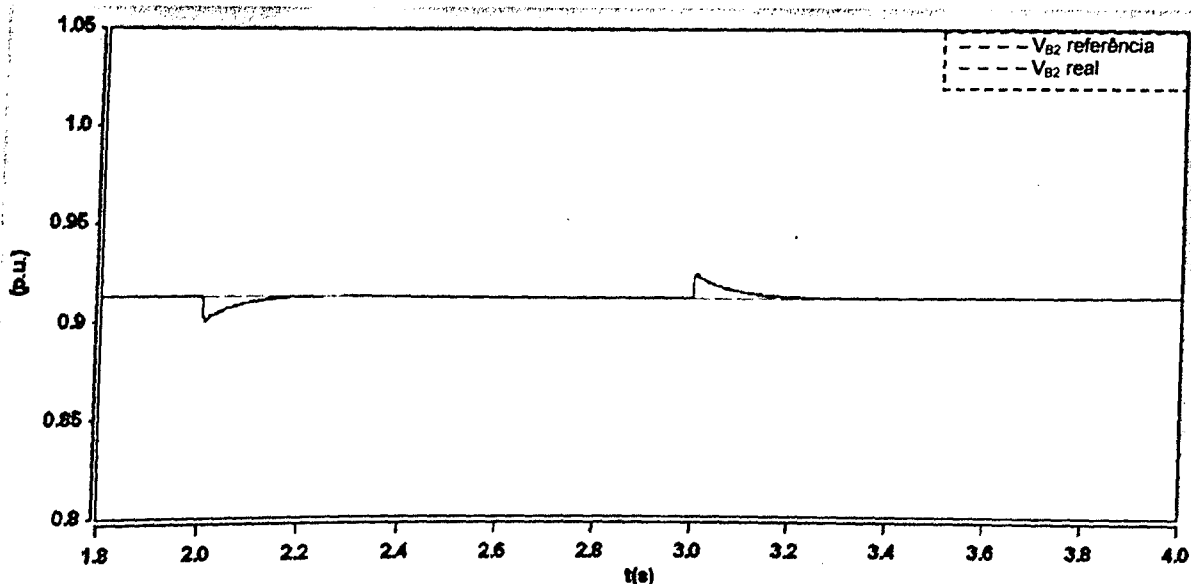


Figura 3.29 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – afundamento de tensão com ASVC

Para que o controle da tensão na barra B2 seja bem sucedido, é necessária uma injeção de potência reativa (24Mvar), por parte do ASVC, durante os instantes de duração da perturbação (**Intervalo II**). Esta afirmação é corroborada pela figura 3.30.

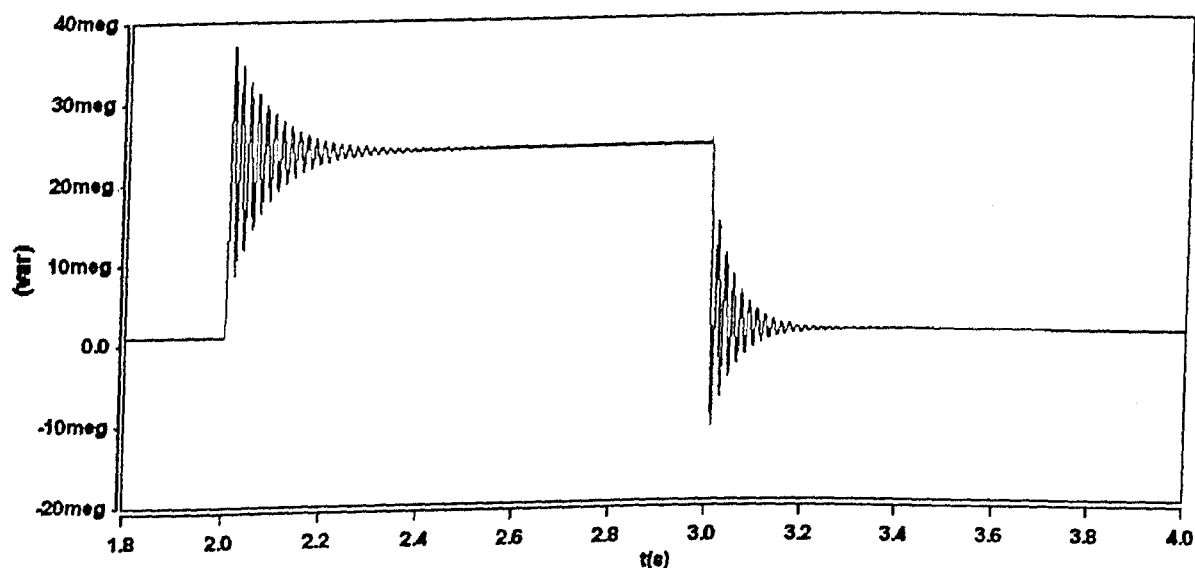


Figura 3.30 – Potência reativa entre o ASVC e o sistema CA – afundamento de tensão com ASVC

A figura 3.31 mostra a tensão V_c nos terminais do capacitor do ASVC a qual, também neste caso, foi mantida praticamente constante, a despeito da

ocorrência de picos transitórios irrelevantes ($\pm 0,008$ p.u.) nos instantes de aplicação e eliminação do distúrbio em questão.

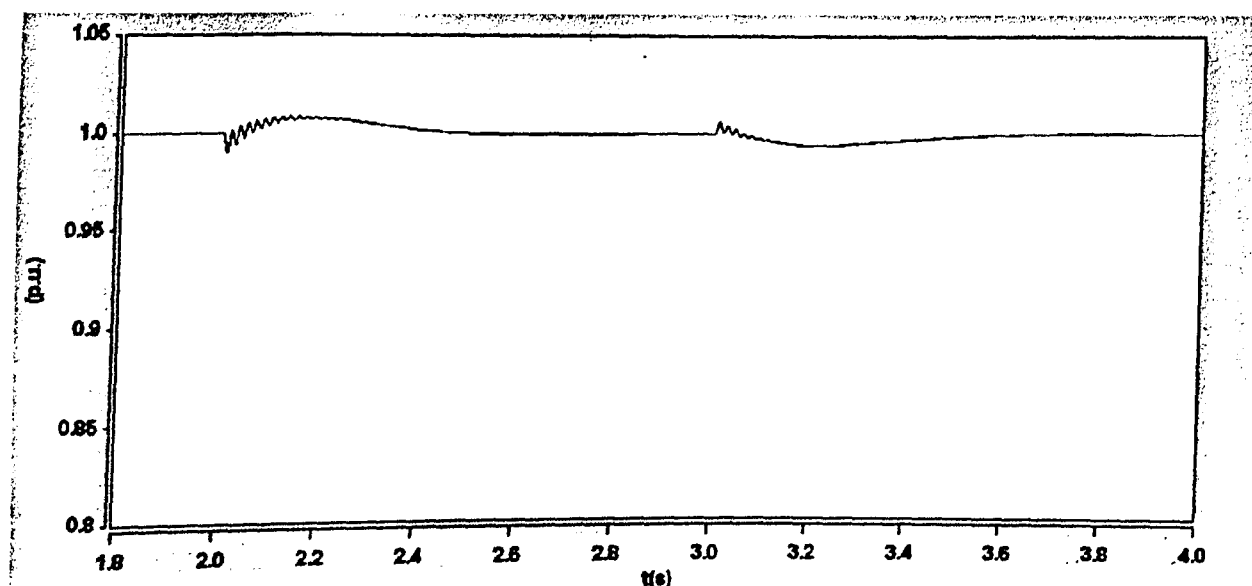


Figura 3.31 – Tensão nos terminais do capacitor do ASVC ($V_{base}=15kV$) – afundamento de tensão com ASVC

A tensão V_c é sustentada em um valor constante pela alteração do fluxo de potência ativa entre o ASVC e o sistema CA, como mostra a Figura 3.32.

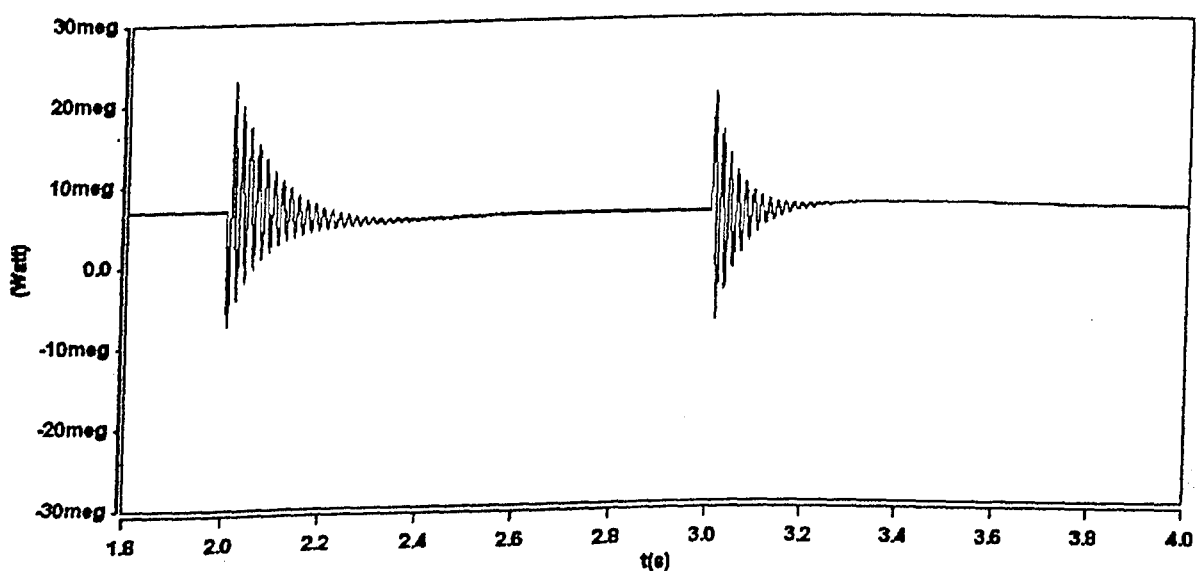


Figura 3.32 – Potência ativa entre o ASVC e o sistema CA – afundamento de tensão com ASVC

3.7.3.4 – Caso 4 – Elevação de tensão sem a presença do ASVC

Neste caso as análises envolvem os efeitos da aplicação de uma elevação momentânea de tensão sobre a barra B2 quando da ausência do ASVC. Nesse sentido, em $t = 2s$ é provocada a ocorrência de tal evento no referido barramento cuja intensidade é de 10% com duração de 1 segundo.

O perfil da tensão entre as fases A e B na barra B2, durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s), oriundo de tais manobras, é exibido na figura 3.33.

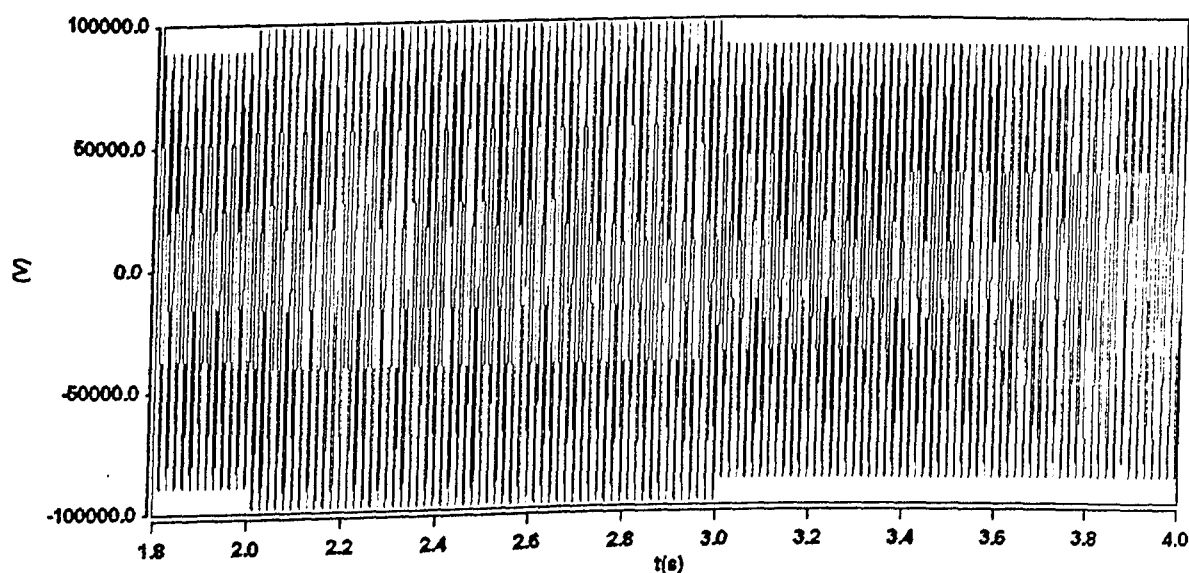


Figura 3.33 – Tensão entre fases na barra B2 – elevação de tensão sem ASVC

Ainda, a figura 3.34 apresenta um “zoom” da mesma tensão nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação.

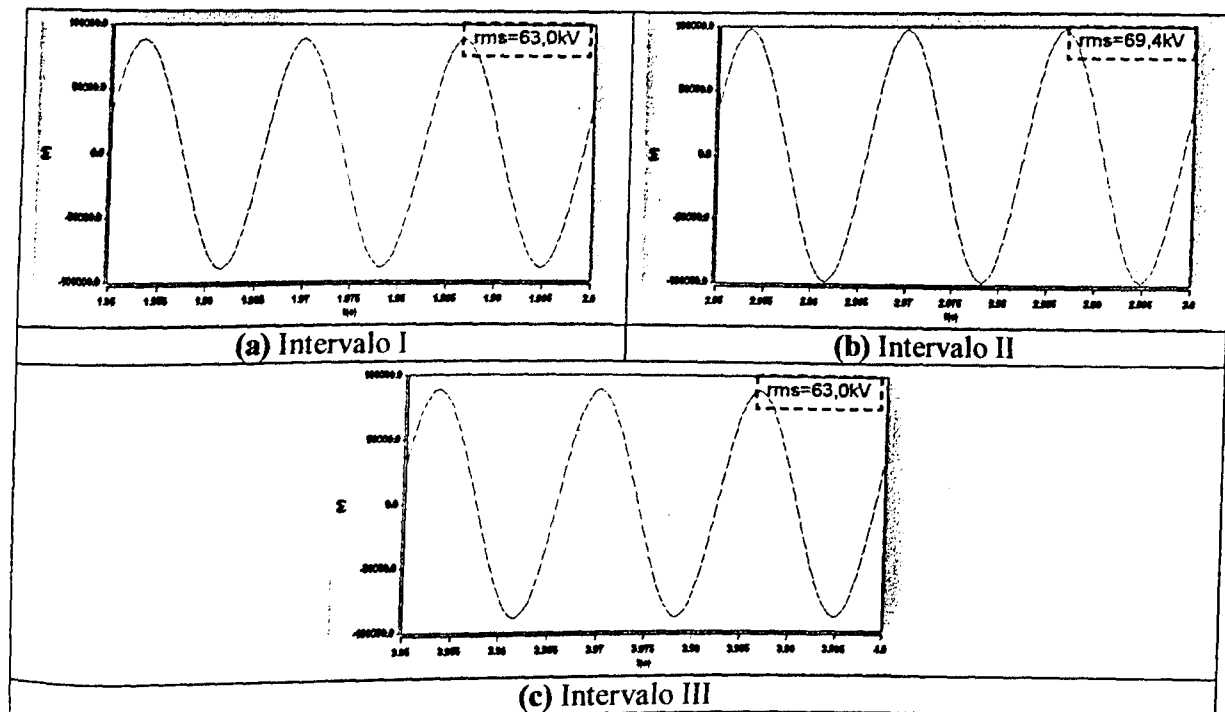


Figura 3.34 –Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de cada intervalo) – elevação de tensão sem ASVC

Uma vez que não existe qualquer controle sobre a tensão da barra B2, das figuras 3.33 e 3.34 verifica-se que, durante a ocorrência do evento, a grandeza em questão acompanha tal distúrbio na mesma proporção (10%). Vale ressaltar que, para o presente sistema em que a tensão no barramento encontra-se baixa, a magnitude da perturbação imposta não implica em maiores problemas, haja visto os níveis de tensão eficaz atingidos (69,4kV). Todavia, em sistemas cujas tensões de operação estejam com valores apropriados ($\cong 1,0$ p.u.), as consequências deste tipo de sobre-tensão podem ser agravadas já que, como mencionado, tais níveis se elevam na mesma proporção, o que pode ser ratificado na figuras 3.35.

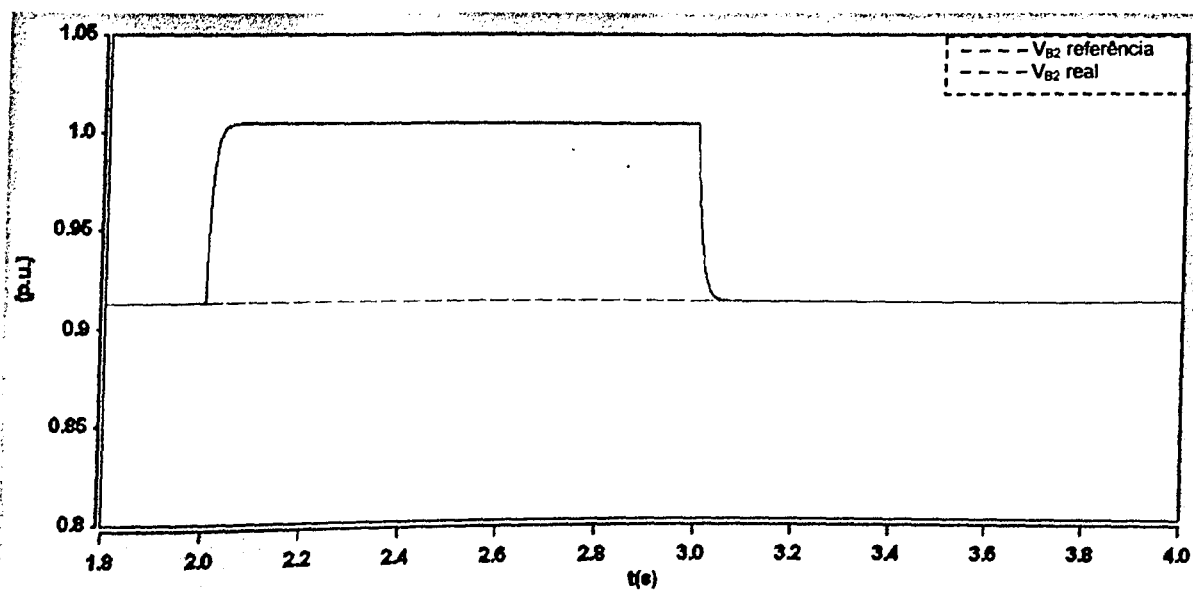


Figura 3.35 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – elevação de tensão sem ASVC

3.7.3.5 – Caso 5 – Elevação de tensão com a presença do ASVC

Da mesma forma que procedido na seção anterior, o comportamento da tensão na barra B2 é analisado quando, aos 2 segundos de simulação, o sistema sob análise é submetido a uma elevação momentânea de tensão de 10% e duração de 1 segundo. Neste caso, entretanto, o ASVC se encontra conectado ao referido barramento a fim de efetuar o controle desta tensão.

Diante disso, a figura 3.36 exibe o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B2 durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s) e, de forma complementar, a figura 3.37 fornece um “zoom” da mesma grandeza nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação.

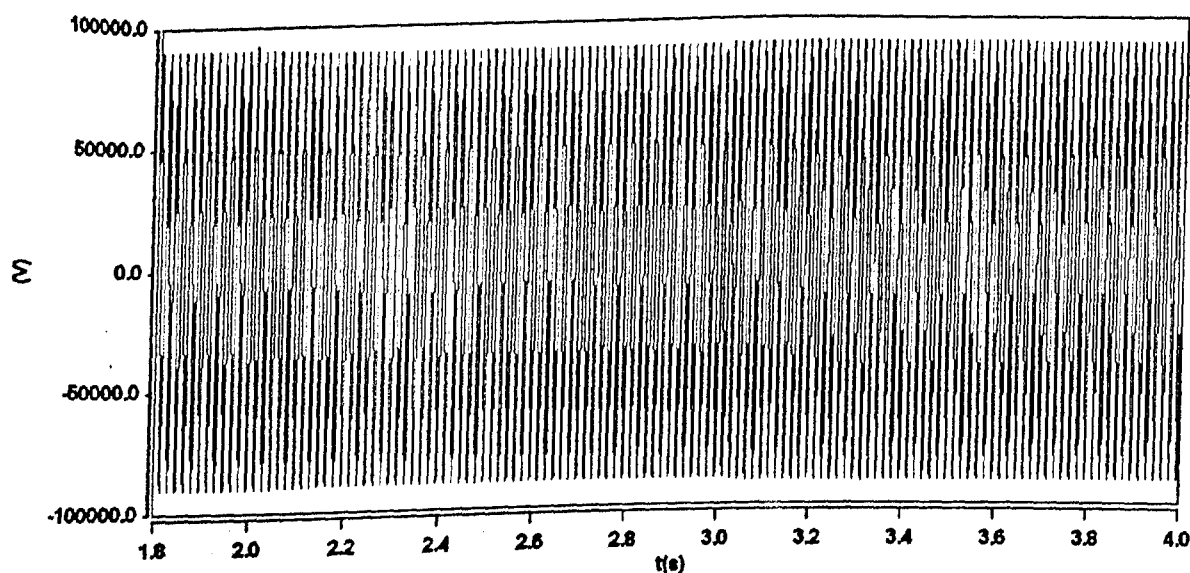


Figura 3.36 – Tensão entre fases na barra B2 – elevação de tensão com ASVC

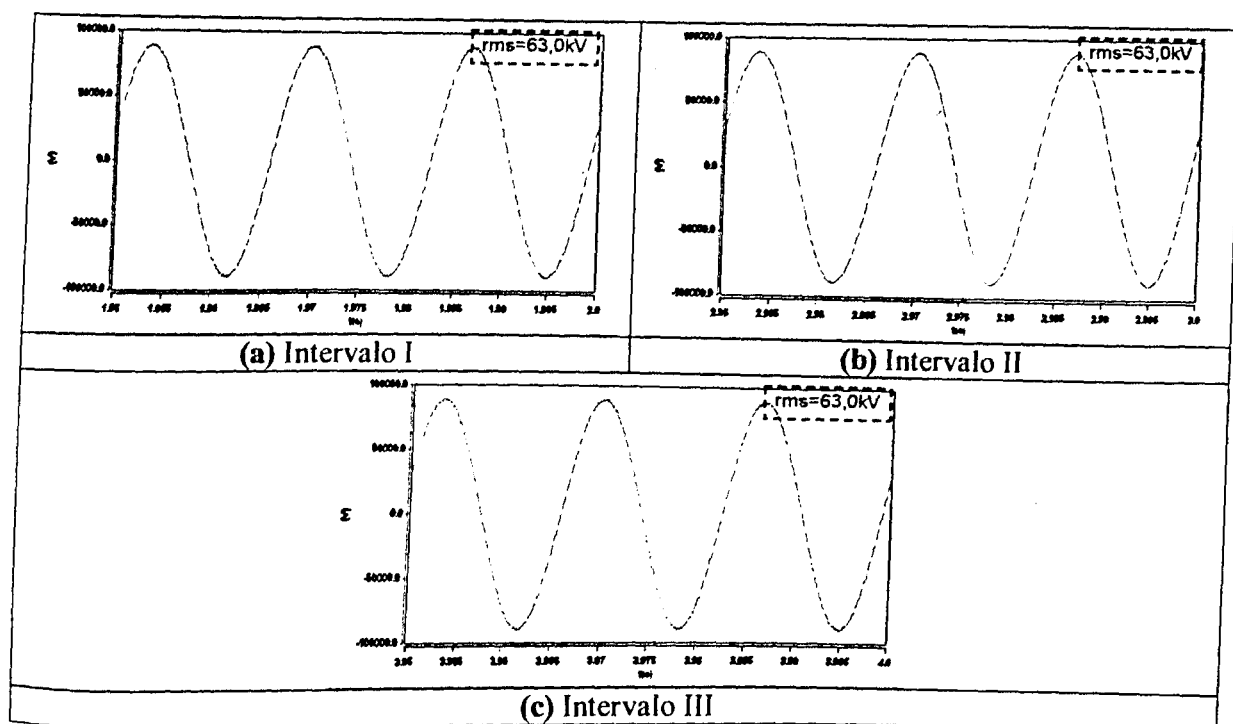


Figura 3.37 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos de cada intervalo) – elevação de tensão com ASVC

Baseando-se nas figuras 3.36 e 3.37 pode se constatar, mais uma vez, a eficácia do compensador avançado em manter a tensão na barra B2 em um patamar constante 63kV (0,91p.u.), mesmo durante a imposição de uma elevação momentânea de 10% na tensão do sistema. De uma forma transitória tal grandeza experimenta um pico de 0,93p.u. em $t = 2s$ (figura 3.38), que pode ser considerado pequeno se comparada com seu valor original (0,91p.u.) e com a magnitude do distúrbio.

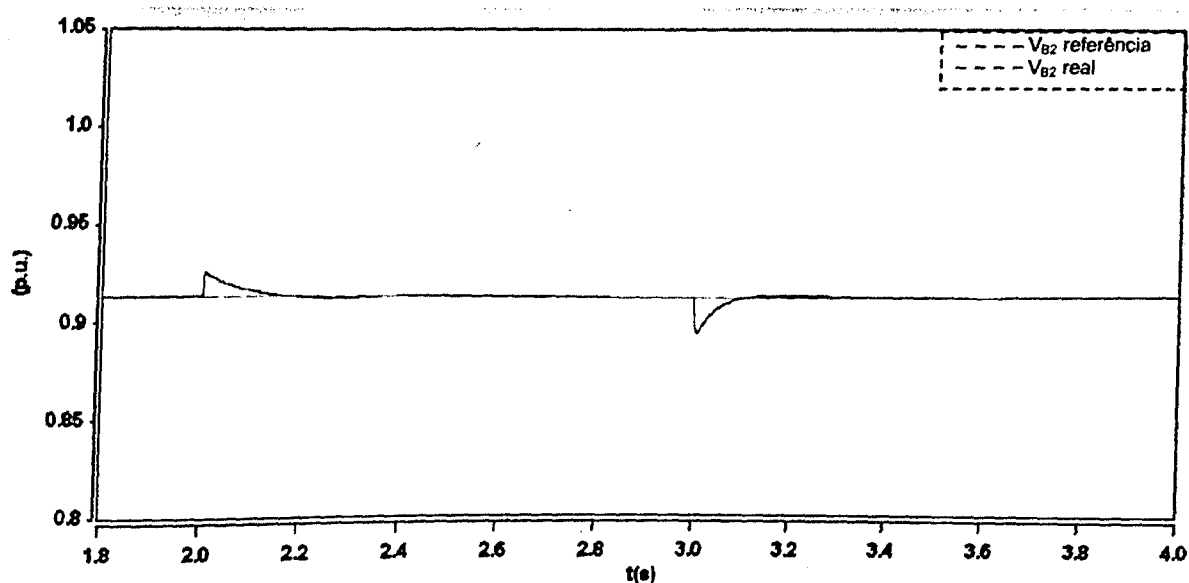


Figura 3.38 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – elevação de tensão com ASVC

O procedimento empregado pela malha de controle para reduzir a tensão do barramento diante da manobra efetuada consiste da absorção de reativos por parte do ASVC, enquanto tal distúrbio perdure (**Intervalo II**). Neste caso, a potência reativa absorvida em regime permanente equivaleu a 18,3Mvar, o que pode ser visualizado na figura 3.39.

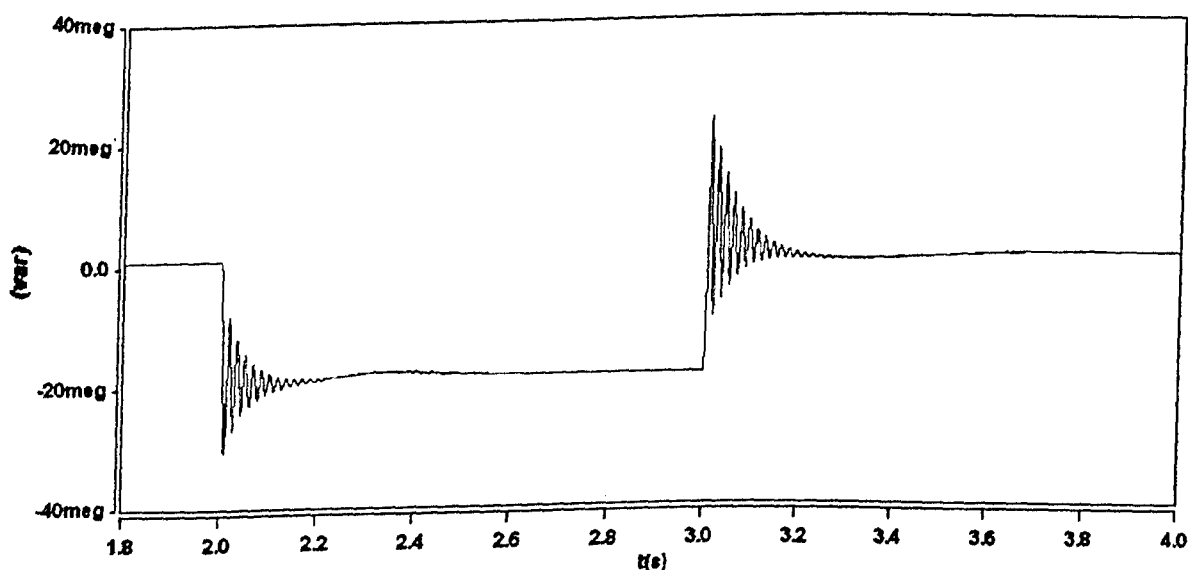


Figura 3.39 – Potência reativa entre o ASVC e o sistema CA – elevação de tensão com ASVC

A figura 3.40 mostra a tensão V_c nos terminais do capacitor do ASVC que, desta vez, experimentou oscilações transitórias maiores ($\pm 0,1p.u.$) nos

instantes de aplicação e eliminação do distúrbio em questão. Não obstante estes fatos, tal grandeza foi conduzida ao seu valor de referência (1,0p.u.) e nesse patamar foi mantida durante o regime permanente.

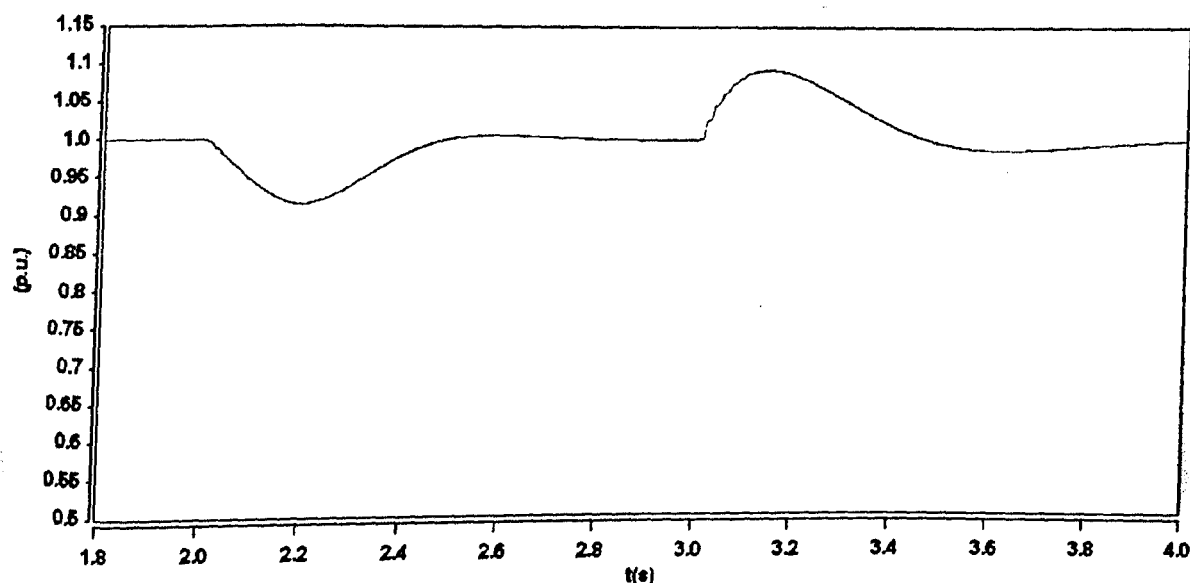


Figura 3.40 – Tensão nos terminais do capacitor do ASVC ($V_{base}=15kV$) – elevação de tensão com ASVC

Neste caso também, todo o processo de sustentação da tensão V_c é regido pela alteração do fluxo de potência ativa entre o ASVC e o sistema CA, como mostra a Figura 3.41.

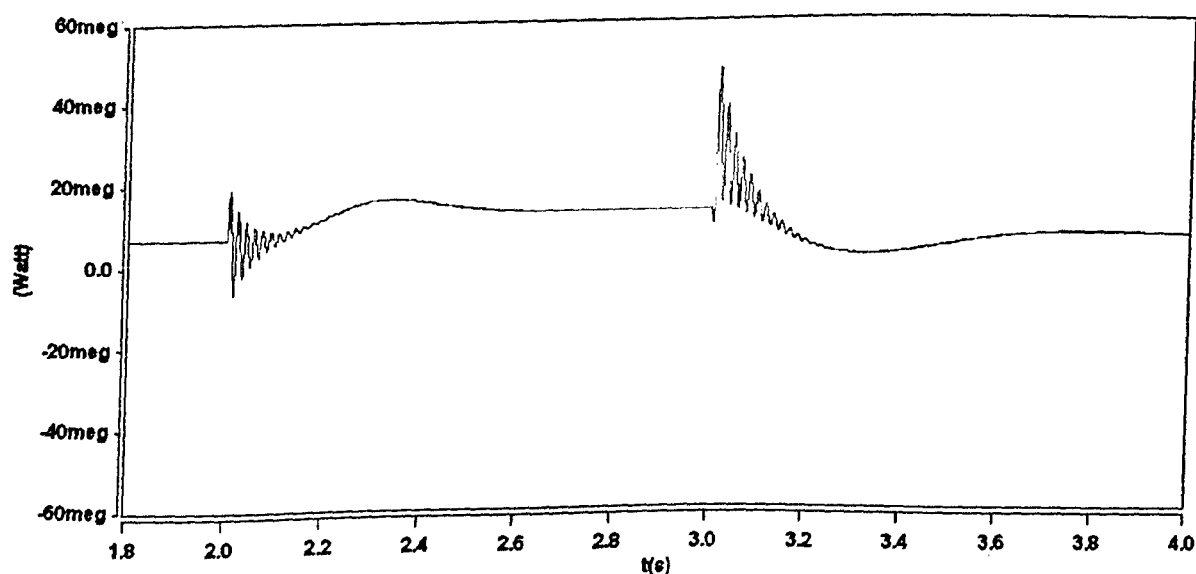


Figura 3.41 – Potência ativa entre o ASVC e o sistema CA – elevação de tensão com ASVC

3.7.3.6 – Quadro resumo comparativo

A tabela 3.5 fornece um quadro resumo comparativo dos valores em regime permanente das grandezas monitoradas durante a simulação dos casos.

Tabela 3.5 – Quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas

Caso	Grandeza	Valores		
		Intervalo I	Intervalo II	Intervalo III
1 - Regulação de tensão através do ASVC	Tensão em B2 [kV]	63,0	69,0	63,0
	Tensão V_c [kV]	15,0	15,0	15,0
	Potência Reativa [Mvar]	0,0	24,5	0,0
2 - Afundamento de tensão sem a presença do ASVC	Tensão em B2 [kV]	63,0	56,7	63,0
	Tensão V_c [kV]	-	-	-
	Potência Reativa [Mvar]	-	-	-
3 - Afundamento de tensão com a presença do ASVC	Tensão em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Tensão V_c [kV]	15,0	15,0	15,0
	Potência Reativa [Mvar]	0,0	24,0	0,0
4 - Elevação de tensão sem a presença do ASVC	Tensão em B2 [kV]	63,0	69,4	63,0
	Tensão V_c [kV]	-	-	-
	Potência Reativa [Mvar]	-	-	-
5 - Elevação de tensão com a presença do ASVC	Tensão em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Tensão V_c [kV]	15,0	15,0	15,0
	Potência Reativa [Mvar]	0,0	-18,3	0,0

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O enfoque principal deste capítulo foi analisar computacionalmente o comportamento de um sistema elétrico ao qual se encontra conectado um compensador paralelo do tipo ASVC, bem como o próprio desempenho do modelo implementado deste equipamento no simulador SABER. De um modo geral, os estudos foram conduzidos de forma a constatar a eficácia do dispositivo quanto ao controle do perfil de tensão em um determinado barramento.

Face a isto, o princípio de funcionamento do ASVC foi detalhado no sentido de se ressaltar a característica da tensão a ser produzida nos seus terminais CA para que o suporte de reativo seja adequado ao controle da tensão no ponto de acoplamento comum entre o compensador e o sistema. A obtenção de tal tensão na saída do compensador é oriunda de uma malha de controle definida neste trabalho, a qual se baseia na sua representação vetorial e no seu princípio de funcionamento mencionado anteriormente. Em síntese, a unidade de controle compara a tensão CA do barramento controlado com uma determinada referência e, uma vez processado por um controlador **PI**, o erro gerado atua no fator de modulação do conversor de modo a alterar a magnitude da tensão trifásica do mesmo. Paralelamente a isso, a tensão do capacitor nos terminais CC é, também, monitorada e qualquer desvio com relação a uma referência predeterminada é detectado e processado por outro controlador **PI**, cuja saída é destinada a alterar o ângulo de fase da referida tensão trifásica do conversor.

De posse do modelo elétrico e da sistemática de controle, baseada na alteração da magnitude e do defasamento angular da tensão trifásica do conversor, ora definidos, os mesmos foram implementados no programa

SABER através de *templates* os quais foram minuciosamente descritos neste capítulo.

Assim, com a implementação deste equipamento no referido simulador foi possível executar uma gama de situações, dentre as quais procurou-se retratar um sistema com problemas de qualidade da energia. Estes se fizeram sentir na forma de variações de tensão de curta duração, em que foi verificada a forte atuação do compensador estático avançado no sentido de prover os seguintes recursos:

- regulação de tensão;
- sustentação da tensão no barramento submetido a um afundamento momentâneo de tensão;
- controle da tensão no barramento submetido a uma elevação momentânea de tensão.

Os resultados destes estudos permitiram concluir que os problemas advindos dos distúrbios de qualidade supra citados podem ser contornados através da instalação do compensador estático avançado ASVC, já que o mesmo contribui para o suporte de reativos necessário a cada tipo de compensação requerida. Além da atuação satisfatória mediante imprevistos da rede de suprimento, o ASVC mostrou-se adequado na regulação programada da tensão do barramento controlado.

Finalmente, foi verificado um bom desempenho da malha de controle implementada, uma vez que, enquanto o dispositivo controla a tensão CA no seu ponto de acoplamento com o sistema, a tensão nos terminais do capacitor do ASVC é mantida praticamente constante.

Uma observação cabível neste instante se refere ao conteúdo harmônico (ruídos) presente na tensão da barra controlada durante a operação do ASVC, o qual se mostrou bastante baixo devido à estratégia de filtragem utilizada.

Deve-se ressaltar, entretanto, a existência de inúmeras investigações, exclusivamente, a respeito desse assunto e, dependendo da filosofia adotada, uma maior atenção deve ser dada ao projeto das malhas de controle.

Dentro do exposto, pode-se dizer que as principais contribuições oferecidas nesta etapa dos trabalhos são:

- agrupamento das informações relevantes à modelagem e controle do compensador paralelo avançado encontradas na literatura e utilizadas nas implementações computacionais desta tese;
- disposição de uma estrutura computacional no domínio do tempo, para que sejam executados estudos envolvendo a implementação do ASVC em um determinado complexo elétrico. Tais estudos são de suma importância quando se trata de instalações futuras, bem como de sistemas já existentes e em operação;
- para uma visão mais completa e real da forma com que os ASVCs operam, é necessário que se leve em consideração a atuação do controle de malha fechada requerido pelo mesmo. Assim, tanto a abordagem teórica, quanto a implementação computacional desse controle é, também, efetuada neste capítulo;
- vale observar que os estudos de desempenho do equipamento, face a presença de redes elétricas distorcidas e/ou desequilibradas, será objeto de discussões no Capítulo V;
- embasamento para a apresentação do controlador de fluxo de potência unificado (UPFC), a ser tratado no Capítulo V.

CAPÍTULO IV

COMPENSADOR ESTÁTICO SÉRIE AVANÇADO - ASC

4.1 COSIDERAÇÕES INICIAIS

Da mesma forma que para um ASVC, ou para qualquer outro componente elétrico, o processo de planejamento e definição pela instalação de um compensador série avançado ou ASC (*Advanced Series Compensator*) no sistema de potência, deve ser precedido por simulações computacionais, para que se possa antever a real interação entre o equipamento e a rede elétrica. Com isso, mais uma vez, o conhecimento do seu princípio de funcionamento, fundamentado nos seus modelos matemáticos, torna-se imprescindível.

Diante disso, neste capítulo serão descritos os princípios de funcionamento dos ASCs e os objetivos de seus controles. Na sequência, serão apresentados os modelos matemáticos que regem tal funcionamento, fundamentados na teoria vetorial, para que deles sejam deduzidas as estratégias de controle adotadas para tais compensadores. Finalmente, tendo como suporte as explanações descritas acima e atendendo ao principal objetivo deste capítulo, será apresentado todo o processo de implementação, tanto do circuito de potência como de controle, de um compensador série

avançado, na plataforma computacional SABER. Ainda, como meio de se analisar o desempenho dos modelos implementados, serão executados alguns estudos de casos, em sistemas típicos da utilização do ASC.

4.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS COMPENSADORES SÉRIE AVANÇADOS - ASC

No Capítulo II foi introduzido o conceito dos compensadores série avançados ou ASC (*Advanced Series Compensator*) o qual, da mesma forma que o ASVC, consiste de um conversor, baseado em chaves semicondutoras com comutação forçada. O ASC, por sua vez, é conectado em série com o sistema CA, através de um transformador de acoplamento, de modo a injetar uma tensão cuja magnitude e ângulo de fase variam de acordo com o grau e tipo de compensação série a ser executada, respectivamente. Nesse sentido, o defasamento entre a tensão injetada e a corrente da linha de transmissão é que determina o intercâmbio das potências ativa e reativa entre o equipamento e o sistema CA. Isso porque, como será visto na próxima seção, o ASC tem a capacidade de controlar tanto a impedância da linha como o ângulo de fase entre os terminais de conexão. Essa é uma das razões pela qual tal compensador avançado é mais eficaz que os compensadores capacitivos série controlados a tiristores, na provisão de amortecimentos para oscilações de potência. Isso porque, o ASC insere, também, uma resistência virtual “positiva” ou “negativa”, em série com a linha, de acordo com a dinâmica das unidades de geração. Deve-se ressaltar que, tal característica é alcançada quando a ponte conversora do ASC, assim como para o ASVC, é conectada a armazenadores de energia.

Diante das vantagens supracitadas, o emprego dos ASCs se torna cada vez mais atraente, principalmente porque as capacidades nominais dos semicondutores de alta potência estão cada vez maiores. Daí o motivo de tais equipamentos merecerem grande atenção, quanto ao seu funcionamento, suas modelagens e simulações computacionais.

4.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ASC

Para a explanação do princípio de funcionamento de um ASC, seja o esquema representativo da conexão do mesmo com o sistema CA, mostrado na figura 4.1.

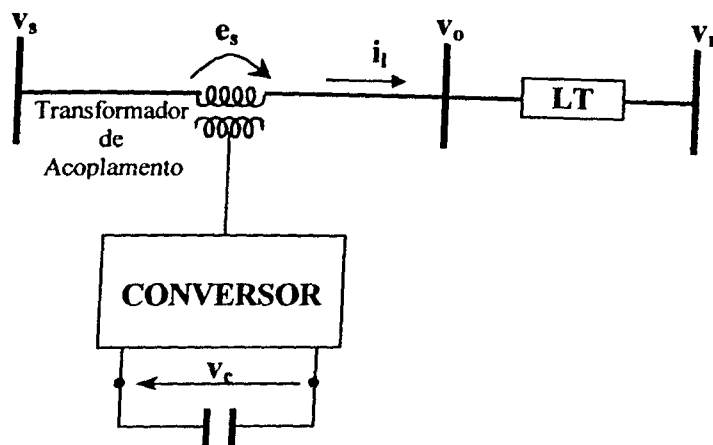


Figura 4.1 – Esquema de conexão de um ASC em uma linha de transmissão

Na figura:

- v_s – tensão do sistema CA à montante do ASC
- v_o – tensão do sistema CA à jusante do ASC
- i_l – corrente da linha de transmissão controlada pelo ASC
- v_r – tensão do terminal receptor da linha controlada pelo ASC
- e_s – tensão injetada em série pelo ASC
- v_c – tensão nos terminais do capacitor do ASC

Como mencionado anteriormente, o ASC injeta em série com a linha de transmissão uma tensão e_s (figura 4.1) cujo ângulo de fase pode variar com relação à corrente i_l entre os ângulos de 0 e 2π , e sua magnitude pode ser alterada entre zero e um valor máximo $e_{s,max}$. Desta forma, a fonte de tensão deve ser capaz de gerar e absorver ambas as potências, ativa e reativa, como mostra a figura 4.2.

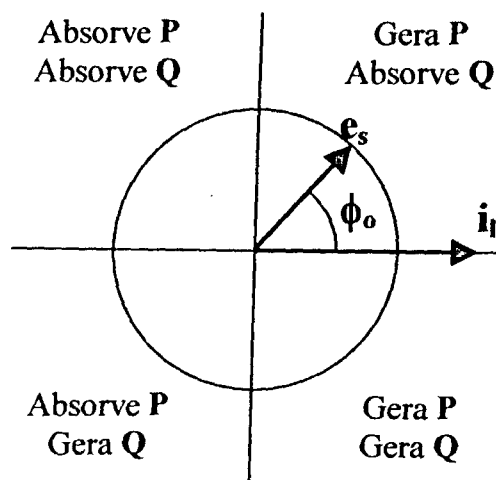


Figura 4.2 – Diagrama fasorial e modos de operação de um ASC

Da figura anterior verifica-se que, apenas potência ativa é gerada ou absorvida quando e_s está em fase ($\phi_o=0^\circ$) ou em anti-fase ($\phi_o=180^\circ$) com i_l , respectivamente, desde que o conversor esteja conectado a algum dispositivo armazenador de energia. Com relação à potência reativa, esta é gerada ou absorvida quando e_s e i_l se encontram em quadratura ($\phi_o=\pm 90^\circ$).

A determinação da tensão e_s a ser injetada pelo ASC depende dos objetivos do seu controle, ou seja, de quais parâmetros da linha de transmissão devem ser alterados com a injeção da referida tensão, ou simplesmente, do fluxo de potência requerido. Assim, assumindo como referência a tensão do barramento CA v_s , considera-se que o compensador série avançado pode atuar no sistema com os seguintes objetivos:

- regulação da tensão terminal;
- compensação da reatância série;
- controle do fluxo de potência através do defasamento angular.

Nas subseções a seguir, são apresentados cada um destes itens com maiores detalhes.

4.3.1 REGULAÇÃO DA TENSÃO TERMINAL

O primeiro objetivo de controle do compensador série avançado é de apenas regular a tensão terminal. Assim:

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_m \quad (4.1)$$

onde \mathbf{e}_m é o vetor de regulação da tensão terminal.

O ângulo de \mathbf{e}_s com relação ao vetor de referência \mathbf{v}_s é mantido igual a zero. Com isso \mathbf{e}_m é definida por:

$$\mathbf{e}_m = k_m \mathbf{u}_s \quad (4.2)$$

onde k_m (fator de compensação da magnitude de \mathbf{v}_o) é uma grandeza escalar e \mathbf{u}_s é um vetor unitário com a mesma direção de \mathbf{v}_s .

Assim, através da injeção de \mathbf{e}_s , somente a magnitude da tensão resultante \mathbf{v}_o é variada com relação a \mathbf{v}_s , como ilustra a figura 4.3.

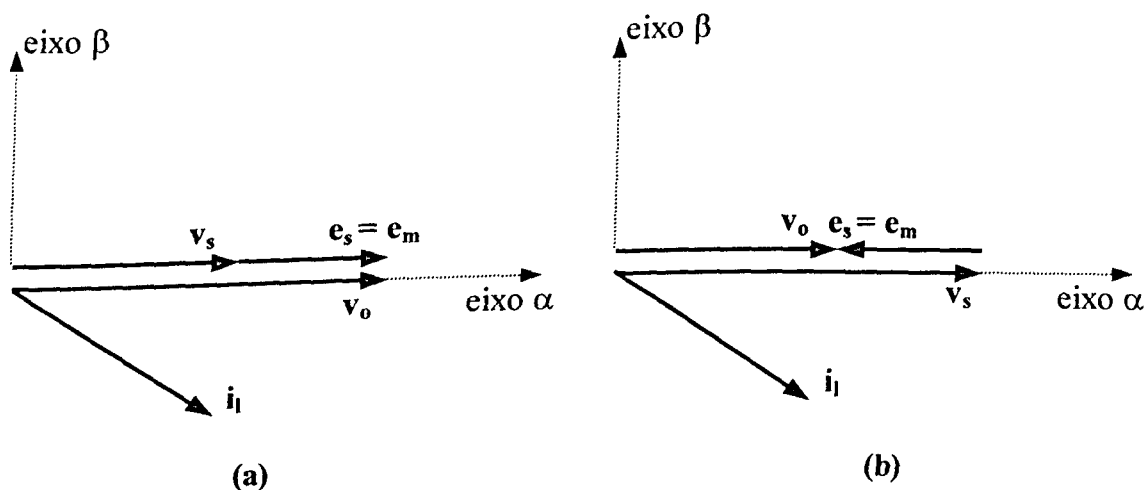


Figura 4.3 – Diagrama fasorial para o ASC na regulação (aumento (a) e redução (b)) da tensão terminal

Da figura 4.3(b), se a tensão \mathbf{e}_s é injetada a 180° de \mathbf{v}_s , tem-se uma redução no valor de \mathbf{v}_o .

4.3.2 COMPENSAÇÃO DA REATÂNCIA SÉRIE

Como segundo objetivo de controle, na compensação da reatância série o vetor \mathbf{e}_s é definido de acordo com a equação (4.3) e visualizado na figura 4.4.

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_x \quad (4.3)$$

onde \mathbf{e}_x é o vetor de compensação da reatância série.

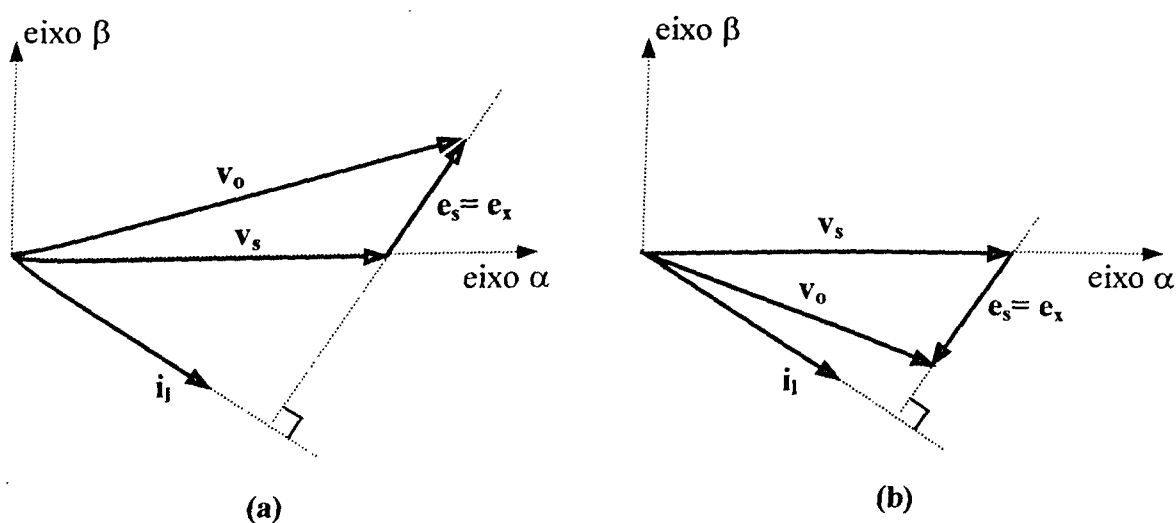


Figura 4.4 – Diagrama fasorial para o ASC na compensação série indutiva (a) e capacitiva (b)

A figura 4.4 mostra que o vetor de compensação de reatância série \mathbf{e}_x , em quadratura com a corrente da linha, é adicionado à tensão \mathbf{v}_s resultando, assim, em uma tensão \mathbf{v}_o na saída do equipamento. Deve-se ressaltar que, \mathbf{e}_x pode apresentar uma característica capacitiva ou indutiva, dependendo do seu sentido (atrasada ou adiantada) em relação ao vetor da corrente de linha \mathbf{i}_l , podendo ser expressa pelas equações (4.4) e (4.5), respectivamente.

$$\mathbf{e}_x = k_x (\mathbf{j} \mathbf{i}_l) \quad (4.4)$$

$$\mathbf{e}_x = k_x (-\mathbf{j} \mathbf{i}_l) \quad (4.5)$$

onde k_x (fator de compensação da reatância série) é uma grandeza escalar e $\mathbf{j}\mathbf{i}_l$ é um vetor unitário e perpendicular a \mathbf{i}_l .

Assim, através das equações (4.3) a (4.5), pode-se determinar o ângulo e a magnitude da tensão \mathbf{e}_s a ser injetada pelo ASC, a fim de se produzir os efeitos desejados de compensação série, retratados no vetor da tensão \mathbf{v}_o após o compensador.

4.3.3 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO DEFASAMENTO ANGULAR

O ângulo de carga δ_{or} é definido como o defasamento entre os vetores de tensão \mathbf{v}_o , após o ASC, e \mathbf{v}_r , no terminal receptor da linha de transmissão. Neste modo de operação, o ajuste deste ângulo de fase é que determinará o fluxo de potência ativa através da linha controlada, baseando-se em um valor de referência predeterminado. Este, portanto, constitui o terceiro objetivo de controle do ASC, o qual injeta uma tensão \mathbf{e}_s em série com a linha de transmissão definida pela equação (4.6) e traçada na figura 4.5.

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_\delta \quad (4.6)$$

onde \mathbf{e}_δ é o vetor de regulação do ângulo de fase.

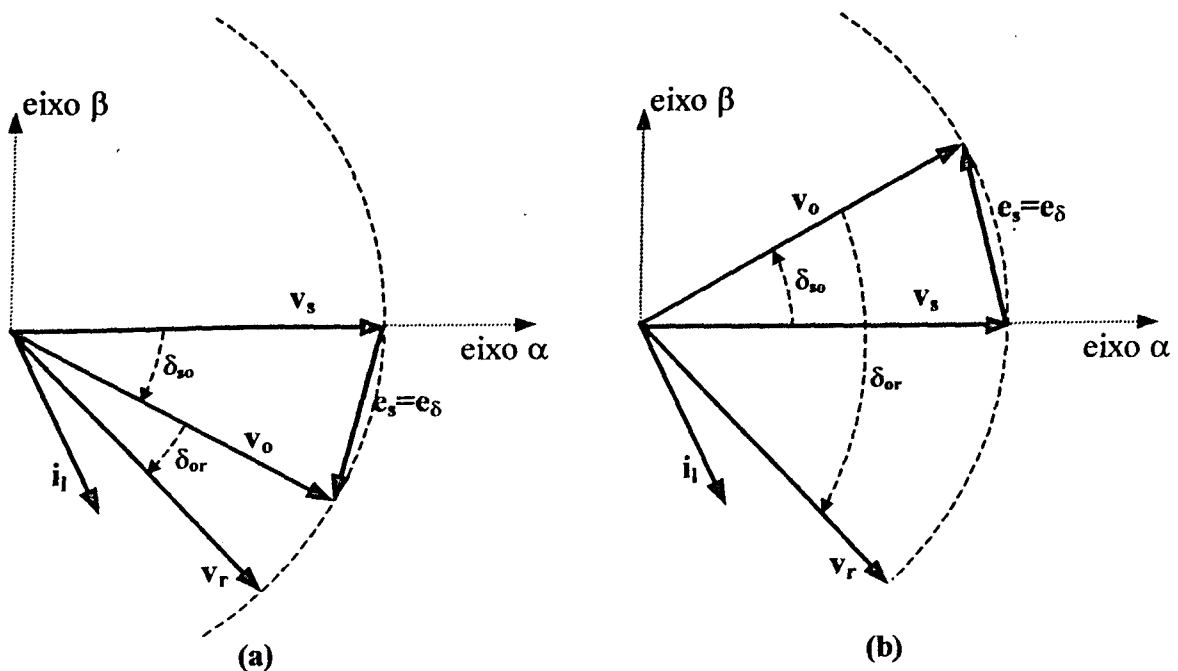


Figura 4.5 – Diagrama fasorial para o ASC no controle do fluxo de potência através do defasamento angular: atrasando v_o (a) e adiantando v_o (b) com relação a v_s

Da figura anterior verifica-se que, e_δ é responsável pela alteração do ângulo δ_{so} , entre as tensões v_s e v_o , o que, conseqüentemente, modifica o ângulo de carga δ_{or} . Um ponto a ser observado é que, a amplitude da tensão após o compensador (v_o) não varia para qualquer valor de e_δ , ou seja, para qualquer ângulo de fase. Isso é assegurado, uma vez que, quando v_o está atrasada de v_s e, conseqüentemente, o ângulo de transmissão é reduzido (figura 4.5(a)), e_δ é definida pela equação (4.7)[7].

$$e_\delta = 2|v_s| \sin(k_\delta/2) \cdot \exp[j(-\pi/2 + k_\delta/2)] \quad (4.7)$$

onde k_δ (fator de compensação do ângulo de fase) está em radianos e é negativo.

Já para o caso da tensão v_o estar adiantada de v_s e o ângulo de carga ser incrementado (figura 4.5(b)), e_δ é expressa pela equação (4.8).

$$e_\delta = 2|v_s| \sin(k_\delta/2) \cdot \exp[j(\pi/2 + k_\delta/2)] \quad (4.8)$$

onde k_δ é positivo.

4.4 ANÁLISE VETORIAL DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DO ASC

Nesta seção é apresentada a modelagem do circuito de potência de um ASC e da linha de transmissão ao qual este se encontra conectado. Tal modelagem é baseada na teoria vetorial, a partir da qual são obtidas as funções de transferência empregadas pelo respectivo controle. Neste caso, também, são utilizados os princípios de controle vetorial resumidos no Capítulo II.

A figura 4.6 mostra uma representação simplificada do circuito trifásico de potência de um ASC, conectado em série ao sistema CA através de um transformador, a qual é utilizada nesta análise.

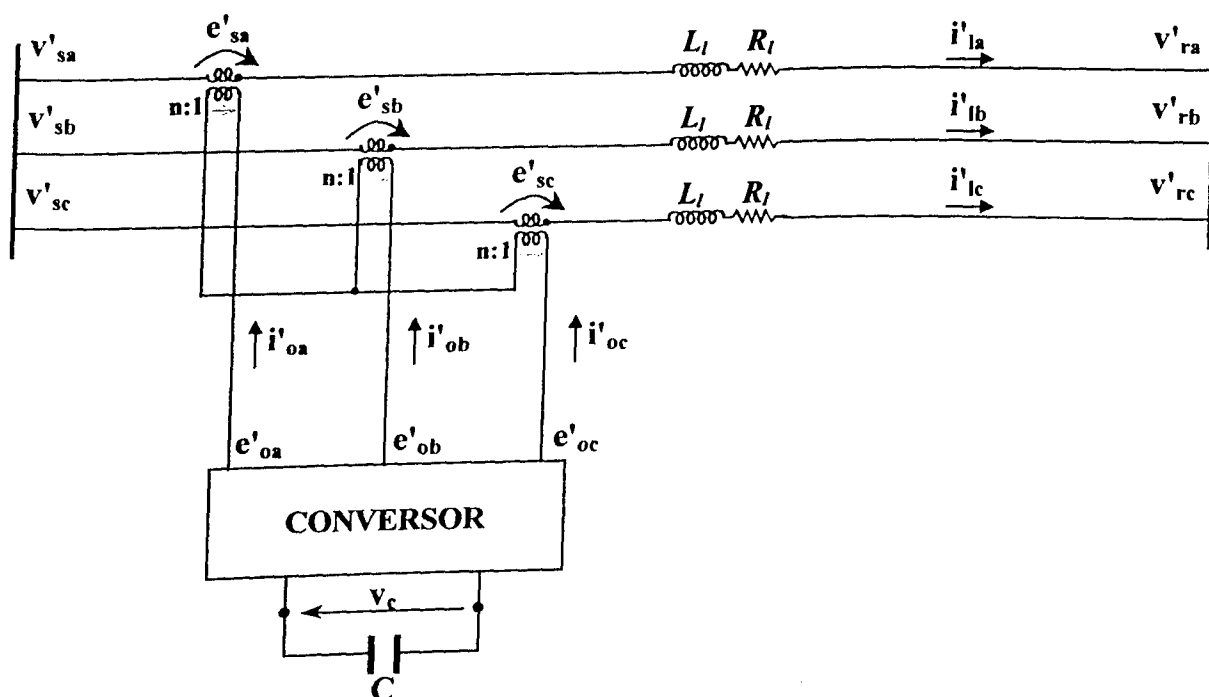


Figura 4.6 – Circuito equivalente trifásico simplificado do ASC

Da figura 4.6, primeiramente, pode-se dizer que as relações entre as grandezas nos terminais trifásicos do conversor e aquelas injetadas na linha de

transmissão são dadas pelas equações (4.9) a (4.14), considerando um transformador série ideal com relação de transformação de 1:n.

$$ne'_{sa} = e'_{oa} \quad (4.9)$$

$$ne'_{sb} = e'_{ob} \quad (4.10)$$

$$ne'_{sc} = e'_{oc} \quad (4.11)$$

$$ni'_{oa} = i'_{la} \quad (4.12)$$

$$ni'_{ob} = i'_{lb} \quad (4.13)$$

$$ni'_{oc} = i'_{lc} \quad (4.14)$$

Da mesma maneira que executado para o ASVC no capítulo anterior, transformando as tensões e correntes do ASC das equações anteriores para grandezas em p.u., através das equações (4.15) e (4.16),

$$i = i' / i_{base} \quad (4.15)$$

$$e = e' / e_{base} \quad (4.16)$$

as equações do circuito de saída do ASC podem migrar do sistema trifásico para o sistema de referência ortogonal síncrono, como demonstrado nas transformações a seguir:

$$\begin{bmatrix} e_{s\alpha} \\ e_{s\beta} \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\begin{bmatrix} e_{o\alpha} \\ e_{o\beta} \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} e_{oa} \\ e_{ob} \\ e_{oc} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} i_{oa} \\ i_{ob} \\ i_{oc} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Assim, as relações entre as componentes da tensão injetada pelo ASC e a tensão nos terminais CC do conversor, são dadas pelas equações (4.21) e (4.22)

$$e_{s\alpha} = m_s v_c \cos \phi_s \quad (4.21)$$

$$e_{s\beta} = m_s v_c \sin \phi_s \quad (4.22)$$

onde ϕ_s é a diferença angular entre os vetores da tensão injetada pelo ASC e da tensão na barra de referência v_s .

A figura 4.7 mostra como as componentes dos vetores do circuito CA do ASC estão relacionadas com o vetor de referência v_s no plano rotativo síncrono.

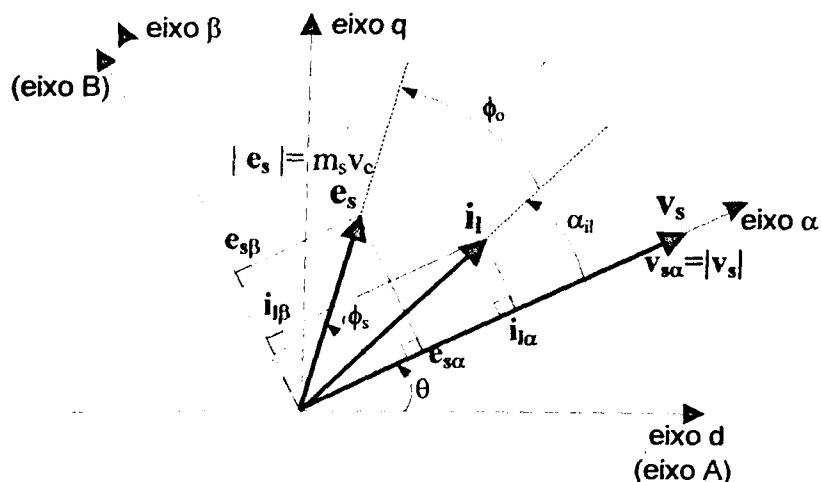


Figura 4.7 – Vetores das tensões e correntes do ASC

Na figura 4.7, o ângulo ϕ_0 é que determina a transferência de potência (ativa e reativa) entre o circuito de saída do ASC e o sistema elétrico de potência ao qual está conectado.

Ainda, da figura 4.6 são deduzidas as expressões representativas do circuito de transmissão compensado pelo ASC, mostradas nas equações (4.23) a (4.25).

$$v'_{sa} + e'_{sa} - v'_{ra} = L_l \frac{d(i'_{la})}{dt} + R_l i'_{la} \quad (4.23)$$

$$v'_{sb} + e'_{sb} - v'_{rb} = L_l \frac{d(i'_{lb})}{dt} + R_l i'_{lb} \quad (4.24)$$

$$v'_{sc} + e'_{sc} - v'_{rc} = L_l \frac{d(i'_{lc})}{dt} + R_l i'_{lc} \quad (4.25)$$

Convertendo as grandezas para o sistema p.u., considerando a potência base do transformador e as tensões bases nos terminais do mesmo, de acordo com as mesmas equações utilizadas no Capítulo III e reescritas em (4.26) a (4.32) a seguir:

$$i = i' / i_{\text{base}} \quad (4.26)$$

$$v = v' / v_{\text{base}} \quad (4.27)$$

$$e = e' / e_{\text{base}} \quad (4.28)$$

$$Z_{\text{base}} = v_{\text{base}} / i_{\text{base}} \quad (4.29)$$

$$x_l = \omega_b L_l / Z_{\text{base}} \quad (4.30)$$

$$x_c = 1 / \omega_b C Z_{\text{base}} \quad (4.31)$$

$$r_l = R_l / Z_{\text{base}} \quad (4.32)$$

e arranjando as equações (4.23) a (4.25) na forma matricial, obtém-se a equação (4.33).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_l \omega_b}{x_l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-r_l \omega_b}{x_l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-r_l \omega_b}{x_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_b}{x_l} (v_{sa} + e_{sa} - v_{ra}) \\ \frac{\omega_b}{x_l} (v_{sb} + e_{sb} - v_{rb}) \\ \frac{\omega_b}{x_l} (v_{sc} + e_{sc} - v_{rc}) \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Através das equações (4.34) a (4.37) é executada a transformação vetorial das variáveis trifásicas para grandezas do plano α - β .

$$\begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} |v_s| \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$\begin{bmatrix} e_{s\alpha} \\ e_{s\beta} \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$\begin{bmatrix} v_{r\alpha} \\ v_{r\beta} \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

onde, $[C_1]$ é a matriz de transformação definida no Capítulo II, e reescrita em (4.38).

$$[C_1] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

em que:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{sq}}{v_{sd}} \right) \quad (4.39)$$

e as componentes da tensão v_s no sistema de eixos estacionários v_{sq} e v_{sd} são obtidas através da transformação a seguir:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

em que $[C]$ é a matriz de transformação dada pela equação (2.8) no Capítulo II.

No sistema de referência síncrono, a equação (4.33) pode ser escrita como:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_l \omega_b}{x_l} & \omega \\ -\omega & \frac{-r_l \omega_b}{x_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_b}{x_l} (v_s | + e_{s\alpha} - v_{r\alpha}) \\ \frac{\omega_b}{x_l} (e_{s\beta} - v_{r\beta}) \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

onde ω é definida na equação (4.42).

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.42)$$

A equação (4.41) é, então, o modelo matemático de um circuito de transmissão simplificado controlado pelo ASC, em notação p.u. no sistema de referência síncrono.

4.5 EXPRESSÕES ANALÍTICAS PARA AS COMPONENTES DO VETOR DA TENSÃO INJETADA PELO ASC

Na seção 4.3 foram mostradas as expressões analíticas para cada tipo de vetor da tensão série injetada pelo ASC, considerando os vários objetivos de operação do mesmo. Nesta seção, as mesmas expressões ora apresentadas são reescritas em termos das suas componentes no sistema de referência síncrono, cujo vetor de referência é a tensão v_s , através das quais são baseadas as estratégias de controle empregadas.

4.5.1 MODO 1: REGULAÇÃO DA TENSÃO TERMINAL

Baseando-se na equação (4.2), a tensão $e_s = e_m$ destinada à regulação da tensão terminal pode ser reescrita em função do fator de compensação k_m como:

$$e_s = e_m = k_m \exp(j0) \quad (4.43)$$

No sistema de referência síncrono ($\alpha\beta$), e_s e e_m podem ser expressas pelas equações (4.44) e (4.45), respectivamente.

$$e_s = e_{s\alpha} + je_{s\beta} \quad (4.44)$$

$$e_m = e_{m\alpha} + je_{m\beta} \quad (4.45)$$

Portanto, substituindo (4.44) e (4.45) em (4.43) resulta na equação (4.46)

$$e_{s\alpha} + je_{s\beta} = e_{m\alpha} + je_{m\beta} = k_m + j0 \quad (4.46)$$

Assim, igualando-se as partes real e imaginária da equação (4.46), as componentes ortogonais síncronas do vetor da tensão injetada pelo ASC (\mathbf{e}_s) no Modo 1 de operação são definidas pelas equações (4.47) e (4.48).

$$e_{s\alpha} = e_{m\alpha} = k_m \quad (4.47)$$

$$e_{s\beta} = e_{m\beta} = 0 \quad (4.48)$$

4.5.2 MODO 2: COMPENSAÇÃO DA REATÂNCIA SÉRIE

A tensão injetada pelo ASC responsável pela compensação série ($\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_x$), é definida pelas equações (4.4) e (4.5), as quais são reescritas em (4.49) e (4.50), respectivamente.

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_x = k_x \exp[j(\alpha_{il} + \pi/2)] \quad (4.49)$$

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_x = k_x \exp[j(\alpha_{il} - \pi/2)] \quad (4.50)$$

Considerando o fator de compensação k_x como positivo quando \mathbf{e}_x estiver adiantada de \mathbf{i}_l e negativo para o caso contrário, então, no sistema de referência síncrono, as equações (4.49) e (4.50) são reduzidas à (4.51).

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_x = e_{x\alpha} + je_{x\beta} = -k_x \sin \alpha_{il} + jk_x \cos \alpha_{il} \quad (4.51)$$

Com isso, uma vez que \mathbf{e}_s é definida pela equação (4.44), igualando-se as partes real e imaginária da equação (4.51), são obtidas as componentes ortogonais do vetor da tensão injetada pelo ASC no Modo 2 de operação dadas por (4.52) e (4.53).

$$e_{s\alpha} = e_{x\alpha} = -k_x \sin \alpha_{il} \quad (4.52)$$

$$e_{s\beta} = e_{x\beta} = k_x \cos \alpha_{il} \quad (4.53)$$

4.5.3 MODO 3: CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO DEFASAMENTO ANGULAR

A partir das suas equações de definição ((4.7) e (4.8)), o vetor $\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_\delta$, responsável pelo defasamento angular da tensão terminal, pode ser também definido em termos das coordenadas $\alpha\beta$ e do fator de compensação k_δ como mostra a equação (4.54):

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_\delta = e_{\delta\alpha} + j e_{\delta\beta} = -2|\mathbf{v}_s| \sin^2(k_\delta/2) + j|\mathbf{v}_s| \sin(k_\delta) \quad (4.54)$$

Da mesma forma que nas subseções anteriores, considerando \mathbf{e}_s como definido em (4.44) e igualando-se as partes real e imaginária da equação (4.54), são obtidas as componentes ortogonais do vetor da tensão injetada pelo ASC no Modo 3 de operação dadas por (4.55) e (4.56).

$$e_{s\alpha} = e_{\delta\alpha} = -2|\mathbf{v}_s| \sin^2(k_\delta/2) \quad (4.55)$$

$$e_{s\beta} = e_{\delta\beta} = |\mathbf{v}_s| \sin(k_\delta) \quad (4.56)$$

4.6 SISTEMA DE CONTROLE DO ASC

Apesar dos objetivos de operação do ASC, traçados anteriormente, serem variados, tal equipamento atua no sistema CA através da injeção de uma simples tensão e_s em série com a linha de transmissão, como já mencionado exaustivamente. Com isso, pode-se dizer que, o único objetivo do sistema de controle do ASC consiste em determinar qual deve ser a magnitude e o ângulo, ou ainda, os valores das componentes $e_{s\alpha}$ e $e_{s\beta}$, da tensão a ser produzida nos terminais trifásicos do seu conversor. Para tanto, o princípio básico do controle é a medição da grandeza controlada que, quando comparada com o respectivo valor de referência, produz um sinal de erro, o qual alimenta um controlador PI (Proporcional Integral). Este, por sua vez, atua no sentido de reduzir o referido erro através da emissão das informações necessárias ao gerador de pulsos do conversor, para que na saída do mesmo se estabeleça o vetor e_s , necessário à compensação requerida.

Diante do exposto, tendo tal sequência de operações como regra geral, a seguir, são apresentadas as malhas de controle para cada modo de operação particularmente, ao final do que é mostrada também a malha completa de controle do ASC.

4.6.1 MALHA DE CONTROLE DA TENSÃO TERMINAL

Para a regulação da magnitude da tensão terminal $|v_o|$, esta é medida e comparada com a referência $|v_o|_{ref}$. A diferença obtida entre tais grandezas é processada por um controlador **PI-1** o qual, a partir da equação (4.57), define o fator de regulação da tensão k_m a ser utilizado na equação (4.47).

$$k_m = \left(k_{p,m} + \frac{k_{i,m}}{s} \right) (|v_o|_{ref} - |v_o|) \quad (4.57)$$

4.6.2 MALHA DE CONTROLE DA REATÂNCIA SÉRIE

A impedância efetiva, entre os terminais emissores e receptores, da linha de transmissão a ser compensada é dada por:

$$r_l + jx_l = \frac{v_s - (v_{r\alpha} + jv_{r\beta})}{i_{l\alpha} + ji_{l\beta}} \quad (4.58)$$

Assim, a reatância série efetiva x_l da referida linha pode ser calculada como:

$$x_l = \frac{-v_{r\beta}i_{l\alpha} - (v_s - v_{r\alpha})i_{l\beta}}{i_{l\alpha}^2 + i_{l\beta}^2} \quad (4.59)$$

Após medidas as tensões e correntes acima e, a partir das mesmas, calculada a reatância atual da linha, esta última é comparada com um valor de referência predeterminado. O erro oriundo de tal comparação é processado pelo controlador **PI-2** como mostra a equação representativa de tal malha.

$$k_x = \left(k_{p,x} + \frac{k_{i,x}}{s} \right) (x_{lref} - x_l) \quad (4.60)$$

onde k_x é o fator de compensação série utilizado nas equações (4.52) e (4.53).

4.6.3 MALHA DE CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO DEFASAMENTO ANGULAR

Como dito anteriormente, o ângulo de carga, definido como o defasamento entre os vetores da tensão após o ASC e aquela no terminal receptor da linha de transmissão, pode determinar o fluxo de potência através da mesma. Diante disso, calculando-se tal potência p_l , através dos valores medidos de tensão e corrente na linha e da equação (4.61) (referente à equação (2.11) do Capítulo II), obtém-se o sinal de controle necessário à malha em questão.

$$p_l = \frac{3}{2} (v_{sd} i_{ld} + v_{sq} i_{lq}) \quad (4.61)$$

Comparando o sinal de potência atual na linha com um valor de referência (p_{lref}), o qual é definido pelo usuário de acordo com as necessidades do sistema de transmissão, novamente, um sinal de erro será produzido, o qual é tratado por um controlador **PI-3**, como mostra a equação a seguir:

$$k_{\delta} = \left(k_{p,\delta} + \frac{k_{i,\delta}}{s} \right) (p_{lref} - p_l) \quad (4.62)$$

onde k_{δ} é o fator para o controle do fluxo de potência através do ângulo de fase utilizado nas equações (4.55) e (4.56).

4.6.4 MALHA DE CONTROLE COMPLETA DO ASC

A figura 4.8 mostra um diagrama de blocos para o controle do ASC, o qual engloba os três modos de operação descritos anteriormente.

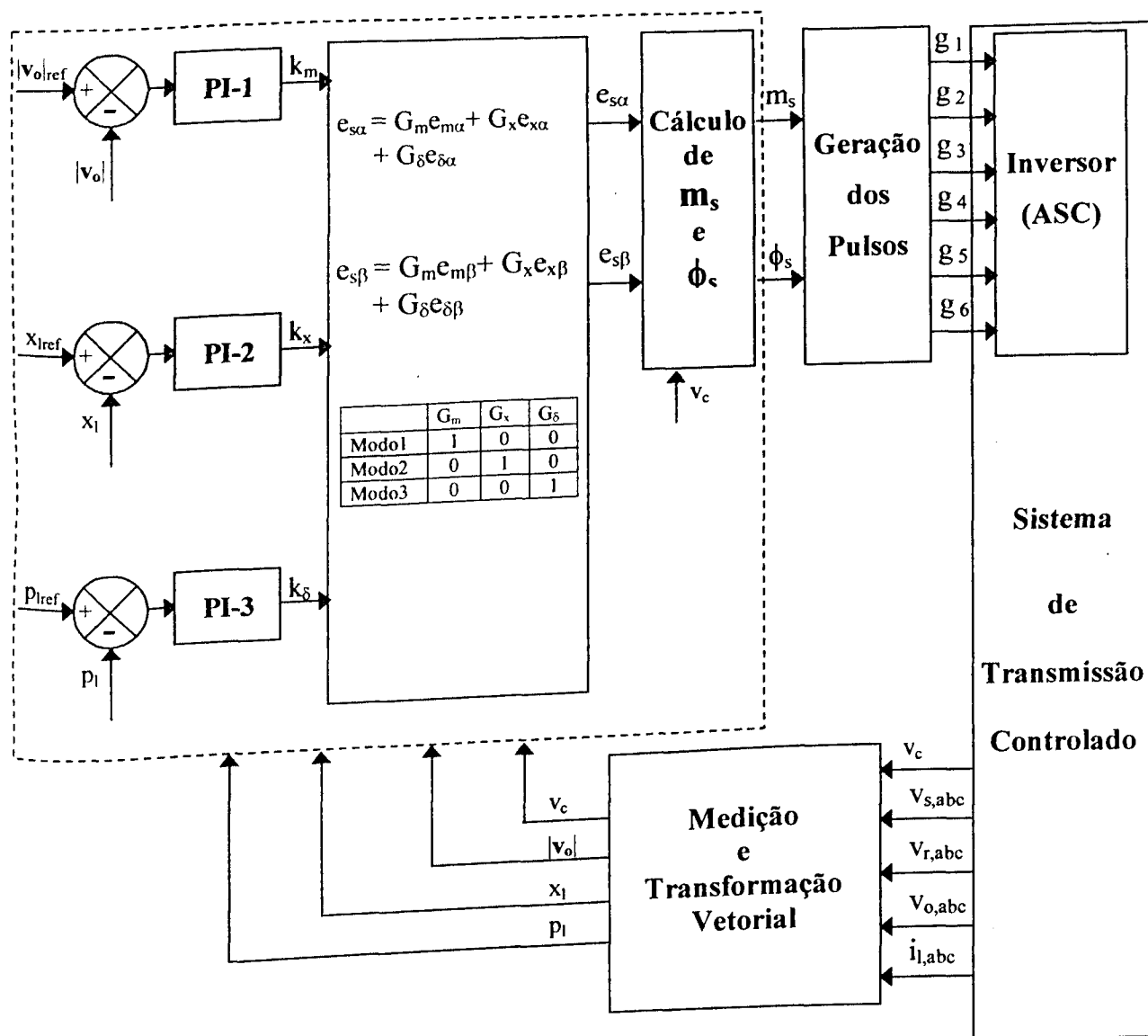


Figura 4.8 – Diagrama de blocos da malha de controle completa do ASC

Ressalta-se que o diagrama de blocos apresentado na figura anterior envolvendo os controladores PI-1, PI-2 e PI-3 é baseado nas equações (4.57), (4.60) e (4.62), definidas anteriormente nas subseções 4.6.1, 4.6.2 e 4.6.3,

respectivamente. Além disso, a seleção do modo de operação será feita através da tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Seleção do modo de operação do ASC

	G_m	G_x	G_δ
Modo1	1	0	0
Modo2	0	1	0
Modo3	0	0	1

Com relação à tabela acima, destacam-se as seguintes notas:

- No **Modo 1**, como G_m é selecionado, as componentes de e_s são determinadas através das equações (4.47) e (4.48) e do fator de regulação da tensão k_m .
- Quando G_x é escolhido, no **Modo 2** de operação, são utilizadas as equações (4.52) e (4.53) e o fator de compensação da reatância série k_x na determinação de e_s .
- Finalmente, no **Modo 3**, G_δ é selecionado, a fim de que o ASC efetue o defasamento angular, injetando em série com a linha uma tensão e_s cujas componentes são determinadas a partir das equações (4.55) e (4.56) e do fator k_δ .

Ainda, da figura 4.8, é observado que, de posse da informação sobre que tensões ($e_{s\alpha}$ e $e_{s\beta}$) devem ser produzidas nos terminais trifásicos do conversor, são calculados o fator de modulação (m_s) e o ângulo de fase (ϕ_s), a serem utilizados na definição dos pulsos, como será melhor detalhado na próxima seção referente à implementação do ASC.

4.7 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO ASC NO SABER

Na presente seção é apresentada toda a implementação do modelo do ASC descrito anteriormente na plataforma SABER, enfatizando os *templates* desenvolvidos neste capítulo. Para tanto, o arranjo do referido modelo é reproduzido na figura 4.9.

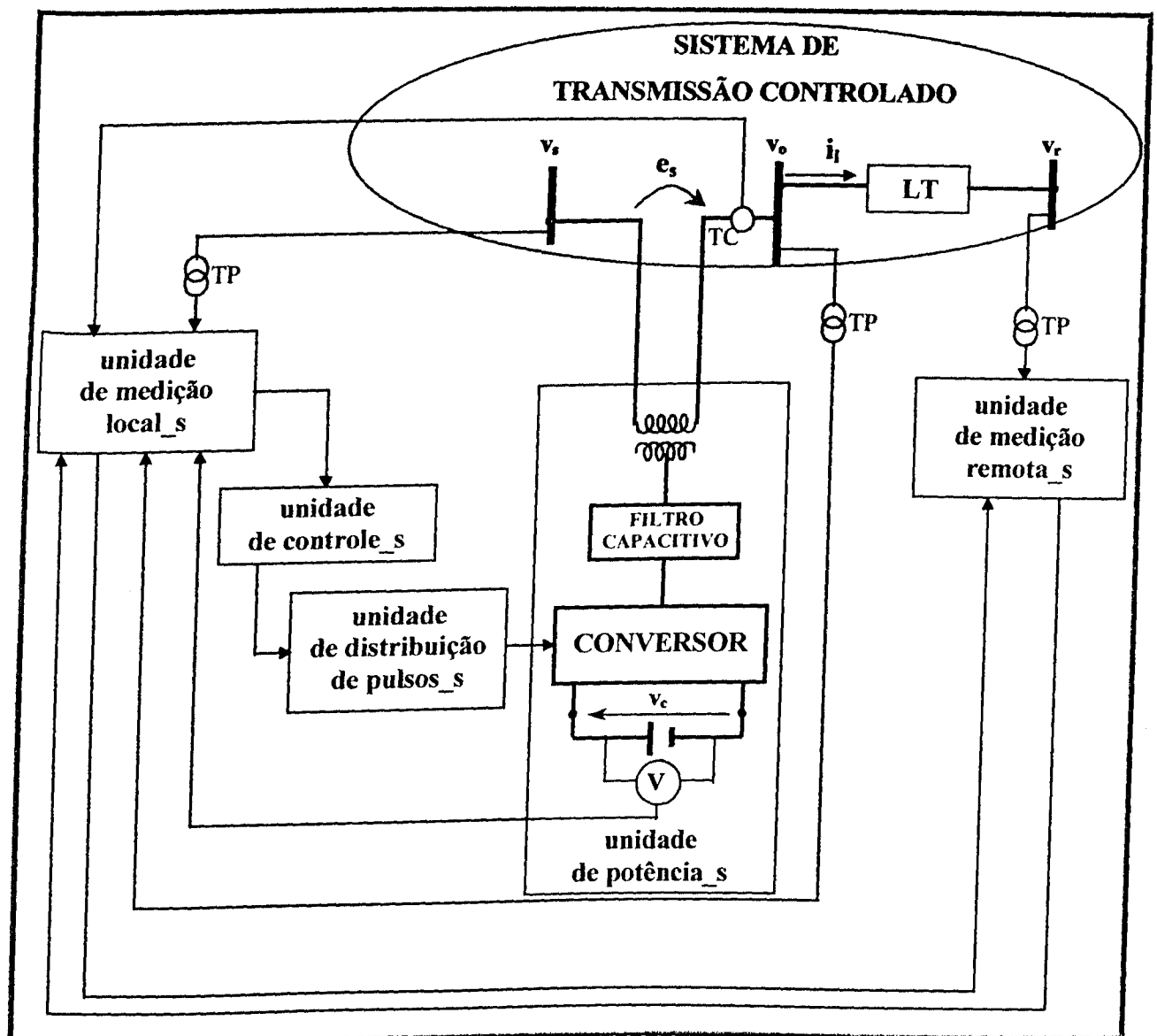


Figura 4.9– Esquema de conexão do ASC em um sistema de potência.

Da mesma forma que no ASVC, o conversor utilizado no presente compensador série é do tipo VSI com chaveamento PWM. Face a isto, os distúrbios a serem provocados no sistema de transmissão devido ao funcionamento do ASC ocorrem na forma de harmônicos de tensão os quais, devido às suas características, podem ser eliminados através do filtro capacitivo localizado na saída do equipamento, como pode ser constatado na figura anterior. A configuração do referido filtro encontra-se no detalhe na figura 4.10.

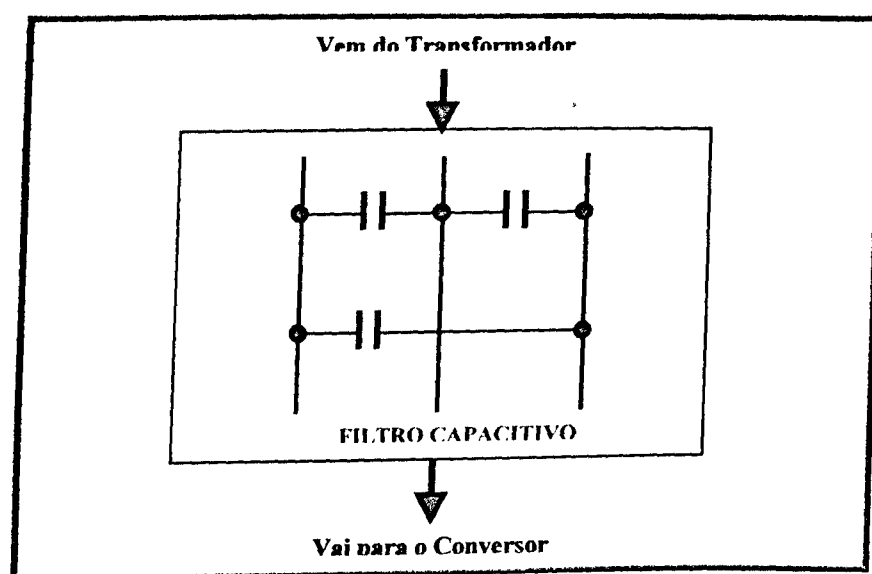


Figura 4.10 – Configuração do filtro capacitivo

Um outro ponto a ser observado na figura 4.9 é que, a tensão nos terminais de corrente contínua do conversor, ou seja nos terminais do capacitor, é sustentada por uma fonte CC. Isto porque, existem inúmeras estratégias para manutenção desta tensão em um valor constante, dentre as quais podem se destacar a conexão de baterias nestes terminais, como é o presente caso, ou até mesmo, o acoplamento de um equipamento do tipo ASVC através de um capacitor comum. Este último procedimento retrata exatamente a configuração do Controlador de Fluxo de Potência Unificado – UPFC a ser abordado no Capítulo V.

A exposição do modelo implementado do compensador série avançado é feita através das suas partes componentes. Estas são formadas por cinco unidades principais mostradas na figura 4.11, onde também são destacados os sinais de intercâmbio entre as mesmas.

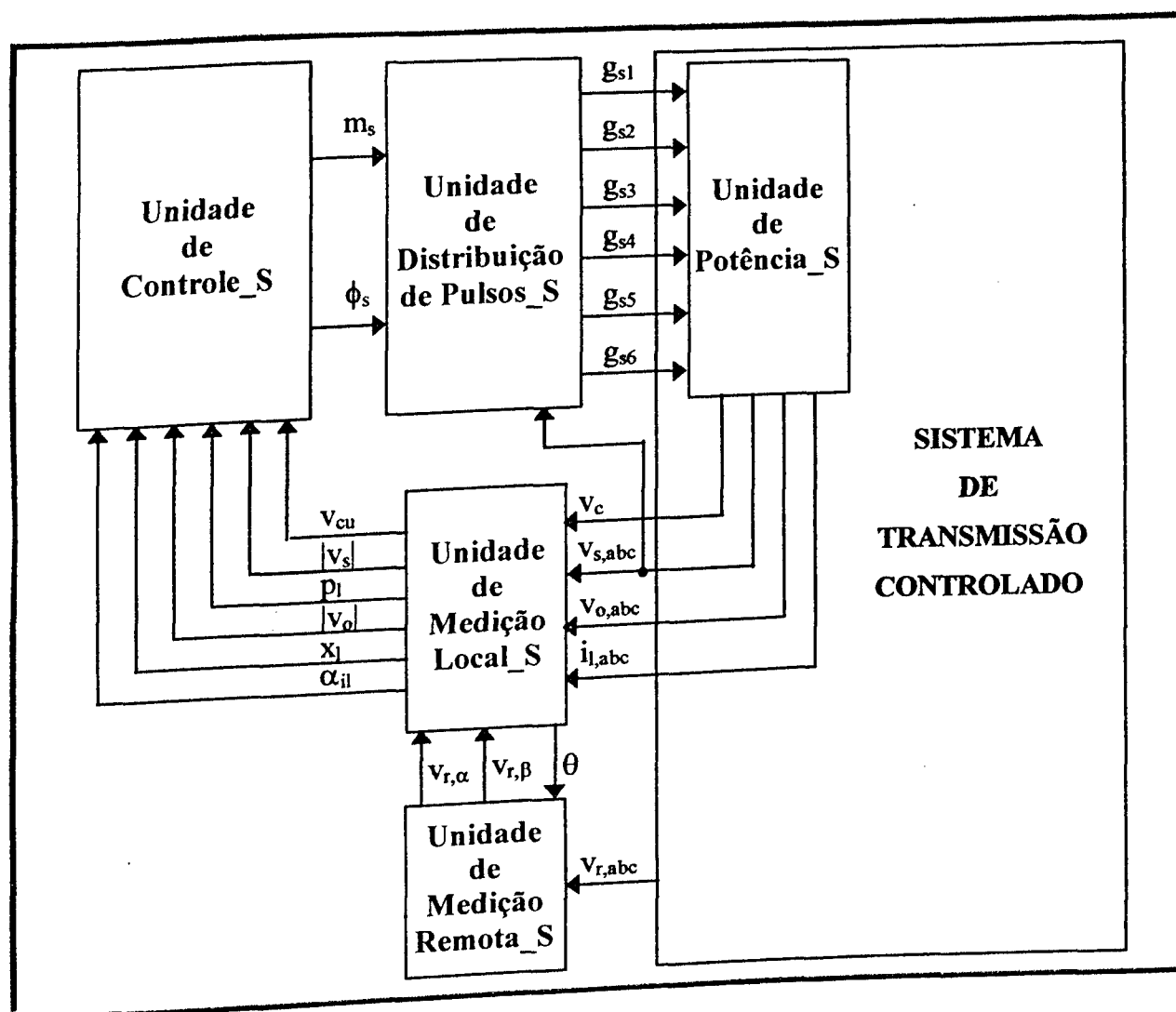


Figura 4.11 – Diagrama esquemático do modelo geral do ASC implementado

Baseando-se na figura 4.11, pode-se dizer que cada unidade (Potência_S, Medição Local_S, Medição Remota_S, Controle_S e Distribuição de Pulsos_S) é caracterizada por suas funções, as quais são detalhadas nas subseções seguintes.

4.7.1 UNIDADE DE POTÊNCIA_S

A Unidade de Potência_S é composta pelos seguintes itens: transformador série de acoplamento entre o ASC e o sistema, filtro capacitivo, ponte conversora, fonte de tensão nos terminais CC do conversor e elementos passivos adicionais (resistores e indutores). Com isso, a topologia da Unidade de Potência é ilustrada na figura 4.12.

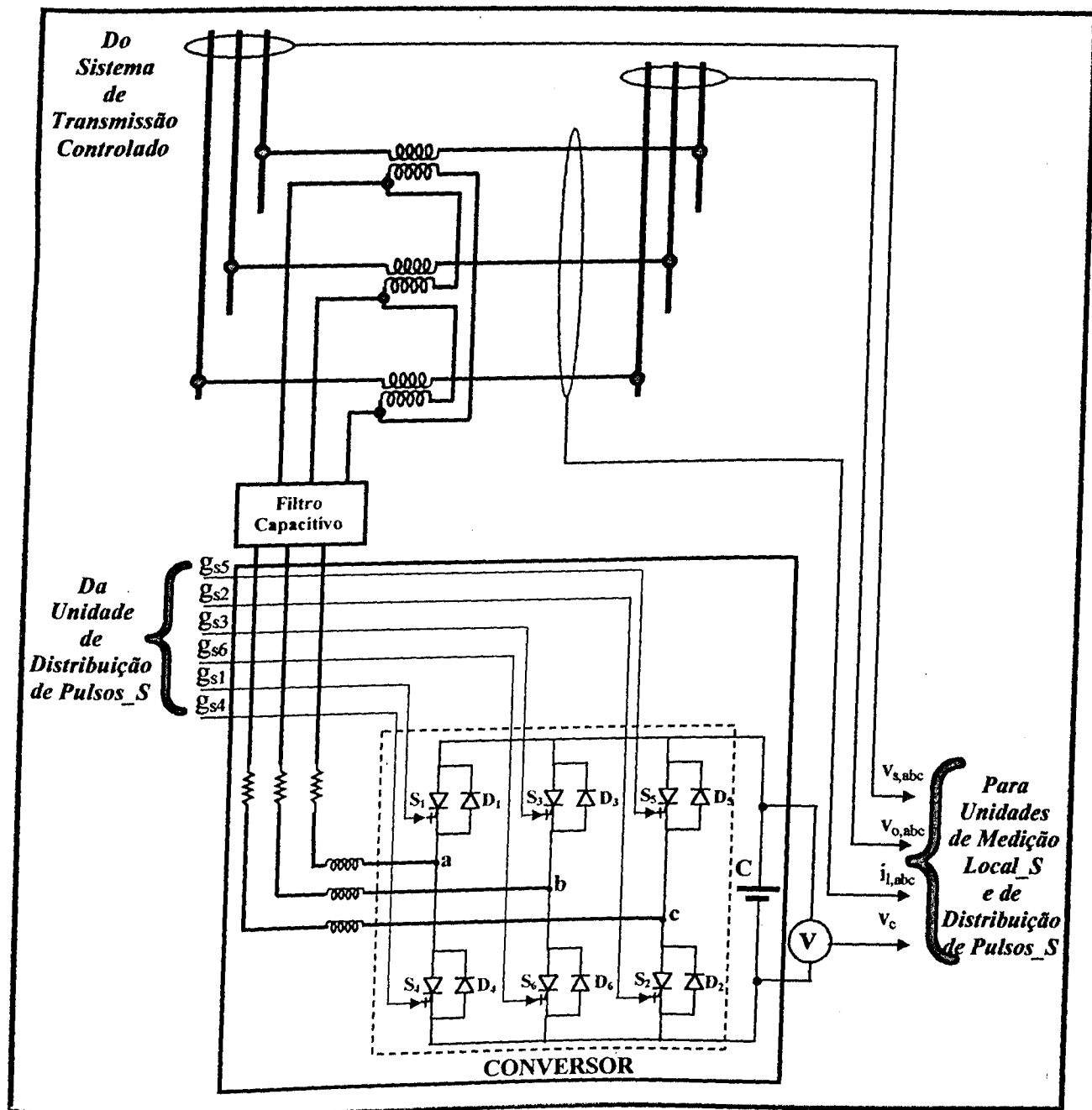


Figura 4.12 – Diagrama de blocos do template Unidade_Potência_S do ASC implementado

Como pode ser constatado a partir da figura anterior, da mesma forma e pelos mesmos motivos que o ASVC apresentado no Capítulo III, o circuito de potência do ASC é modelado de forma trifásica, sendo que as fases são independentemente representadas.

4.7.2 UNIDADE DE MEDIÇÃO LOCAL_S

Uma vez que o ASC encontra-se conectado em série com o sistema, nesta unidade é feita a aquisição das tensões trifásicas à montante (v_s) e à jusante (v_o) deste equipamento, bem como das correntes trifásicas na linha de transmissão e da tensão da fonte CC nos terminais de corrente contínua do conversor, como mostram as figuras 4.9, 4.10 e 4.12. Além disso, nesta unidade são efetuadas as manipulações dos sinais medidos, tais como: transformação vetorial das tensões e correntes, cálculo dos valores de potência, reatância e fator de potência na linha e cálculo do módulo e ângulo das tensões v_s e v_o referidas anteriormente. Com exceção do ângulo θ da tensão v_s , o qual é enviado para a Unidade de Medição Remota_S, todas as grandezas calculadas são destinadas à Unidade de Controle no formato requerido pela mesma.

O *template*, desenvolvido neste trabalho, que representa a referida unidade no simulador SABER é denominado por **Unidade_Medição_Local_S**, cujo diagrama de blocos é exibido na figura 4.13. Vale observar que, os blocos deste diagrama consistem, também, de *templates* construídos durante o presente trabalho, sendo que alguns destes já foram detalhados no Capítulo III dispensando, portanto, maiores comentários.

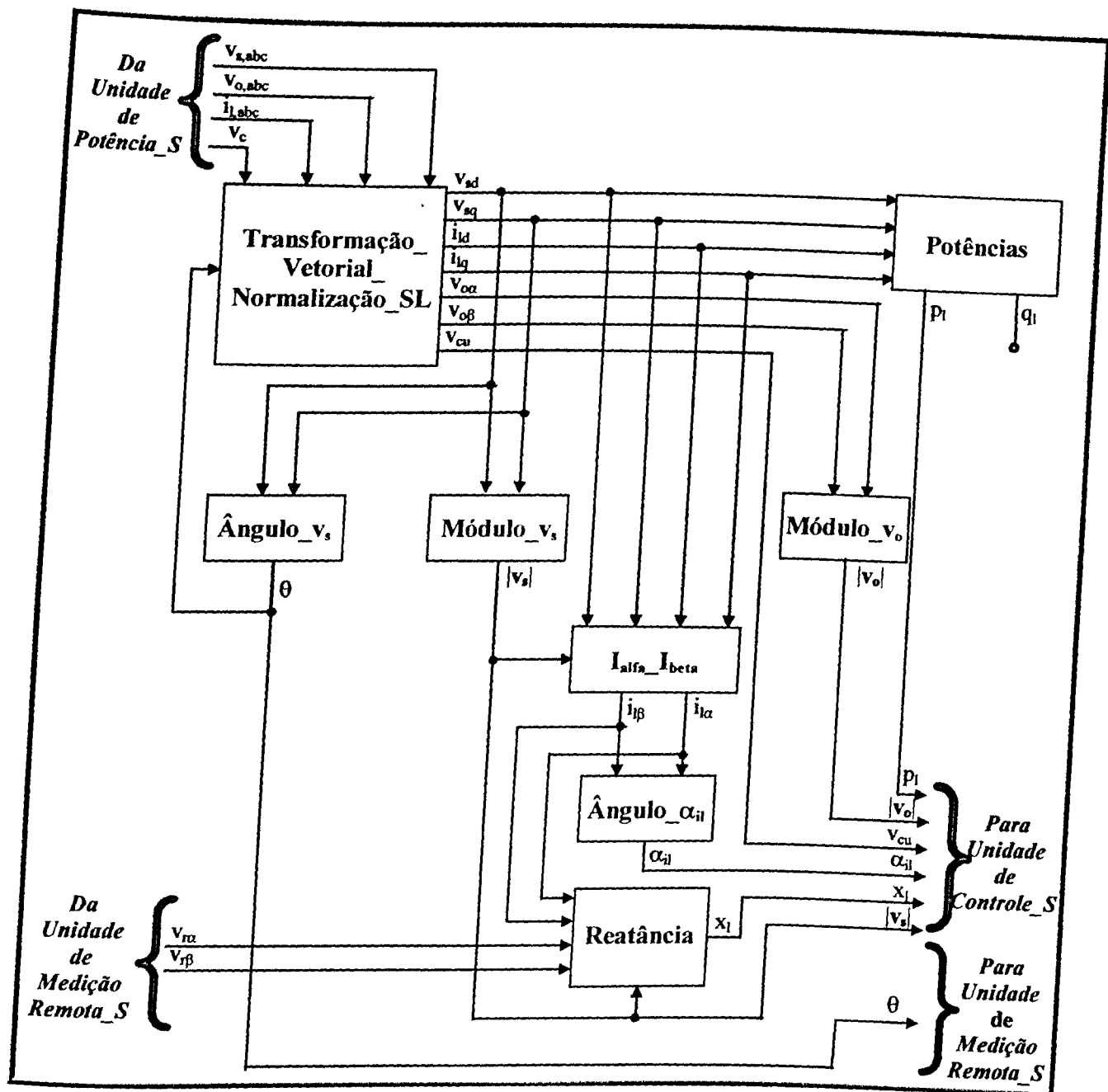


Figura 4.13 – Diagrama de blocos do *template* Unidade_Medição_Local_S do ASC implementado

Do diagrama anterior pode-se identificar 4 *templates*, além dos outros 4 já utilizados e comentados no modelo do ASVC (**Módulo_v_s**, **Ângulo_v_s**, **Potências** e **I_alfa_I_beta**), que compõem a Unidade de Medição. Deve-se observar porém que, no ASC os *templates* **Potências** e **I_alfa_I_beta** calculam as potências e correntes na linha de transmissão, respectivamente. Com relação aos *templates* novos, suas funções são descritas na sequência:

- **Transformação_Vetorial_Normalização_SL:** este *template* é semelhante àquele utilizado e detalhado no ASVC. Contudo, além de efetuar a normalização e a transformação vetorial (**abc** para **dq**) das tensões $v_{s,abc}$ e das correntes na linha de transmissão $i_{l,abc}$, este bloco manipula também as tensões à jusante do ASC ($v_{o,abc}$), como indica a figura 4.14.

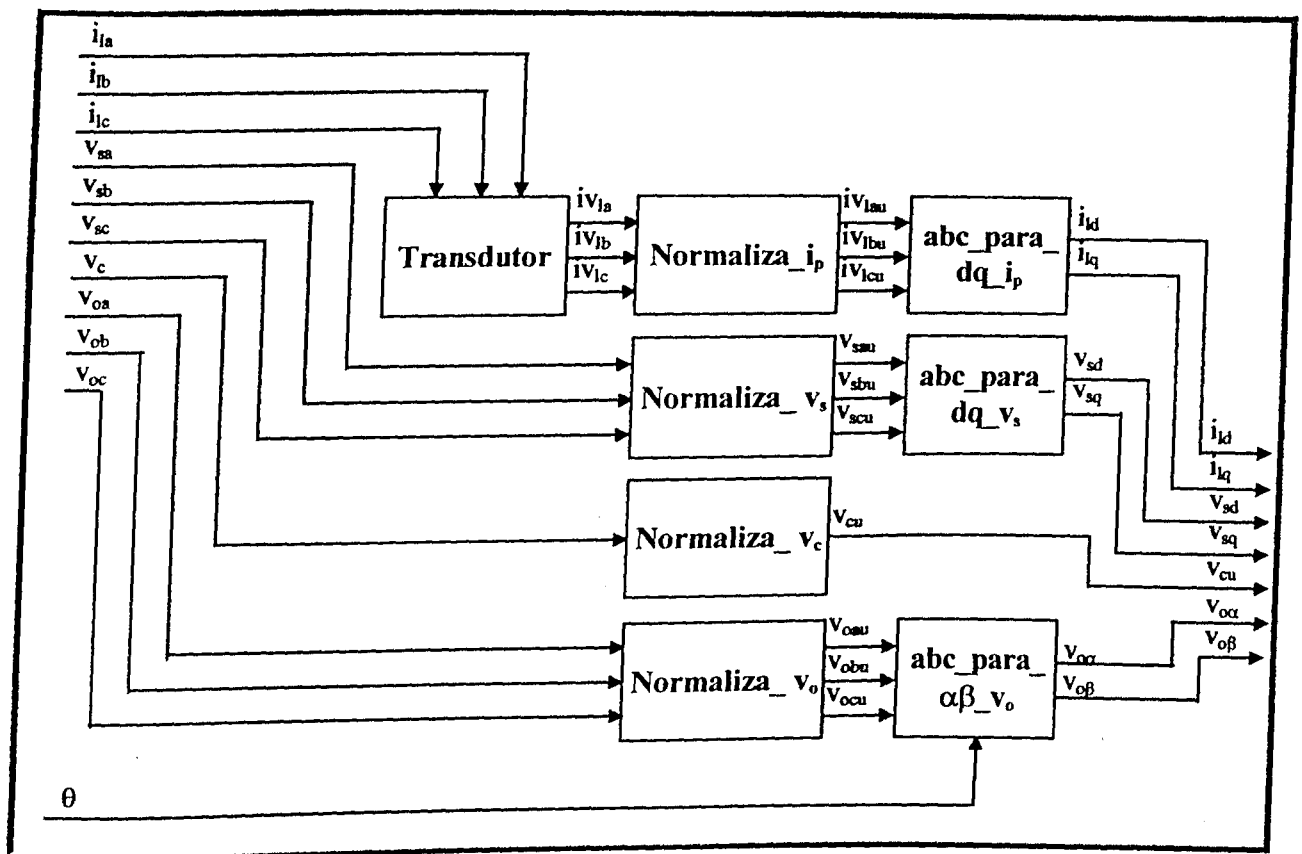


Figura 4.14 – Diagrama de blocos do *template* Transformação_Vetorial_Normalização_SL

Tais tensões $v_{o,abc}$, após serem normalizadas por **Normaliza_ v_o** , são transformadas para grandezas do sistema ortogonal síncrono ($v_{o\alpha}$ e $v_{o\beta}$), conforme o procedimento apresentado na equação 4.37 (seção 4.4), através do *template* **abc_para_ $\alpha\beta$ _v_o**.

- **Módulo_v_o**: calcula o módulo do vetor da tensão (**v_o**) na barra à jusante do ASC através das suas componentes **v_{oα}** e **v_{oβ}** e da equação (4.63).

$$|v_o| = \sqrt{v_{o\alpha}^2 + v_{o\beta}^2} \quad (4.63)$$

- **Ângulo_α_{il}**: calcula o ângulo entre o vetor de corrente na linha (**i_l**) e o vetor da tensão de referência (**v_s**) através das suas componentes **i_{lα}** e **i_{lβ}** e da equação (4.64).

$$\alpha_{il} = \tan^{-1} \left(\frac{i_{l\beta}}{i_{l\alpha}} \right) \quad (4.64)$$

- **Reatância**: a partir dos sinais de tensão e corrente (**|v_s|**, **v_{rα}**, **v_{rβ}**, **i_{lα}** e **i_{lβ}**), calcula a reatância atual (**x_l**) da linha de transmissão utilizando, para tanto, a equação (4.65).

$$x_l = \frac{-v_{r\beta}i_{l\alpha} - (v_s - v_{r\alpha})i_{l\beta}}{i_{l\alpha}^2 + i_{l\beta}^2} \quad (4.65)$$

Uma vez obtidos os sinais (**p_l**, **|v_o|**, **|v_s|**, **α_{il}**, **x_l** e **v_{cu}**), a serem utilizados pelo sistema de controle do ASC, os mesmos são enviados para **Unidade_Control_S**. Já o ângulo **θ**, calculado pelo bloco **Ângulo_v_s**, é emitido para os *templates* **Transformação_Vetorial_Normalização_SL** (que se encontra nesta mesma unidade) e **Unidade_Medição_Remota_S**.

4.7.3 UNIDADE DE MEDIÇÃO REMOTA_S

Esta unidade é semelhante à Unidade de Medição Local_S, entretanto, a aquisição de tensões trifásicas é efetuada no terminal receptor da linha de transmissão, como mostram as figuras 4.9 e 4.11. Neste bloco, também, é feita a normalização e transformação vetorial dessas grandezas seguidas do cálculo do módulo do vetor correspondente, como mostra a figura 4.15.

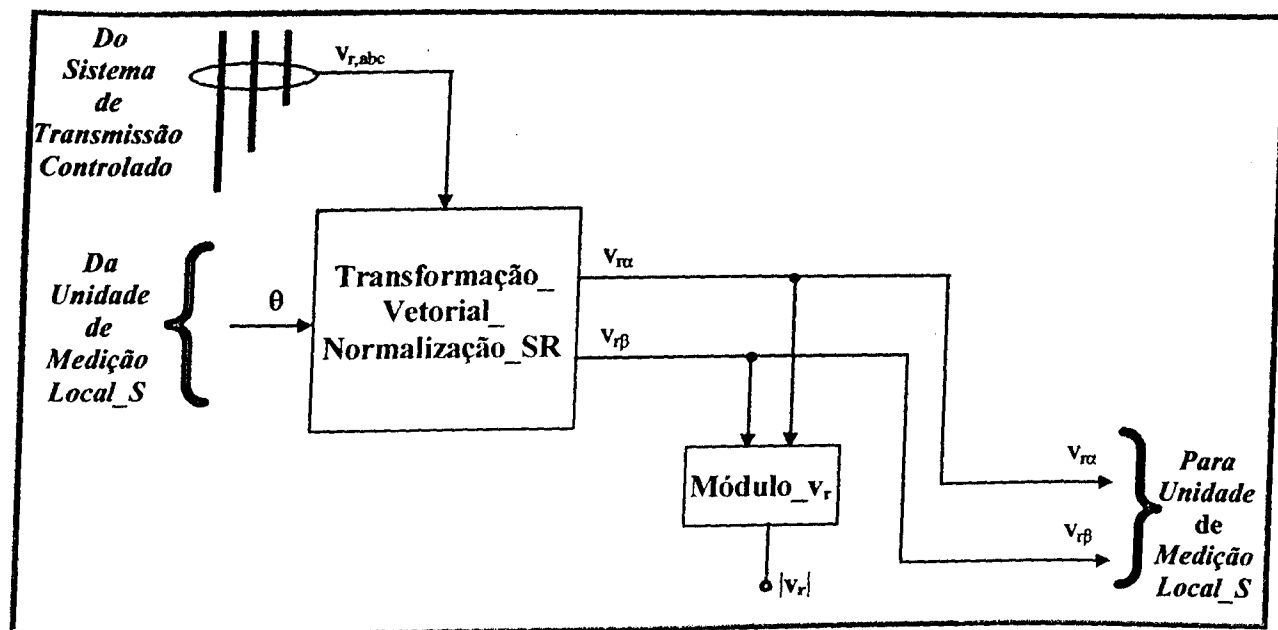


Figura 4.15 – Diagrama de blocos do *template* Unidade_Medicação_Remota_S do ASC implementado

Os blocos que constituem o *template* Unidade_Medicação_Remota_S já foram comentados anteriormente, cabendo ressaltar que o bloco **Transformação_Vetorial_Normalização_SR** executa tais funções apenas sobre as tensões trifásicas $v_{r,abc}$. Assim, uma vez obtidas as componentes $v_{r\alpha}$ e $v_{r\beta}$, através dos mesmos procedimentos ora aplicados para outras tensões, estas são enviadas para o *template* Unidade_Medicação_Local_S, onde são utilizadas no cálculo da reatância atual da linha de transmissão. O módulo do vetor correspondente a esta tensão ($|v_r|$) é calculado somente para uma monitoração interna.

4.7.4 UNIDADE DE CONTROLE_S

Esta unidade, representada pelo *template* **Unidade_Control_S**, comporta as malhas de controle discutidas na seção 4.6, cuja saída consiste dos sinais necessários à geração dos pulsos do conversor. O diagrama de blocos representativo deste modelo é mostrado na figura 4.16.

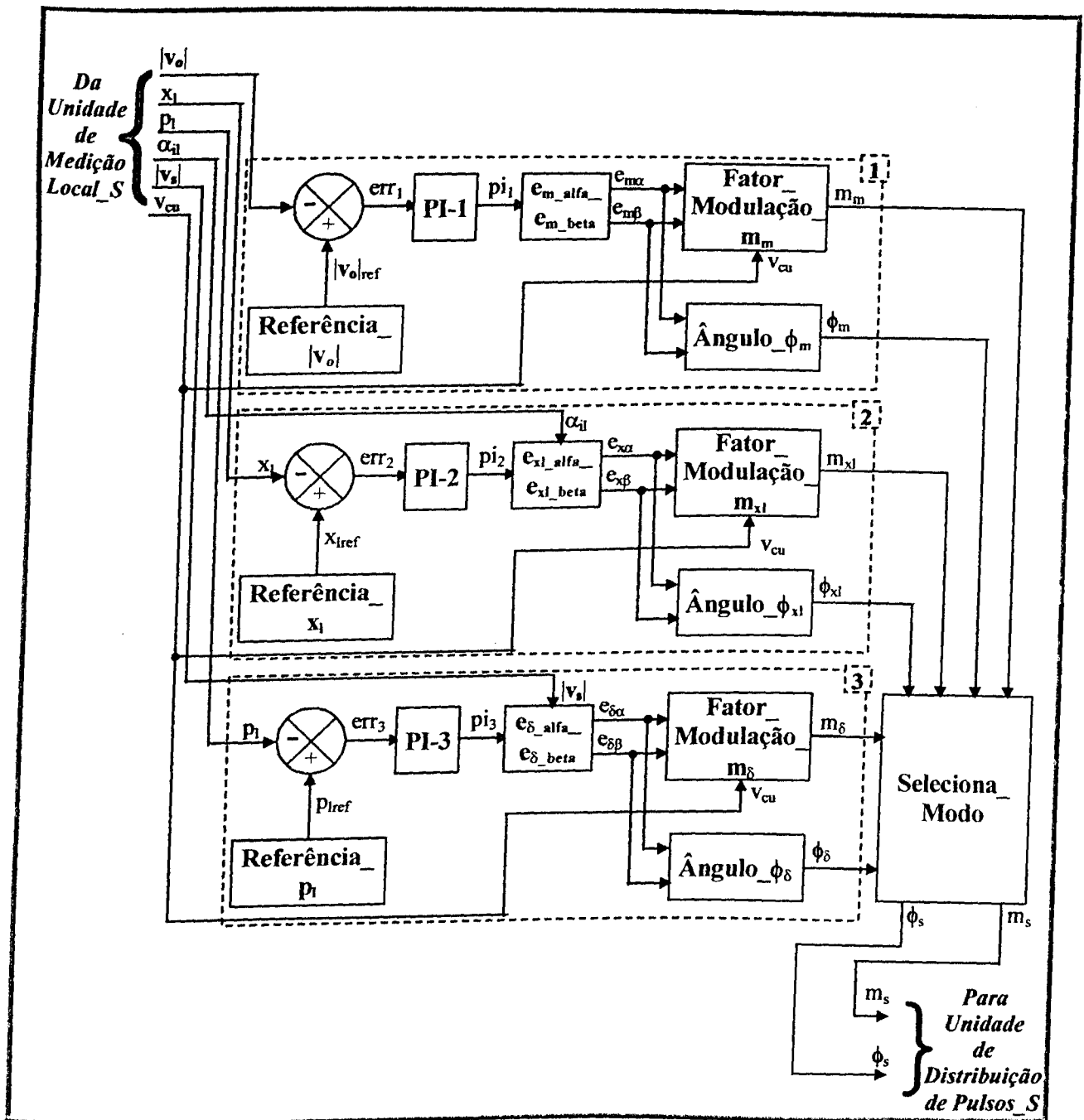


Figura 4.16 – Diagrama de blocos do *template* **Unidade_Control_S** do ASC implementado

Observando a figura 4.16 constata-se a presença de três malhas independentes para o controle da magnitude da tensão v_o (**Malha 1**), da reatância série x_l da linha (**Malha 2**) e da potência ativa transmitida p_l (**Malha 3**).

Com relação à **Malha 1**, a lógica adotada consiste na comparação do sinal $|v_o|$, proveniente da Unidade de Medição Local_S, com o valor de referência, oriundo do *template* **Referência_ $|v_o|$** que gera um sinal constante estipulado pelo usuário. O erro resultante de tal comparação (err_1) é enviado para o bloco proporcional/integral (**PI-1**) que altera a sua saída (pi_1) no sentido de suprimir o referido erro ($|v_o| = |v_o|_{ref}$). Este sinal pi_1 , que corresponde ao fator de compensação k_m das equações 4.50 e 4.51 (seção 4.5), é inserido no *template* **$e_{m_alfa_}e_{m_beta}$** o qual define, através das citadas equações, as componentes $e_{m\alpha}$ e $e_{m\beta}$ do vetor necessário para este modo de controle. Tais componentes são processadas pelos *templates* **Fator_Modulação_ m_m** e **Ângulo_ ϕ_m** através das equações (4.66) e (4.67), respectivamente, de modo que os resultados sejam o fator de modulação (m_m) e o ângulo (ϕ_m) requeridos para a supressão do erro err_1 .

$$m_m = 2 \frac{\left(\sqrt{e_{m\alpha}^2 + e_{m\beta}^2} \right) v_{ca_base} \sqrt{3}}{v_{cu} (v_{c_base})} \quad (4.66)$$

$$\phi_m = \tan^{-1} \left(\frac{e_{m\beta}}{e_{m\alpha}} \right) \quad (4.67)$$

Vale observar que, na equação (4.66), as grandezas v_{ca_base} e v_{c_base} são as mesmas utilizadas no *template* **Transformação_Vetorial_Normalização_SL** da Unidade de Medição Local_S para normalização das tensões CA e nos terminais da fonte CC, respectivamente.

No tocante à **Malha 2**, a comparação da reatância atual da linha x_l com sua respectiva referência (valor definido pelo usuário presente na saída do *template* **Referência_** x_l) dá origem ao erro err_2 que, neste caso é a entrada do controlador (**PI-2**). O produto deste último bloco (pi_2), equivalente ao fator de compensação k_x (seção 4.5), é enviado ao *template* **$e_{x_alfa_}e_{x_beta}$** que calcula as componentes $e_{x\alpha}$ e $e_{x\beta}$ para este modo de controle, a partir das equações (4.50) e (4.51) reescritas em (4.68) e (4.69), respectivamente.

$$e_{x\alpha} = -k_x \sin \alpha_{il} \quad (4.68)$$

$$e_{x\beta} = k_x \cos \alpha_{il} \quad (4.69)$$

Neste caso também, tais componentes são utilizadas para a determinação do fator de modulação m_{xl} e o ângulo ϕ_{xl} necessários para se eliminar o erro err_2 . Isto é executado pelos *templates* **Fator_Modulação_** m_{xl} e **Ângulo_** ϕ_{xl} cujo procedimento é análogo àquele empregado na malha de controle anterior.

Na **Malha 3** da figura 4.16, o erro err_3 , decorrente da comparação entre o sinal medido (p_l) e o de referência (p_{lref}) da potência ativa na linha, é processado pelo controlador **PI-3** que, por sua vez, dá origem ao fator de compensação pi_3 (ou k_δ conforme seção 4.5). Este fator é enviado ao *template* **$e_{\delta_alfa_}e_{\delta_beta}$** (equações (4.70) e (4.71)) para se computar as componentes $e_{\delta\alpha}$ e $e_{\delta\beta}$, as quais, da mesma forma que nas malhas anteriores, são utilizadas para a definição do fator de modulação m_δ e do ângulo ϕ_δ necessários para se eliminar o erro err_3 neste modo de controle.

$$e_{\delta\alpha} = -2|v_s| \sin^2(k_\delta/2) \quad (4.70)$$

$$e_{\delta\beta} = |v_s| \sin(k_\delta) \quad (4.71)$$

Finalmente, uma vez obtidos esses três pares de sinais $((m_m; \phi_m)$, $(m_{xl}; \phi_{xl})$ e $(m_\delta; \phi_\delta)$), e baseando-se no modo de controle escolhido pelo usuário, o *template* **Seleciona_Modo** atribui apenas um dos pares às suas saídas (m_s e ϕ_s), as quais são enviadas à Unidade de Distribuição de Pulsos_S.

4.7.5 UNIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE PULSOS_S

A partir dos sinais enviados por **Unidade_Control_S**, a presente unidade, modelada no simulador SABER pelo *template* **Unidade_Distribuição_Pulsos_S**, produz os pulsos necessários ao disparo das chaves na ponte conversora do ASC. A topologia deste *template* é apresentada na figura 4.17 porém, o detalhamento do seu funcionamento é omitido uma vez que este é idêntico àquele descrito no Capítulo III (seção 3.6.4) para o ASVC.

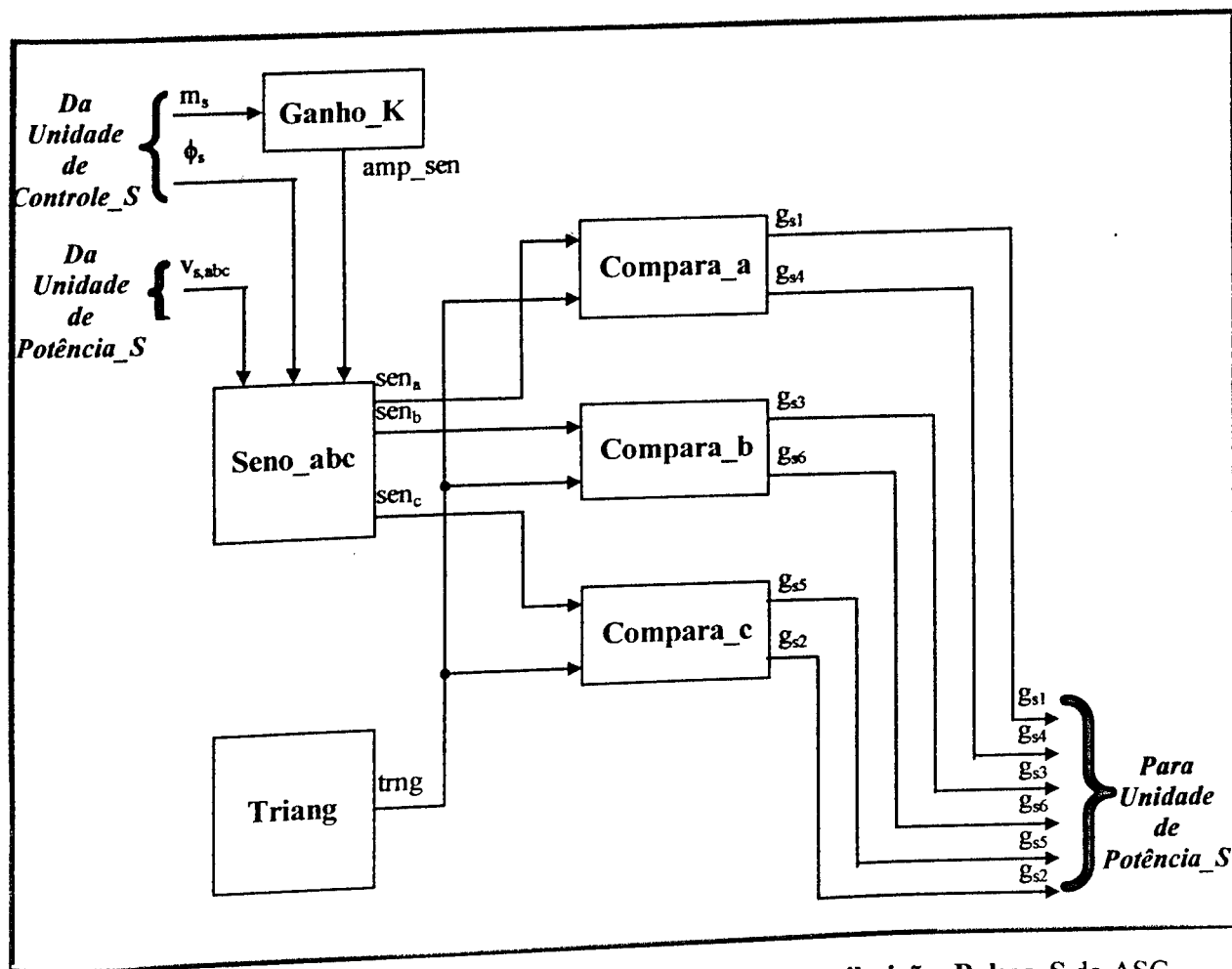


Figura 4.17 – Diagrama de blocos do template *Unidade_Distribuição_Pulsos_S* do ASC implementado

4.8 ESTUDOS DE CASOS

Nesta seção os estudos se destinam à verificação do desempenho operacional do ASC no sentido de atender aos requisitos de transmissão de energia, tais como controle da tensão no terminal emissor da LT, da reatância da linha ou do fluxo de potência através do ângulo de carga. Tais investigações serão efetuadas através de simulações computacionais do mesmo sistema elétrico fictício utilizado no Capítulo III o qual representa um complexo típico, também para o emprego do compensador estático em questão.

4.8.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO

A figura 4.18 ilustra o sistema em anel simulado que, como dito anteriormente, possui as mesmas características daquele detalhado no Capítulo III (seção 3.7.1) no que se refere aos seguintes itens: linhas de transmissão (LT1, LT2, LT3 e LT4), cargas (CARGA2, CARGA3 e CARGA4) e sistemas equivalentes (CONCESS_1 e CONCESS_4).

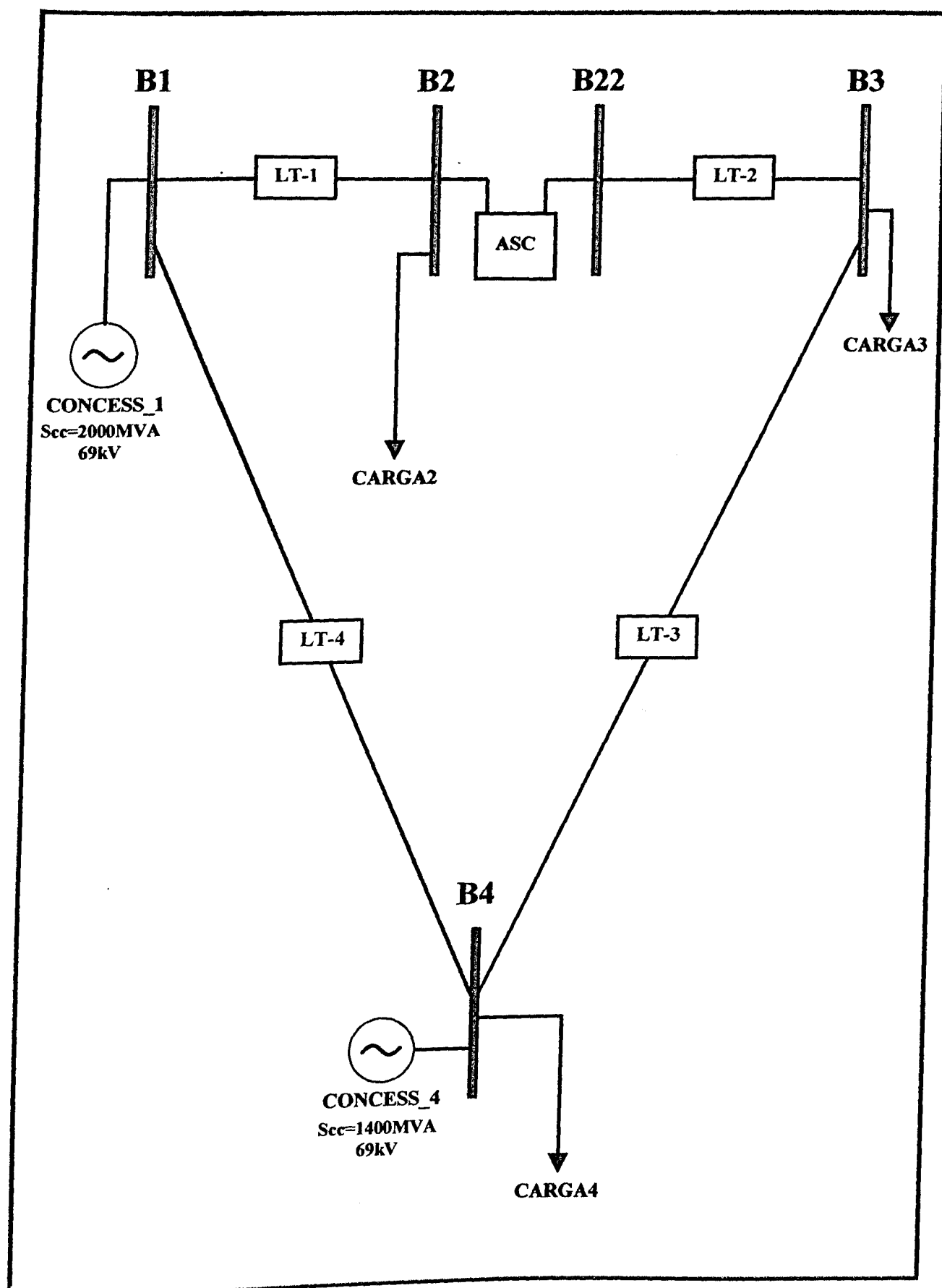


Figura 4.18 – Diagrama unifilar do sistema simulado

No presente caso, observa-se a presença do ASC conectado entre as barras B2 e B22, com o objetivo de prover a flexibilidade de transmissão na linha LT2. Assim, um detalhe do arranjo utilizado para este equipamento no contexto do sistema simulado é mostrado na figura 4.19, e as informações necessárias à simulação do mesmo são listadas na tabela 4.2. Com relação à citada tabela vale ressaltar que, os dados sobre os valores de referência das grandezas controladas e o modo de operação do ASC serão especificados de acordo com o caso simulado.

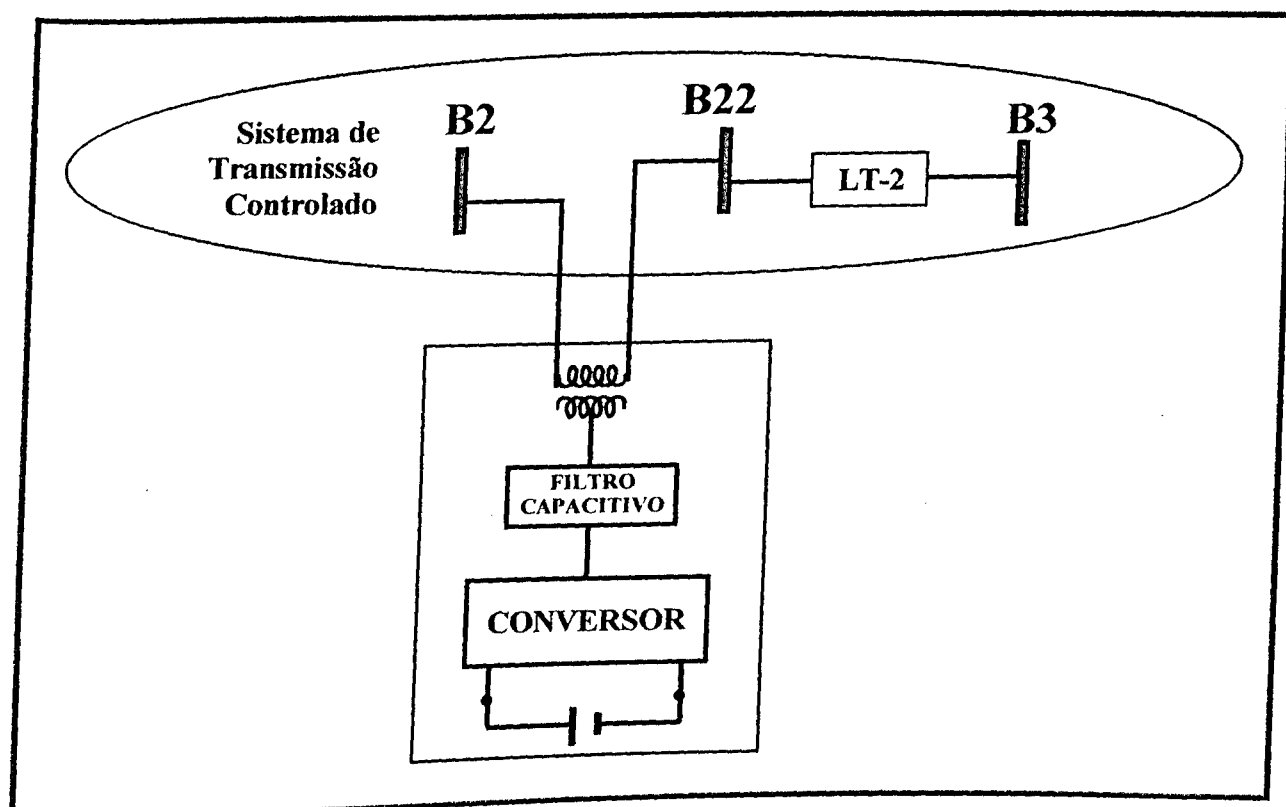


Figura 4.19 – Detalhamento do arranjo do ASC no contexto do sistema simulado

Tabela 4.2 – Dados para simulação do ASC

Dados de entrada	Valor	Unidade
Resistência percentual do transformador série	0,5	[%]
Reatância percentual do transformador série	8	[%]
Potência nominal do transformador série	35	[MVA]
Capacitância dos capacitores do filtro capacitivo	10	[μ F]
Tensão nominal da fonte CC	15	[kV]
Tensão CA base	69	[kV]
Tensão CC base	15	[kV]
Potência base	35	[MVA]
Frequência de chaveamento do conversor	1,8	[kHz]
Tensão de referência no terminal emissor da LT2 (v_{ref})	-	
Reatância de referência da LT2 (x_{lref})	-	
Fluxo de potência requerido através da LT2 (p_{lref})	-	
Modo de operação do ASC	-	
Relação de transformação entre as tensões no primário e no secundário do transformador série	1:1	

4.8.2 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

Uma vez estabelecidos o arranjo físico e as características dos componentes elétricos, procedeu-se a um conjunto de estudos que podem ser agrupados em seis casos identificados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Identificação dos casos simulados

Caso	Objetivo	Descrição		
		Intervalo I	Intervalo II	Intervalo III
		1,8 – 2 s	2 – 3 s	3 – 4 s
1	Verificar o desempenho do ASC na regulação da tensão na barra emissora da LT2 (B22) ao acompanhar um determinado valor de referência (Controle: Modo 1)	Operação do sistema em condições normais, estando o ASC com a tensão de referência CA igual à tensão original do barramento ($V_{o,ref}=0,91pu$)	Em 2s a tensão CA de referência do ASC é alterada para 1pu. ($V_{o,ref}=1,0pu$)	Em 3s a tensão CA de referência do ASC é retornada para o valor original do barramento ($V_{o,ref}=0,91pu$)
2	Observar o comportamento do sistema quando submetido a um afundamento momentâneo de tensão com a presença do ASC (Controle: Modo 1)	Operação do sistema em condições normais (com ASC)	Em 2s é aplicado um afundamento de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (com ASC)	Em 3s o afundamento de 10% é eliminado da barra B2 (com ASC)
3	Observar o comportamento do sistema quando submetido a uma elevação momentânea de tensão com a presença do ASC (Controle: Modo 1)	Operação do sistema em condições normais (com ASC)	Em 2s é aplicada uma elevação de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (com ASC)	Em 3s a elevação de 10% é eliminada da barra B2 (com ASC)
4	Verificar o desempenho do ASC na compensação da reatância série da LT2 ao acompanhar um determinado valor de referência (Controle: Modo 2)	Operação do sistema em condições normais, estando o ASC com a reatância de referência igual à original da LT2 ($X_{l,ref}=0,258pu$)	Em 2s a reatância de referência do ASC é alterada para a metade do valor original da LT2. ($X_{l,ref}=0,129pu$)	Em 3s a reatância de referência do ASC é retornada para o valor original da LT2 ($X_{l,ref}=0,258pu$)
5	Observar o comportamento do sistema quando submetido a uma elevação súbita no valor da reatância da linha controlada com a presença do ASC (Controle: Modo 2)	Operação do sistema em condições normais estando o ASC com a reatância de referência igual à original da LT2 ($X_{l,ref}=0,258pu$)	Em 2s a reatância da LT2 é subitamente dobrada do seu valor original mantendo o ASC com a reatância de referência igual à original da LT2 ($X_{l,ref}=0,258pu$)	Em 3s a reatância da LT2 retorna ao seu valor original estando o ASC com a reatância de referência igual à original da LT2 ($X_{l,ref}=0,258pu$)
6	Verificar o desempenho do ASC no controle do fluxo de potência ativa da LT2 ao acompanhar um determinado valor de referência (Controle: Modo 3)	Operação do sistema em condições normais, estando o ASC com a potência de referência igual à original da LT2 ($P_{l,ref}=10,925MW$)	Em 2s a potência de referência do ASC é elevada ($P_{l,ref}=11,925MW$)	Em 2s a potência de referência do ASC é elevada novamente ($P_{l,ref}=12,925MW$)

4.8.3 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações, os quais exibem as grandezas controladas em cada caso e, ainda, a tensão série injetada pelo ASC de modo a atender aos requisitos de controle. Além disso, é importante apresentar o perfil da tensão na barra B2 correspondente àquela à montante do compensador em questão.

Vale ressaltar que, nos Casos 2 e 3, onde o sistema apresenta distúrbios de afundamento e elevação momentâneas de tensão e o ASC encontra-se presente, serão efetuadas análises comparativas com os resultados obtidos quando da ausência deste equipamento de compensação. Tais situações correspondem aos Casos 2 e 4, respectivamente, discutidos na seção 3.8 do Capítulo III.

Face a isto, os resultados obtidos são agrupados, também, em seis conjuntos de acordo com os casos simulados.

4.8.3.1 – Caso 1 – Regulação de tensão através do ASC (Controle: Modo 1)

Como mencionado na tabela 4.3, o presente caso objetiva verificar o desempenho do ASC na regulação da tensão na barra emissora da LT2 (B22) ao acompanhar um determinado valor de referência. Para tanto, aos 2 segundos de simulação, tal valor é elevado de 0,91p.u. (tensão original do barramento sem a presença do ASC) para 1,0p.u, onde é mantido durante 1 segundo. Aos 3 segundos a mesma referência é reduzida para o referido valor original de tensão no barramento, a fim de se enfatizar a alta possibilidade de manipulação desta grandeza.

Em face deste cenário, a figura 4.20 ilustra o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B22, durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s). Já a figura 4.21 apresenta um “zoom” da mesma grandeza nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação, a saber: 1,8 a 2s, 2 a 3s e 3 a 4s.

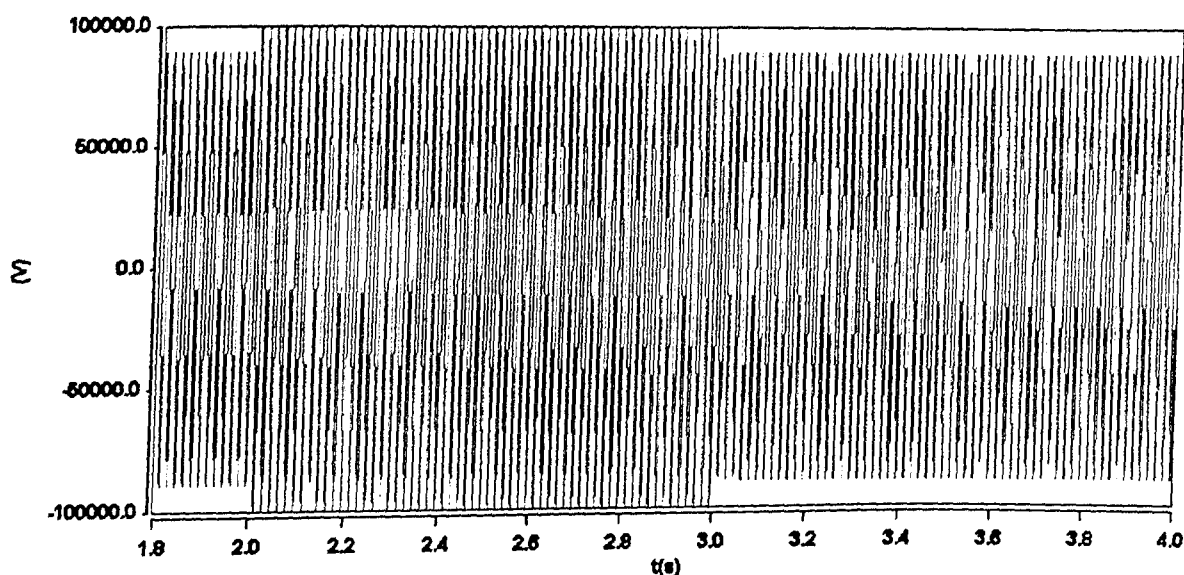


Figura 4.20 – Tensão entre fases na barra B22 – regulação de tensão

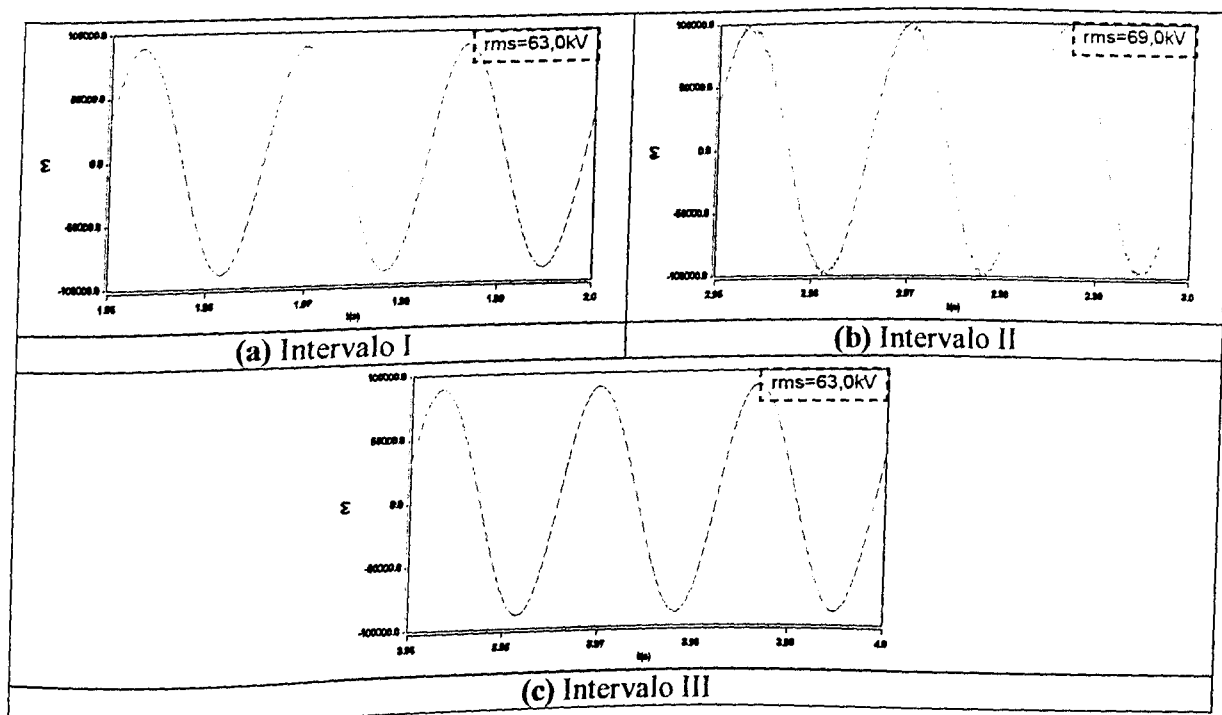


Figura 4.21 –Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos de cada intervalo) – regulação de tensão

Das figuras 4.20 e 4.21 verifica-se que, a tensão rms na barra B22 encontra-se baixa (63kV) até que, a partir de 2s, acompanhando a referência do ASC, tal grandeza controlada passa a apresentar o valor de 69kV (1p.u. da tensão nominal do barramento). Uma redução nesse valor rms é observada a partir de 3s devido, mais uma vez, a alteração do patamar de referência do compensador. Tais fatos podem ser melhor visualizados na figura 4.22, que mostra o comportamento da tensão rms na barra B22 juntamente com a referência do ASC.

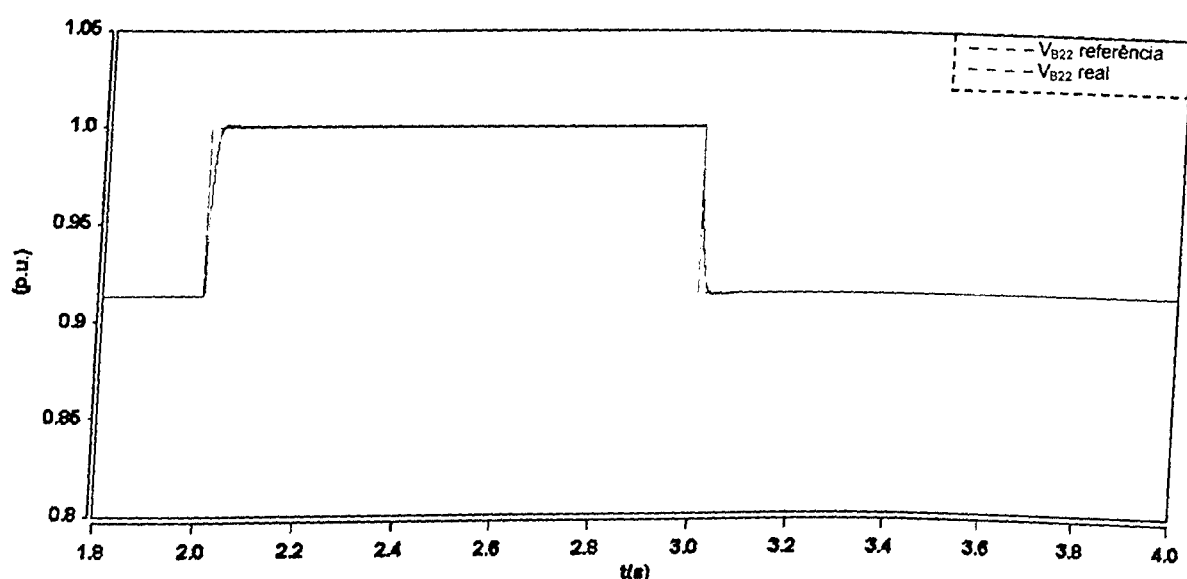


Figura 4.22 – Tensão rms na barra B22 ($V_{base}=69\text{kV}$) – regulação de tensão

A figura 4.23 ilustra, para todo o período de simulação (entre 1,8 e 4,0s), o perfil da tensão injetada em série pelo ASC em uma das fases da LT2. Além disso, a figura 4.24 mostra um “zoom” da mesma grandeza apenas nos três últimos ciclos do **Intervalo II** (2 a 3s), juntamente com as tensões à montante e à jusante do ASC.

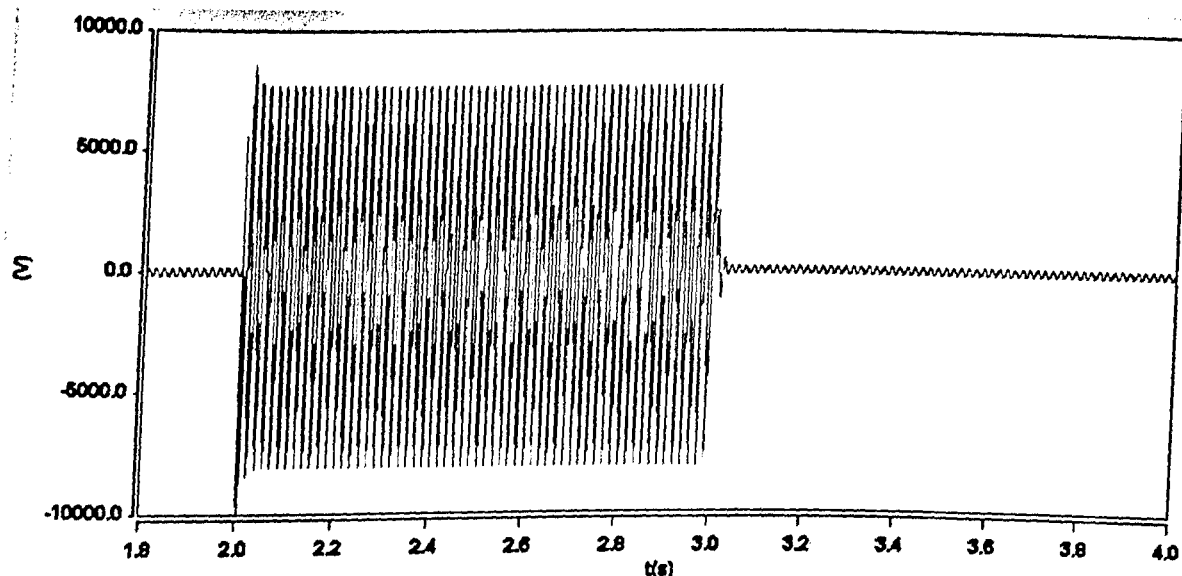


Figura 4.23 – Tensão injetada pelo ASC – regulação de tensão

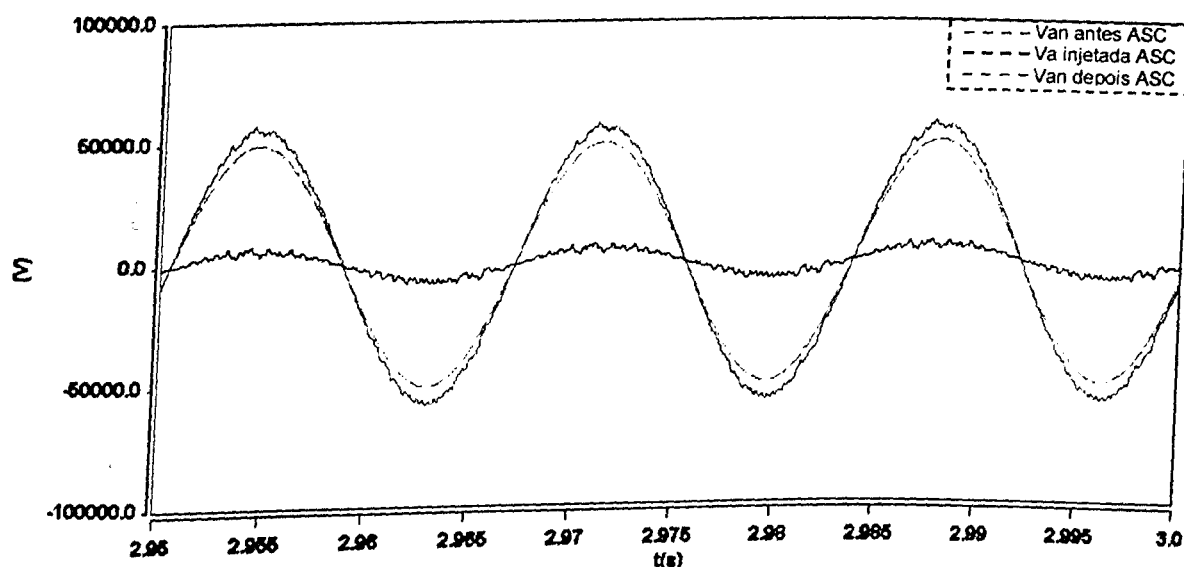


Figura 4.24 – Tensões antes, depois e injetada pelo ASC – regulação de tensão

O gráfico acima evidencia que a tensão injetada pelo ASC ($V_{rms}=4,44kV$) encontra-se em fase com a tensão na barra B2 ($V_{rms}=35,4kV$), o que acarreta em uma alteração apenas na magnitude da tensão em B22 ($V_{rms}=39,82kV$), como era de se esperar neste modo de controle. Além disso, apesar de se constatar a presença de ruídos tanto na tensão injetada quanto na tensão fase/neutro da barra B22, uma menor incidência deste distúrbio é conferida na tensão fase/fase mostrada anteriormente na figura 4.21.

Um ponto a ser ressaltado é que, apesar da regulação na barra B22 ter sido bem sucedida, durante a operação do ASC (entre 2 e 3 segundos), o nível rms da tensão na barra B2 é reduzido de 0,91p.u. para 0,89p.u., como mostra a figura 4.25.

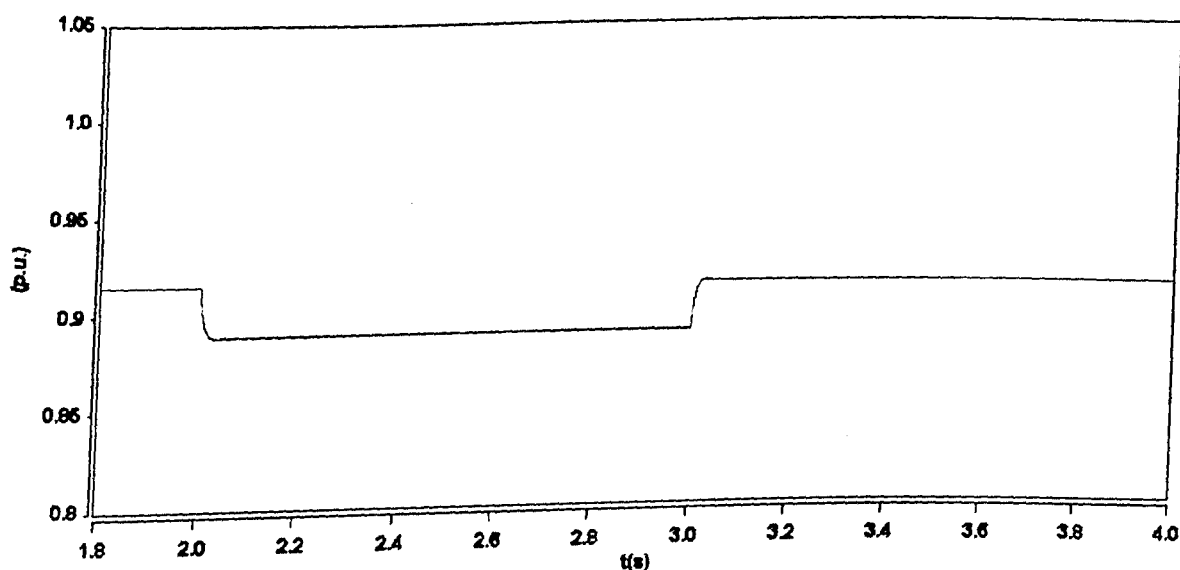


Figura 4.25 – Tensão rms na barra B2 ($V_{base}=69\text{kV}$) – regulação de tensão

A explicação para tal comportamento reside no fato de que, uma vez elevada a tensão no terminal emissor da LT2 esta passa a transmitir mais potência, já que a carga atendida pela mesma é modelada por impedância constante. Esse acréscimo de carga provoca a referida diminuição no valor da tensão na barra B2, já que a mesma encontra-se desprovida de qualquer tipo de compensação de reativos.

4.8.3.2 – Caso 2 – Afundamento de tensão com a presença do ASC (Controle: Modo 1)

O objetivo deste caso é observar o comportamento da tensão na barra B22, cuja magnitude é controlada pelo ASC, quando o sistema sob análise é submetido a um afundamento momentâneo de tensão. Dessa forma, em $t = 2s$ tal distúrbio é imposto ao sistema com intensidade de 10% e duração de 1 segundo.

O resultado de tal manobra é indicado na figura 4.26 que ilustra o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B22 durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s). Além disso, a figura 4.27 apresenta um “zoom” da mesma grandeza nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação.

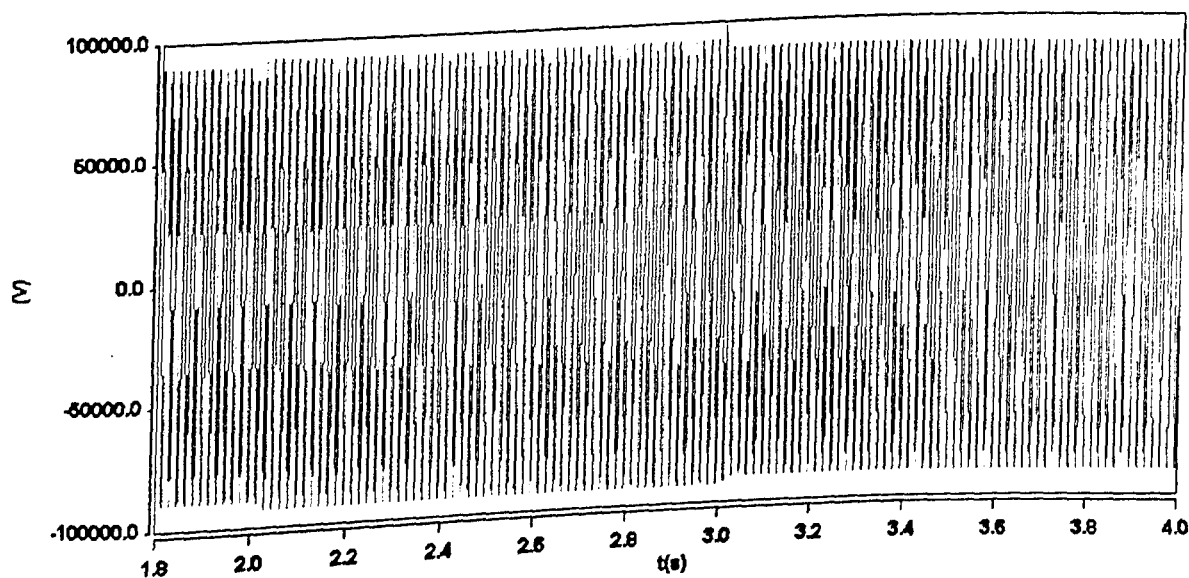


Figura 4.26 – Tensão entre fases na barra B22 – afundamento de tensão com ASC

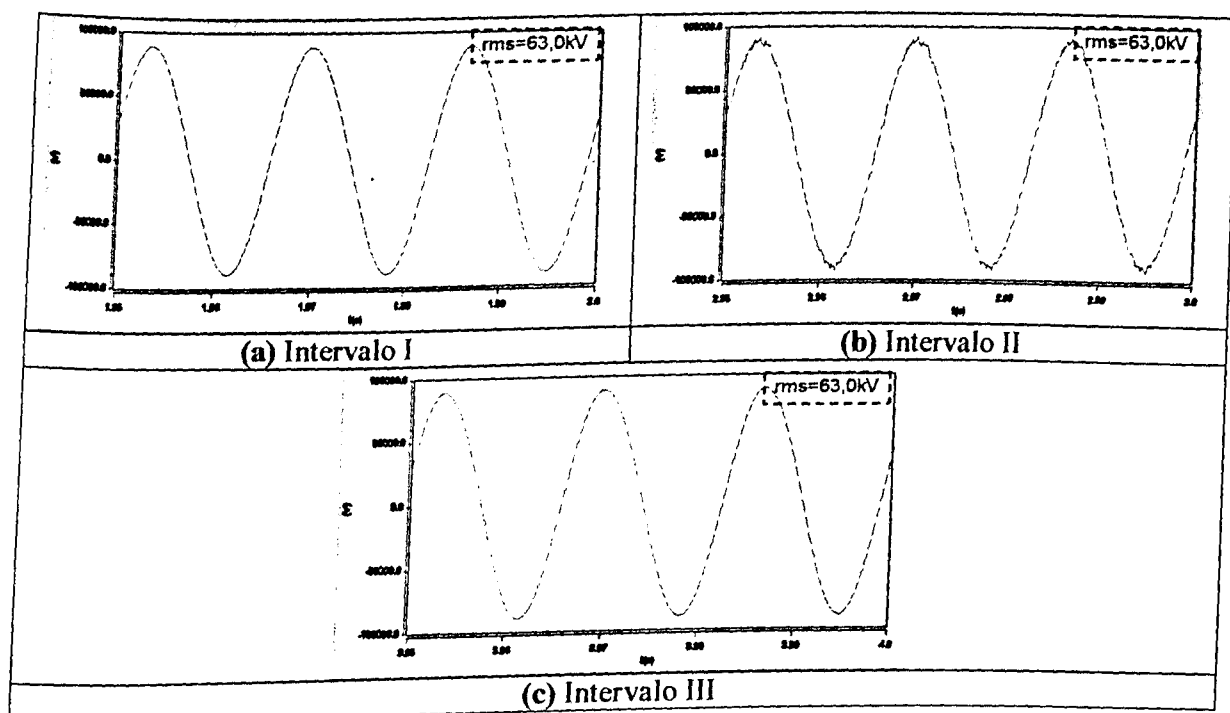


Figura 4.27 –Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos de cada intervalo) – afundamento de tensão com ASC

Das figuras 4.26 e 4.27 pode se constatar a eficiência do compensador avançado em manter a tensão na barra B22 em um valor constante 63kV (0,91p.u.), mesmo durante a imposição de um afundamento sobre a mesma. Deve-se ressaltar neste momento que, o sombreamento presente na tensão mostrada na figura 4.26 entre 2 e 3 segundos é consequência de um irrisório conteúdo de ruídos nessa forma de onda devido à operação do ASC. Este fato, contudo, não interfere no valor eficaz da grandeza sob análise. Além disso, verifica-se na figura 4.28 que, apenas de uma forma transitória, tal tensão experimenta uma variação de -0,02p.u. em $t = 2s$, que pode ser considerada desprezível se comparada com a magnitude do distúrbio. Quando a perturbação é eliminada em $t = 3s$, é possível observar uma pequena elevação (0,94 p.u.) na tensão monitorada, o que não representa maiores inconvenientes.

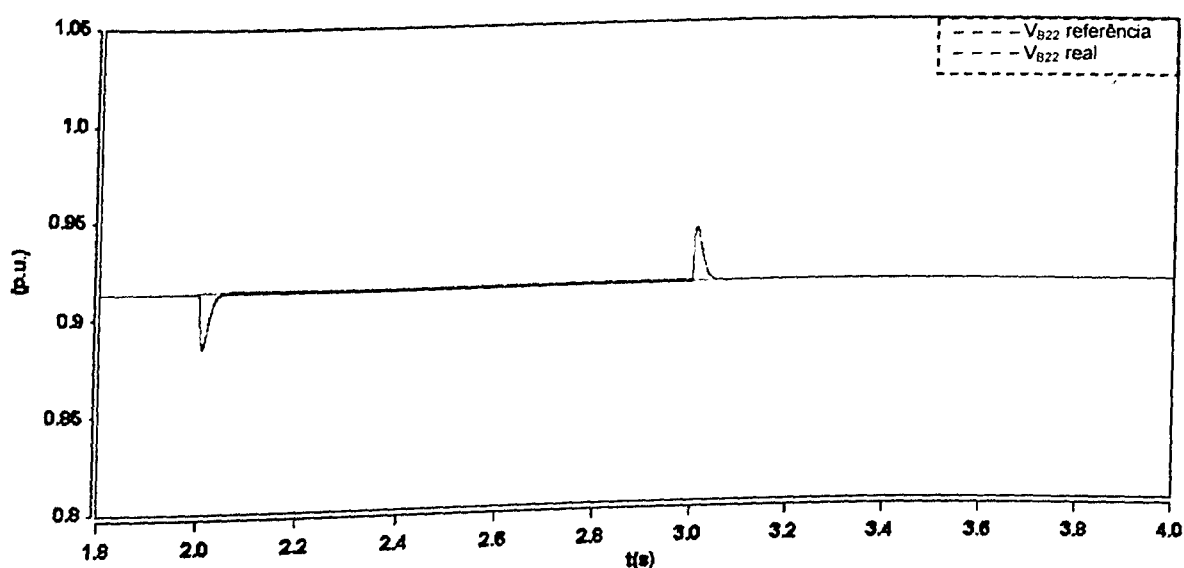


Figura 4.28 – Tensão rms na barra B22 ($V_{base}=69\text{kV}$) – afundamento de tensão com ASC

Para manter constante a tensão na barra B22, durante a ocorrência do evento em questão (**Intervalo II**), o ASC injeta uma tensão de 4,96kV em série com a LT2, como mostra a figura 4.29.

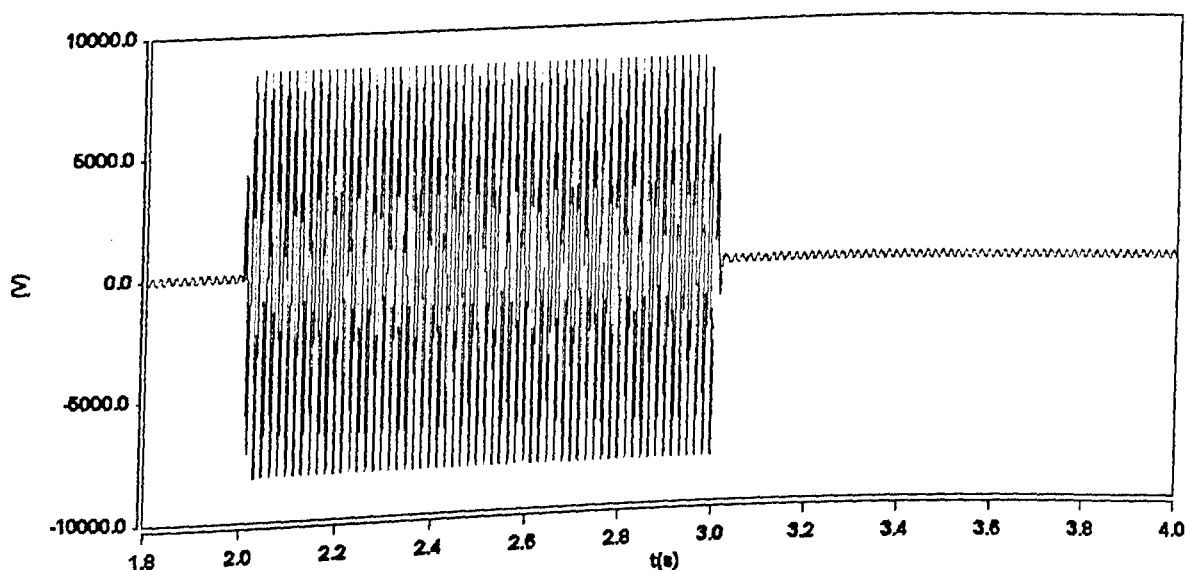


Figura 4.29 – Tensão injetada pelo ASC – afundamento de tensão com ASC

A característica de tal grandeza injetada pelo ASC é, da mesma forma que no caso anterior (Caso 1), em fase com a tensão no barramento B2, como

pode ser evidenciado pela figura 4.30 nos três últimos ciclos da permanência do distúrbio.

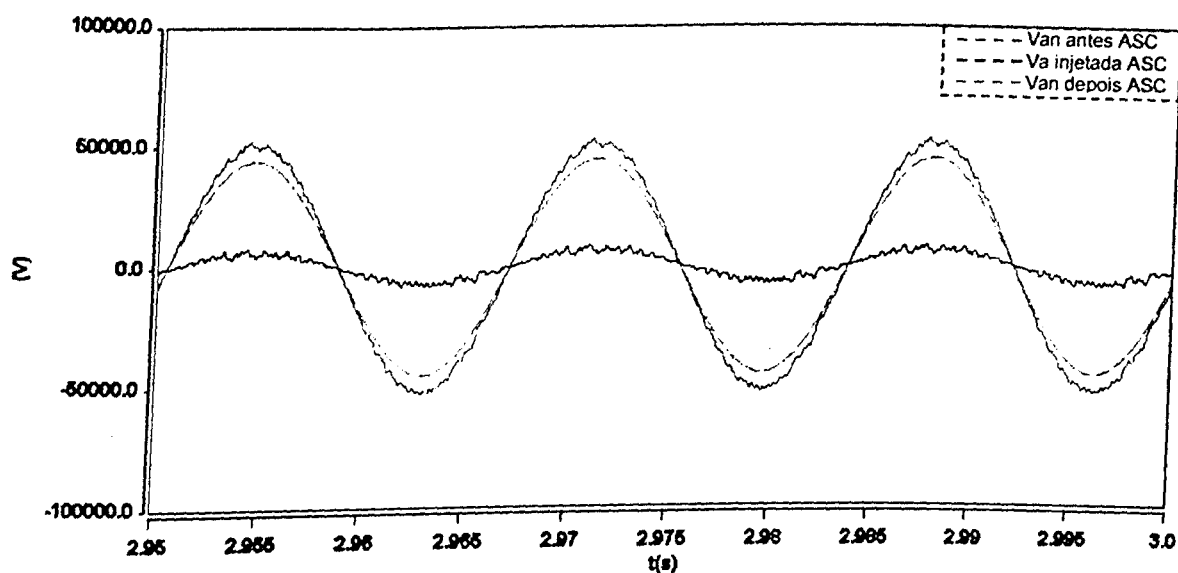


Figura 4.30 – Tensões antes, depois e injetada pelo ASC – afundamento de tensão com ASC

A figura 4.31 apresenta o comportamento do valor rms da tensão à montante do ASC.

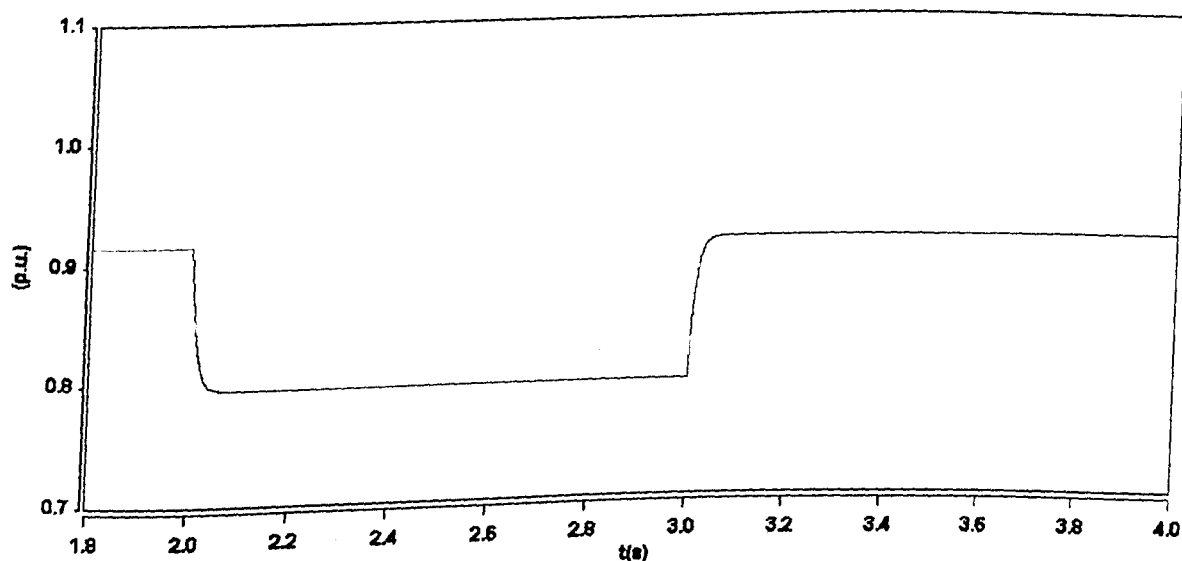


Figura 4.31 – Tensão rms na barra B2 ($V_{base}=69\text{kV}$) – afundamento de tensão com ASC

Da figura anterior constata-se que a grandeza monitorada atinge um patamar de 0,8p.u., o que é devido tanto à perturbação quanto à manutenção da tensão na carga, como explicado para o Caso 1. Deve-se ressaltar portanto que, esta tensão é inferior àquela experimentada pela barra B2 (0,82p.u.) quando da ocorrência de tal distúrbio sem qualquer equipamento de compensação (Capítulo III – seção 3.7.3.2).

4.8.3.3 – Caso 3 – Elevação de tensão com a presença do ASC (Controle: Modo 1)

Neste caso as análises envolvem os efeitos da aplicação de uma elevação momentânea de tensão (10%) sobre a barra B2 quando da presença do ASC controlando a magnitude da tensão no terminal B22. Tal evento ocorre aos 2 segundos de simulação e se mantém por 1 segundo.

Diante disso, a figura 4.32 exibe o perfil da tensão entre as fases A e B na barra controlada durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s) e, de forma complementar, a figura 4.33 fornece um “zoom” da mesma grandeza nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação.

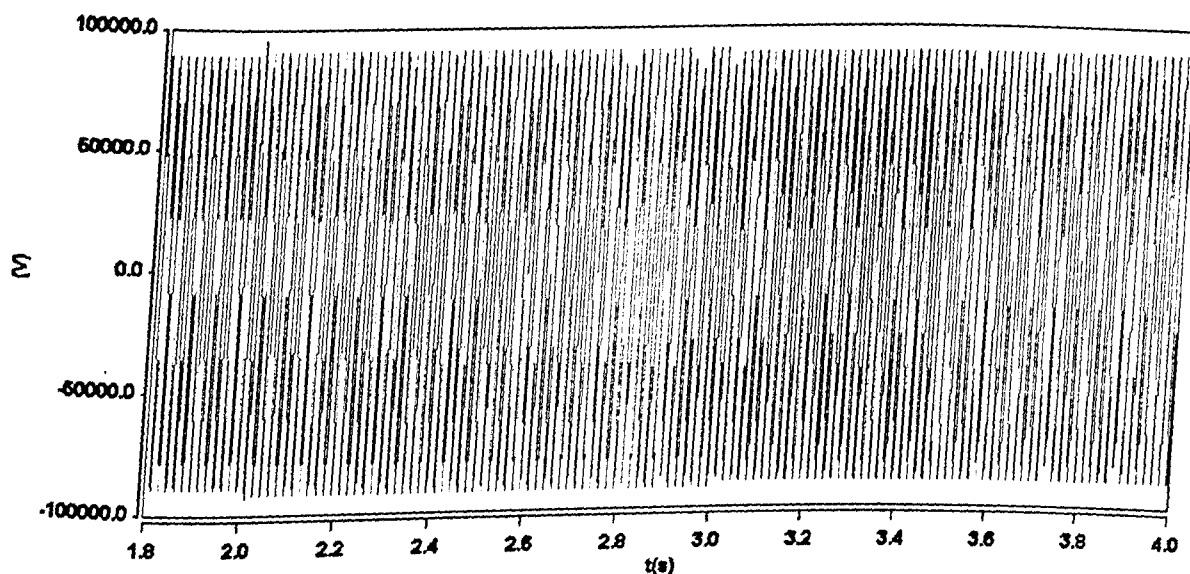


Figura 4.32 – Tensão entre fases na barra B22 – elevação de tensão com ASC

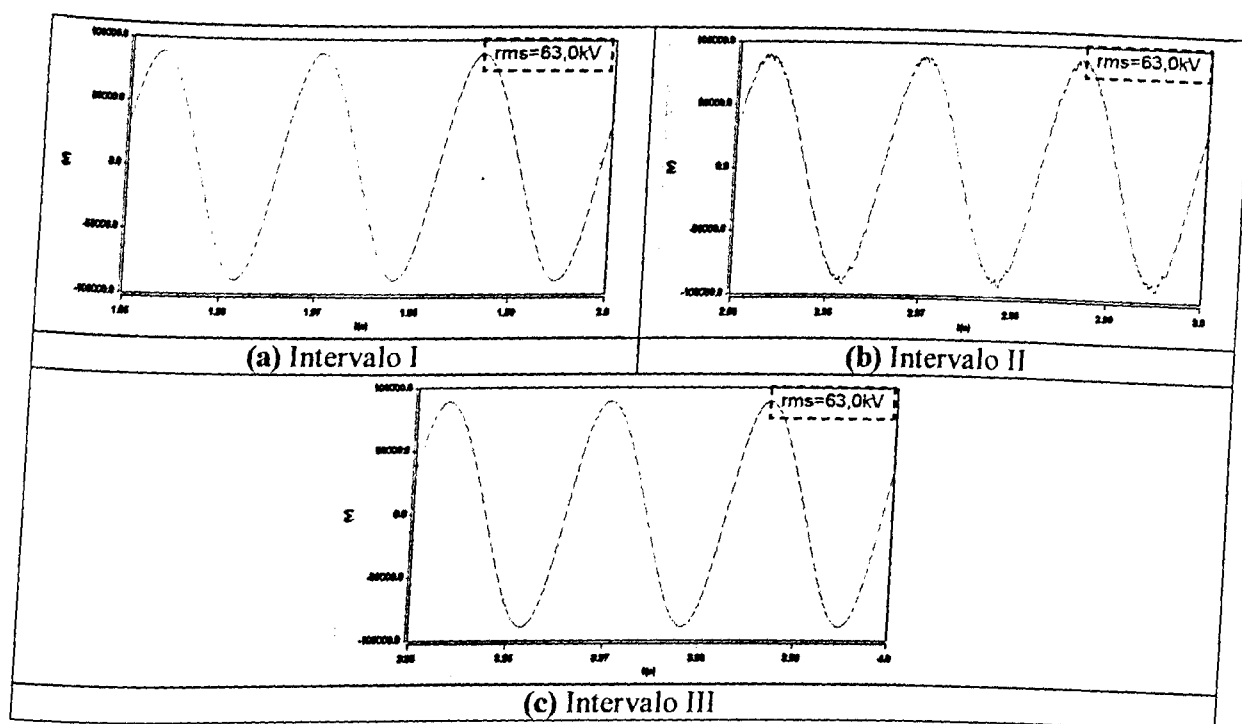


Figura 4.33 –Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos de cada intervalo) – elevação de tensão com ASC

Baseando-se nas figuras 4.32 e 4.33 pode se constatar, mais uma vez, a eficácia do compensador avançado em manter a tensão na barra B22 em um valor constante 63kV (0,91p.u.), mesmo durante a perturbação imposta. De uma forma transitória tal grandeza experimenta uma elevação para 0,94p.u. em $t = 2s$ (figura 4.34), que pode ser considerada pequena se comparada com seu valor original (0,91p.u.) e com a magnitude do distúrbio.

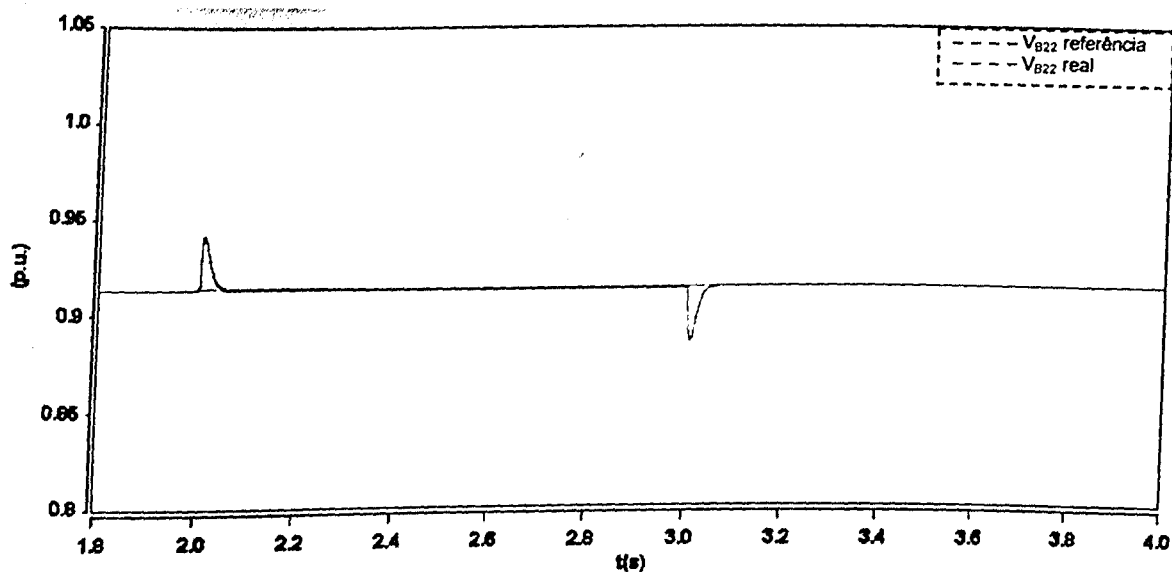


Figura 4.34 – Tensão rms na barra B22 ($V_{base}=69kV$) – elevação de tensão com ASC

O procedimento empregado pela malha de controle para reduzir a tensão do barramento B22, enquanto a referida sobre-tensão perdure, consiste na injeção de uma tensão série defasada de 180° daquela encontrada na barra B2. A constatação de tal fato é obtida nas figuras 4.35 e 4.36.

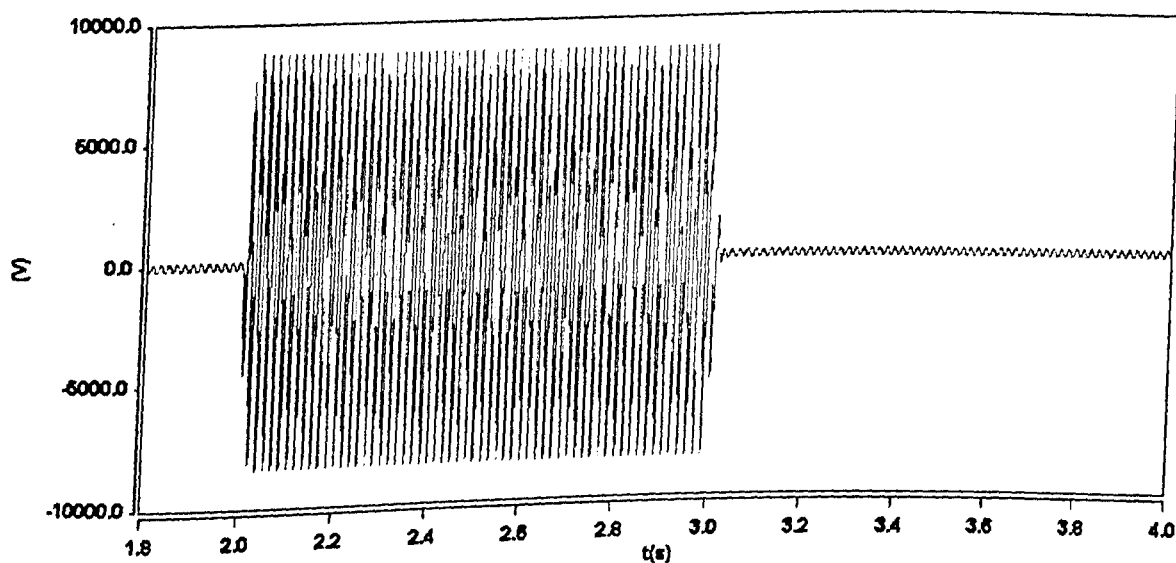


Figura 4.35 – Tensão injetada pelo ASC – elevação de tensão com ASVC

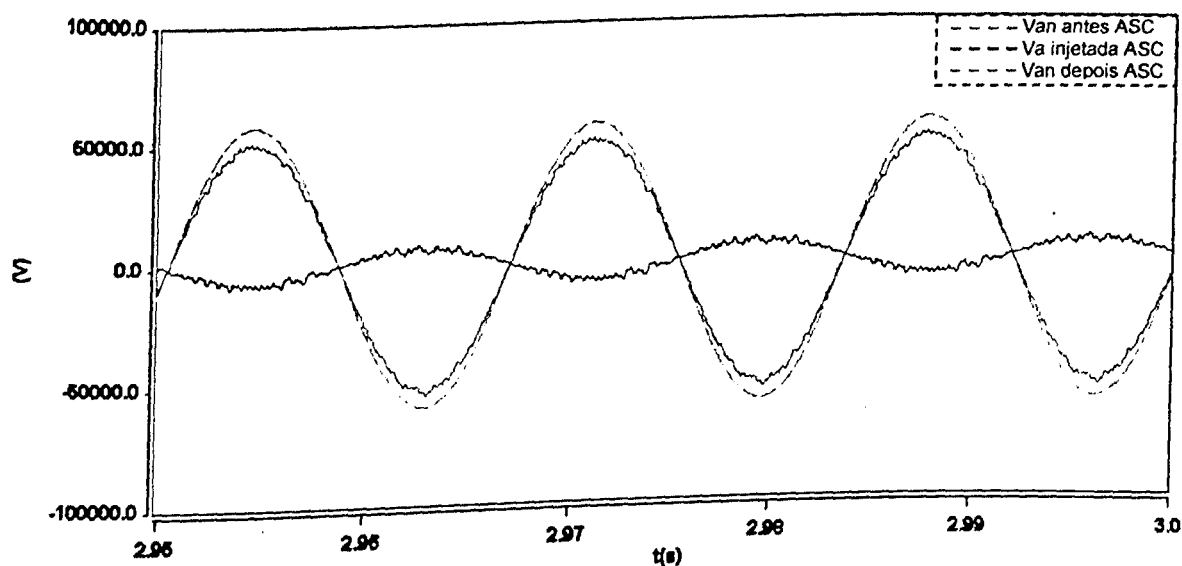


Figura 4.36 – Tensões antes, depois e injetada pelo ASC – elevação de tensão com ASC

A figura 4.37 apresenta a tensão rms na barra B2, a qual tem o seu valor elevado para 1,04p.u. durante a ocorrência do distúrbio. Este valor encontra-se 0,03p.u. acima daquele obtido quando o sistema foi submetido ao mesmo evento sem a presença de qualquer compensador (Capítulo III – seção 3.7.3.4). Mais uma vez, tal fato se deve ao valor da tensão no terminal emissor da LT2.

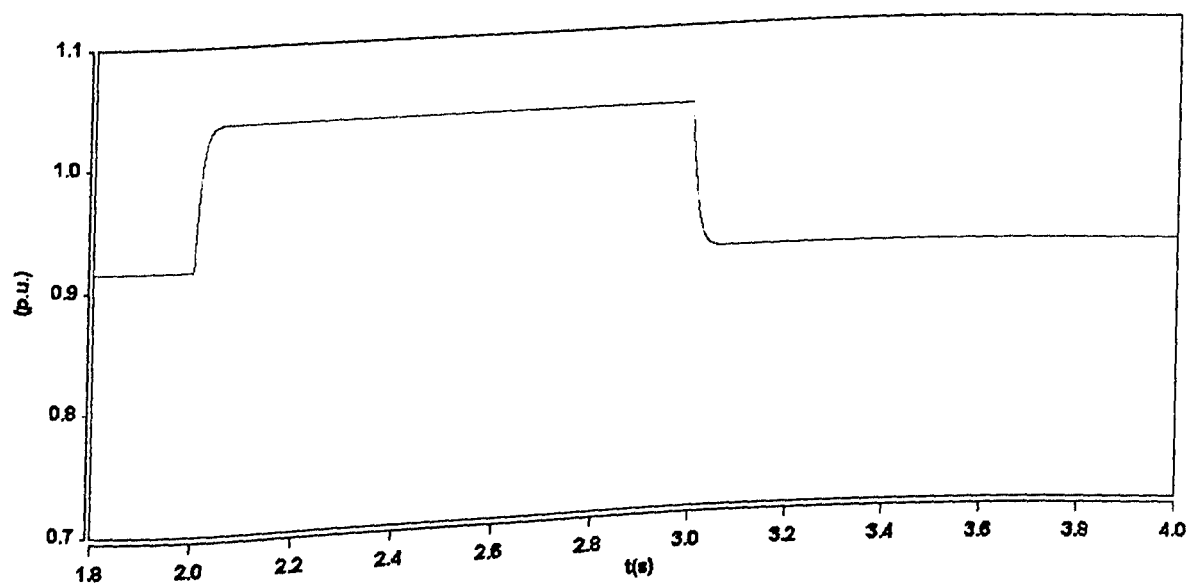


Figura 4.37 – Tensão rms na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – elevação de tensão com ASC

4.8.3.4 – Caso 4 – Compensação da reatância série através do ASC (Controle: Modo 2)

Como antecipado na tabela 4.3, o presente caso objetiva verificar o desempenho do ASC na compensação da reatância série da LT2 ao acompanhar um determinado valor de referência. Para tanto, aos 2 segundos de simulação, tal valor é alterado de 0,258p.u. (reatância original da linha sem a presença do ASC) para 0,129p.u., onde é mantido durante 1 segundo. Aos 3 segundos a mesma referência é elevada para o referido valor original, a fim de se enfatizar a alta possibilidade de manipulação desta grandeza.

O resultado de tais manobras pode ser visualizado através do comportamento da reatância série da LT2, ilustrado na figura 4.38 juntamente com a referência do ASC.

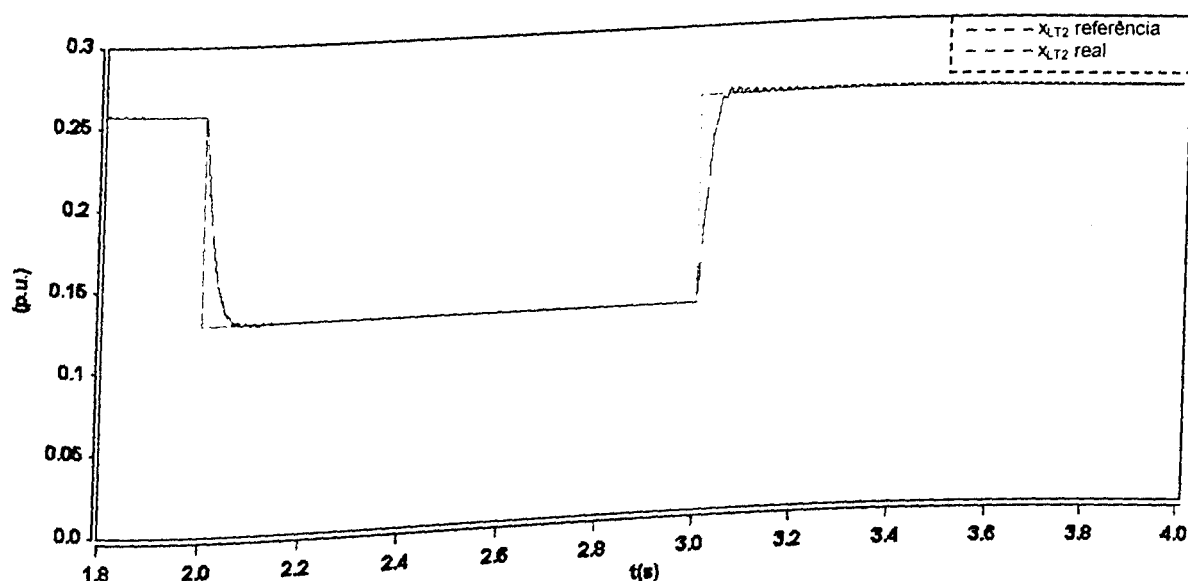


Figura 4.38 – Reatância série da LT2 ($Z_{base}=136\Omega$) – compensação reatância série

A figura 4.39 ilustra, para todo o período de simulação (entre 1,8 e 4,0s), o perfil da tensão injetada pelo ASC em série com a LT2.

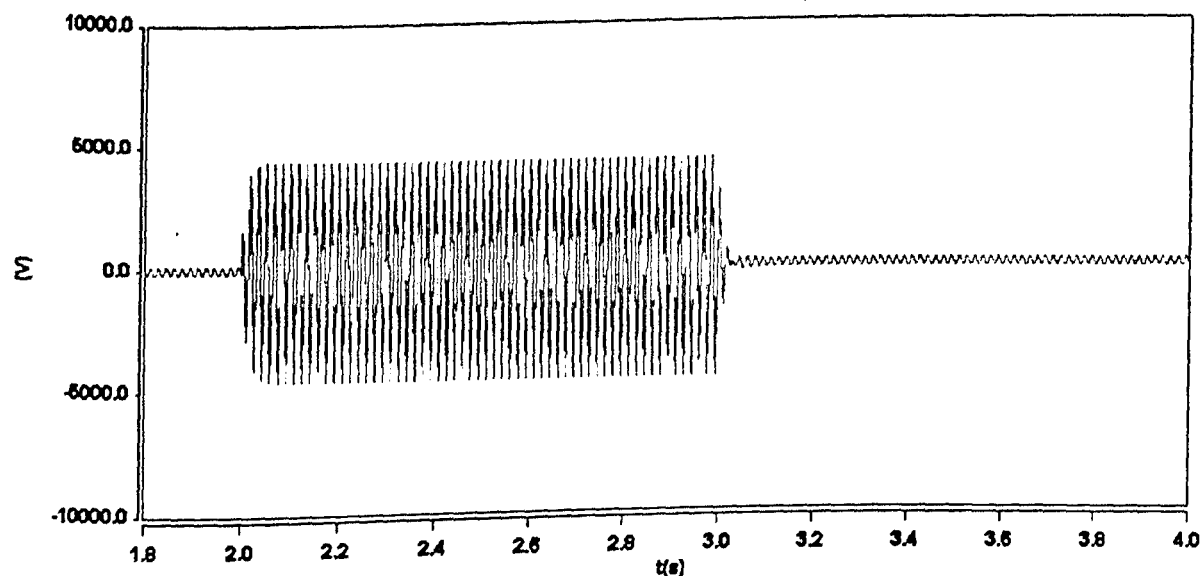


Figura 4.39 – Tensão injetada pelo ASC – compensação reatância série

De modo a evidenciar a característica de tal tensão injetada, a figura 4.40 mostra um “zoom” da mesma grandeza, apenas nos três últimos ciclos do Intervalo II (2 a 3s), juntamente com a corrente transportada pela linha de transmissão em questão.

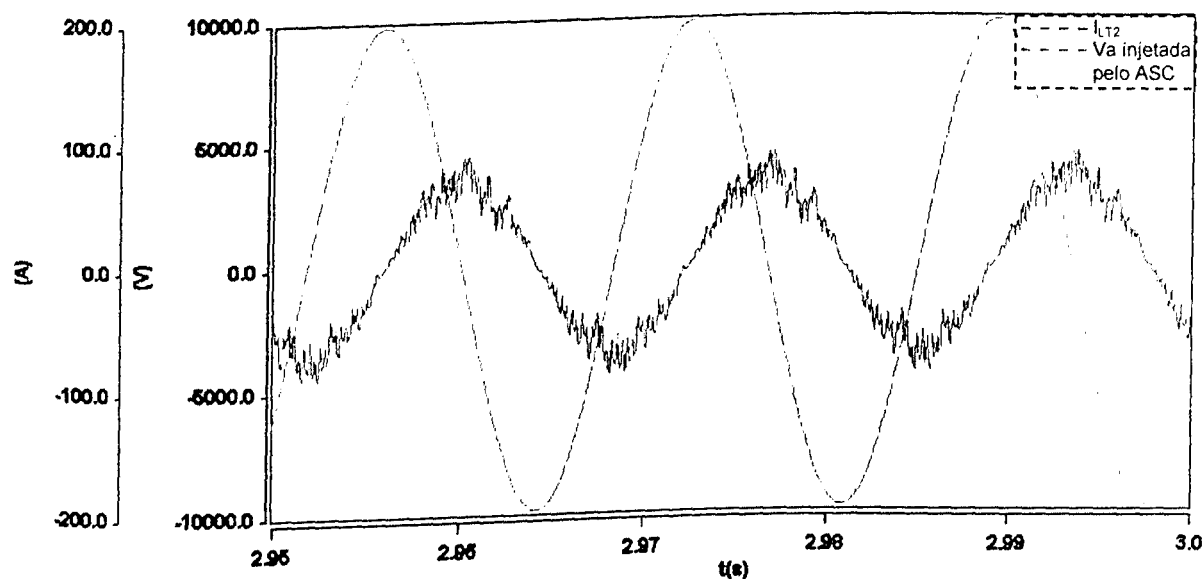


Figura 4.40 – Tensão injetada pelo ASC e corrente na LT2 – compensação reatância série

O gráfico acima mostra que a tensão injetada pelo ASC ($V_{rms}=2,6kV$) encontra-se defasada em 90° da corrente na linha ($I_{rms}=139,2A$), o que corresponde a uma compensação série capacitiva, como era de se esperar já que, neste caso, o objetivo é a redução da reatância total da LT2.

Mais uma vez, uma variação na tensão rms da barra B2 pode ser observada na figura 4.41, porém para este caso, em menor escala.

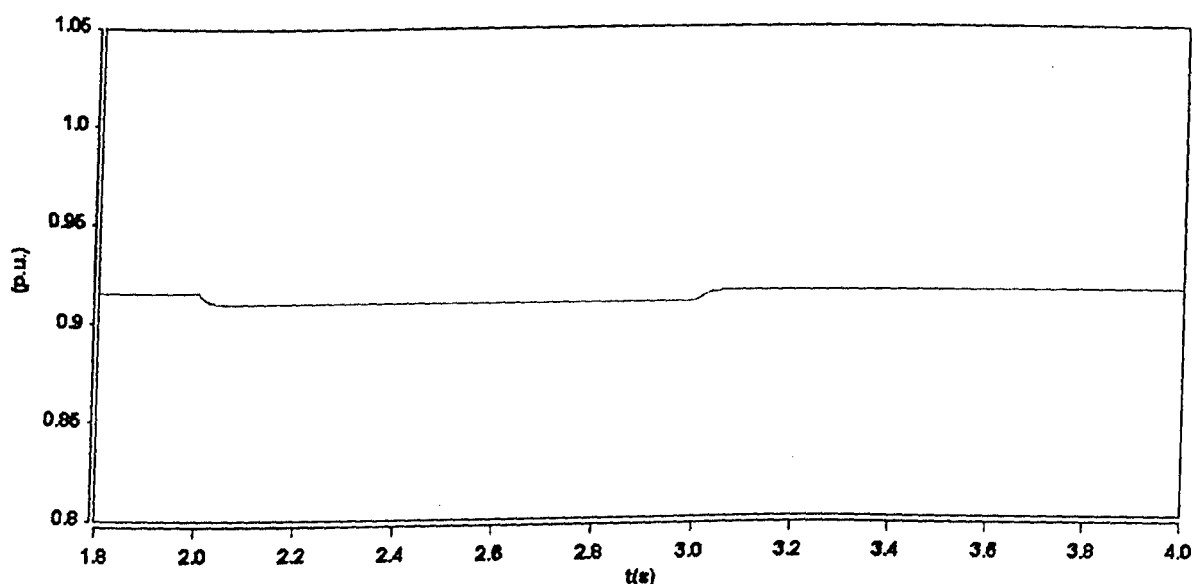


Figura 4.41 – Tensão rms na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – compensação reatância série

4.8.3.5 – Caso 5 – Monitoração e controle da reatância série através do ASC (Controle: Modo 2)

Ainda operando no **Modo 2** de controle, o desempenho do ASC é analisado quando, subitamente, uma elevação da reatância da LT2 é detectada. Este seria o caso, por exemplo, de um sistema onde a LT2 representasse o equivalente de duas ou mais linhas de transmissão e, em um determinado instante, uma delas fosse perdida ou desligada. A execução desta manobra se dá aos 2 segundos de simulação, onde o valor da indutância da LT2 é alterado de 90mH para 180mH até que em $t=3s$ tal ação é desfeita.

Na figura 4.42 é mostrado o comportamento da reatância efetiva da LT2 juntamente com a referência do ASC.

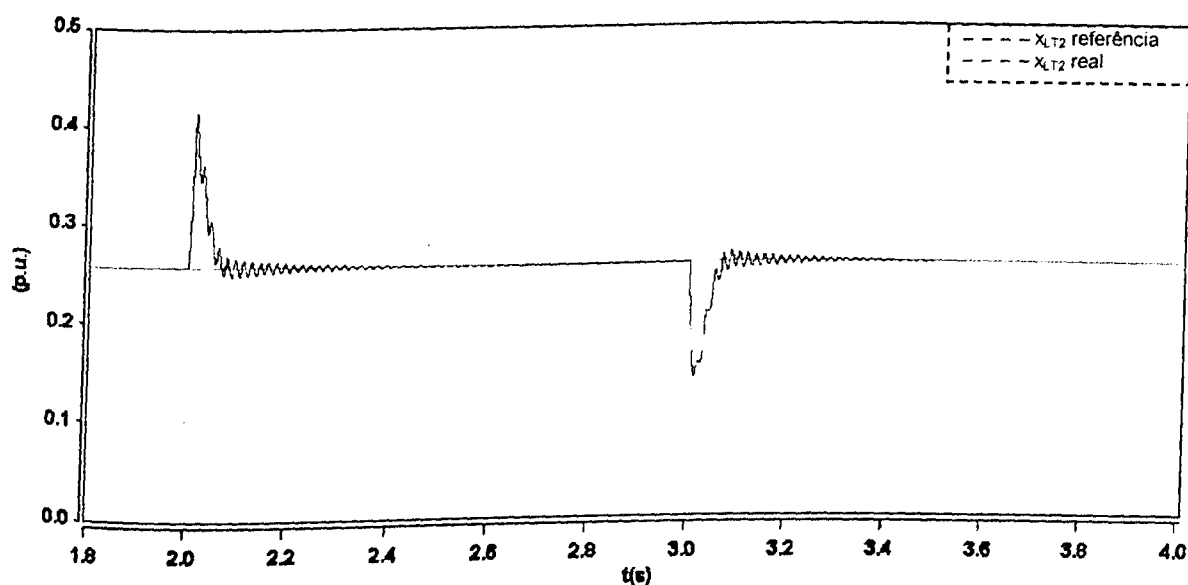


Figura 4.42 – Reatância série da LT2 ($Z_{base}=136\Omega$) – monitoração e controle da reatância série

Novamente, pode-se constatar a eficácia do compensador em questão ao atender o objetivo de controle que, neste caso, consiste em manter a reatância efetiva da LT2 em um valor constante, a despeito da ocorrência de

picos de 0,41p.u. e 0,14p.u. na aplicação e retirada do distúrbio, respectivamente.

Tal controle de reatância se deve à injeção de uma tensão em série por parte do ASC, no intervalo de 2 e 3 segundos (figura 4.43), a qual também se encontra defasada em 90° da corrente na linha monitorada (figura 4.44).

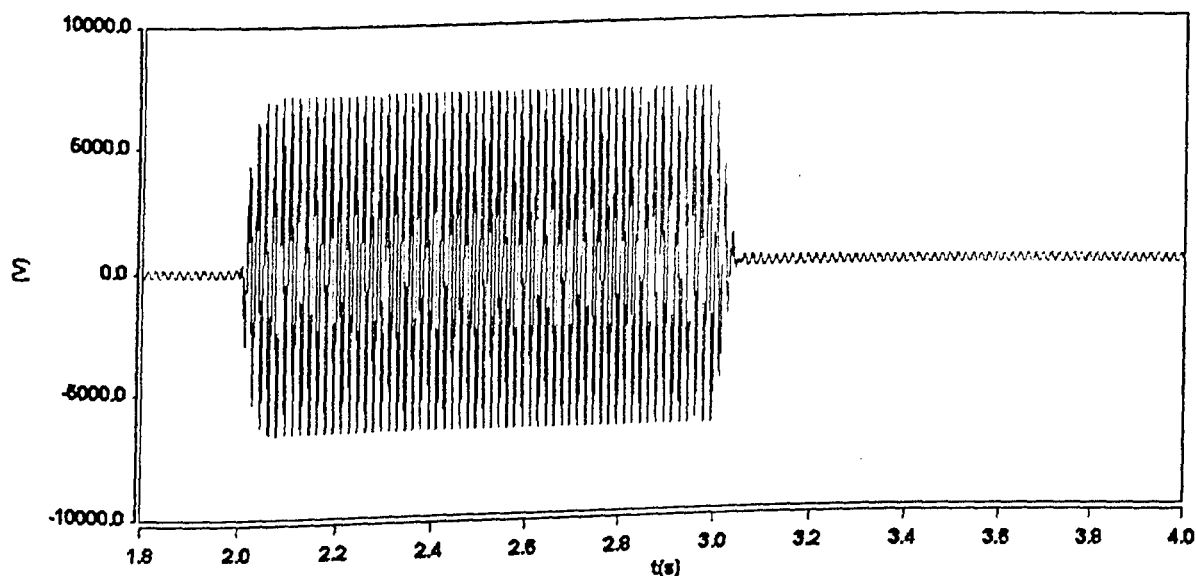


Figura 4.43 – Tensão injetada pelo ASC – monitoração e controle da reatância série

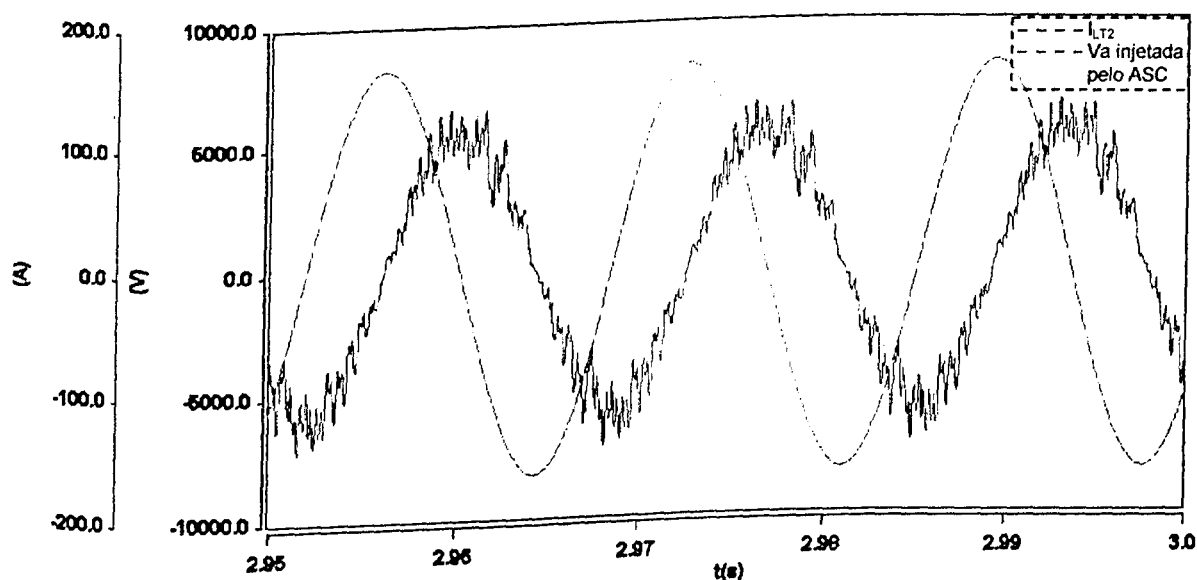


Figura 4.44 – Tensão injetada pelo ASC e corrente na LT2 – monitoração e controle da reatância série

Neste caso, o perfil da tensão rms da barra B2 não é afetado (figura 4.45), uma vez que o controle atua no sentido de manter a reatância, e por consequência os níveis de tensão nas extremidades da LT2, em valores constantes.

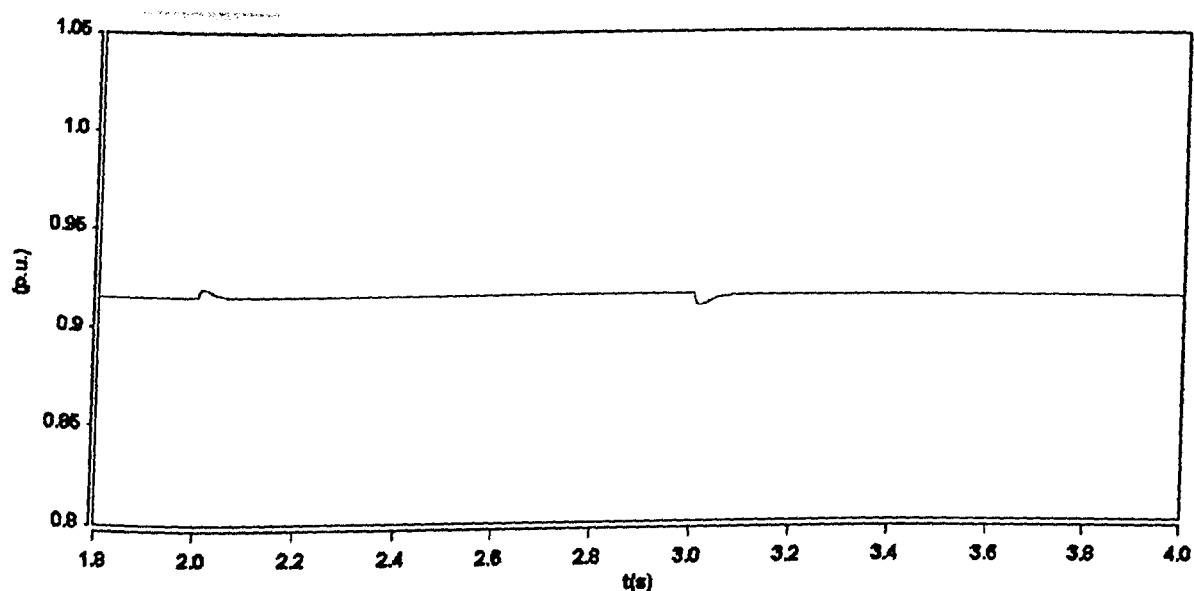


Figura 4.45 – Tensão rms na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – monitoração e controle da reatância série

4.8.3.6 – Caso 6 – Controle do fluxo de potência ativa através do ASC (Controle: Modo 3)

Neste último caso, o desempenho do ASC é avaliado quando o mesmo é solicitado para controlar o fluxo de potência ativa na LT2 através da alteração do defasamento angular entre os terminais emissor e receptor da mesma. O procedimento empregado nestas análises consiste em que, até os 2 segundos de simulação, a potência de referência do ASC encontra-se em 10,925MW, igual àquela estabelecida na LT2 devido ao fluxo de carga sem qualquer compensação. A partir desse instante, tal valor de referência é alterado para 11,925MW e, aos 3 segundos, é elevado novamente para 12,925MW. Tais mudanças gradativas dependem das necessidades do sistema de transmissão, bem como da capacidade do equipamento de compensação.

Os resultados de tais manobras, exibido na figura 4.46, certificam que o ASC atende prontamente às solicitações do sistema, já que a potência ativa transportada pela LT2 acompanha a referência imposta ao equipamento.

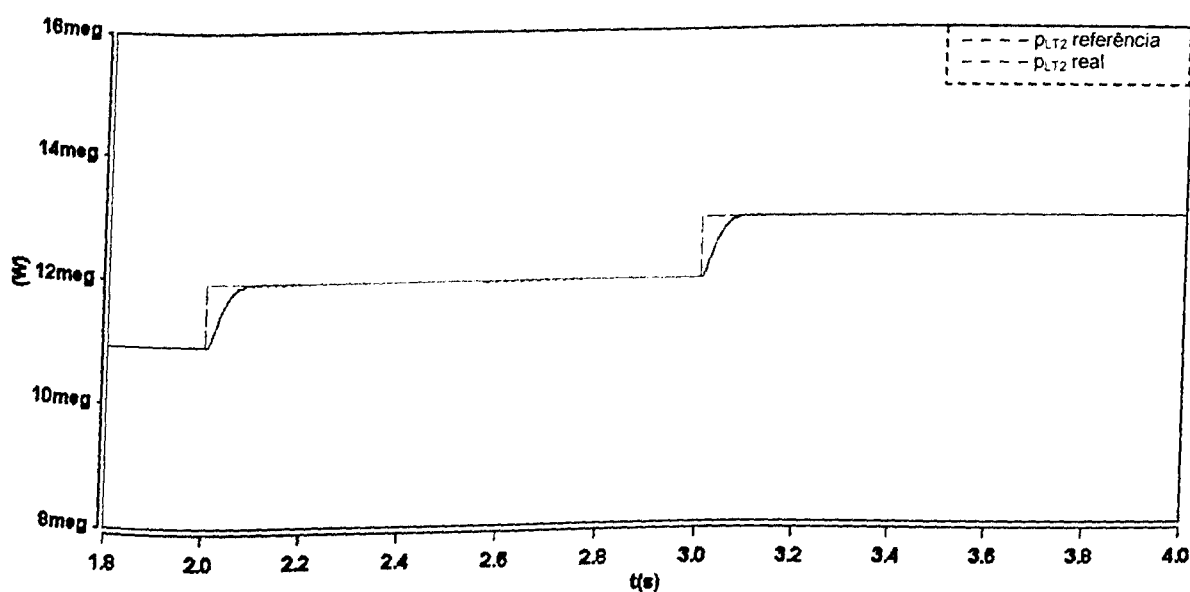


Figura 4.46 – Potência ativa na LT2 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

A figura 4.47 ilustra, para todo o período de simulação (entre 1,8 e 4,0s), o perfil da tensão injetada pelo ASC em série com a LT2.

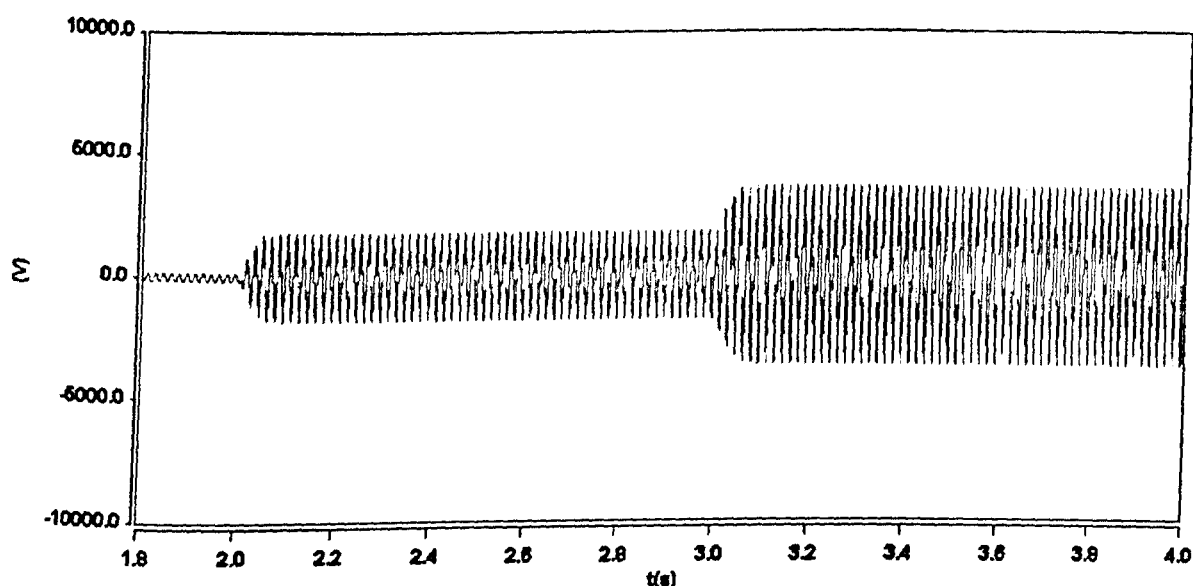


Figura 4.47 – Tensão injetada pelo ASC – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

Pode-se constatar da figura acima que, à medida que a solicitação de potência aumenta (11,925MW e 12,925MW), eleva-se também a magnitude da tensão injetada pelo equipamento (1,1kV e 2,1kV, em valores rms respectivamente). Tais incrementos nesta grandeza acarretam em um maior defasamento entre as tensões das barras B2 e B22 sem, contudo, alterar a magnitude das mesmas. Esta afirmativa é retratada nas figuras 4.48 e 4.49, que mostram tais grandezas em detalhe, apenas nos três últimos ciclos do **Intervalo II** (2 a 3s) e do **Intervalo III** (3 a 4s), respectivamente.

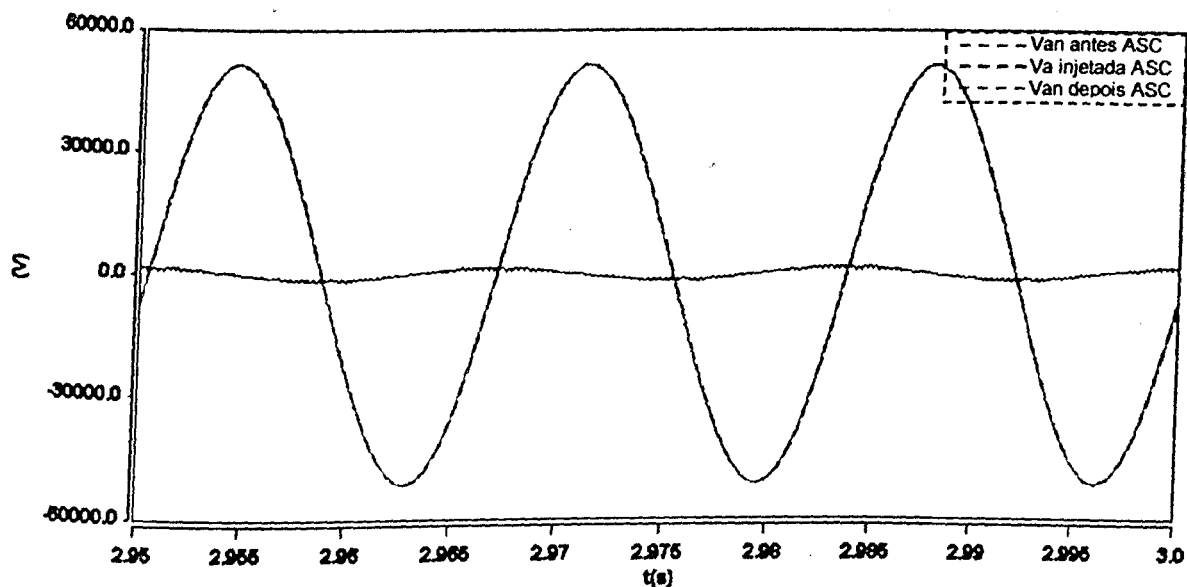


Figura 4.48 – Tensões antes, depois e injetada pelo ASC (**Intervalo II**) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

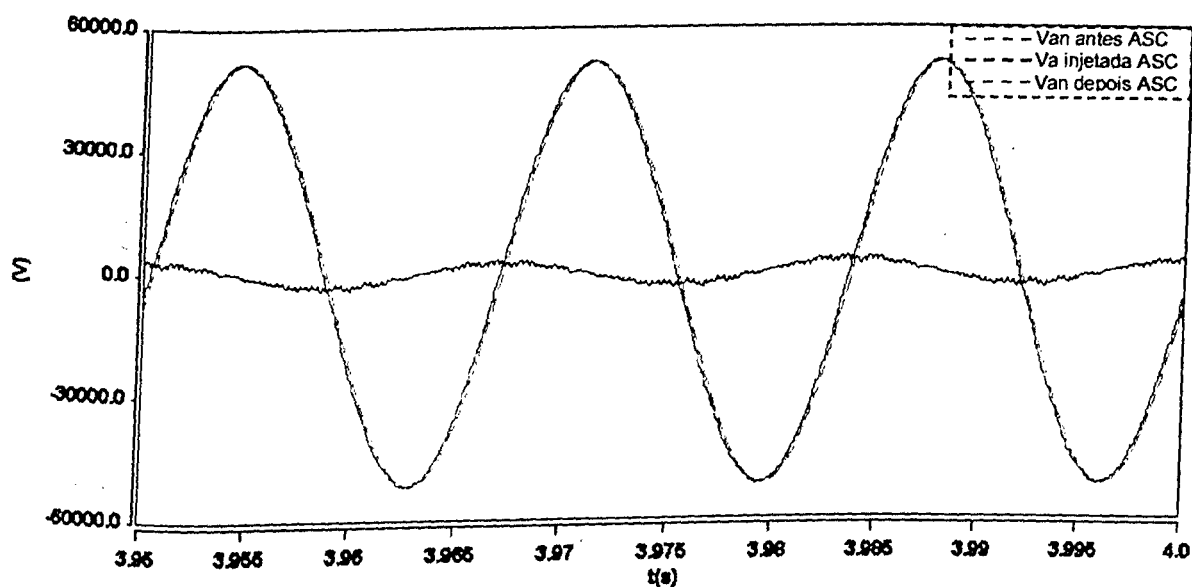


Figura 4.49 – Tensões antes, depois e injetada pelo ASC (**Intervalo III**) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

O comportamento do ângulo entre as tensões em B2 e B22 referido anteriormente pode ser visualizado em função do tempo na figura 4.50.

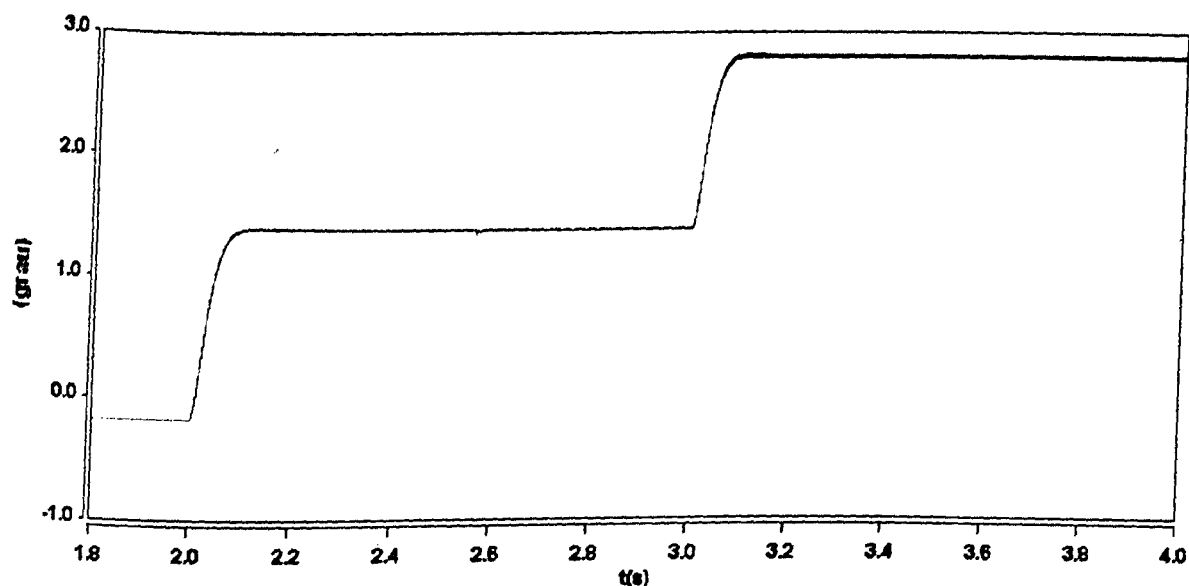


Figura 4.50 – Ângulo entre as tensões nas barras B2 e B22 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

Da figura acima observa-se que, no **Intervalo I** (1,8 a 2s) o defasamento existente entre as tensões sob análise é mínimo ($-0,18^\circ$) e é devido apenas à impedância do transformador série, já que nesse período não há compensação por parte do ASC. Já nos **Intervalos II** (2 a 3s) e **III** (3 a 4s) a tensão na barra B22 encontra-se adiantada em $1,38^\circ$ e $2,8^\circ$, respectivamente, daquela na barra B2. A consequência disso é o aumento do ângulo de carga, ou seja, do defasamento entre as tensões das barras B22 e B3, que pode ser visualizado na figura 4.51 com os seguintes valores: $-5,53^\circ$ (**Intervalo I**), $-5,92^\circ$ (**Intervalo II**) e $-6,36^\circ$ (**Intervalo III**). Como já explanado em seções anteriores, essa variação no ângulo de carga é a responsável pela alteração da potência ativa transmitida pela LT2.

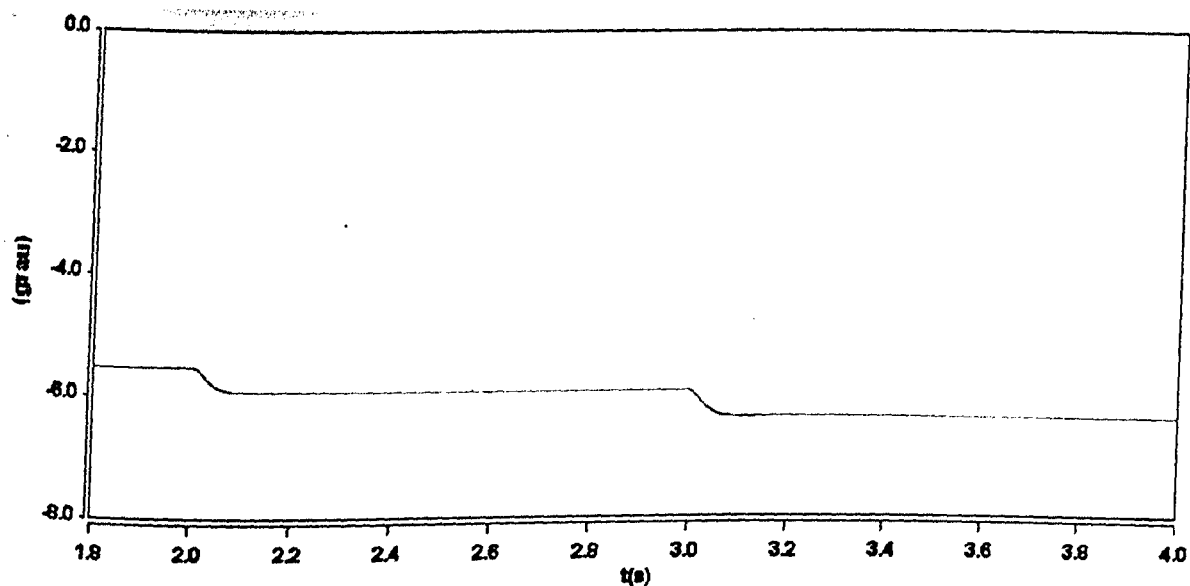


Figura 4.51 – Ângulo entre as tensões nas barras B22 e B3 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

Neste caso não foram verificadas modificações na tensão rms da barra B2, como mostra a figura 4.52.

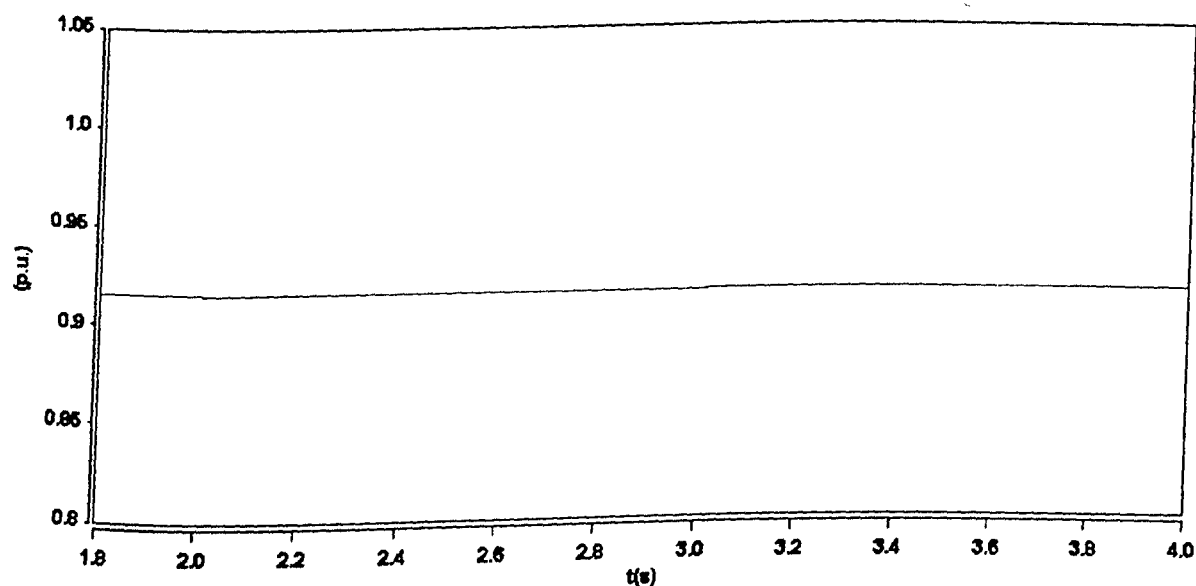


Figura 4.52 – Tensão rms na barra B2 ($V_{base}=69\text{kV}$) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

4.8.3.7 – Quadro resumo comparativo

A tabela 4.4 fornece um quadro resumo comparativo dos valores em regime permanente das grandezas monitoradas durante a simulação dos casos.

Tabela 4.4 – Quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas

Caso	Grandeza	Valores		
		Intervalo I	Intervalo II	Intervalo III
1 - Regulação de tensão através do ASC (Controle: Modo 1)	Tensão em B22 [kV]	63,0	69,0	63,0
	Tensão injetada/fase [kV]	0,0	4,44	0,0
	Tensão em B2 [kV]	63,0	61,4	63,0
2 – Afundamento de tensão com a presença do ASC (Controle: Modo1)	Tensão em B22 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Tensão injetada/fase [kV]	0,0	4,96	0,0
	Tensão em B2 [kV]	63,0	55,2	63,0
3 - Elevação de tensão com a presença do ASC (Controle: Modo 1)	Tensão em B22 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Tensão injetada/fase [kV]	0,0	5,04	0,0
	Tensão em B2 [kV]	63,0	71,8	63,0
4 – Compensação da reatância série através do ASC (Controle: Modo 2)	Reatância efetiva da LT2 [Ω]	35,22	17,55	35,22
	Tensão injetada/fase [kV]	0,0	2,6	0,0
	Tensão em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
5 – Monitoração e controle da reatância série através do ASC (Controle: Modo 2)	Reatância efetiva da LT2 [Ω]	35,22	35,22	35,22
	Tensão injetada/fase [kV]	0,0	4,1	0,0
	Tensão em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
6 – Controle do fluxo de potência ativa através do ASC (Controle: Modo 3)	Potência ativa na LT2 [MW]	10,93	11,93	12,93
	Tensão injetada/fase [kV]	0,0	1,1	2,1
	Tensão em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Ângulo entre B2 e B22 [graus]	-0,18	1,38	2,8
	Ângulo entre B22 e B3 [graus]	-5,53	-5,92	-6,36

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo as atenções foram voltadas às análises computacionais de desempenho de um compensador série do tipo ASC, no sentido de conferir a eficiência do equipamento quanto à flexibilidade proporcionada pelo mesmo ao sistema de transmissão controlado.

Para tanto fez-se necessária uma descrição completa do princípio de funcionamento do ASC nos seus três modos operativos, donde foram definidas as características das tensões injetadas pelo mesmo, ou seja:

- para regulação da tensão terminal a tensão injetada deve estar em fase com a tensão à montante do ASC;
- no caso da compensação da reatância série, a tensão inserida em série deve encontrar-se em quadratura com a corrente da linha controlada;
- para o controle do fluxo de potência, a tensão injetada deve ser tal que apenas o ângulo entre as tensões à montante e à jusante do ASC seja alterado, ou seja, a magnitude destas grandezas deve permanecer constante.

Na sequência, baseando-se na análise vetorial das grandezas envolvidas no modelo do compensador em questão, a tensão a ser injetada pelo mesmo foi determinada em termos das suas componentes no sistema de referência síncrono. Esta representação, juntamente com os sinais provenientes dos blocos controladores permitem a obtenção dos sinais necessários à determinação dos pulsos para a ponte conversora. Com relação ao controle do ASC, este é constituído por três malhas independentes as quais, dependendo da escolha efetuada pelo usuário, determinarão de forma alternativa os referidos sinais de gatilho.

Todo o processo de incorporação do modelo do ASC no programa SABER foi descrito de forma detalhada e, uma vez concluída tal etapa de

implementação, foi possível se executar uma gama de situações, em que foi verificada a forte atuação deste equipamento no sentido de prover os seguintes recursos:

- regulação da tensão na barra emissora da linha controlada;
- sustentação da tensão no barramento emissor da LT controlada, quando o mesmo é submetido a um afundamento momentâneo de tensão;
- controle da tensão no barramento emissor da LT controlada, quando o mesmo é submetido a uma elevação momentânea de tensão;
- compensação da reatância série da linha de transmissão controlada;
- detecção e controle de uma variação inesperada na reatância da LT;
- manipulação do fluxo de potência ativa através da variação do ângulo de carga.

Os resultados destes estudos permitiram verificar um bom desempenho do modelo bem como das malhas de controle implementadas, já que os objetivos citados anteriormente foram alcançados. Além disso pode-se observar que, apesar do ASC manter a tensão constante na barra emissora da LT quando o sistema está sujeito a distúrbios como afundamento e elevação de tensão, este não garante uma boa qualidade na tensão do barramento à montante de si. Pelo contrário, dependendo do tipo de compensação a ser efetuada, o perfil de tal tensão pode ser até prejudicado devido à falta de um suporte de reativos. Este problema é contornado quando da utilização de uma unidade UPFC, a qual será abordada no próximo capítulo.

Neste capítulo, também, foram detectados baixos índices de ruídos nas tensões fase/fase do barramento controlado e isto se deve ao método de filtragem empregado. Todavia, assim como argumentado no Capítulo III, pesquisas específicas a respeito deste assunto são requeridas, tanto no sentido de se aprimorar a eficiência dos filtros quanto de se adequar as malhas de controle a tais dispositivos.

Face às argumentações anteriores, pode-se dizer que as principais contribuições oferecidas nesta etapa dos trabalhos são:

- reunião das informações importantes à modelagem e controle do compensador série avançado, encontradas na literatura e utilizadas nas implementações computacionais desta tese;
- adaptação das malhas de controle obtidas nas referências bibliográficas aos objetivos aqui delineados;
- provimento de uma estrutura computacional no domínio do tempo, para que sejam executados estudos envolvendo a implementação do ASC em sistemas elétricos;
- fornecimento de subsídios para o entendimento da porção série do controlador de fluxo de potência unificado (UPFC), a ser tratado no Capítulo V.

CAPÍTULO V

CONTROLADOR DE FLUXO DE POTÊNCIA UNIFICADO – UPFC

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos Capítulos III e IV foram apresentadas as abordagens teóricas e traçados os procedimentos para a implementação computacional dos compensadores avançados, ASVC e ASC, de forma separada. Isso porque, tais concepções de equipamentos são exeqüíveis e comercialmente disponíveis, dependendo das necessidades dos sistemas a serem compensados.

Neste capítulo, todavia, serão efetuadas as considerações teóricas e sobre implementação computacional do controlador de fluxo de potência unificado (UPFC) que, como dito no Capítulo II, reúne todas as funções de um ASVC e de um ASC. Tal atenção é dada ao UPFC uma vez que este emprega uma estratégia de compensação cada vez mais emergente. Uma das razões para tal afirmativa é que, como visto no Capítulo IV, para se obter os recursos oferecidos por um ASC são requeridos aparatos extras que garantam tanto o seu funcionamento quanto a integridade da tensão nas demais barras do sistema. Dentre tais aparatos se encontram, primeiramente, os dispositivos de provimento da tensão CC do conversor onde, no presente trabalho, foi utilizada uma fonte de tensão contínua. Além disso, em alguns casos, foram verificadas variações no perfil de tensão eficaz da barra à montante do

compensador série indicando, portanto, a necessidade de um suporte de reativos neste terminal. Tais necessidades são supridas com a utilização do UPFC, conforme será constatado no decorrer do presente capítulo. Devido a tais considerações, a possibilidade de simulação computacional se torna cada vez mais necessária, para que se possa antever a real interação entre tal equipamento e a rede elétrica.

Face ao exposto, ao longo das próximas seções será abordado o processo de implementação, tanto do circuito de potência como de controle, do controlador unificado em questão, na plataforma computacional denominada SABER, seguindo a mesma sequência adotada nos capítulos precedentes. Deve-se ressaltar no entanto que, em alguns pontos, certos aprofundamentos serão desnecessários, uma vez que os mesmos já foram tratados nos Capítulos III e IV .

Finalmente, para ilustrar a eficácia do dispositivo na compensação de diferentes imposições de controle e de distúrbios, serão executados alguns estudos de casos, em um sistema teste, a fim de se analisar o desempenho dos modelos implementados.

5.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS CONTROLADORES DE FLUXO DE POTÊNCIA UNIFICADOS - UPFC

O controlador de fluxo de potência unificado ou UPFC (*Unified Power Flow Controller*) emprega o mais novo conceito, e consiste do mais completo equipamento, na área da compensação de sistemas de transmissão. Como mencionado no Capítulo II (seção 2.4.2.3), o UPFC consiste de dois conversores do tipo VSI, empregando semicondutores de alta potência como os GTOs, interligados por um circuito de corrente contínua sustentado por um capacitor, conforme esquematizado na figura 5.1.

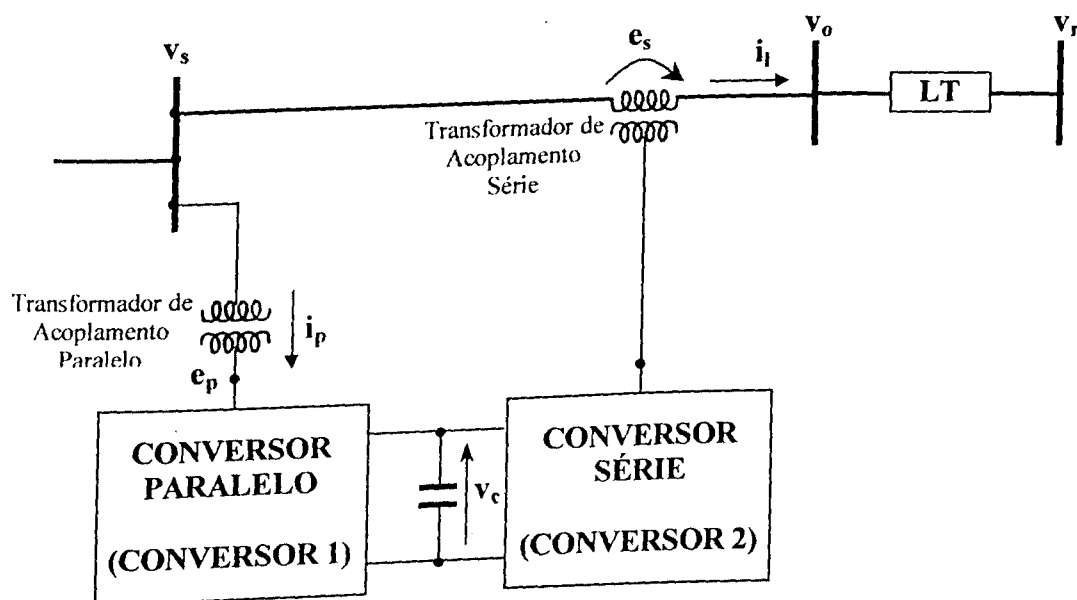


Figura 5.1 – Esquema de conexão de um UPFC em um sistema de potência

As unidades conversoras, também chamadas de Conversor 1 e Conversor 2, conectadas em paralelo e em série, respectivamente, podem gerar ou absorver potência reativa independentemente uma da outra. Esse tipo de arranjo, também, permite o fluxo livre de potência ativa em qualquer direção entre os terminais CA dos dois conversores.

Face à descrição acima, verifica-se que o UPFC nada mais é do que um compensador estático avançado (ASVC) ligado a um compensador série avançado (ASC) através de um elo comum de corrente contínua, cuja tensão é mantida por um único capacitor. Devido a isso, o UPFC atende tanto às necessidades de compensação paralela de reativos quanto aos requerimentos de controle da impedância, ângulo de fase e tensão terminal em uma linha de transmissão. Nesse sentido, a unidade paralela do UPFC, ou Conversor 1, além de prover a compensação de reativos ao sistema, tem uma função primordial de suprir ou absorver a potência ativa demandada ou fornecida pelo Conversor 2. Já a unidade série, tem como função principal injetar uma tensão na linha com magnitude e ângulo variáveis, que resulta em uma troca de potências ativa e reativa com o sistema de transmissão. A potência reativa é gerada ou absorvida internamente pelo próprio Conversor 2. Por outro lado, a potência ativa requerida, para permitir que o ângulo da tensão injetada seja alterado, é fornecida pelo Conversor 1. Ao se comparar a unidade série do UPFC e um ASC, deve ser ressaltado que, para este último só há possibilidade de troca de potência ativa com o sistema se o mesmo for conectado a um dispositivo armazenador de energia.

Além das vantagens oferecidas por cada unidade constituinte do conjunto chamado UPFC, este compensador permite a reunião de todas elas em um único equipamento. Isso faz com que o uso do UPFC se torne cada vez mais comum, requerendo, portanto, o seu funcionamento modelado e implementado em programas computacionais, para que possam ser utilizados em estudos de planejamento e operação de sistemas.

5.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO UPFC

Pelo fato do UPFC consistir da união dos compensadores ASVC e ASC, pode-se dizer que o seu princípio de funcionamento já se encontra satisfatoriamente descrito nos capítulos III e IV. Desse modo, torna-se necessário apenas comentar as principais funções dos Conversores 1 e 2 no contexto do controlador de fluxo de potência unificado. Tais funções caracterizam os propósitos essenciais deste equipamento. Os comentários a seguir serão feitos tendo como base a figura 5.1 apresentada anteriormente.

Conversor 1

Esta unidade tem por metas:

- a compensação de potência reativa através da variação da magnitude da tensão e_p na saída do conversor paralelo, com relação à tensão do sistema CA v_s . Neste caso, tal compensação de reativos ocorre em resposta ao controle do módulo da tensão v_s , que pode variar devido a uma perturbação imposta pelo sistema ou, ainda, devido aos efeitos da atuação do Conversor 2;
- a absorção e fornecimento de potência ativa através da variação do ângulo entre a tensão e_p na saída do conversor paralelo e a tensão do sistema CA v_s . A alteração do referido defasamento representa a ação do controle da tensão v_c nos terminais do capacitor no elo CC entre as duas pontes. Portanto, este recurso oferecido pelo lado paralelo do UPFC é responsável pela manutenção da referida tensão contínua em um patamar constante. Deve-se ressaltar que, a variação de v_c , com relação ao seu valor de referência, se deve às solicitações tanto da unidade paralela quanto da unidade série, uma vez que em qualquer

uma das duas formas de compensação existirá uma tendência de carga ou descarga do capacitor em questão.

Conversor 2

Esta unidade tem por funções:

- a regulação da tensão terminal v_o através da injeção da tensão série e_s em fase com a tensão no barramento emissor v_s ;
- a compensação da reatância série através da injeção da tensão e_s em quadratura com a corrente i_l na linha de transmissão;
- o controle do fluxo de potência da linha de transmissão através do ângulo de carga (defasamento entre as tensões v_o e v_r), pela injeção de uma tensão série e_s com amplitude e ângulo de fase tais que garantam a variação apenas do ângulo da tensão no terminal emissor (v_o).

Em função das funções atribuídas ao equipamento, constata-se que ocorrerá, para a maioria dos casos, uma operação simultânea dos dois conversores e, assim, uma sobreposição das respostas de cada um, que poderá ser melhor visualizada nas simulações computacionais. Havendo necessidade de se operar o Conversor 1 separadamente (em sua versão isolada ASVC), basta manter o Conversor 2 no modo de operação inativo. Por outro lado, a operação da unidade série isoladamente é impraticável visto que, para o tipo de configuração mostrado na figura 5.1, há a necessidade de um dispositivo para manter constante a tensão do capacitor.

5.4 ANÁLISE VETORIAL DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DO UPFC

Uma vez que a operação do UPFC pode ser realizada agrupando as ações independentes de cada unidade conversora (ASVC e ASC - seções 3.4 e 4.4, respectivamente), esta seção se restringe a ilustrar, apenas, o circuito trifásico simplificado do compensador unificado mostrado na figura 5.2.

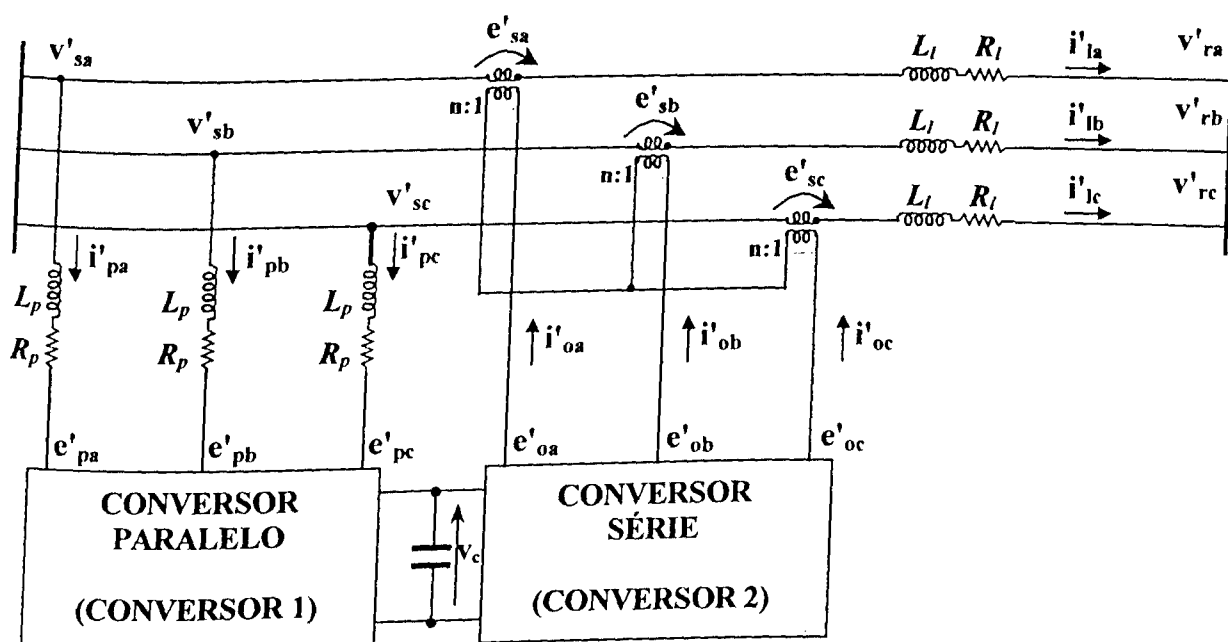


Figura 5.2 – Circuito equivalente de um sistema de transmissão controlado por UPFC

Fazendo-se uma analogia com os desenvolvimentos e transformações já realizados, constata-se, por mera inspeção, que as equações finais que descrevem o dispositivo obedecem ao conjunto de expressões anteriormente apresentadas.

5.5 SISTEMA DE CONTROLE DO UPFC

As estratégias de controle empregadas em cada conversor do UPFC, para que estas atendam aos propósitos mencionados na seção 5.3, são independentes uma da outra, apesar de ambas as unidades se “comunicarem” através do capacitor do elo de corrente contínua. Portanto, uma vez efetuados os estudos e testes (Capítulo III) para se determinar a malha de controle para o ASVC, esta também é aplicada ao Conversor 1 do compensador unificado no presente capítulo. Da mesma forma é procedida a definição da malha de controle para o Conversor 2 do UPFC, tendo como base aquela escolhida para o ASC no Capítulo IV.

5.6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO UPFC NO SABER

A implementação computacional do UPFC no simulador SABER faz uso dos módulos desenvolvidos para cada compensador avançado, descritos nos capítulos anteriores, interligando-os através do capacitor nos terminais CC. Assim, a estrutura geral do controlador de fluxo de potência unificado implementado obedece ao esquema mostrado na figura 5.3.

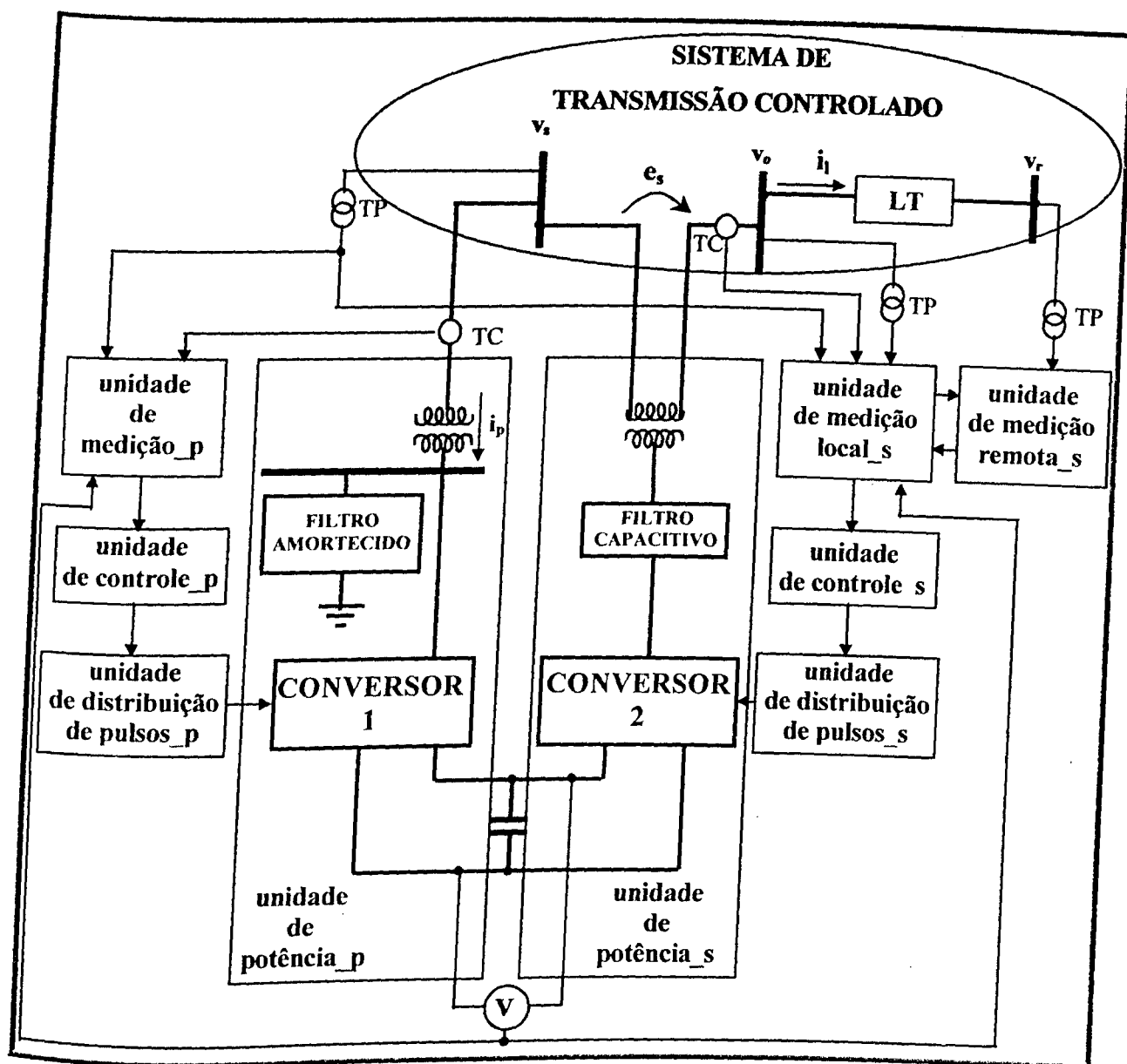


Figura 5.3 – Esquema de conexão do UPFC em um sistema de potência

Da mesma forma que para o ASVC e para o ASC, a exposição da implementação do modelo do controlador de fluxo de potência unificado deve ser feita através das suas partes componentes, que consistem das nove unidades principais mostradas na figura 5.4. Nesta ilustração são ressaltados os sinais de intercâmbio entre tais blocos e, principalmente, a comunicação entre as unidades de potência paralela e série, através do capacitor do elo de corrente contínua.

Uma vez que as unidades que compõem o modelo do UPFC são exatamente as mesmas que aquelas já abordadas previamente para os seus respectivos compensadores, o detalhamento das mesmas pode ser dispensado nesta seção.

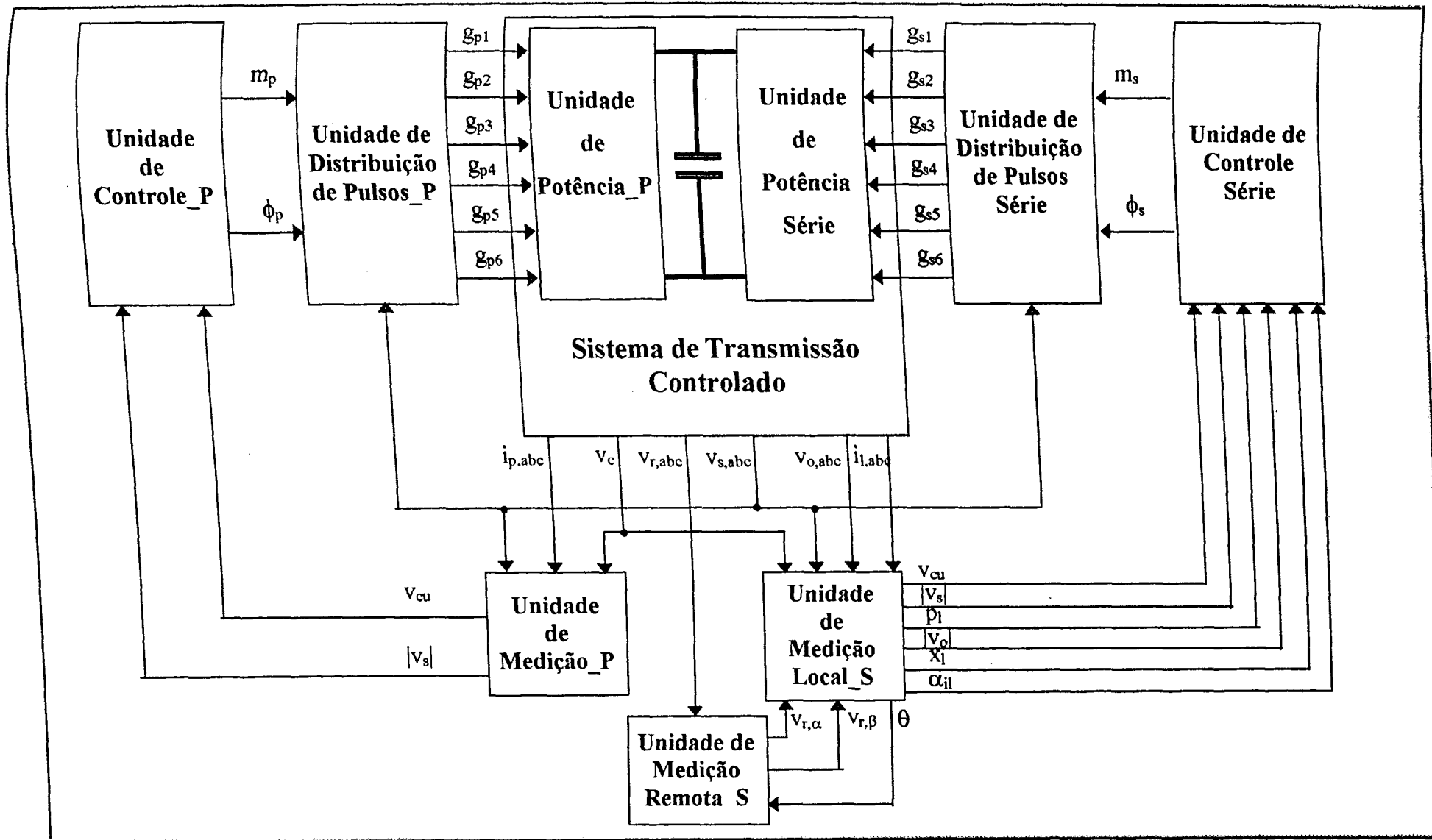


Figura 5.4 – Diagrama esquemático do modelo geral do UPFC implementado.

5.7 ESTUDOS DE CASOS

Os estudos de casos a serem executados nesta seção têm por propósito avaliar o desempenho do modelo do UPFC implementado no simulador SABER, bem como o comportamento do sistema ao qual se encontra conectado. Mais especificamente, tais estudos objetivam verificar a sobreposição dos efeitos das duas unidades conversoras do UPFC e, ainda, a interação entre as mesmas no que tange, por exemplo, a carga ou descarga do capacitor do elo de corrente contínua, durante a compensação ou controle de uma das grandezas determinantes na transmissão de potência. Com isso, mais uma vez, tais investigações serão efetuadas através de simulações computacionais do mesmo sistema elétrico utilizado nos Capítulos III e IV o qual representa um complexo típico, também para o emprego do controlador unificado em questão.

5.7.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO

A figura 5.5 retrata o sistema em anel simulado cujas informações relacionadas às linhas de transmissão, cargas e sistemas equivalentes encontram-se explicitadas no Capítulo III (seção 3.7.1).

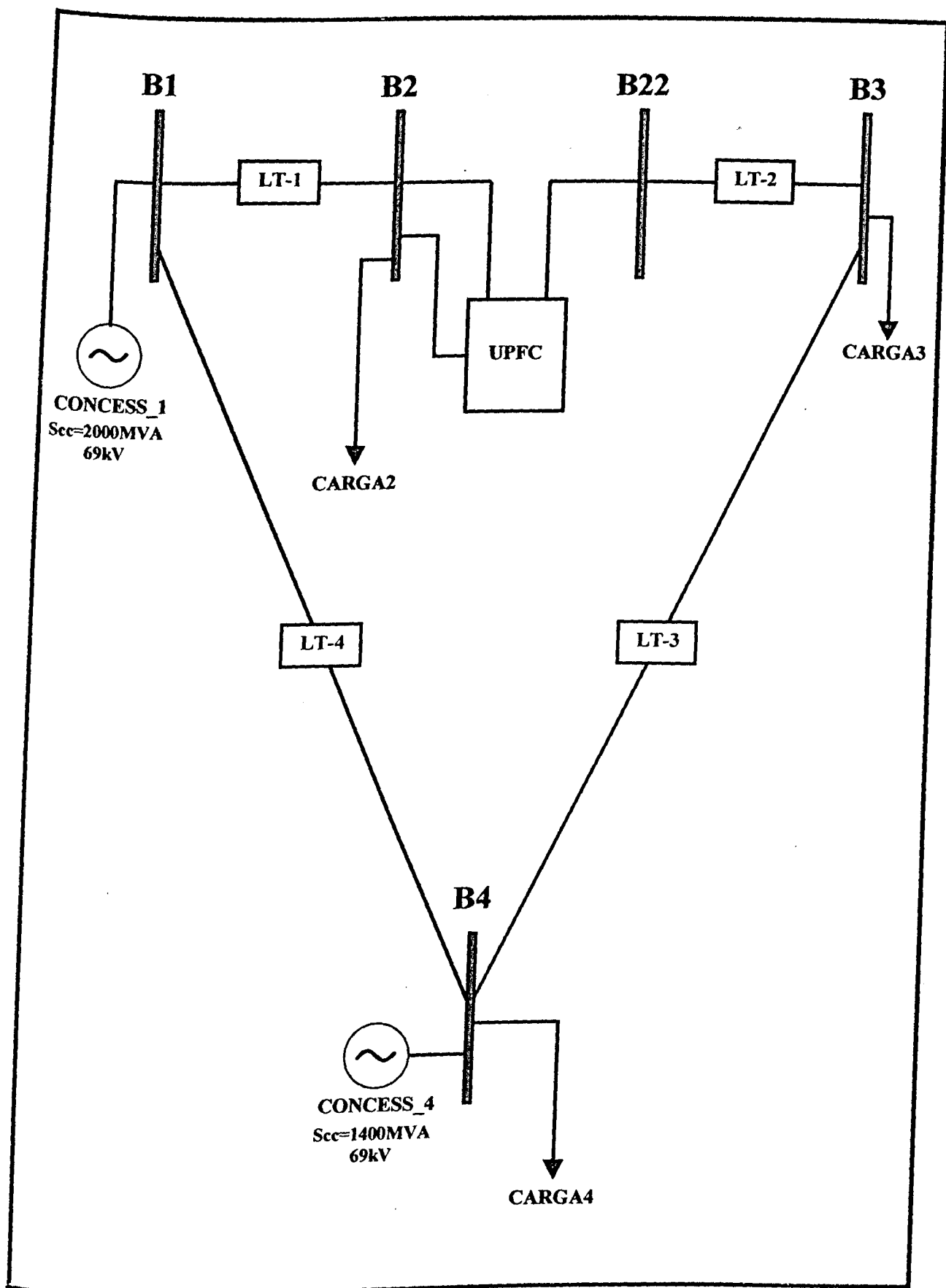


Figura 5.5 – Diagrama unifilar do sistema simulado

Como mostra o diagrama anterior, o UPFC encontra-se conectado às barras B2 e B22, de modo a proporcionar a flexibilidade de transmissão na linha LT2 bem como o suporte de reativos no barramento B2. Já a figura 5.6 fornece um detalhe do arranjo utilizado para este equipamento no âmbito do sistema simulado.

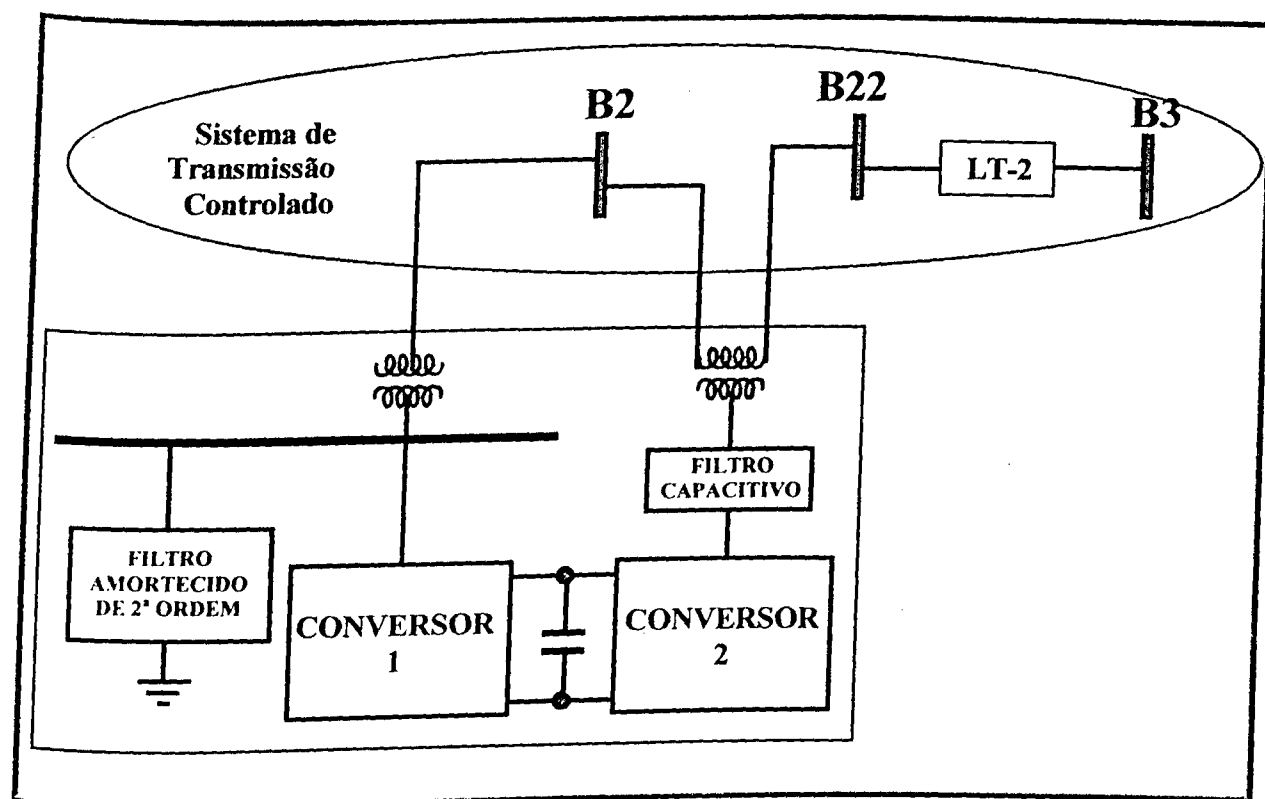


Figura 5.6 – Detalhamento do arranjo do UPFC no contexto do sistema simulado

De maneira complementar, a tabela 5.1 reúne as informações necessárias à simulação do UPFC, ressaltando-se que, os dados sobre os valores de referência das grandezas controladas e o modo de operação do Conversor 2 do UPFC serão especificados de acordo com o caso simulado.

Tabela 5.1 – Dados para simulação do UPFC

	Dados de entrada	Valor	Unidade
UPFC Paralelo	Tensão no primário do transformador paralelo	69	[kV]
	Tensão no secundário do transformador paralelo	3,3	[kV]
	Resistência percentual do transformador paralelo	0,5	[%]
	Reatância percentual do transformador paralelo	8	[%]
	Potência nominal do transformador paralelo	35	[MVA]
	Capacitância do capacitor nos terminais CC	128	[mF]
	Tensão nominal do capacitor nos terminais CC	15	[kV]
	Tensão CA base	69	[kV]
	Tensão CC base	15	[kV]
	Potência base	35	[MVA]
	Frequência de chaveamento do conversor paralelo	1,8	[kHz]
	Filtro amortecido de 2ª ordem	R1	0,001 [pΩ]
		R2	0,1872 [Ω]
		L1	17,5296 [μH]
		C1	500 [μF]
UPFC Série	Resistência percentual do transformador série	0,5	[%]
	Reatância percentual do transformador série	8	[%]
	Potência nominal do transformador série	35	[MVA]
	Capacitância dos capacitores do filtro capacitivo	10	[μF]
	Tensão nominal do capacitor nos terminais CC	15	[kV]
	Tensão CA base	69	[kV]
	Tensão CC base	15	[kV]
	Potência base	35	[MVA]
	Frequência de chaveamento do conversor série	1,8	[kHz]
	Tensão de referência no terminal emissor da LT2 (v_{oref})	-	
	Reatância de referência da LT2 (x_{lref})	-	
	Fluxo de potência requerido através da LT2 (p_{lref})	-	
	Modo de operação do UPFC série	-	
	Relação de transformação entre as tensões no primário e no secundário do transformador série	1:1	

5.7.2 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

O conjunto de casos simulados nesta seção engloba três das seis situações simuladas no Capítulo 4, as quais são identificadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Identificação dos casos simulados

Caso	Objetivo	Descrição		
		Intervalo I	Intervalo II	Intervalo III
		1,8 – 2 s	2 – 3 s	3 – 4 s
1	Verificar o desempenho do UPFC na regulação da tensão na barra emissora da LT2 (B22) ao acompanhar um determinado valor de referência, mantendo a tensão na barra B2 constante (Controle Conversor 2: Modo 1)	Operação do sistema em condições normais, estando o Conversor 2 do UPFC com a tensão de referência CA igual ao valor original do barramento ($v_{o\ ref}=0,91pu$)	Em 2s a tensão CA de referência do Conversor 2 é alterada para 1pu. ($v_{o\ ref}=1,0pu$)	Em 3s a tensão CA de referência do Conversor 2 é retornada para o valor original do barramento ($v_{o\ ref}=0,91pu$)
2	Observar o comportamento do sistema quando submetido a uma elevação súbita no valor da reatância da linha controlada com a presença do UPFC (Controle Conversor 2: Modo 2)	Operação do sistema em condições normais com a reatância de referência do Conversor 2 do UPFC igual à original da LT2 ($x_{l\ ref}=0,258pu$)	Em 2s a reatância da LT2 é subitamente dobrada do seu valor original mantendo a reatância de referência do Conversor 2 do UPFC igual à original da LT2 ($x_{l\ ref}=0,258pu$)	Em 3s a reatância da LT2 retorna ao seu valor original com a reatância de referência do Conversor 2 do UPFC igual à original da LT2 ($x_{l\ ref}=0,258pu$)
3	Verificar o desempenho do UPFC no controle do fluxo de potência ativa da LT2 ao acompanhar um determinado valor de referência (Controle Conversor 2: Modo 3)	Operação do sistema em condições normais, estando o Conversor 2 do UPFC com a potência de referência igual à original da LT2 ($p_{l\ ref}=10,925MW$)	Em 2s a potência de referência do Conversor 2 do UPFC é elevada ($p_{l\ ref}=11,925MW$)	Em 2s a potência de referência do Conversor 2 do UPFC é elevada novamente ($p_{l\ ref}=12,925MW$)

Nota: Em todos os casos a tensão CA de referência do Conversor 1 do UPFC foi mantida igual à tensão original do barramento ($v_{s\ ref}=0,91pu$)

A escolha por tais casos se deve ao fato dos mesmos contemplarem situações onde são solicitadas todas as funções do UPFC, caracterizando assim uma amostra de como tal equipamento se comportaria nas demais ocasiões. Além disso, uma comparação pode ser efetuada entre a aplicação do presente controlador de fluxo de potência e do ASC visto no capítulo anterior.

5.7.3 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados apresentados a seguir revelam, primeiramente, o comportamento das grandezas controladas por parte do Conversor 2 (série) do UPFC, seguidas das tensões série injetadas pelo mesmo em cada situação. Além disso, uma vez que as tensões na barra B2 e nos terminais do capacitor são sustentadas pelo lado paralelo do UPFC (Conversor 1), estas grandezas também serão exibidas juntamente com as correspondentes injeções de reativos.

Considerando a estrutura supracitada e obedecendo a estrutura empregada nos capítulos prévios, os resultados obtidos são agrupados em três conjuntos de acordo com os casos simulados.

5.7.3.1 – Caso 1 – Regulação de tensão através do UPFC (Controle Conversor 2: Modo 1)

Como mencionado na tabela 5.2, o presente caso objetiva verificar o desempenho do UPFC na regulação da tensão na barra emissora da LT2 (B22) ao acompanhar um determinado valor de referência mantendo constante a tensão no barramento B2. Tendo isso em vista, aos 2 segundos de simulação, a referência de tensão do Conversor 2 é elevada de 0,91p.u. (tensão original do barramento sem a presença do UPFC) para 1,0p.u, onde é mantida durante 1 segundo. Aos 3 segundos a mesma referência é reduzida para o referido valor original de tensão no barramento, onde permanece até o tempo final de simulação.

Face a este cenário, a figura 5.7 ilustra o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B22, durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s).

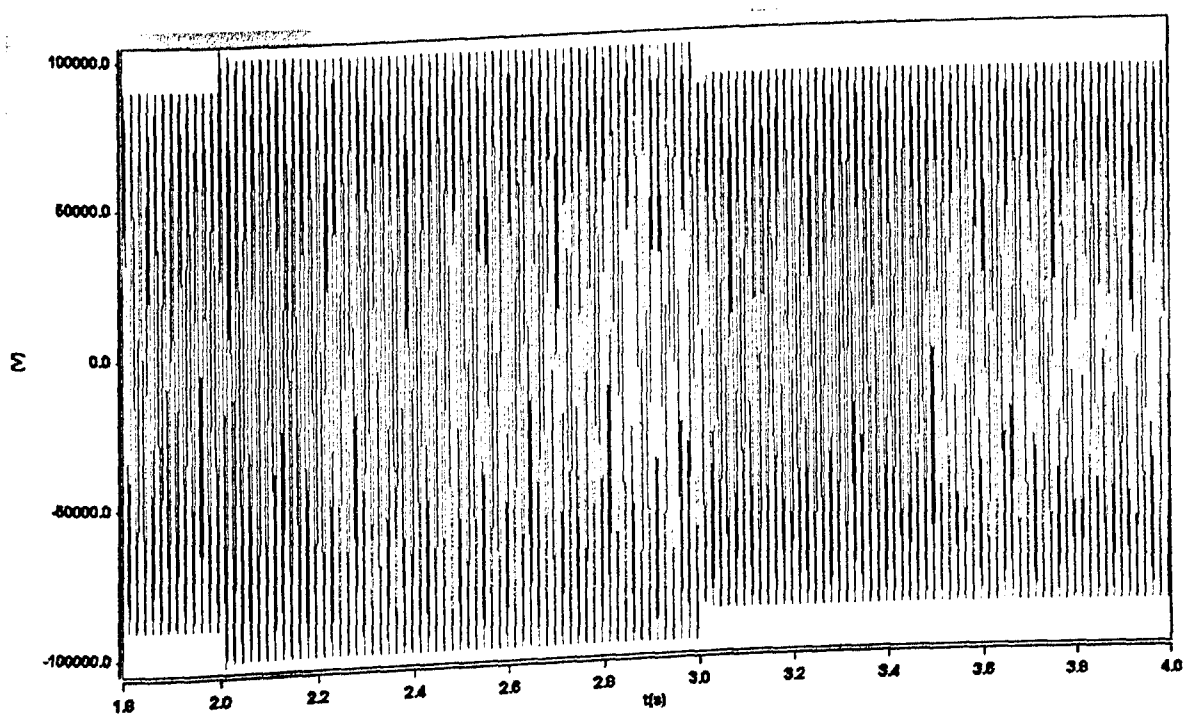


Figura 5.7 – Tensão entre fases na barra B22 – regulação de tensão

A figura 5.8 apresenta um “zoom” da mesma grandeza acima nos três últimos ciclos de cada intervalo de simulação, a saber: 1,8 a 2s, 2 a 3s e 3 a 4s.

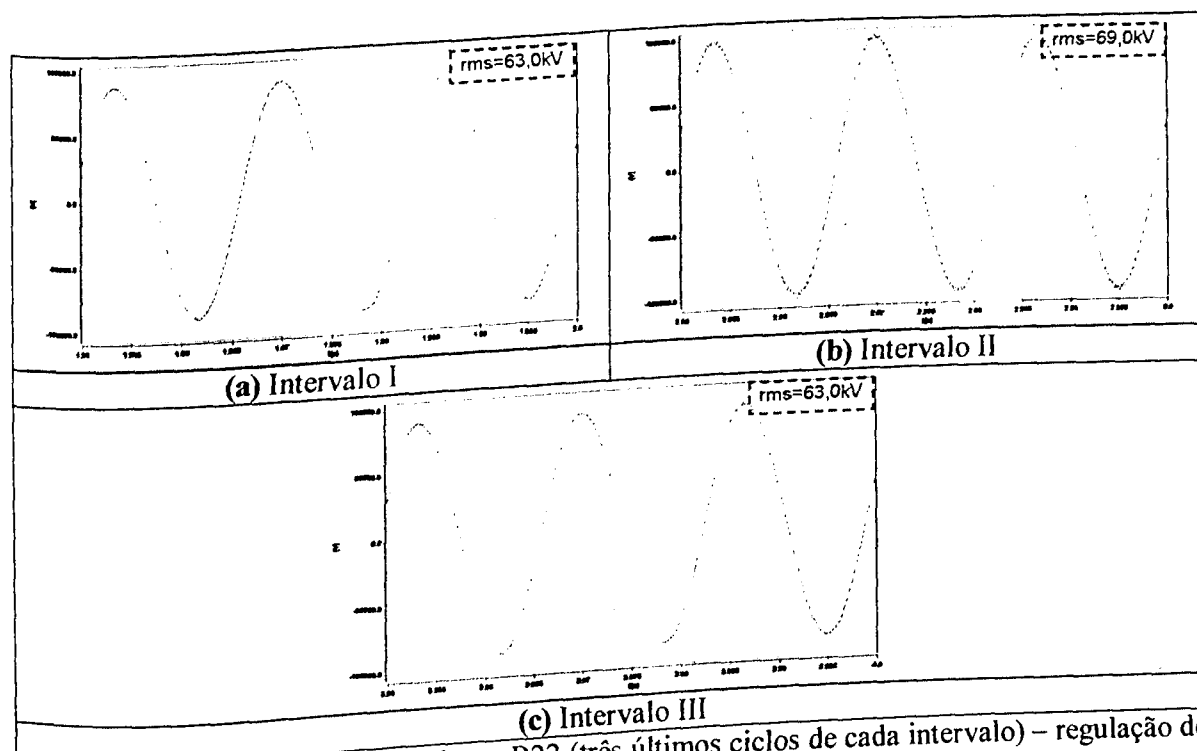


Figura 5.8 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos de cada intervalo) – regulação de tensão

Das figuras 5.7 e 5.8 verifica-se que, a tensão eficaz na barra B22 encontra-se baixa (63kV) até que, a partir de 2s, acompanhando a referência do Conversor 2 do UPFC, tal grandeza controlada passa a apresentar o valor de 69kV (1p.u. da tensão nominal do barramento). Uma redução nesse valor eficaz é observada a partir de 3s devido, mais uma vez, a alteração do patamar de referência do controlador. Tais fatos podem ser melhor visualizados na figura 5.9, que mostra o comportamento da tensão eficaz na barra B22 juntamente com a respectiva referência.

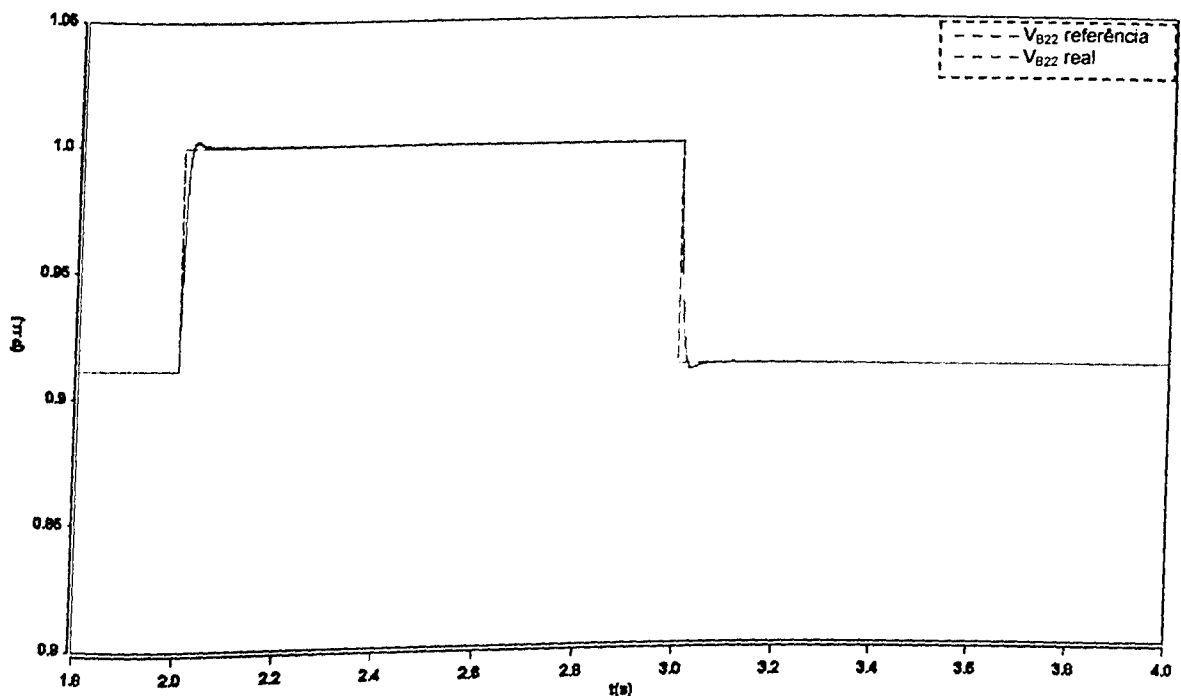


Figura 5.9 – Tensão eficaz na barra B22 ($V_{base}=69kV$) – regulação de tensão

A figura 5.10 ilustra, para todo o período de simulação (entre 1,8 e 4,0s), o perfil da tensão injetada pelo Conversor 2 em série com a LT2. Além disso, a figura 5.11 mostra um “zoom” da mesma grandeza apenas nos três últimos ciclos do **Intervalo II** (2 a 3s), juntamente com as tensões à montante e à jusante do referido equipamento.

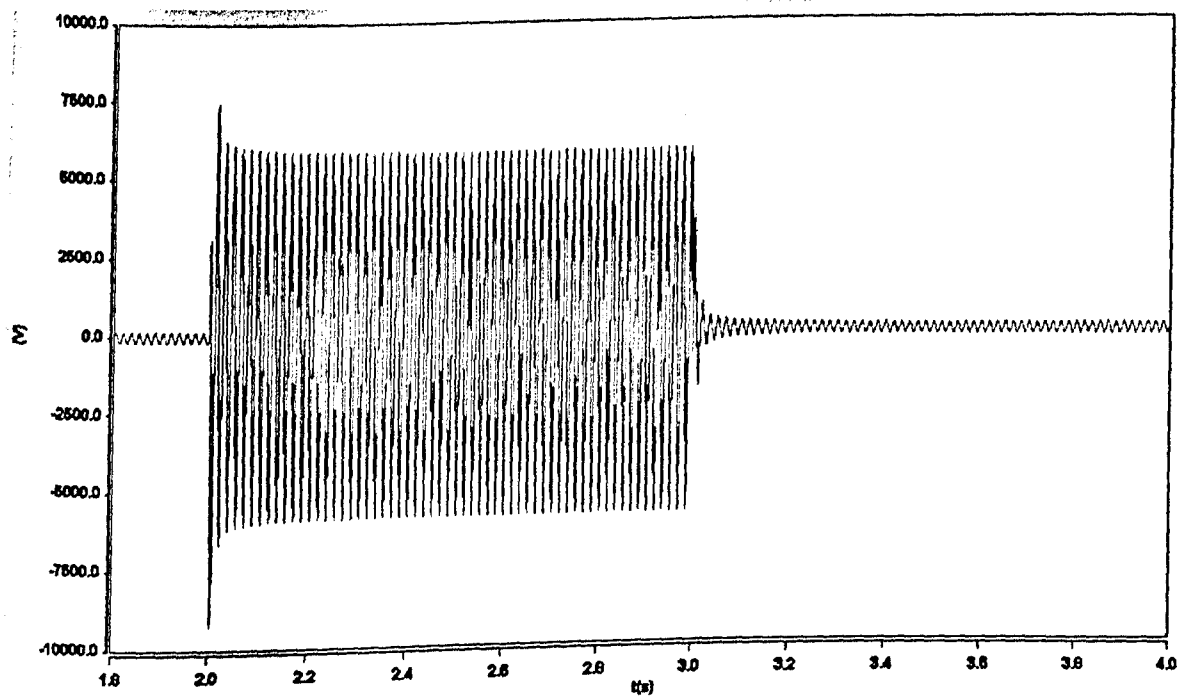


Figura 5.10 – Tensão injetada pelo Conversor 2 – regulação de tensão

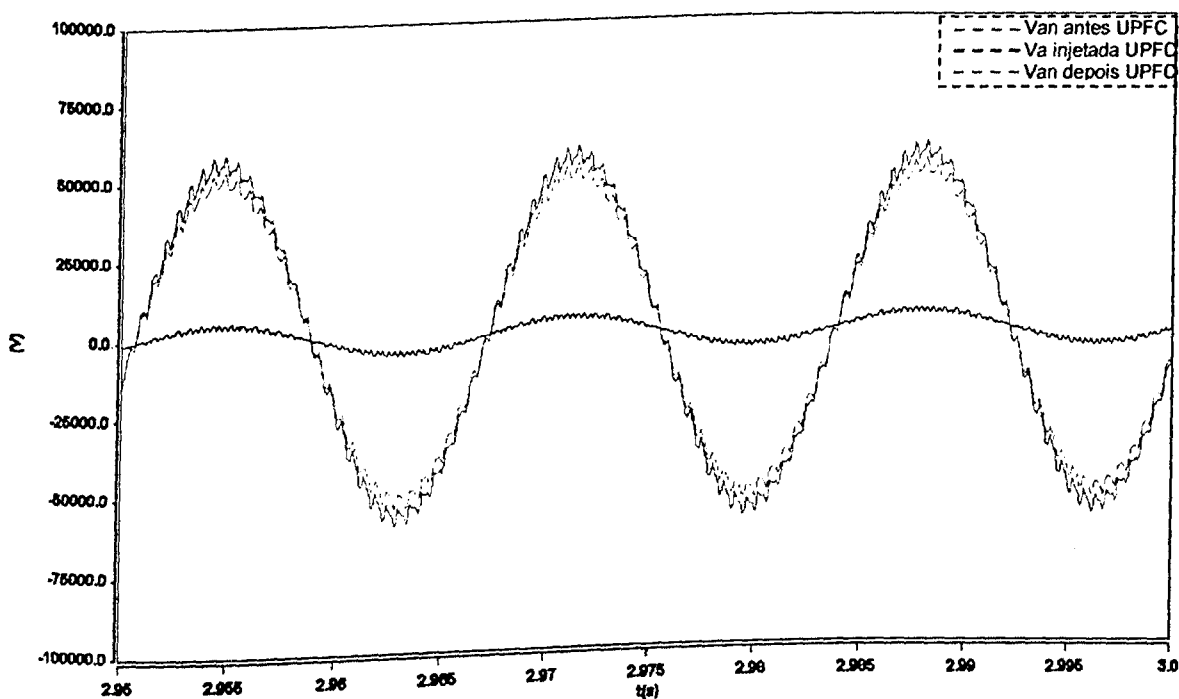


Figura 5.11 – Tensões antes, depois e injetada pelo Conversor 2 – regulação de tensão

O gráfico acima evidencia que a tensão injetada pelo Conversor 2 do UPFC ($V_{eficaz}=3,7kV$) encontra-se em fase com a tensão na barra B2

($V_{\text{eficaz}}=36,5\text{kV}$), o que acarreta em uma alteração apenas na magnitude da tensão em B22 ($V_{\text{eficaz}}=40\text{kV}$), como era de se esperar neste modo de controle. Deve-se enfatizar que, esta tensão injetada é inferior àquela observada com a operação do ASC ($V_{\text{eficaz}}=4,44\text{kV}$) no Capítulo IV – seção 4.8.3.1. Isto se deve ao fato de que, neste caso, a tensão na barra B2 também está sendo controlada pelo Conversor 1 do UPFC (figura 5.12 mostrada a seguir), acarretando em um valor maior, comparado com o obtido na seção 4.8.3.1 (0,89p.u.), e mais próximo daquele almejado pelo controle do Conversor 2.

Da figura 5.11 observa-se, ainda, que os ruídos de alta frequência ocorrem nas tensões fase/neutro tanto da barra B2 quanto da B22 devido à operação de ambos os conversores do UPFC. Não obstante tais fatos, a forma de onda das tensões fase/fase se encontra com níveis inferiores de perturbação.

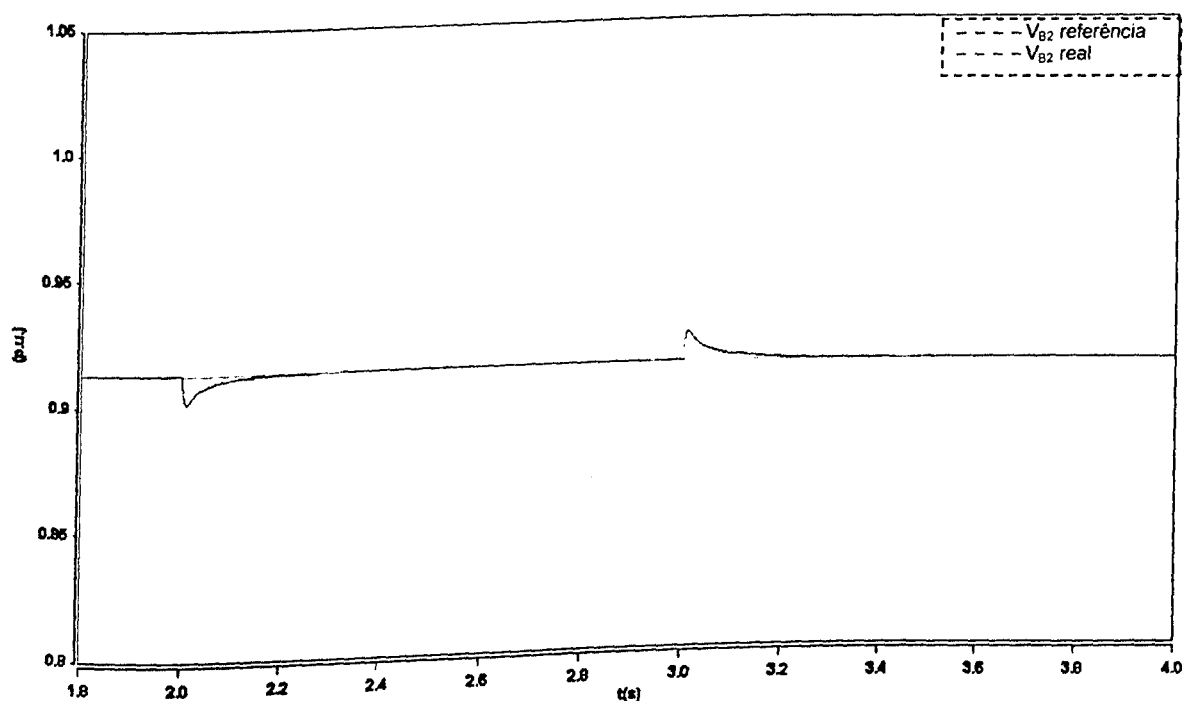


Figura 5.12 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{\text{base}}=69\text{kV}$) – regulação de tensão

Para que a tensão na barra B2 seja mantida, é necessária uma injeção de potência reativa (6,2Mvar), por parte do Conversor 1 do UPFC, durante o

intervalo em que o Conversor 2 efetua a regulação desejada (**Intervalo II**), como mostra a figura 5.13.

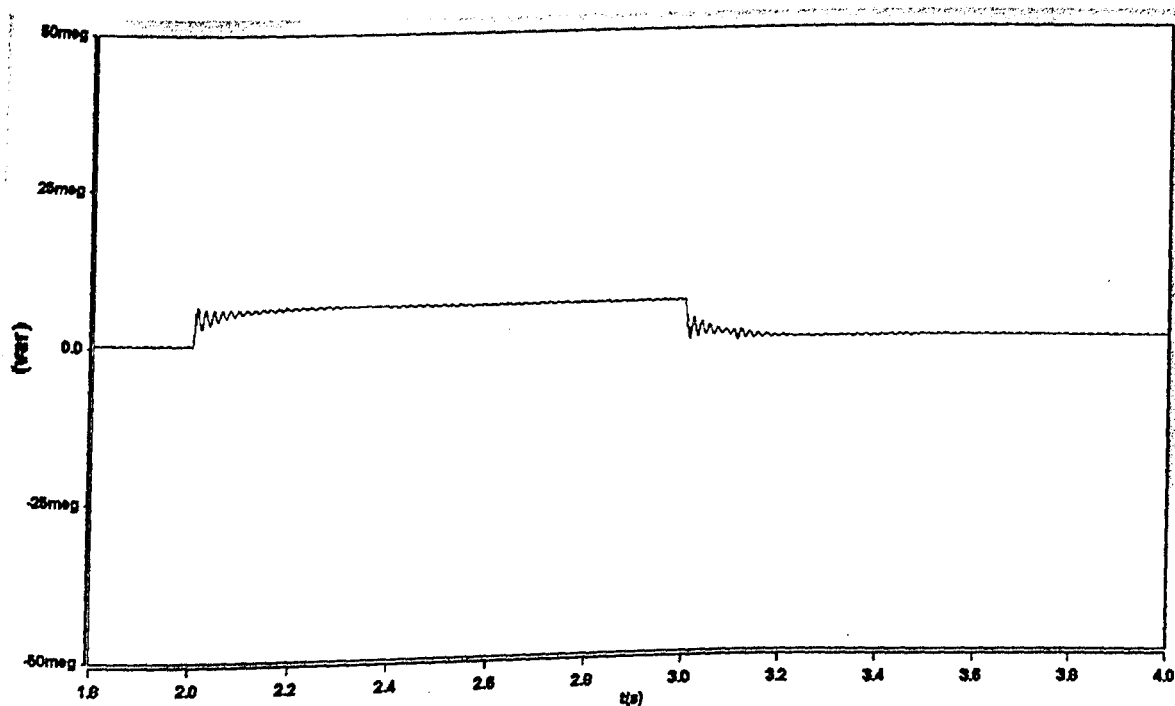


Figura 5.13 – Potência reativa entre o Conversor 1 e o sistema CA – regulação de tensão

Além das observações anteriores, a figura 5.14 mostra a tensão V_c nos terminais do capacitor do UPFC a qual, também, foi mantida praticamente constante, a despeito da ocorrência de algumas oscilações irrelevantes.

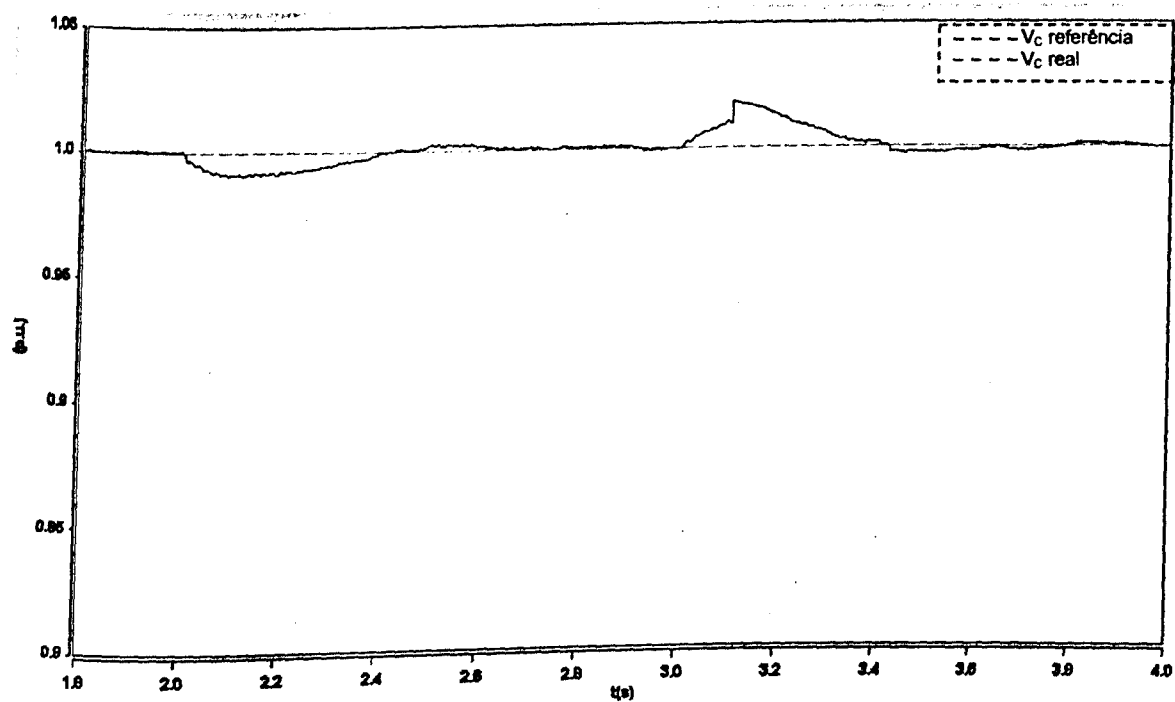


Figura 5.14 – Tensão nos terminais do capacitor do UPFC ($V_{base}=15kV$) – regulação de tensão

5.7.3.2 – Caso 2 – Monitoração/controle da reatância série através do UPFC (Controle Conversor2:Modo 2)

Neste caso, similarmente ao que foi executado na seção 4.8.3.5 do capítulo anterior, aos 2 segundos de simulação é provocada uma elevação da indutância da LT2 de 90mH para 180mH o que, conseqüentemente, implica em uma alteração da sua reatância efetiva. Desta vez, esta última grandeza encontra-se monitorada e controlada pelo sistema série do UPFC operando no **Modo 2**. Este cenário é mantido até que, em $t=3s$, o valor original da indutância é restabelecido.

Na figura 5.15 é mostrado o comportamento da reatância efetiva da LT2 bem como o seu respectivo valor de referência, no qual esta deve ser mantida.

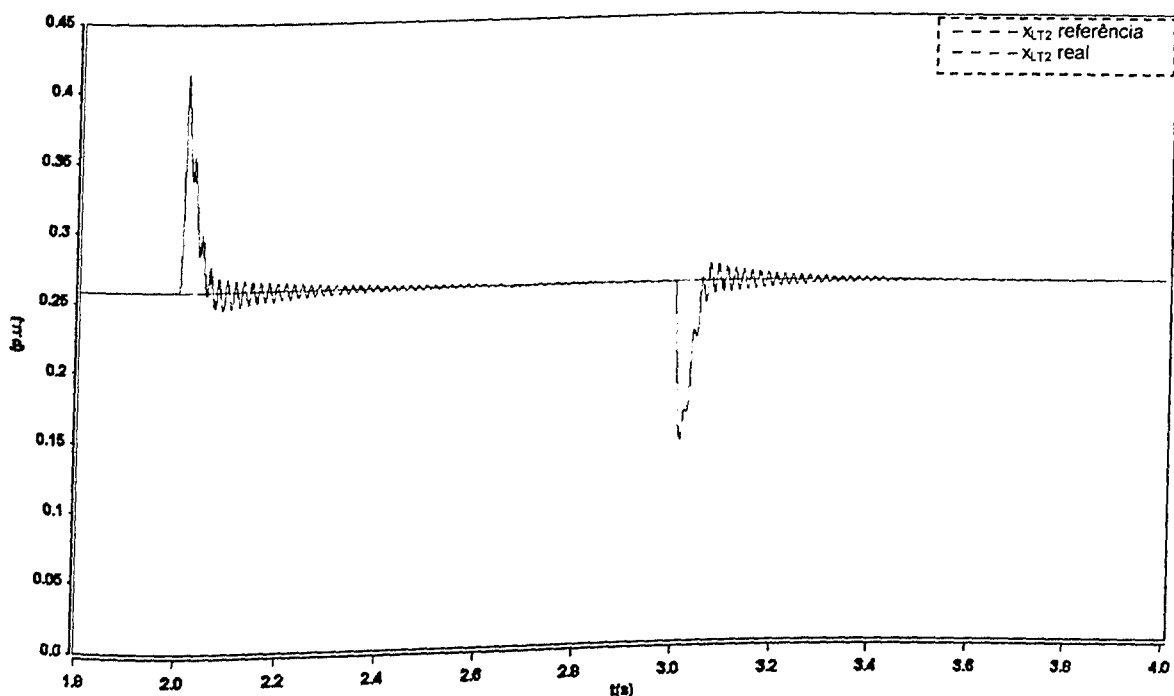


Figura 5.15 – Reatância série da LT2 ($Z_{base}=136\Omega$) – monitoração e controle da reatância série

Apesar da ocorrência de picos de 0,41p.u. e 0,14p.u. no valor da grandeza controlada, na aplicação e retirada do distúrbio, respectivamente,

mais uma vez pode-se constatar a eficiência do compensador unificado ao atender o objetivo de controle. Isto se deve à injeção de uma tensão em série de 3,5kV por parte do Conversor 2 do UPFC, no intervalo de 2 e 3 segundos (figura 5.16), a qual também se encontra defasada em 90° da corrente na linha monitorada (figura 5.17).

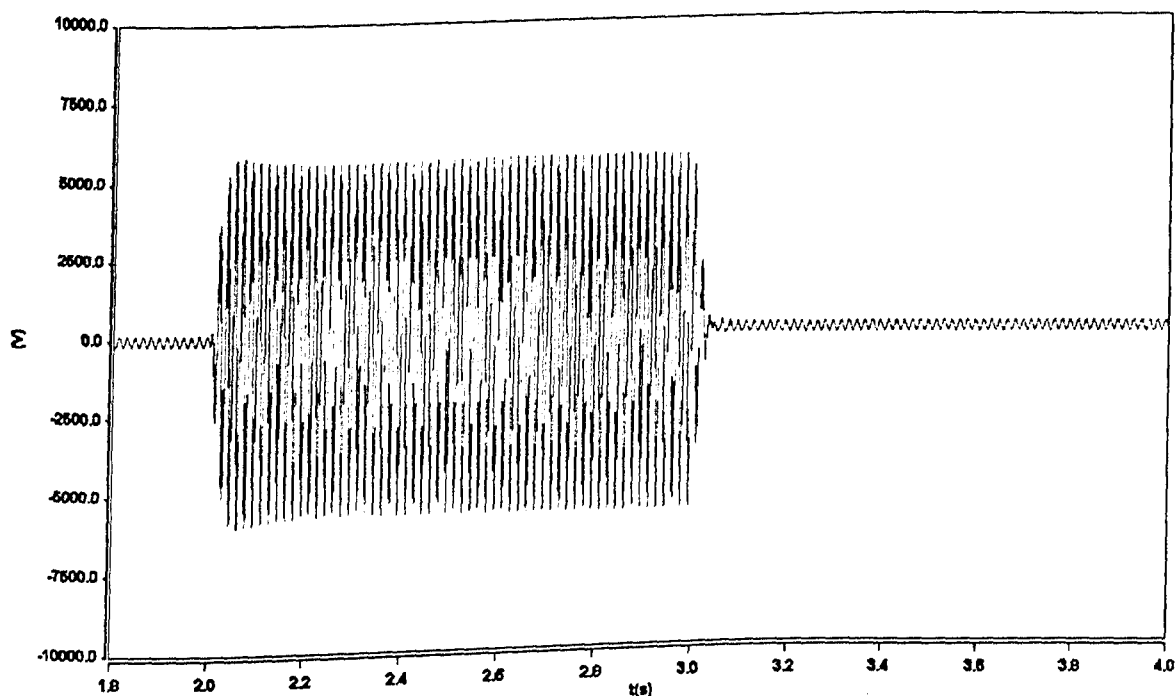


Figura 5.16 – Tensão injetada pelo Conversor 2 do UPFC – monitoração e controle da reatância série

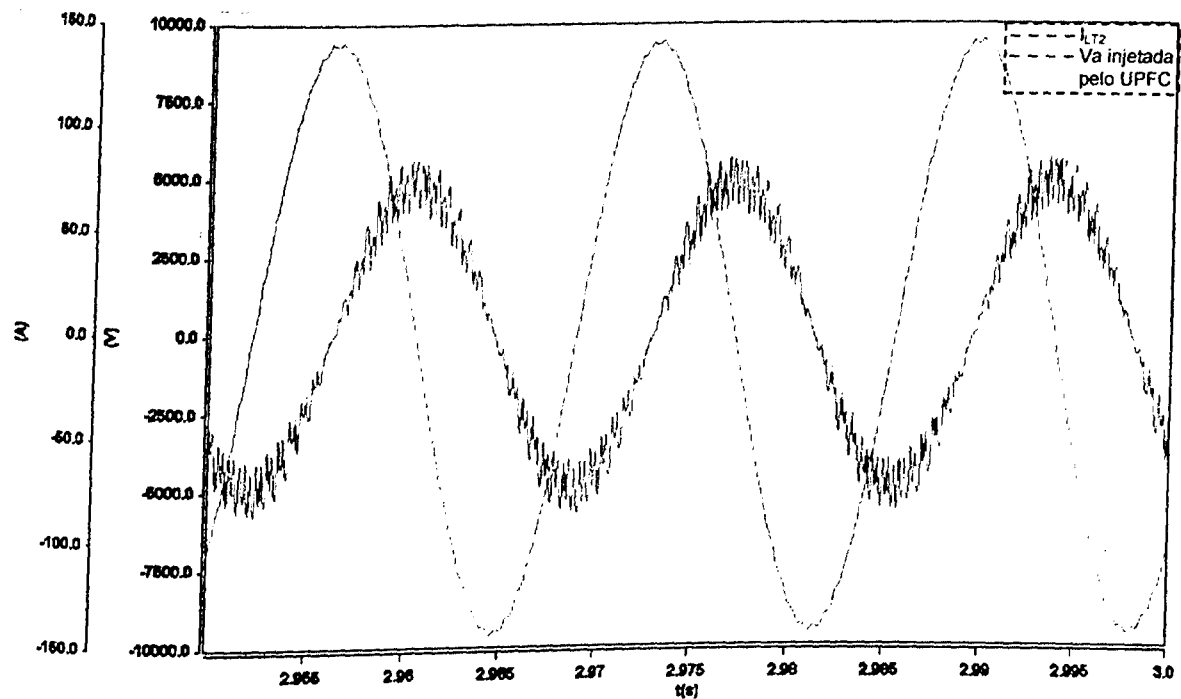


Figura 5.17 – Tensão injetada pelo Conversor 2 do UPFC e corrente na LT2 – monitoração e controle da reatância série

Assim como ocorrido quando da compensação de reatância via ASC, neste caso, o perfil da tensão eficaz da barra B2 fica praticamente inalterado, como mostra a figura 5.18.

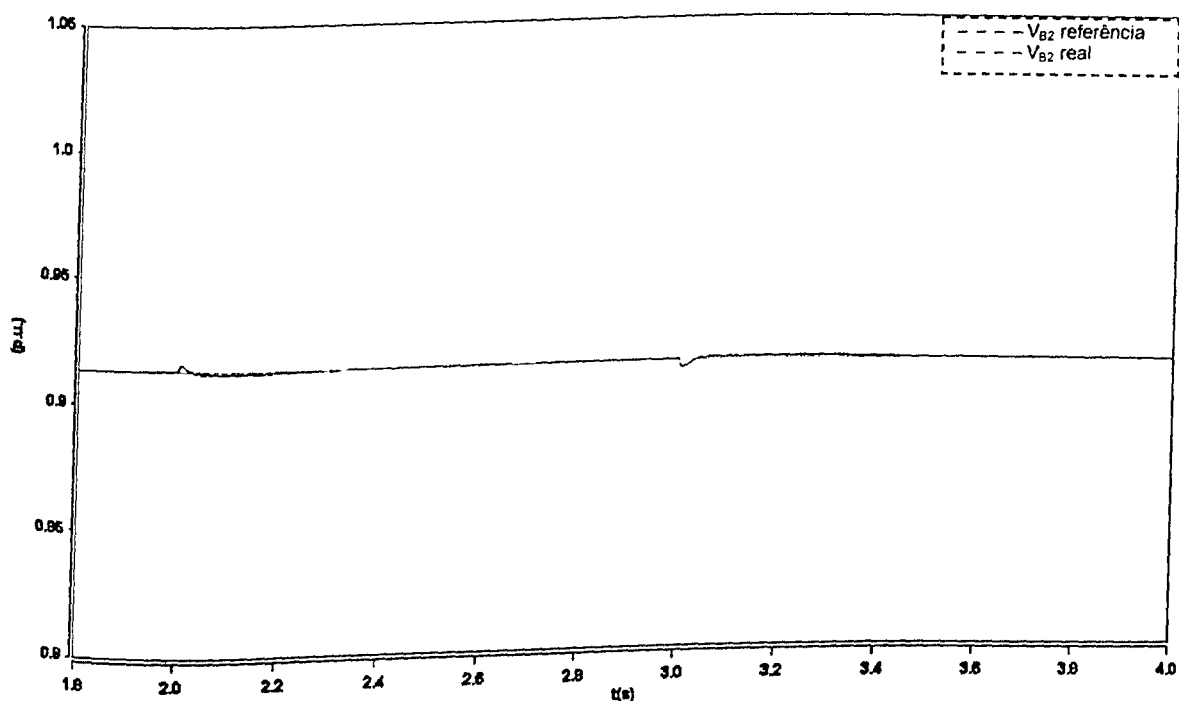


Figura 5.18 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – monitoração e controle da reatância série

O comportamento constante da tensão ocorre, primordialmente, devido à característica da compensação efetuada pelo Conversor 2, já que uma mínima variação no fluxo de potência reativa (1,7Mvar) é detectada entre o Conversor 1 e o sistema CA, como mostra a figura 5.19.

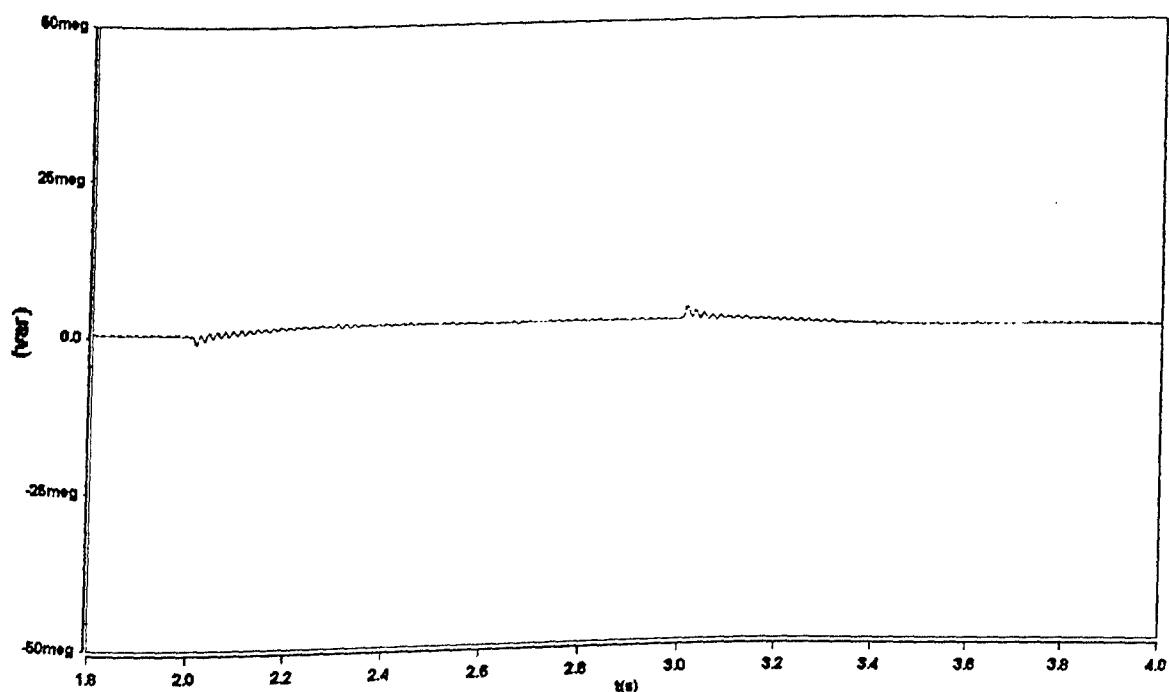


Figura 5.19 – Potência reativa entre o Conversor 1 e o sistema CA – monitoração e controle da reatância série

A figura 5.20 mostra a tensão V_c nos terminais do capacitor do UPFC que, também, experimentou oscilações transitórias nos instantes de aplicação e eliminação do distúrbio em questão. Não obstante estes fatos, tal grandeza foi conduzida ao seu valor de referência (1,0p.u.) e nesse patamar foi mantida durante o regime permanente.

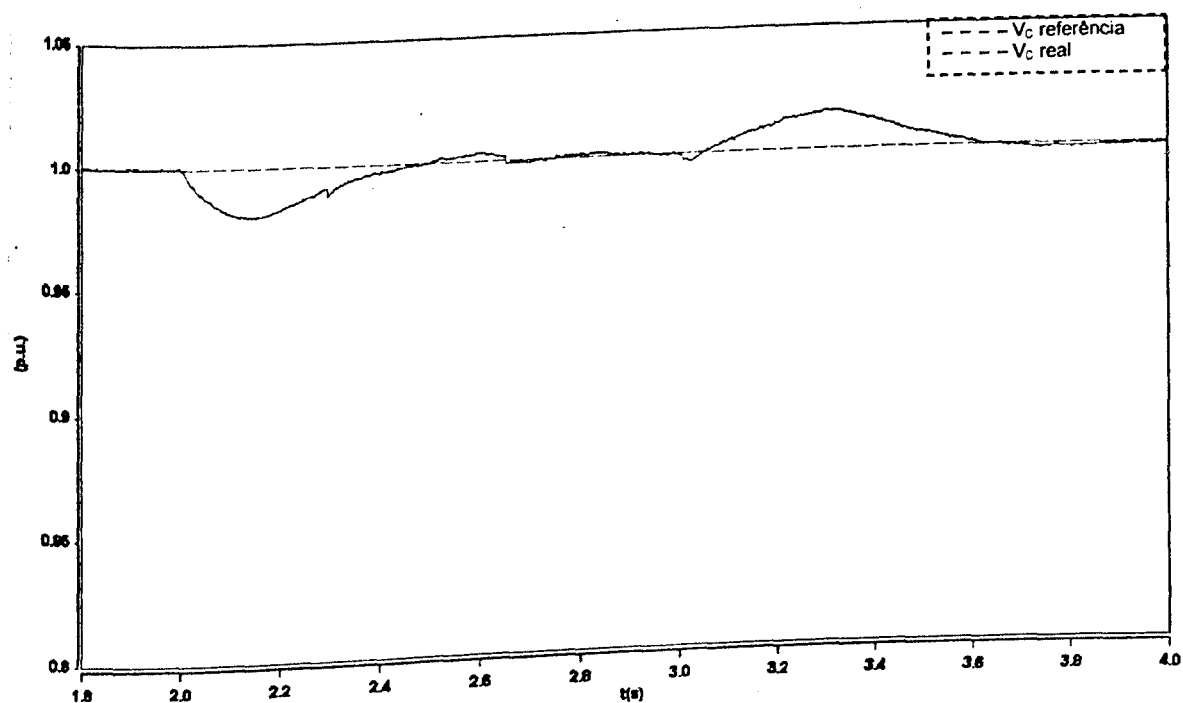


Figura 5.20 – Tensão nos terminais do capacitor do UPFC ($V_{base}=15kV$) – monitoração e controle da reatância série

5.7.3.3 – Caso 3 – Controle do fluxo de potência ativa através do UPFC (Controle Conversor 2: Modo 3)

Finalmente, o presente estudo consiste na manipulação do fluxo de potência ativa na LT2, através da alteração do ângulo de transmissão por parte do UPFC. A estratégia utilizada nestas análises consiste em que, aos 2 segundos de simulação, a potência de referência do Conversor 2 do UPFC é alterada de 9,72MW para 10,72MW e na sequência, em $t=3s$, a mesma grandeza é elevada para 11,72MW.

O resultado de tais manobras, exibido na figura 5.21, certificam que o UPFC implementado atende prontamente às solicitações do sistema, já que a potência ativa transmitida pela LT2 acompanha a referência imposta ao equipamento.

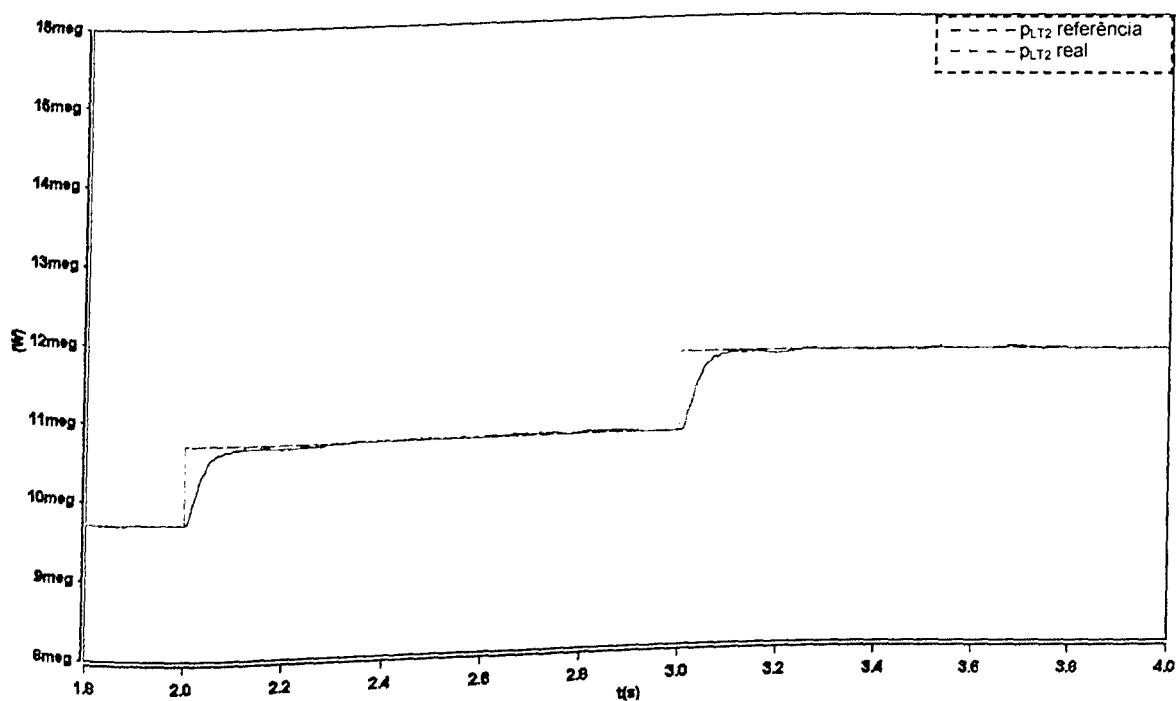


Figura 5.21 – Potência ativa na LT2 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

A figura 5.22 ilustra, para todo o período de simulação (entre 1,8 e 4,0s), o perfil da tensão injetada pelo Conversor 2 do UPFC.

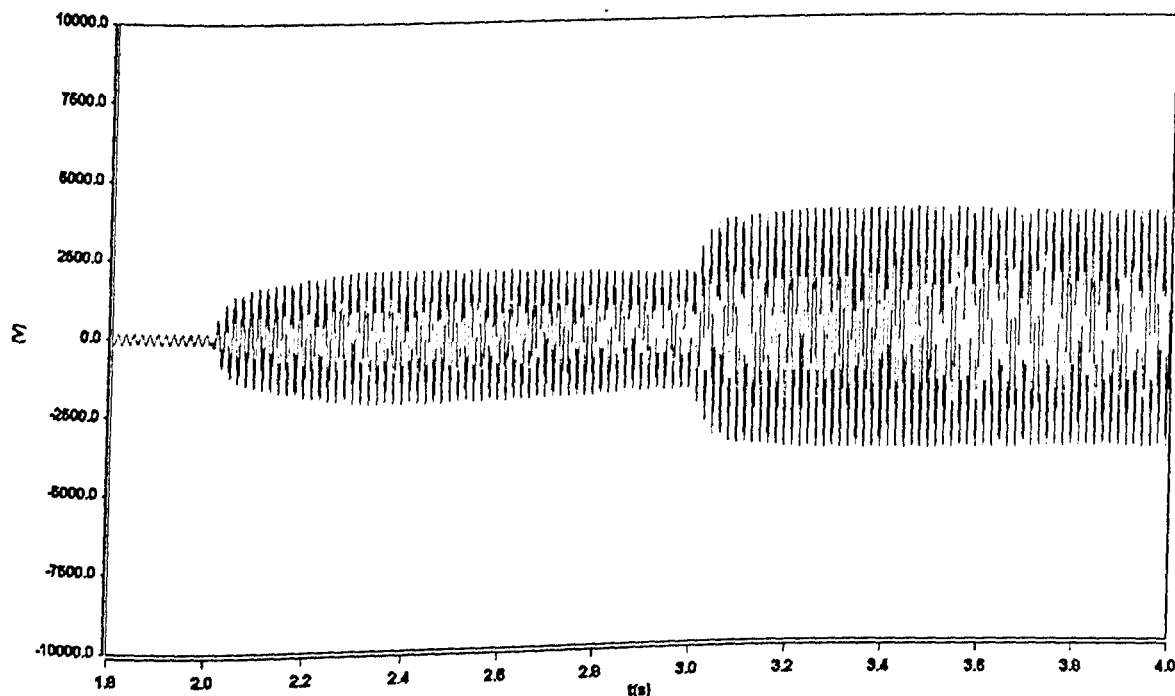


Figura 5.22 – Tensão injetada pelo Conversor 2 do UPFC – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

Da figura acima observa-se que, assim como para o ASC, à medida que a solicitação de potência aumenta (10,72MW e 11,72MW), eleva-se também a magnitude da tensão injetada pelo UPFC (1,18kV e 2,37kV, em valores eficaz respectivamente). A consequência disto, como já explicado em outro momento, é um maior defasamento entre as tensões das barras B2 e B22 sem alterar as suas magnitudes, o que pode ser confirmado nos detalhes das figuras 5.23 e 5.24 para os três últimos ciclos do **Intervalo II** (2 a 3s) e do **Intervalo III** (3 a 4s), respectivamente.

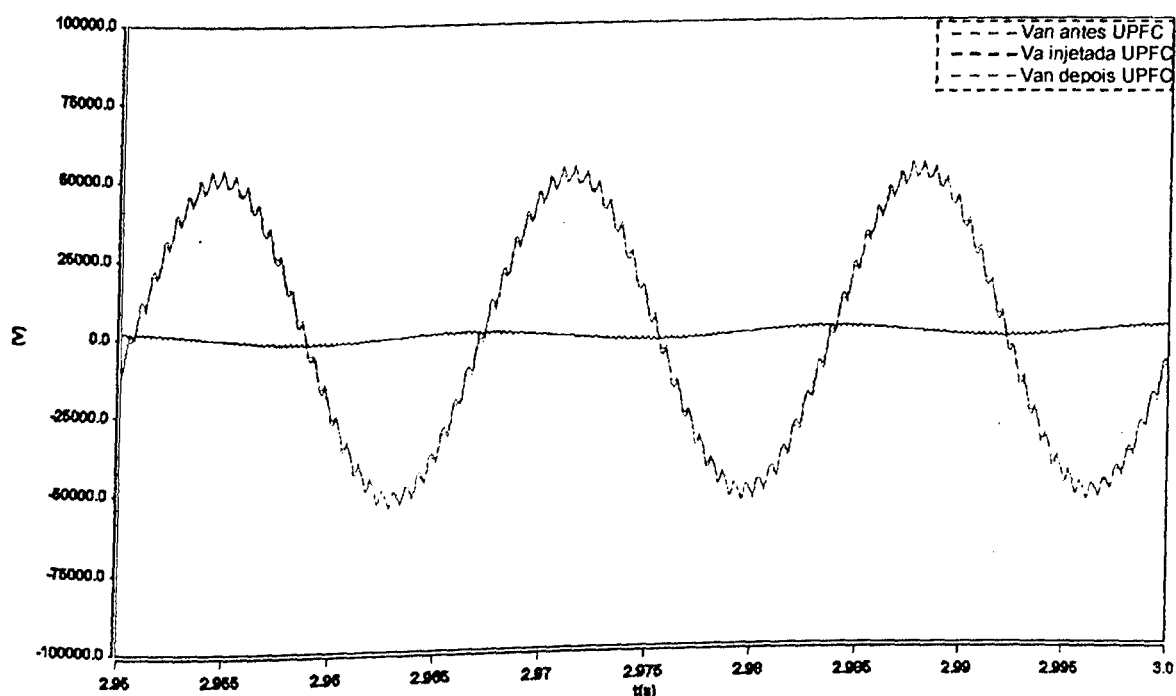


Figura 5.23 – Tensões antes, depois e injetada pelo Conversor 2 do UPFC (**Intervalo II**) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

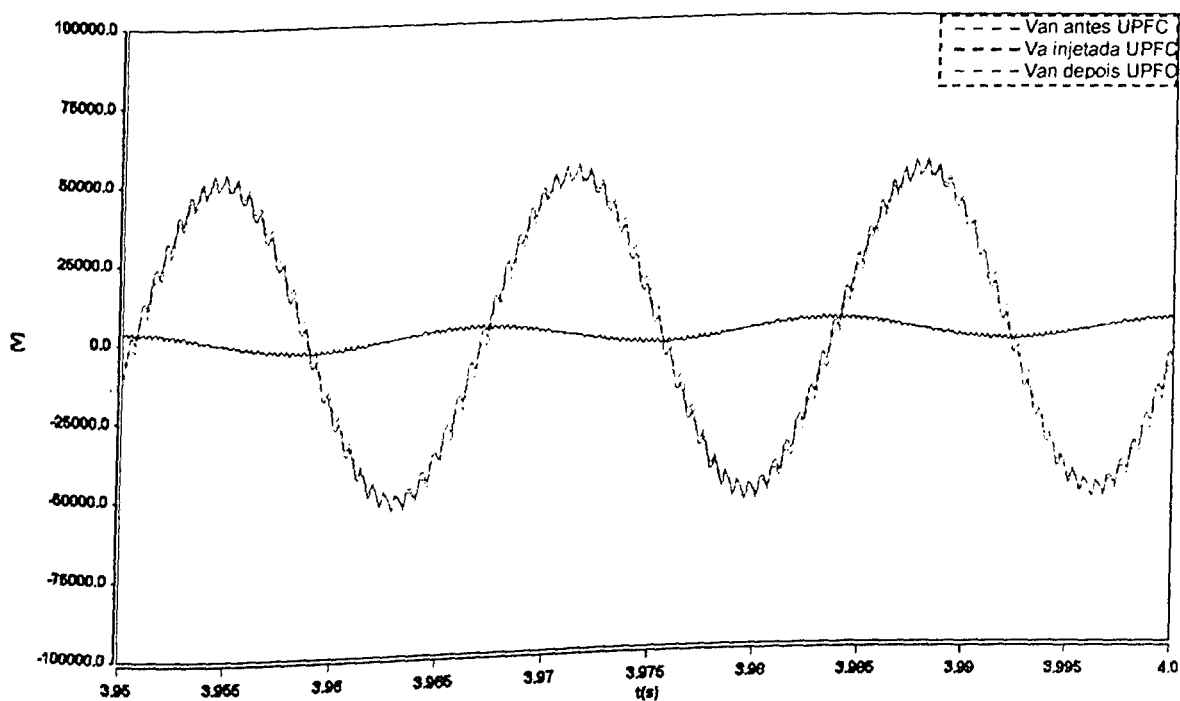


Figura 5.24 – Tensões antes, depois e injetada pelo Conversor 2 do UPFC (**Intervalo III**) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

O ângulo entre as tensões nos barramentos B2 e B22, que inicialmente é $-0,16^\circ$ (**Intervalo I**), é alterado para $1,73^\circ$ (**Intervalo II**) e posteriormente para $3,43^\circ$ (**Intervalo III**), como mostra a figura 5.25.

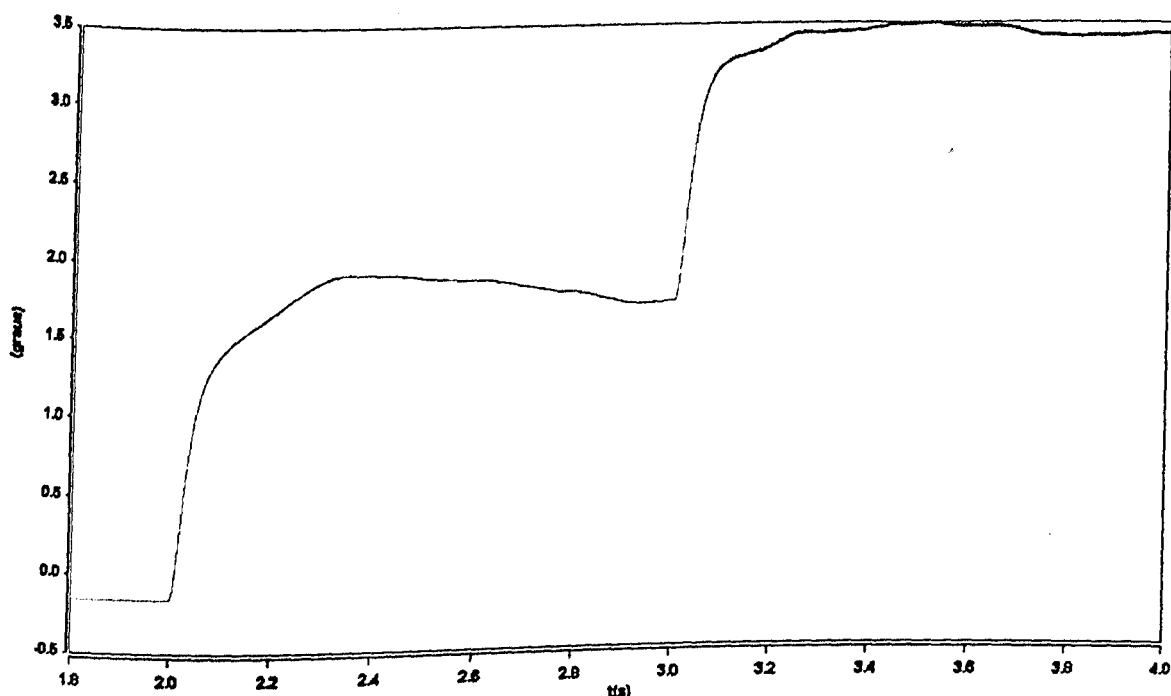


Figura 5.25 – Ângulo entre as tensões nas barras B2 e B22 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

As variações observadas anteriormente implicam no aumento do ângulo de carga, responsável pela alteração da potência ativa transmitida pela LT2, o qual é exibido na figura 5.26 com os seguintes valores de regime permanente: $-4,9^\circ$ (Intervalo I), $-5,35^\circ$ (Intervalo II) e $-5,77^\circ$ (Intervalo III).

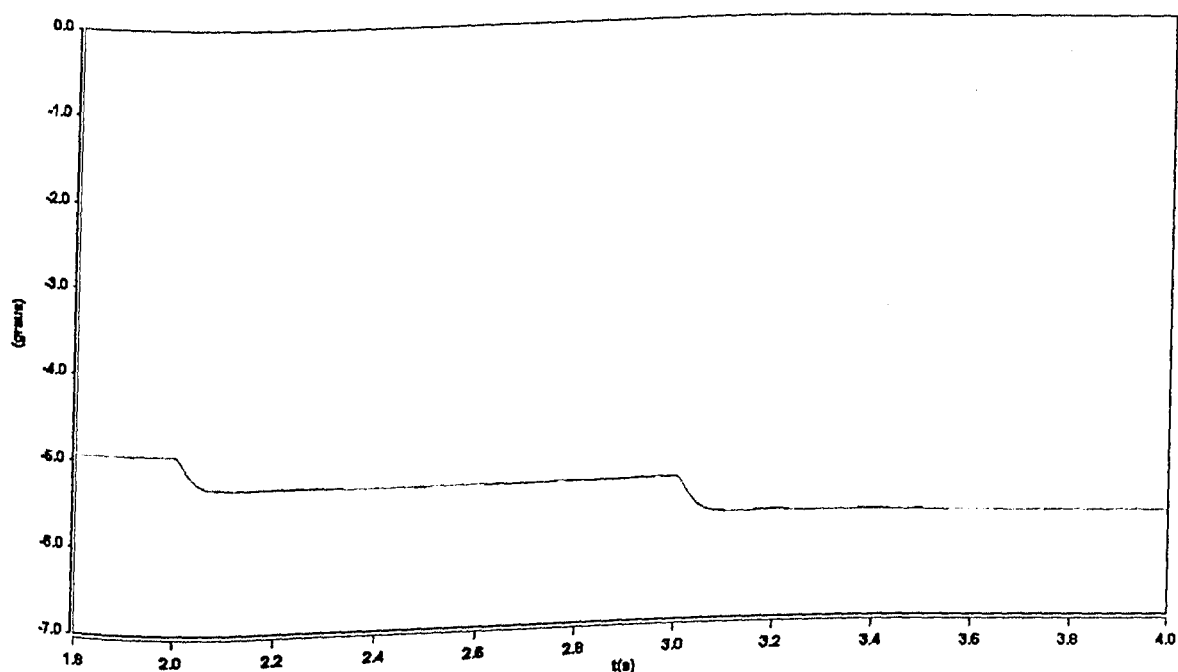


Figura 5.26 – Ângulo entre as tensões nas barras B22 e B3 – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

Mais uma vez, não foram verificadas modificações na tensão eficaz da barra B2, como mostra a figura 5.27.

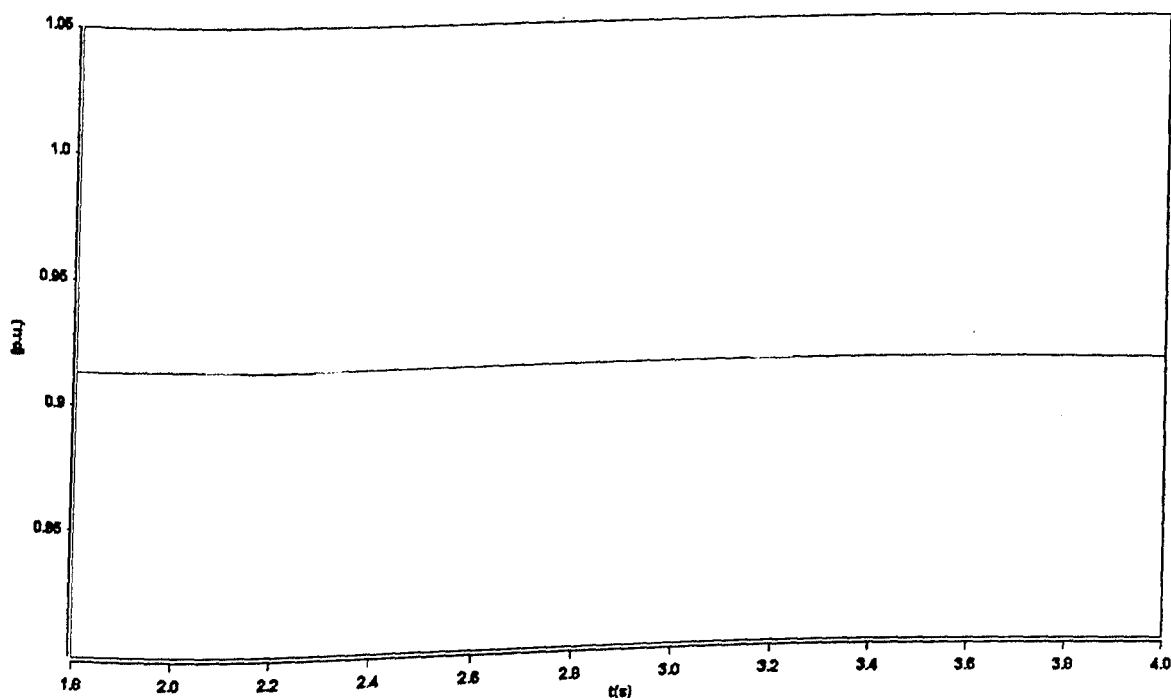


Figura 5.27 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69kV$) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

Neste caso, este fato também se deve à característica da compensação efetuada pelo Conversor 2, uma vez que a reação do Conversor 1 a uma variação de tensão no barramento em questão, em termos de injeção de reativos, é imperceptível (0,8Mvar). Isto pode ser constatado através da figura 5.28.

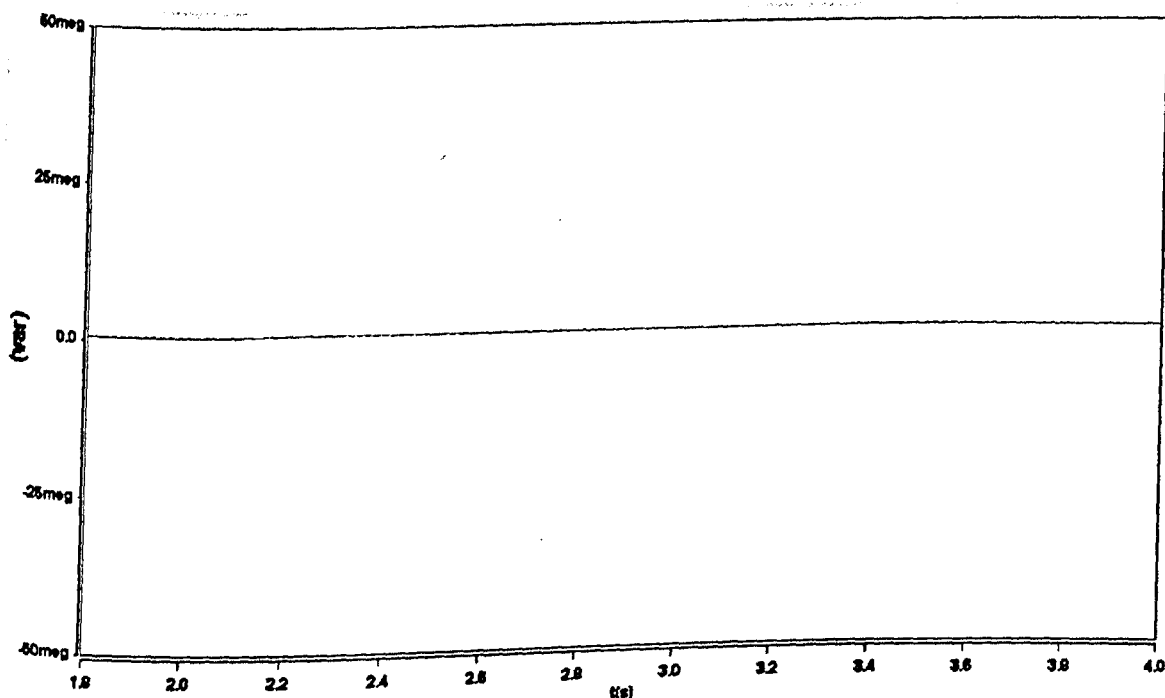


Figura 5.28 – Potência reativa entre o Conversor 1 e o sistema CA – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

Por fim, a figura 5.29 exibe a tensão nos terminais do capacitor do UPFC a qual, apesar de experimentar irrisórias oscilações transitórias, foi mantida no seu valor de referência (1,0p.u.).

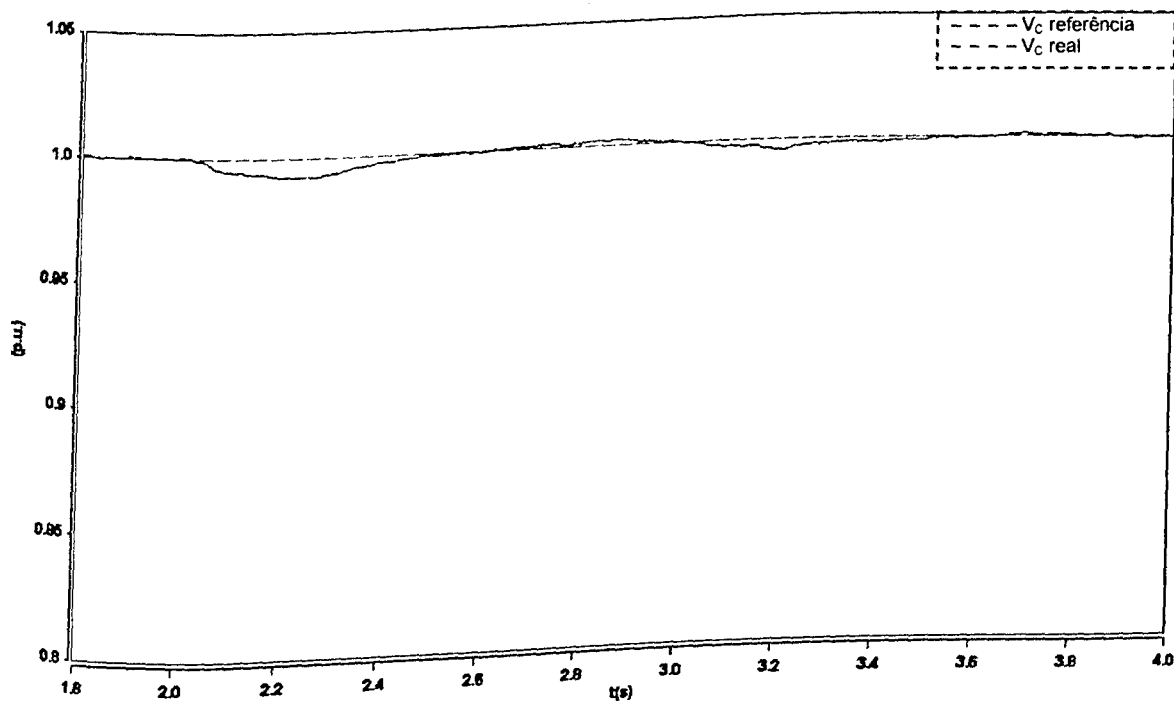


Figura 5.29 – Tensão nos terminais do capacitor do UPFC ($V_{base}=15kV$) – controle do fluxo de potência através do ângulo de carga

5.7.3.4 – Quadro resumo comparativo

A tabela 5.3 fornece um quadro resumo comparativo dos valores em regime permanente das grandezas monitoradas durante a simulação dos casos.

Tabela 5.3 – Quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas

Caso	Grandeza	Valores		
		Intervalo I	Intervalo II	Intervalo III
1 - Regulação de tensão através do UPFC (Controle: Modo 1)	Tensão em B22 [kV]	63,0	69,0	63,0
	Tensão injetada/fase [kV] **	0,0	3,7	0,0
	Tensão em B2 [kV]	63,0	63,4	63,0
	Potência Reativa [Mvar] *	0,0	6,2	0,0
2 - Monitoração e controle da reatância série através do UPFC (Controle: Modo 2)	Reatância efetiva da LT2 [Ω]	35,22	35,22	35,22
	Tensão injetada/fase [kV] **	0,0	3,5	0,0
	Tensão em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Potência Reativa [Mvar] *	0,0	1,7	0,0
3 - Controle do fluxo de potência ativa através do UPFC (Controle: Modo 3)	Potência ativa na LT2 [MW]	9,72	10,72	11,72
	Tensão injetada/fase [kV]**	0,0	1,18	2,37
	Tensão em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Ângulo entre B2 e B22 [graus]	-0,16	1,73	3,43
	Ângulo entre B22 e B3 [graus]	-4,9	-5,35	-5,77
	Potência Reativa [Mvar] *	0,0	0,8	0,0

Nota: Em todos os casos a tensão nos terminais do capacitor do UPFC permaneceu constante e igual a 15kV.

* Grandeza referente ao Conversor 1 do UPFC

** Grandeza referente ao Conversor 2 do UPFC

5.8 AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DO UPFC FACE A OUTROS DISTÚRBIOS DE QUALIDADE

Até o presente momento foi possível constatar a eficiência dos compensadores avançados no controle da tensão de um barramento perante afundamentos e elevações de tensão. Diante disso, pode-se dizer que a eficácia dos mesmos diante de perturbações do tipo *Flicker* encontra-se verificada. Assim, de modo a investigar o comportamento deste tipo de compensador face a outros distúrbios de qualidade da energia, os estudos de casos a serem executados nesta seção têm por propósito avaliar o desempenho do UPFC quando o sistema apresenta problemas de harmônicos e desequilíbrios. Além disso, um levantamento a respeito do conteúdo harmônico presente na tensão dos barramentos controlados, bem como na corrente injetada pelo UPFC, também é efetuado. Este levantamento é feito para a operação do UPFC com e sem a presença de unidades de filtragem, sendo esta última situação um caso especial de funcionamento. Para tanto, são executadas simulações computacionais do complexo elétrico apresentado na figura 5.5, o qual é submetido a várias situações a serem descritas na seção seguinte.

5.8.1 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

O conjunto de casos simulados nesta seção compreende cinco situações, as quais são identificadas na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Identificação dos casos simulados

Caso	Objetivo	Descrição	
		Intervalo I	Intervalo II
		1,8 – 2 s	2 – 3 s
1	Verificar o desempenho do UPFC quando o sistema é submetido a um afundamento trifásico de tensão (Controle Conversor 2: Modo 1)	Operação do sistema em condições normais (com UPFC)	Em 2s é aplicado um afundamento trifásico de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (com UPFC)
2	Observar o comportamento do sistema quando o mesmo é submetido a um afundamento de tensão em uma fase	Operação do sistema em condições normais (sem UPFC)	Em 2s é aplicado um afundamento monofásico de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (sem UPFC)
3	Analisar o desempenho do UPFC quando o sistema é submetido a um afundamento de tensão em uma fase (Controle Conversor 2: Modo 1)	Operação do sistema em condições normais (com UPFC)	Em 2s é aplicado um afundamento monofásico de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (com UPFC)
4	Verificar o desempenho do UPFC quando o sistema, possuindo 5% de distorção harmônica, é submetido a um afundamento trifásico de tensão (Controle Conversor 2: Modo 1)	Operação do sistema com 5% de distorção harmônica (com UPFC)	Em 2s é aplicado um afundamento trifásico de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (com UPFC)
5	Verificar o desempenho do UPFC e avaliar o conteúdo harmônico injetado pelo mesmo, quando o sistema é submetido a um afundamento trifásico de tensão e o equipamento encontra-se desprovido de unidades de filtragem (Controle Conversor 2: Modo 1)	Operação do sistema em condições normais (com UPFC sem filtros)	Em 2s é aplicado um afundamento trifásico de 10% na tensão da barra B2 com duração de 1s (com UPFC sem filtros)

Nota: Nos casos em que o UPFC está presente, as tensões CA de referência do Conversor 1 e do Conversor 2 foram mantidas iguais à tensão original do barramento ($V_{s\ ref}=0,91pu$)

Deve-se ressaltar que, a importância dos Casos 1 e 2 apresentados na tabela acima consiste em prover situações básicas para uma comparação com os resultados obtidos nos Casos 3 e 4.

5.8.2 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações, os quais exibem as tensões controladas pelos dois conversores do UPFC, ressaltando-se seus valores rms e de distorção harmônica (DHV). Além disso, é mostrada a forma de onda da corrente injetada pelo Conversor 1 com o seu correspondente índice de distorção harmônica (DHI).

Considerando a estratégia supracitada, os resultados obtidos são agrupados em cinco conjuntos de acordo com os casos simulados.

5.8.2.1 – Caso 1 – Afundamento trifásico de tensão com presença do UPFC

No presente caso, em $t=2s$ o sistema sob análise é submetido a um afundamento trifásico momentâneo de tensão com intensidade de 10% e duração de 1 segundo. A figura 5.30 ilustra o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B2 durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s).

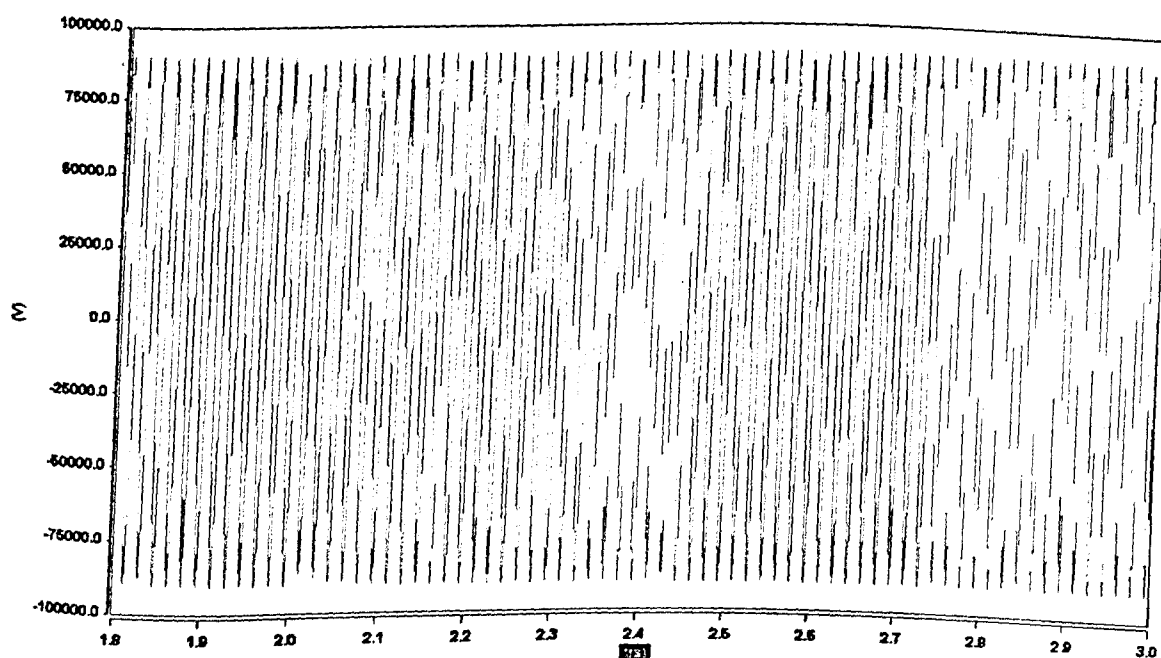


Figura 5.30 – Tensão entre fases na barra B2 – afundamento trifásico de tensão com UPFC

Ainda, a figura 5.31 apresenta um “zoom” da grandeza acima nos três últimos ciclos do **Intervalo II** de simulação.

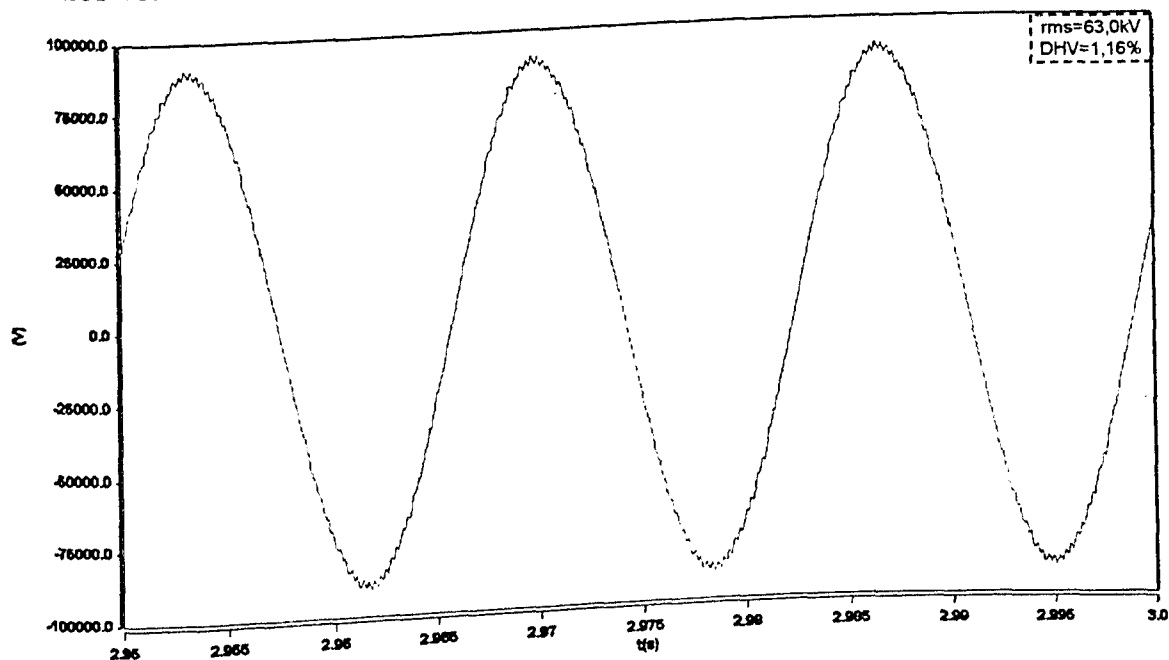


Figura 5.31 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC

O perfil da tensão entre fases na barra B22 durante todo o período de simulação é mostrado na figura 5.32 e o detalhe dos três últimos ciclos é apresentado na figura 5.33.

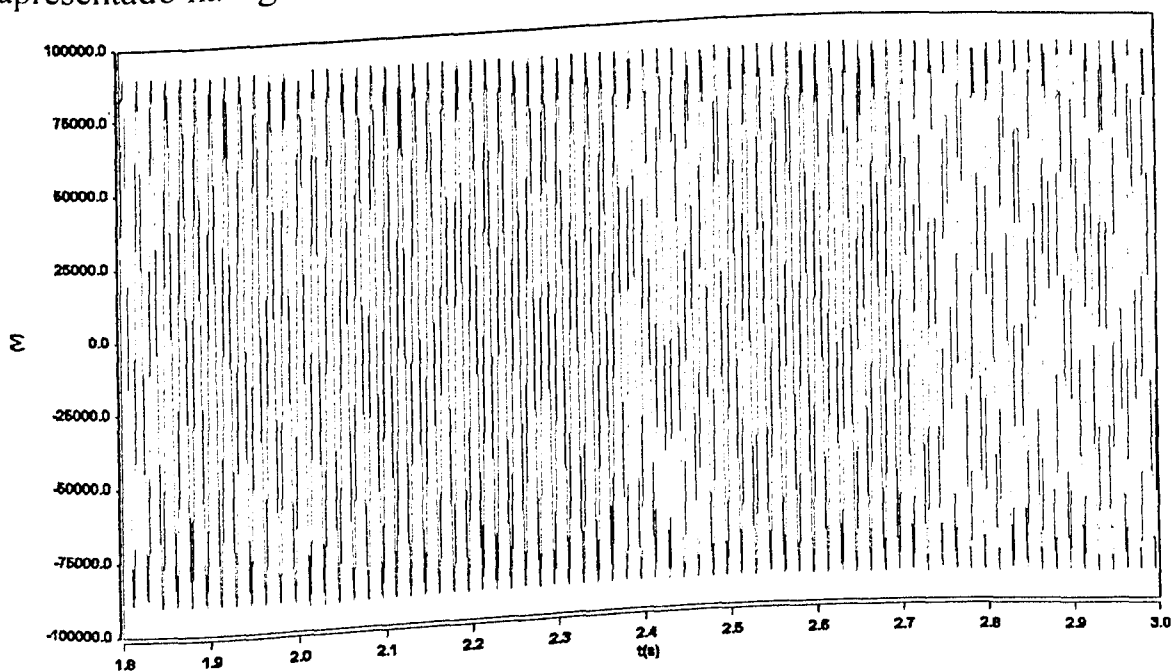


Figura 5.32 – Tensão entre fases na barra B22 – afundamento trifásico de tensão com UPFC

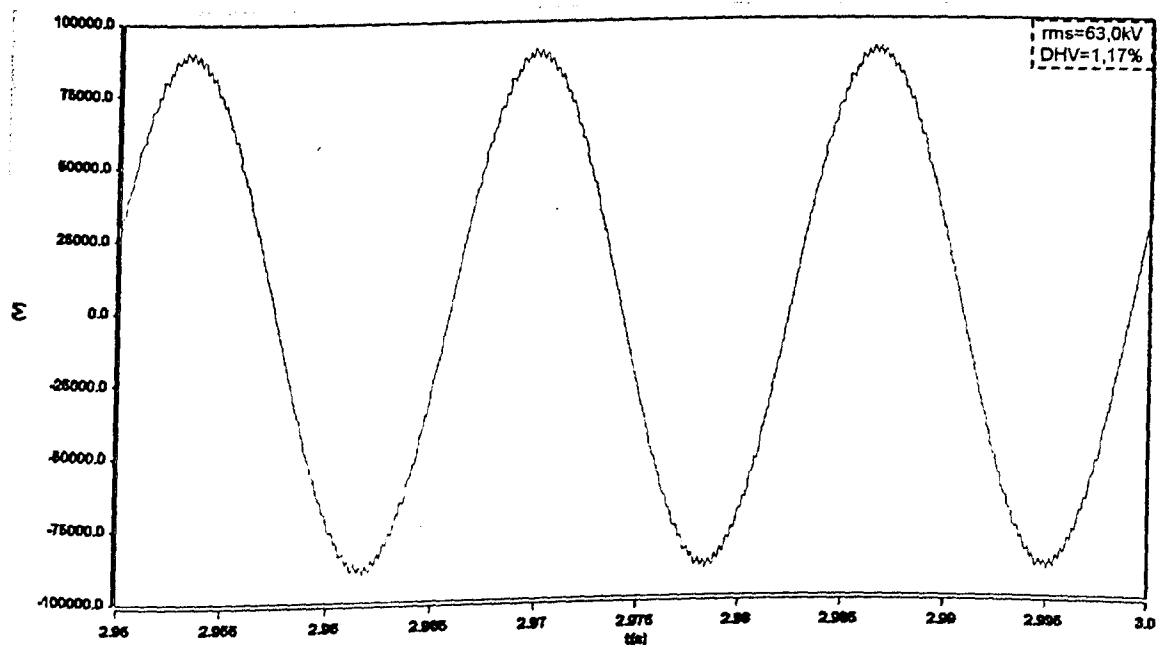


Figura 5.33 –Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC

A partir das figuras anteriores fica constatada, mais uma vez a eficácia do UPFC na manutenção da tensão nas barras B2 e B22, enquanto o sistema está sujeito a um afundamento trifásico de tensão. Com relação ao conteúdo harmônico presente nas grandezas analisadas, constata-se níveis adequados de DHV ($\cong 1,16\%$).

No tocante à corrente injetada pelo equipamento através da sua unidade paralela, esta apresenta um DHI igual a 1,4%. Esta corrente pode ser visualizada na figura 5.34.

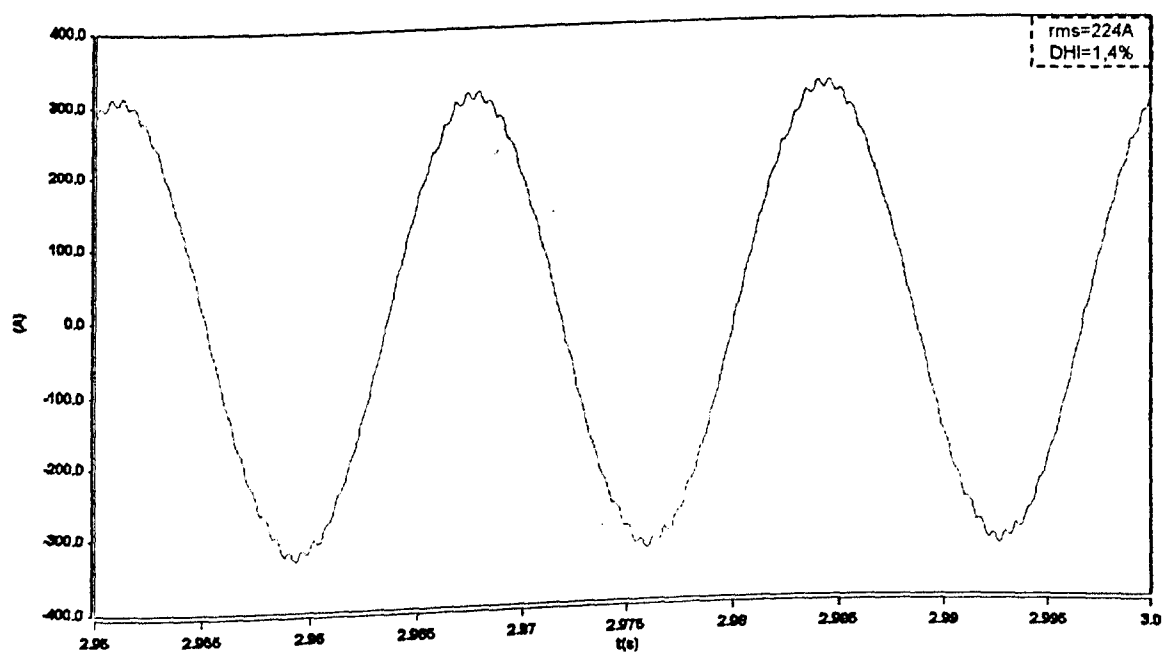


Figura 5.34 – Corrente injetada na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC

5.8.2.2 – Caso 2 – Afundamento monofásico de tensão sem a presença do UPFC

Com o objetivo de observar o comportamento do sistema quando o mesmo é submetido a um afundamento monofásico (10%) de tensão na fase A e encontra-se desprovido de um UPFC, neste caso, o referido distúrbio é aplicado aos 2 segundos de simulação. Assim, a figura 5.35 ilustra a forma de onda das tensões entre fases na barra B2 nos três últimos ciclos do **Intervalo II** de simulação, e a tabela 5.5 ressalta os seus respectivos valores rms.

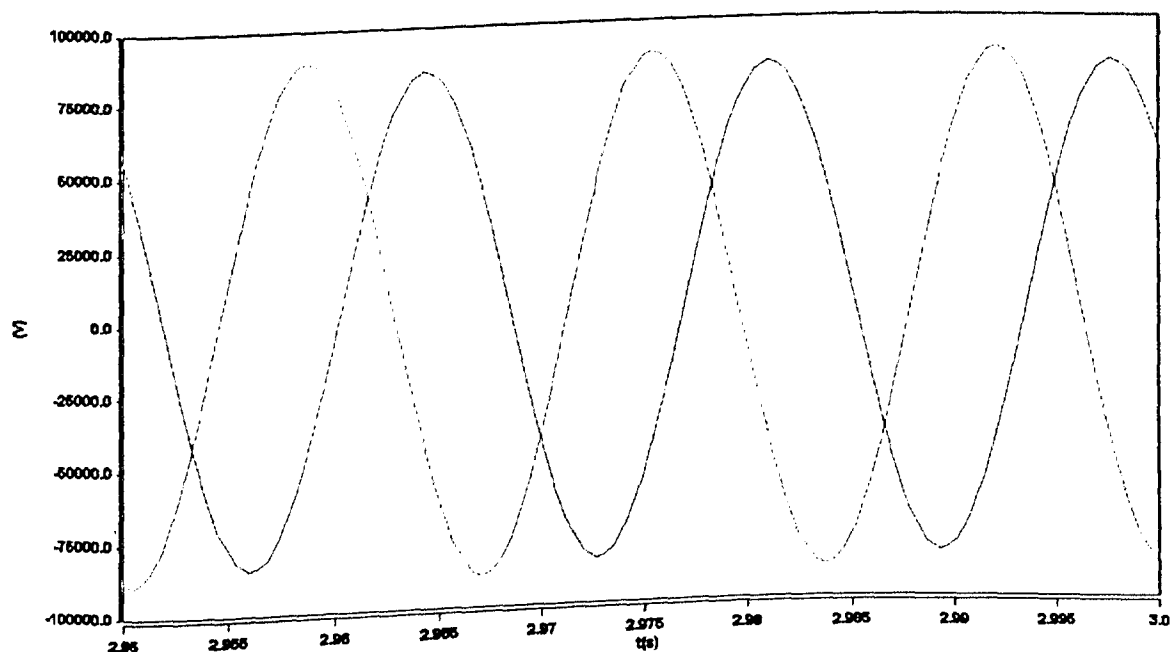


Figura 5.35 –Tensões entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento monofásico de tensão sem UPFC

Tabela 5.5 – Valores rms e fator de desequilíbrio das tensões entre fases na barra B2

Tensão fase/fase	rms [kV]	Fator de desequilíbrio [%]
V_{ab}	60,0	3,0
V_{bc}	63,0	
V_{ca}	60,0	

5.8.2.3 – Caso 3 – Afundamento monofásico de tensão com a presença do UPFC

Neste caso, o mesmo afundamento monofásico do caso anterior é aplicado ao sistema sob análise, o qual se encontra com a presença do UPFC. O resultado desta manobra pode ser visualizado nas figuras 5.36 e 5.37, que mostram as tensões entre fases nas barras B2 e B22, respectivamente, nos três últimos ciclos do **Intervalo II** de simulação.

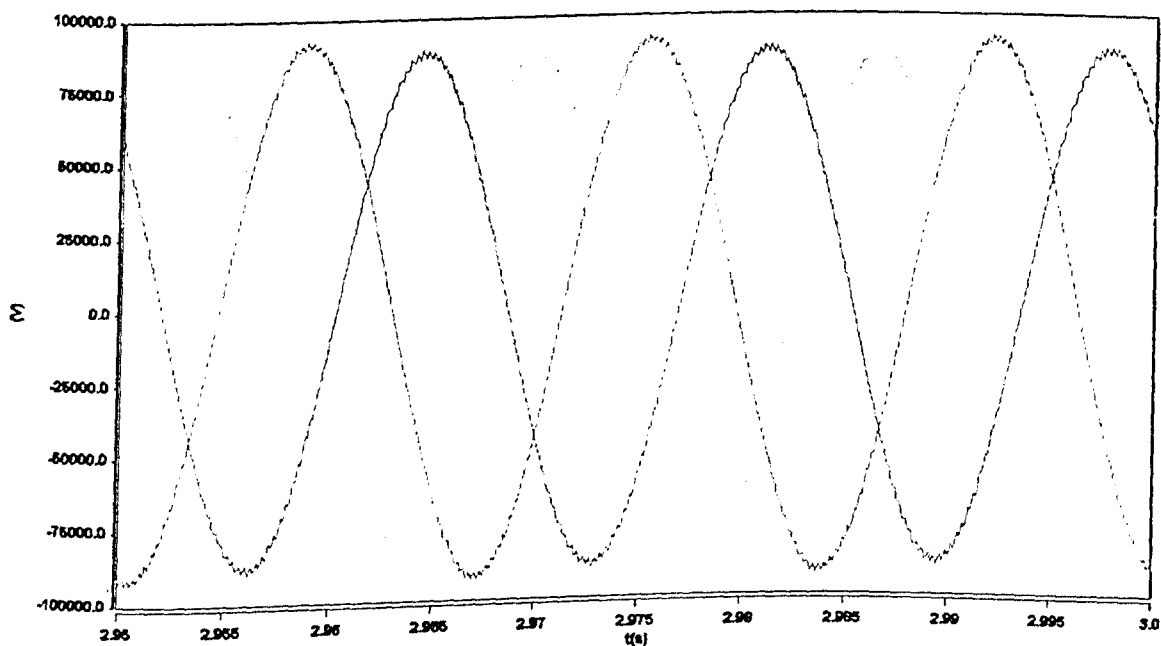


Figura 5.36 – Tensões entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento monofásico de tensão com UPFC

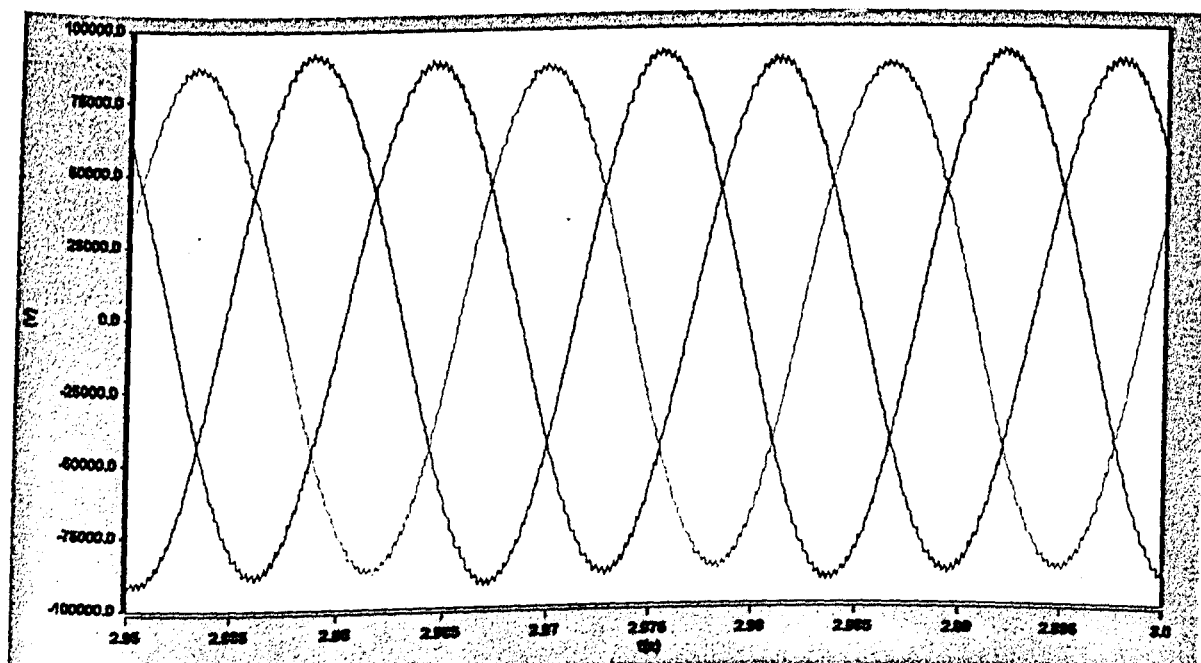


Figura 5.37 –Tensões entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento monofásico de tensão com UPFC

Complementando as figuras anteriores, a tabela 5.6 exibe os valores rms das tensões entre fases nas barra B2 e B22, juntamente com suas respectivas distorções harmônicas e fatores de desequilíbrio.

Tabela 5.6 – Valores rms, distorções harmônicas e fator de desequilíbrio das tensões entre fases nas barras B2 e B22

Tensão fase/fase	Barra B2			Barra B22		
	rms [kV]	DHV [%]	Fator de desequilíbrio [%]	rms [kV]	DHV [%]	Fator de desequilíbrio [%]
V _{ab}	62,0	0,86	3,0	62,0	0,85	3,0
V _{bc}	64,9	0,82		64,9	0,81	
V _{ca}	62,0	0,86		62,0	0,85	

Uma comparação entre os valores rms das tensões fase/fase na barra B2 no presente caso e aqueles obtidos sem a presença do UPFC (Caso 2) revelam que o equipamento não compensa tensões desequilibradas. O dispositivo atua no sentido de elevar as tensões nas três fases simultaneamente. Isso se explica pela estratégia de controle utilizada, que opera de forma trifásica e unificada. Com relação às distorções harmônicas, foi verificada uma pequena atenuação

do DHV em relação àqueles encontrados no Caso 1, quando o UPFC corrige o problema de afundamento equilibrado de tensão.

Quanto às correntes injetadas pela unidade paralela do compensador, suas formas de onda encontram-se exibidas na figura 5.38, e os correspondentes valores rms e de distorção harmônica são apresentados na tabela 5.7.

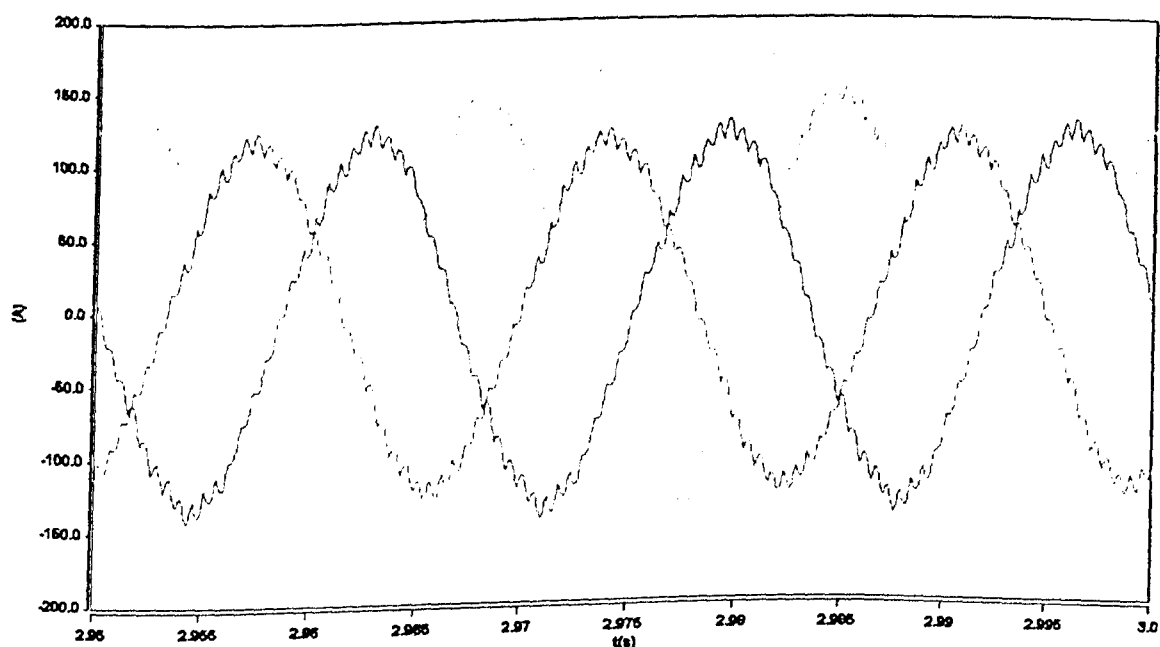


Figura 5.38 – Correntes injetadas na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento monofásico de tensão com UPFC

Tabela 5.7 – Valores rms e distorções harmônicas das correntes injetadas na barra B2

Corrente injetada	rms [A]	DHI [%]
I_a	109,0	3,7
I_b	83,2	5,36
I_c	88,7	5,48

5.8.2.4 – Caso 4 – Afundamento trifásico de tensão com presença do UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica

Neste caso, o sistema sob análise encontra-se operando com uma distorção harmônica de 5% e, em $t=2s$, o mesmo é submetido a um afundamento trifásico momentâneo de tensão com intensidade de 10% e duração de 1 segundo. A figura 5.39 ilustra o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B2 durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s) enquanto que a figura 5.40 apresenta um “zoom” da mesma grandeza nos três últimos ciclos do **Intervalo II** de simulação.

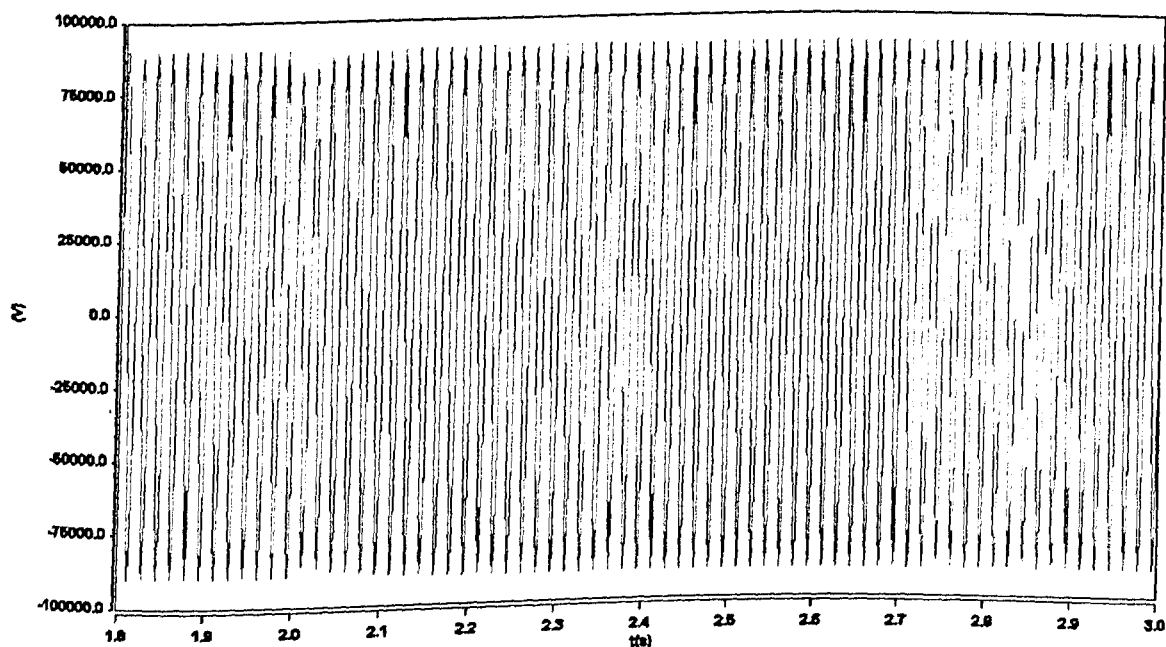


Figura 5.39 – Tensão entre fases na barra B2 – afundamento trifásico de tensão com UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica

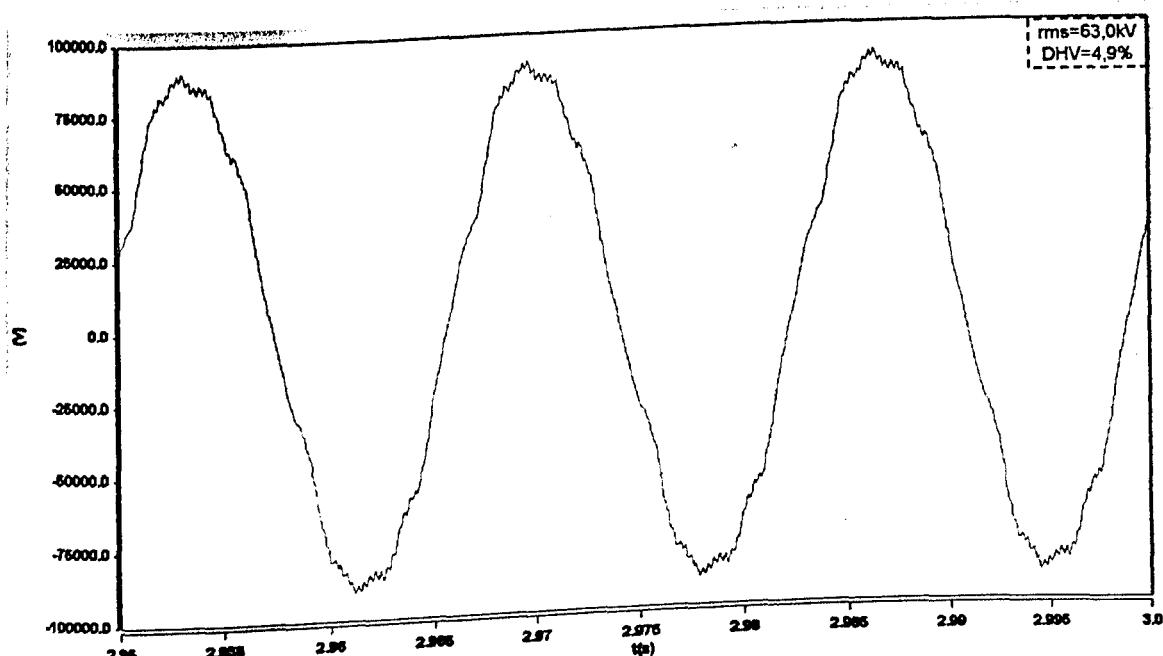


Figura 5.40 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica

Ainda, o perfil da tensão entre fases na barra B22 durante todo o período de simulação é mostrado na figura 5.41 e o detalhe dos três últimos ciclos é apresentado na figura 5.42.

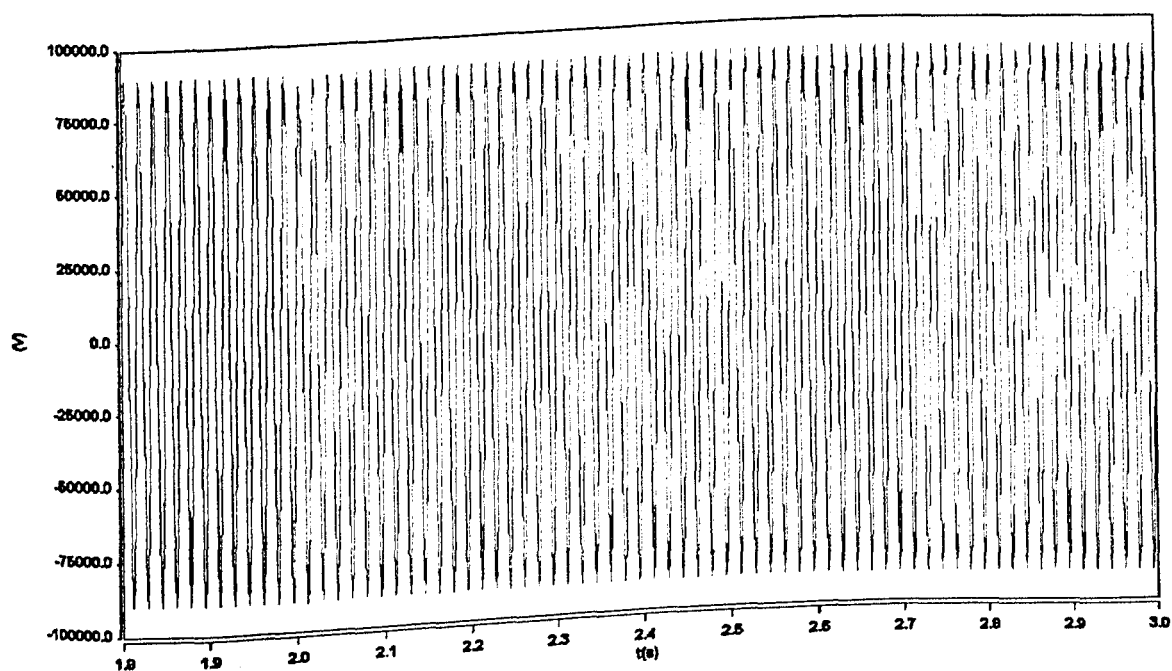


Figura 5.41 – Tensão entre fases na barra B22 – afundamento trifásico de tensão com UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica

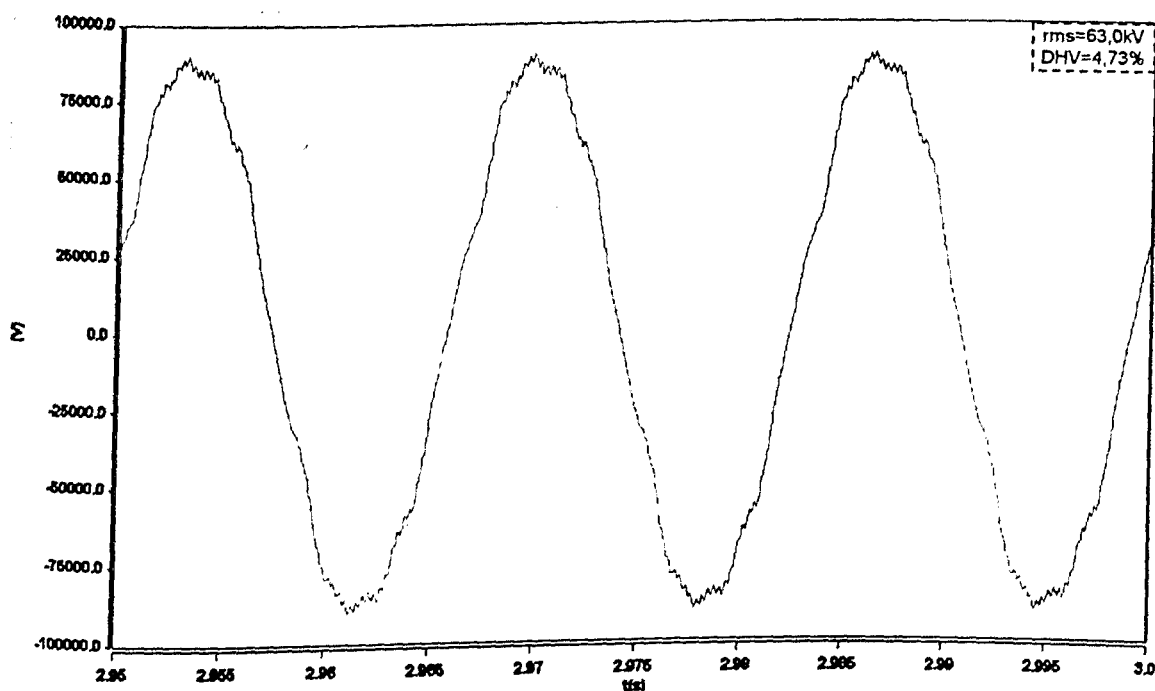


Figura 5.42 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica

A partir das figuras anteriores verifica-se, novamente, a eficiência do UPFC na manutenção da tensão rms nas barras B2 e B22, enquanto o sistema está sujeito a um afundamento trifásico de tensão. No tocante ao conteúdo harmônico presente nas grandezas analisadas, constata-se que o DHV se mantém próximo de 5%, valor este correspondente à distorção harmônica presente no sistema independente da operação do UPFC. Apesar do equipamento não ter atenuado tal distorção, já que esta não é sua função, este também não agravou tal distúrbio na tensão.

Por outro lado, a corrente injetada pelo UPFC através da sua unidade paralela, quando o mesmo opera sob condições de tensão não senoidal, apresenta um DHI igual a 4,14%, e pode ser visualizada pela figura 5.43.

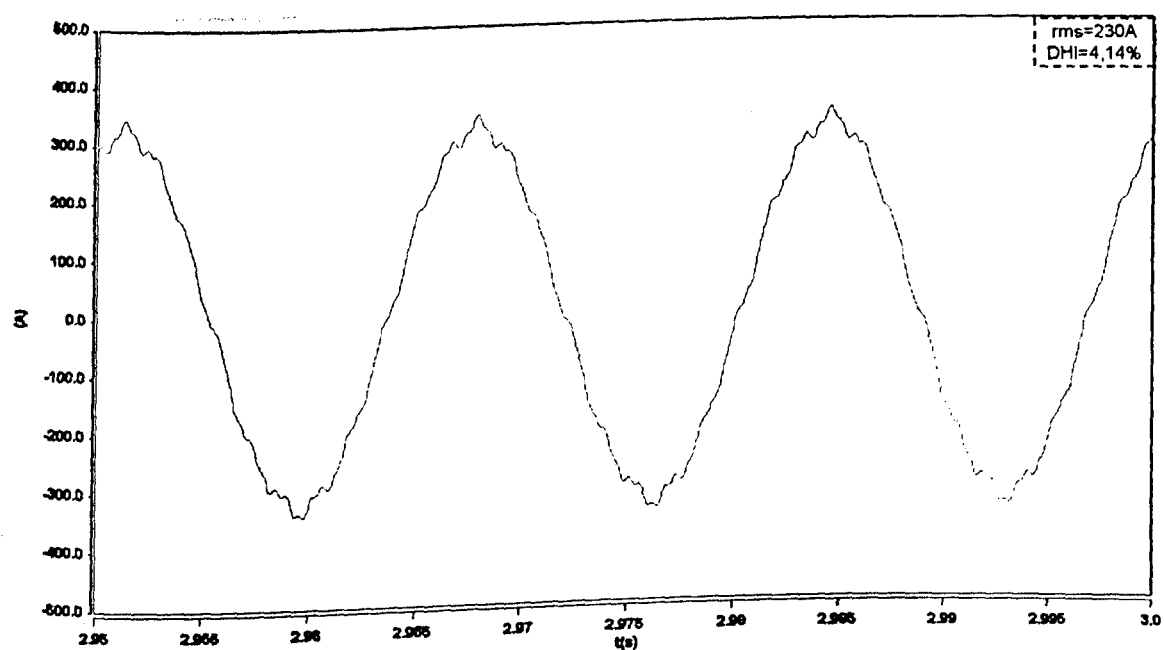


Figura 5.43 – Corrente injetada na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica

5.8.2.5 – Caso 5 – Afundamento trifásico de tensão com presença do UPFC sem unidades de filtragem

No presente caso, os filtros amortecido e capacitivo que se encontram inseridos nas unidades paralela e série, respectivamente, do UPFC são desativados. Este procedimento tem o propósito de caracterizar as consequências de um modo precário de operação deste equipamento e, ainda, ressaltar a necessidade de tais unidades de filtragem. Assim, diante deste cenário, em $t=2s$ o sistema sob análise é submetido a um afundamento trifásico momentâneo de tensão com intensidade de 10% e duração de 1 segundo. A figura 5.44 ilustra o perfil da tensão entre as fases A e B na barra B2 durante todo o intervalo de estudo (entre 1,8 e 4,0s).

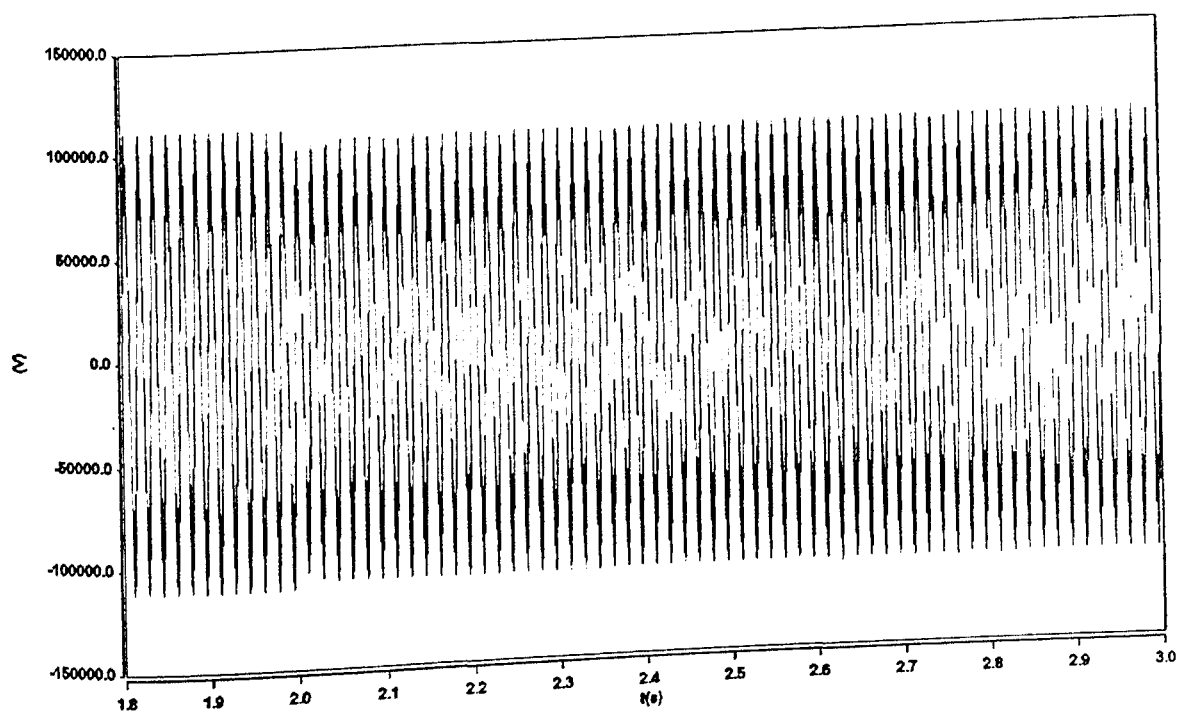


Figura 5.44 – Tensão entre fases na barra B2 – afundamento trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

Ainda, a figura 5.45 apresenta um “zoom” da grandeza acima nos três últimos ciclos do **Intervalo II** de simulação.

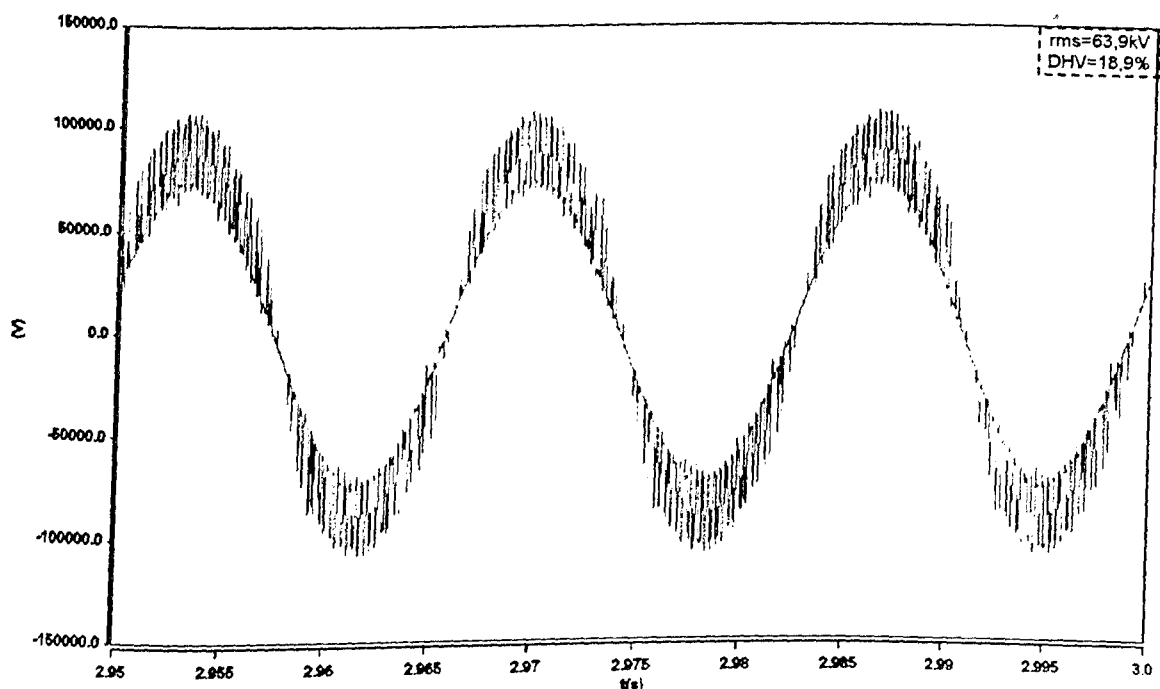


Figura 5.45 – Tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

O espectro harmônico correspondente à forma de onda anterior é mostrado na figura 5.46.

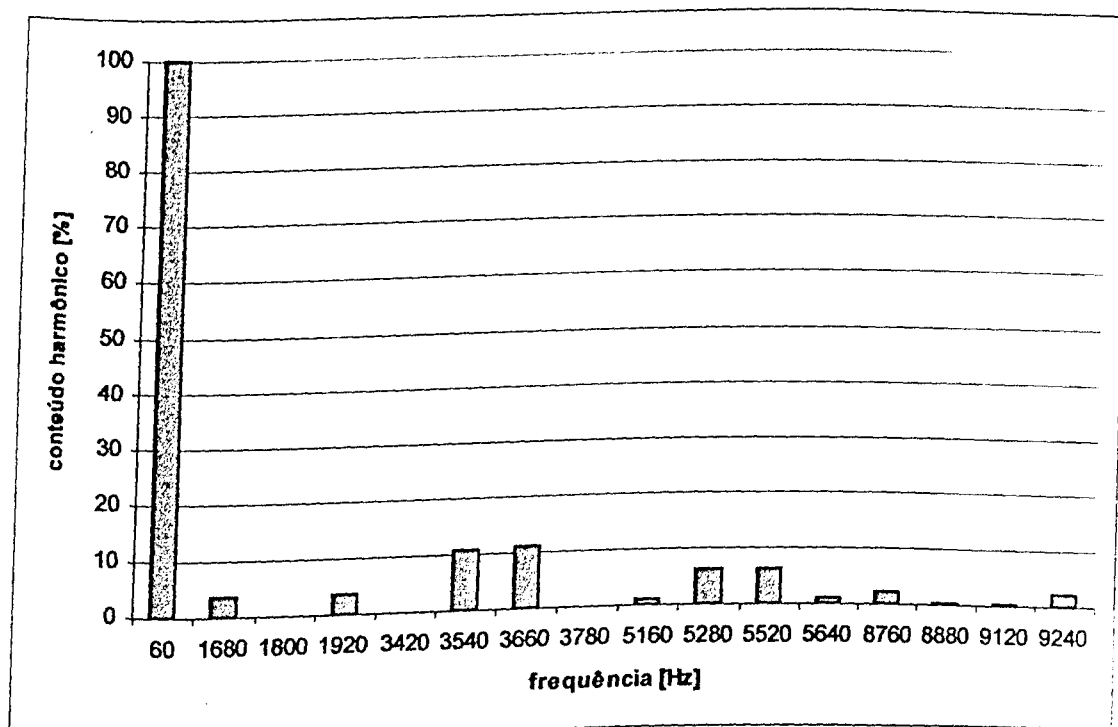


Figura 5.46 – Espectro harmônico da tensão entre fases na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

O perfil da tensão entre fases na barra B22 durante todo o período de simulação é mostrado na figura 5.47 e o detalhe dos três últimos ciclos é apresentado na figura 5.48.

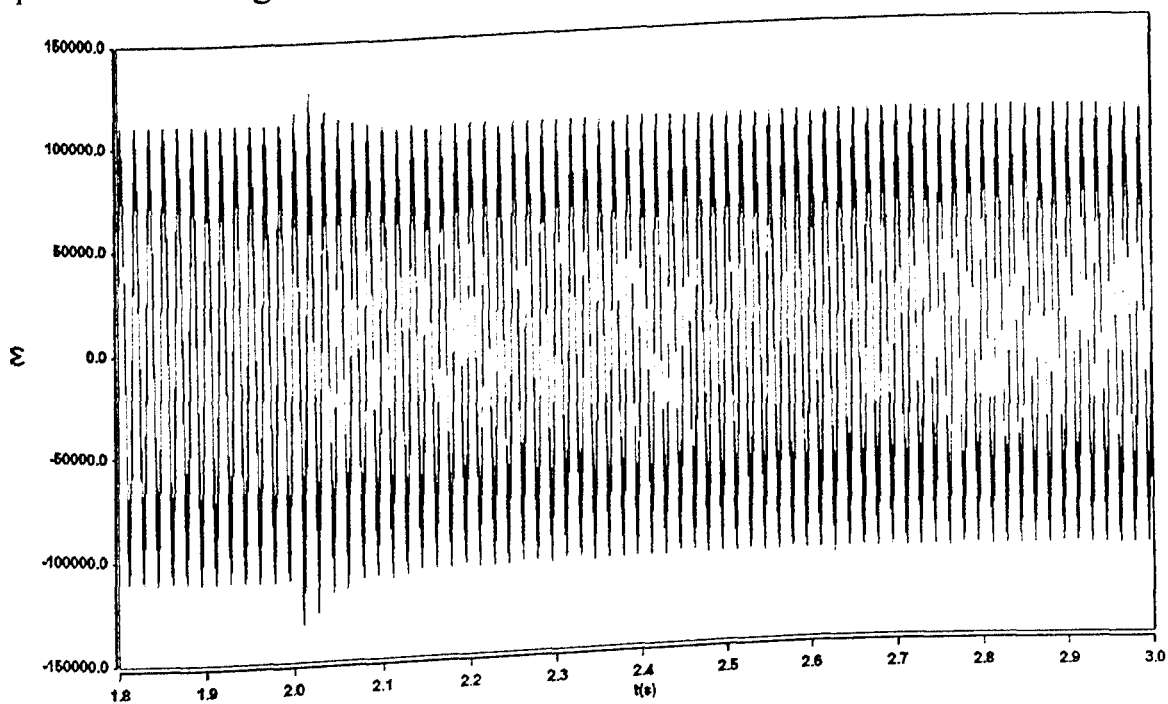


Figura 5.47 – Tensão entre fases na barra B22 – afundamento trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

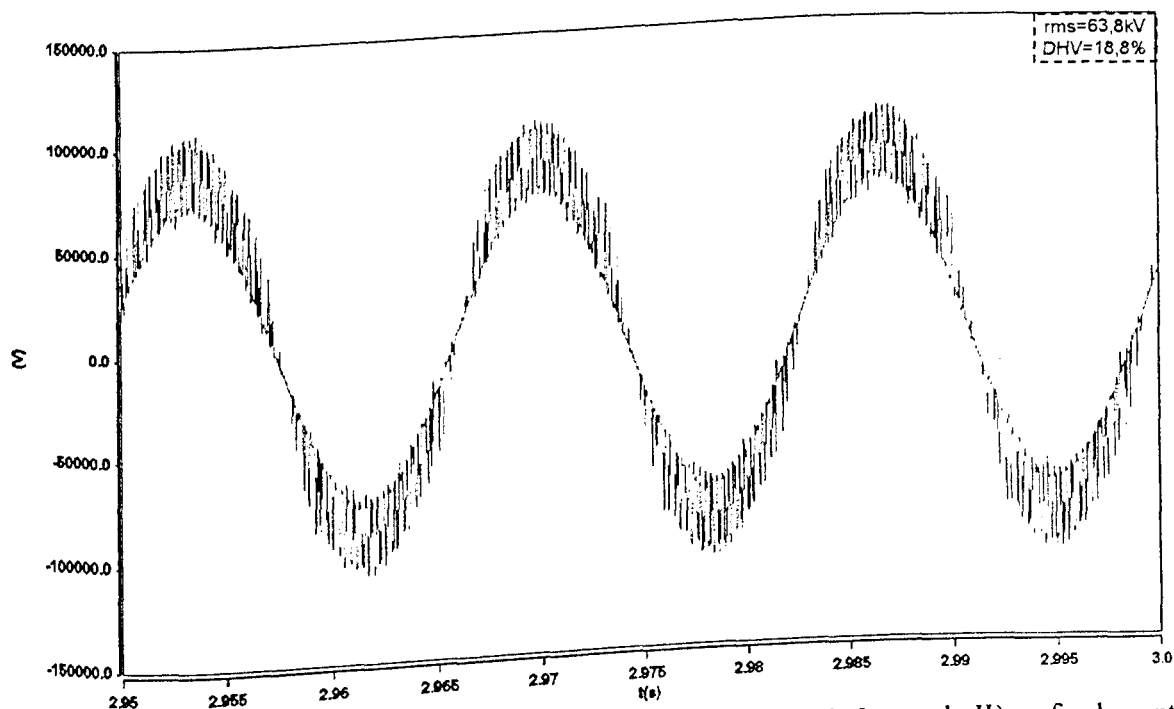


Figura 5.48 – Tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

A análise de Fourier sobre a forma de onda apresentada no gráfico anterior resulta no espectro harmônico mostrado na figura 5.49.

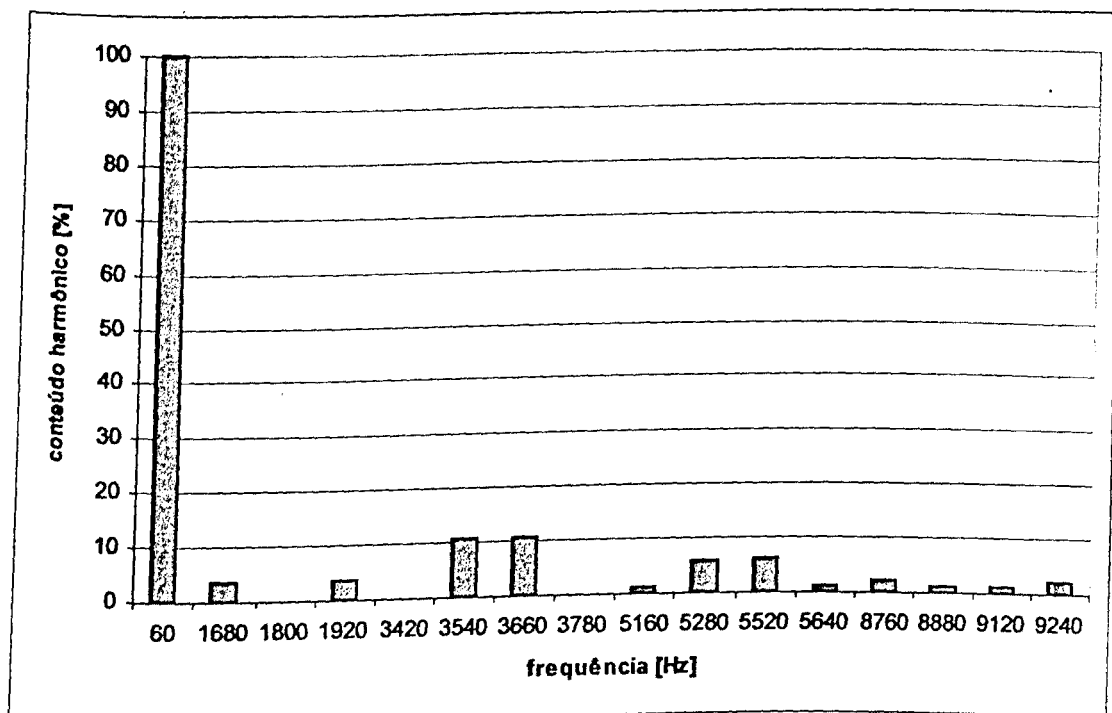


Figura 5.49 –Espectro harmônico da tensão entre fases na barra B22 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

A partir das figuras anteriores fica constatada, mais uma vez a eficácia do UPFC na manutenção da tensão nas barras B2 e B22, enquanto o sistema está sujeito a um afundamento trifásico de tensão. Com relação ao conteúdo harmônico presente nas grandezas analisadas, constata-se níveis altos de DHV ($\cong 18,8\%$), devido à ausência das unidades de filtragem. As ordens harmônicas encontradas são aquelas previstas quando da operação de conversores PWM, como mencionado na seção 3.6 (Capítulo III).

No tocante à corrente injetada pelo equipamento através da sua unidade paralela, esta apresenta um DHI igual a $11,8\%$. Esta corrente pode ser visualizada na figura 5.50 e seu respectivo espectro harmônico é exibido na figura 5.51.

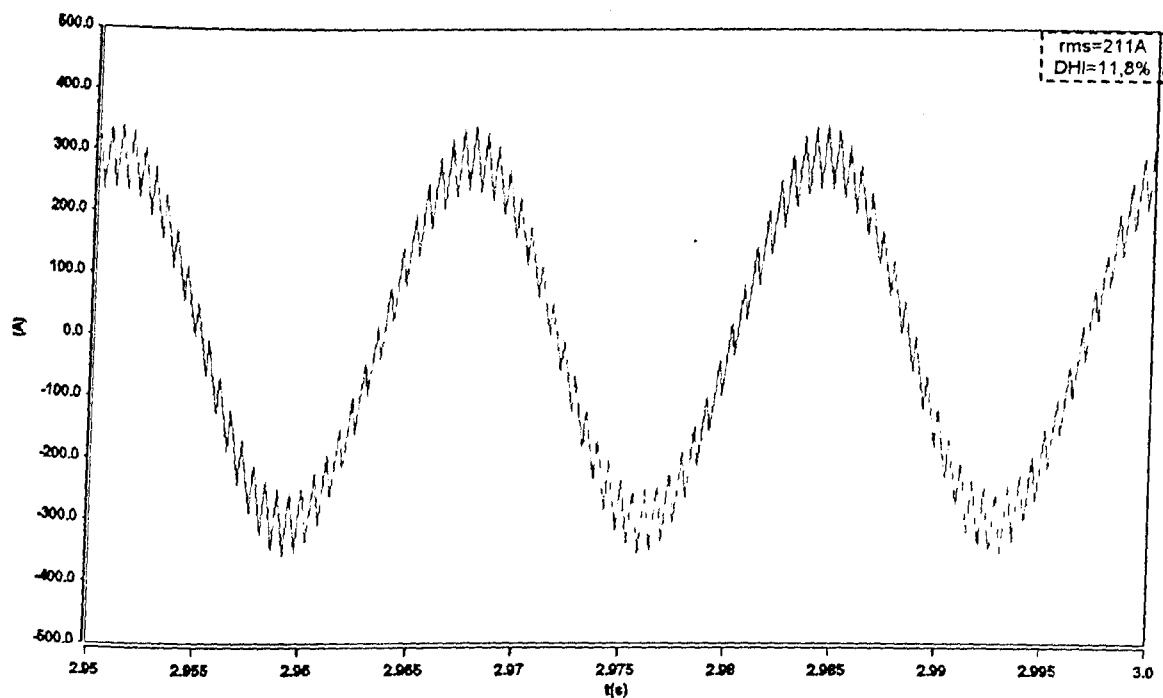


Figura 5.50 – Corrente injetada na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

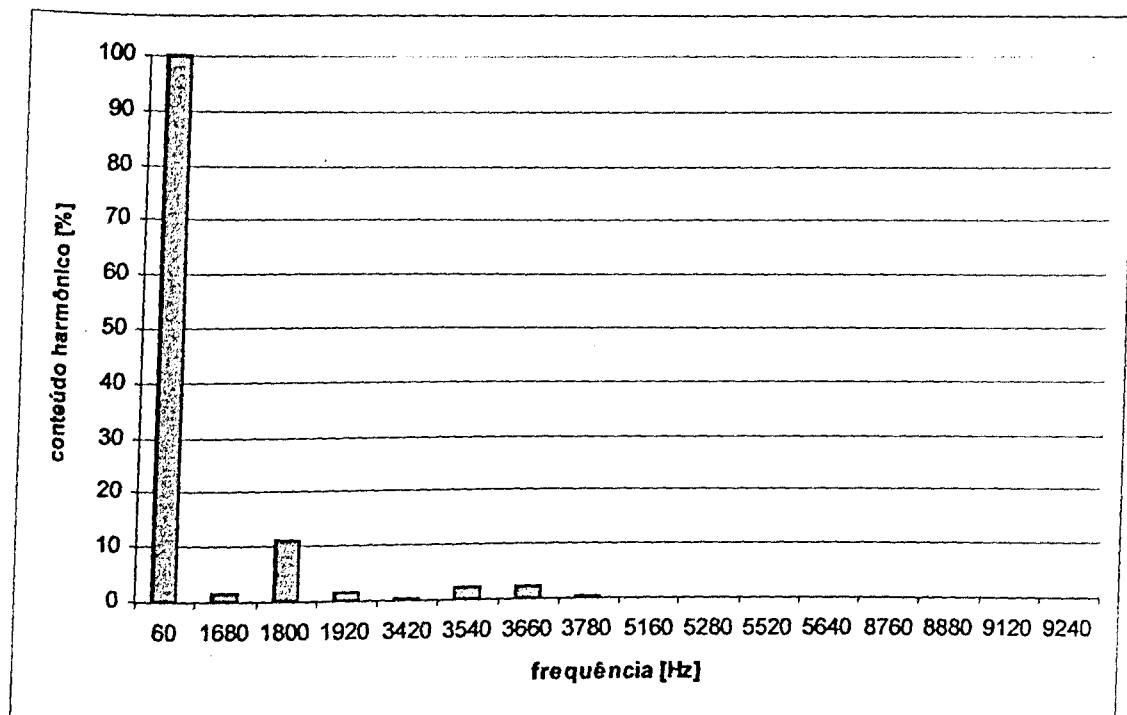


Figura 5.51 – Espectro harmônico da corrente injetada na barra B2 (três últimos ciclos do Intervalo II) – afundamento trifásico de tensão com UPFC (sem filtro)

5.8.2.6 – Quadros resumo comparativos

A tabela 5.8 fornece um quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas nos Casos 1 a 3 durante o afundamento de tensão.

Tabela 5.8 – Quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas nos Casos 1 a 3

Caso	Grandeza	Valores		
		Tensão		
1 – Afundamento trifásico de tensão com a presença do UPFC		V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
	Tensão rms entre fases em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Tensão rms entre fases em B22 [kV]	63,0	63,0	63,0
	DHV em B2 [%]	1,16	1,16	1,16
	DHV em B22 [%]	1,17	1,17	1,17
	Fator de desequilíbrio de tensão em B2 [%]	0,0		
	Fator de desequilíbrio de tensão em B22 [%]	0,0		
		Corrente		
		I_a	I_b	I_c
	Corrente rms injetada em B2 [A]	224,0	224,0	224,0
2 – Afundamento monofásico de tensão sem a presença do UPFC		Tensão		
		V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
	Tensão rms entre fases em B2 [kV]	60,0	63,0	60,0
	Tensão rms entre fases em B22 [kV]	60,0	63,0	60,0
	DHV em B2 [%]	0,0	0,0	0,0
	DHV em B22 [%]	0,0	0,0	0,0
	Fator de desequilíbrio de tensão em B2 [%]	3,0		
	Fator de desequilíbrio de tensão em B22 [%]	3,0		
		Corrente		
		I_a	I_b	I_c
3 – Afundamento monofásico de tensão com a presença do UPFC		Tensão		
		V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
	Tensão rms entre fases em B2 [kV]	62,0	64,9	62,0
	Tensão rms entre fases em B22 [kV]	62,0	64,9	62,0
	DHV em B2 [%]	0,86	0,82	0,86
	DHV em B22 [%]	0,85	0,81	0,85
	Fator de desequilíbrio de tensão em B2 [%]	3,0		
	Fator de desequilíbrio de tensão em B22 [%]	3,0		
		Corrente		
		I_a	I_b	I_c
	Corrente rms injetada em B2 [A]	109,0	83,2	88,7
	DHI da corrente injetada em B2 [%]	3,7	5,36	5,48

A tabela 5.9 mostra um quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas nos Casos 1 e 4 em regime permanente, durante o afundamento de tensão (**Intervalo II**).

Tabela 5.9 – Quadro resumo comparativo das principais grandezas monitoradas nos Casos 1 e 4

Caso	Grandeza	Valores		
		Tensão		
1 – Afundamento trifásico de tensão com a presença do UPFC		V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
	Tensão rms entre fases em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Tensão rms entre fases em B22 [kV]	63,0	63,0	63,0
	DHV em B2 [%]	1,16	1,16	1,16
	DHV em B22 [%]	1,17	1,17	1,17
		Corrente		
		I_a	I_b	I_c
	Corrente rms injetada em B2 [A]	224,0	224,0	224,0
4 – Afundamento trifásico de tensão com a presença do UPFC e sistema com 5% de distorção harmônica		Tensão		
		V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
	Tensão rms entre fases em B2 [kV]	63,0	63,0	63,0
	Tensão rms entre fases em B22 [kV]	63,0	63,0	63,0
	DHV em B2 [%]	4,9	4,9	4,9
	DHV em B22 [%]	4,73	4,73	4,73
		Corrente		
		I_a	I_b	I_c
	Corrente rms injetada em B2 [A]	230,0	230,0	230,0
	DHI da corrente injetada em B2 [%]	4,14	4,14	4,14

5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por meta principal analisar o comportamento de um controlador de fluxo de potência unificado (UPFC – *Unified Power Flow Controller*), bem como do sistema ao qual este se encontra conectado, durante o desempenho das tarefas às quais tal equipamento se destina.

Conforme exaustivamente mencionado, este dispositivo consiste da interligação de um compensador estático avançado (ASVC ou Conversor 1) com um compensador avançado série (ASC ou Conversor 2), através de um capacitor de acoplamento. Assim, devido a tal concepção, o funcionamento físico e os modos operativos de cada ponte conversora deste equipamento recaem exatamente naqueles abordados, separadamente, nos Capítulos III e IV, fazendo-se desnecessária a repetição de tais detalhamentos neste capítulo. O mesmo tratamento breve foi aplicado às questões de análise vetorial, sistema de controle e implementação computacional do UPFC, sendo que, quanto a este último item, foram enfatizadas as conexões existentes entre as unidades componentes do referido modelo unificado.

As grandes contribuições deste capítulo encontram-se nos estudos de casos onde foram verificadas, primeiramente, as ações conjuntas das duas pontes conversoras que compõem o UPFC no sistema controlado e, ainda, a interação entre as mesmas através do capacitor de acoplamento. Tais observações revelam importantes potencialidades do UPFC já que, no primeiro caso, enquanto o Conversor 2 desempenha o seu papel de acordo com o modo de controle, o Conversor 1 controla a tensão no barramento através do suporte de reativos. Assim, o problema do perfil de tensão da barra à montante do compensador série, encontrado quando do emprego do ASC na regulação de tensão, pode ser contornado. Uma outra característica fundamental é que, o mesmo Conversor 1 também controla a tensão no

capacitor de acoplamento, o qual tende a carregar ou descarregar de acordo com o que for solicitado pelas unidades série e paralela. Com isso, torna-se dispensável qualquer dispositivo armazenador de energia, como a fonte CC utilizada pelo ASC, para prover uma tensão constante nos terminais do conversor do tipo VSI do compensador série.

Devido à operação conjunta dos conversores paralelo e série do UPFC, foi verificada uma elevação dos níveis de ruídos nas tensões fase/neutro dos barramentos controlados, porém, as tensões fase/fase foram afetadas em menor proporção. Tais níveis de ruídos destas últimas tensões, considerados baixos, foram alcançados devido às unidades de filtragem presentes em cada um dos conversores. Face a isto, análises mais conclusivas relacionadas com o conteúdo harmônico encontrado dependem, como já mencionado previamente para o ASVC e o ASC, de maiores investigações sobre a estratégia de filtragem e controle associado.

Com relação ao comportamento do UPFC frente a outros distúrbios de qualidade da energia constatou-se, primeiramente, que, ao aplicar um afundamento trifásico de tensão no sistema, as barras controladas pelo equipamento se mantêm com níveis de tensão rms constantes e com valores de DHV relativamente baixos ($\cong 1,16\%$). Além disso, a distorção harmônica da corrente injetada pelo conversor paralelo do UPFC também se apresentou em níveis reduzidos. Por outro lado, quando o afundamento de tensão ocorre apenas em uma das fases, verifica-se que o UPFC atua no sentido de elevar a tensão nas três fases simultaneamente. Este procedimento faz com que o fator desequilíbrio proveniente de tal distúrbio seja mantido (3%). Neste caso, apesar de se observar uma pequena redução no DHV das barras controladas, constata-se uma elevação no DHI da corrente injetada pelo conversor paralelo (entre 3,7 a 5,5%).

Na situação em que o sistema apresenta uma distorção harmônica de 5% e é submetido a um afundamento trifásico de tensão, o UPFC se mostrou, mais uma vez, eficaz no controle do valor rms dessa grandeza. Os valores de DHV encontrados nos barramentos controlados permaneceram próximos daquele imposto ao sistema, independentemente da atuação do dispositivo de compensação. Assim, como consequência direta de tais níveis de distorção de tensão, o DHI observado na corrente injetada pela unidade paralela do UPFC atingiu patamares de aproximadamente 4%.

Finalmente, para a situação em que o UPFC opera sem a presença das unidades de filtragem verificou-se altos níveis de distorção harmônica tanto de tensão como de corrente. Devido a isso, torna-se imprescindível a conexão de tais filtros para que a operação do equipamento não implique em efeitos colaterais à qualidade da energia.

Mediante tais ponderações, pode-se dizer que as principais contribuições oferecidas nesta etapa dos trabalhos são:

- provisão de uma estrutura computacional no domínio do tempo, onde possam ser executados estudos para o planejamento e a operação de sistemas elétricos, com a presença de unidades UPFC;
- avaliação da interação entre as pontes conversoras (paralela e série) do UPFC, durante a operação do mesmo;
- verificação das vantagens oferecidas pela utilização do UPFC, no controle dos parâmetros que determinam o fluxo de potência na linha de transmissão, sobre o ASC;
- conclusão a respeito da eficácia do modelo implementado do UPFC na compensação, apenas, de afundamentos equilibrados de tensão. Este fato se deve à estratégia de controle empregada;
- constatação sobre os baixos níveis de distorção harmônica de tensão provocados pela operação do UPFC;

- verificação das alterações nos valores de DHI das correntes injetadas pelo conversor paralelo do UPFC, conforme as condições em que se encontram as tensões do barramento quais sejam, desequilibradas ou distorcidas;

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS

Muito embora uma gama de comentários conclusivos tenham sido realizados ao final de cada capítulo, considera-se, nesta etapa dos trabalhos, de grande importância uma abordagem global acerca das principais contribuições efetuadas, dos avanços e dos resultados atingidos, a fim de proporcionar uma visão rápida e sucinta do assunto investigado. Neste sentido, este capítulo tem por objetivo a apresentação de uma síntese das principais constatações alcançadas nos capítulos anteriores, enfatizando os pontos de maior destaque contemplados nesta pesquisa, além de oferecer sugestões para futuros desenvolvimentos.

O Capítulo I elucidou de uma maneira geral, os motivos da utilização da tecnologia FACTS e sua correlação com o tema “Qualidade da Energia Elétrica”. Adicionalmente, procedeu-se a uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte dos estudos envolvendo dispositivos que empregam tal tecnologia. Assim, uma vez efetuado tal levantamento, foram estabelecidos os objetivos gerais e a estrutura desta pesquisa.

O Capítulo II se prestou a abordar os principais aspectos relacionados aos sistemas de transmissão CA flexíveis e, com isso, identificar exatamente em que área, ou em que geração, dos FACTS este trabalho foi desenvolvido. Nesse sentido, procedeu-se a identificação de alguns problemas encontrados nos sistemas de transmissão convencionais e, ainda, a exposição de possíveis

soluções ideais para compensação paralela, compensação da reatância série e controle do ângulo de carga. Nessa linha de soluções, foram apresentados, de maneira breve, alguns equipamentos reais que empregam a tecnologia FACTS, classificando-os de acordo com a geração e tipo de compensação efetuada, dentre os quais se encontram os seguintes: RCT, CCT, CE, transformadores defasadores, ASVC, ASC e UPFC. Finalizando, o capítulo abordou os principais conceitos da teoria vetorial, que consiste de uma ferramenta utilizada para modelagem e controle dos dispositivos investigados por este trabalho.

O Capítulo III tratou especificamente do compensador estático paralelo avançado (ASVC), onde o enfoque principal foi implementar e analisar computacionalmente o desempenho do modelo deste dispositivo. Para tanto, primeiramente, apresentou-se o seu princípio de funcionamento caracterizando a tensão a ser produzida nos seus terminais trifásicos para que o suporte de reativo seja adequado ao controle da tensão no ponto de acoplamento comum entre o compensador e o sistema. A referida tensão de compensação é definida pela malha de controle estabelecida neste trabalho, fundamentada na análise vetorial e no princípio de funcionamento do equipamento em questão. Uma vez definidos o arranjo elétrico e a metodologia de controle a serem utilizados, efetuou-se a implementação do ASVC no simulador SABER, o que constituiu uma das grandes contribuições desta tese. Com isso, foi possível analisar o comportamento deste compensador, bem como do sistema ao qual se encontra conectado, frente a afundamentos e elevações de tensão na rede e, ainda, perante uma necessidade de se regular a tensão de um determinado barramento. Em todos os casos o equipamento atuou de forma satisfatória tanto no controle da tensão da barra CA monitorada, quanto no controle da tensão nos terminais CC do capacitor que foi mantida praticamente constante. Face ao exposto,

pode-se afirmar que o modelo do ASVC implementado encontra-se apto a operar como tal e, ainda, como a porção paralela do UPFC discutido no Capítulo V.

Na sequência, o Capítulo IV concentrou-se nas análises envolvendo apenas o compensador série avançado (ASC) o qual, da mesma forma que o compensador paralelo avançado (ASVC), pode ser empregado para resolver problemas da transmissão bem como da qualidade da energia elétrica. Devido a isso, este equipamento, também, deve ser devidamente entendido e implementado em programas computacionais, para que se possa antever a sua real interação com o sistema elétrico a que se destina. Assim, foram descritas as formas como o ASC pode operar no sentido de alterar os parâmetros da rede. Cada um desses modos operativos têm como resultado uma tensão injetada em série com o sistema cujos propósitos e consequentes características consistem na regulação de tensão (tensão injetada em fase com a tensão do sistema), na compensação da reatância série (tensão injetada em quadratura com a corrente da linha) e no controle do fluxo de potência através do ângulo de carga (tensão injetada deve alterar apenas o ângulo entre aquelas à montante e à jusante do ASC). Uma vez definidas tais características, as tensões injetadas foram representadas através das suas componentes no sistema de referência ortogonal síncrono para que, a partir das mesmas e da malha de controle correspondente, os pulsos adequados do conversor pudessem ser gerados. Novamente, todo o processo de incorporação do modelo no simulador SABER foi minuciosamente relatado enfatizando-se os *templates* desenvolvidos por esta tese. Finalmente, foram conduzidos alguns estudos de casos que permitiram verificar a atuação adequada do equipamento frente a situações de distúrbio, como controle da tensão no terminal emissor da LT quando o mesmo é submetido a afundamentos e elevações de tensão e, ainda, controle da reatância série efetiva da linha quando esta apresenta uma

real alteração súbita (como é o caso da perda de uma das linhas que compõem um circuito duplo). Além disso, intervenções programadas no fluxo de potência através da alteração do ângulo de carga foram simuladas com sucesso. A regulação da tensão no terminal emissor da LT também foi bem sucedida, porém, este procedimento resultou em uma redução da tensão no barramento à montante do ASC devido a uma falta de suporte de reativos no mesmo. Este fato evidenciou, portanto, a vantagem de se conectar um compensador do tipo ASVC que supra tal necessidade. Uma vez que tal ASVC e o ASC compartilhem o mesmo capacitor nos seus terminais CC, a configuração final se torna a mesma encontrada na estrutura do UPFC, abordado no Capítulo V.

Por fim, como mencionado anteriormente, o Capítulo V se destinou aos estudos envolvendo o controlador de fluxo de potência unificado (UPFC) que se resume na interligação de um compensador estático avançado do tipo ASVC, aqui referido por Conversor 1, com um compensador série avançado do tipo ASC, denominado por Conversor 2, por meio de um elo comum de corrente contínua cuja tensão é mantida por um único capacitor. Neste caso, a unidade paralela, além de prover a compensação de reativos ao sistema, tem uma função primordial de suprir ou absorver a potência ativa demandada ou fornecida pela unidade série. Este intercâmbio ocorre através da tendência do capacitor se carregar ou descarregar quando os conversores são solicitados. A variação de carga é detectada através da monitoração da tensão nos terminais deste elemento passivo por parte de uma das malhas de controle do Conversor 1. Uma vez esclarecidos tais fatos, este capítulo se restringiu, basicamente, aos estudos de casos, já que maiores detalhamentos sobre aspectos construtivos, modelagem e malha de controle foram efetuados nos Capítulos III e IV. Das simulações executadas foi confirmada a perfeita sobreposição dos efeitos de ambas as unidades, visto que, durante a operação do Conversor

2, o Conversor 1 provê o suporte de reativos necessário para o controle da tensão do barramento ao qual este se encontra conectado. Além disso, verificou-se através dos resultados computacionais que, o conversor paralelo foi eficaz também no controle da tensão nos terminais do capacitor do elo CC. Estas constatações permitem confirmar as vantagens do UPFC sobre o ASC, principalmente pelo fato de que este último ainda requer aparatos extras para manutenção da tensão contínua do conversor.

Ainda no Capítulo V verificou-se que o desempenho do UPFC é satisfatório frente a afundamentos trifásicos de tensão e ineficaz quando esta perturbação ocorre de forma desequilibrada. O referido equipamento não se presta a compensar este tipo de distúrbio na qualidade da energia elétrica, uma vez que o sistema de controle utilizado é do tipo trifásico. Para que tal objetivo fosse alcançado, o controle deveria ser independente para cada fase. Somado a tal constatação observou-se que, apesar dos níveis de DHV não terem sido agravados, os valores de DHI da corrente injetada pelo conversor paralelo, sob tais condições desequilibradas de tensão, foram substancialmente incrementados. Este último indicador também se apresentou em maiores proporções quando a rede controlada pelo UPFC possuía um certo nível prévio de distorção harmônica de tensão. A despeito disso, o comportamento do dispositivo se mostrou adequado durante a ocorrência de um afundamento de tensão, mesmo sob condições distorcidas.

De uma maneira geral, foi observado nos capítulos III, IV e V que o conteúdo harmônico (ruído de alta frequência) presente nas tensões fase/fase dos barramentos controlados, devido à operação dos compensadores ASVC, ASC e UPFC, respectivamente, se mostrou relativamente baixo. Isto se deve ao tipo de conversor e técnica de chaveamento utilizados associado às estratégias de filtragem ora empregadas. Deve-se ressaltar, entretanto, que inúmeras são as opções para estas concepções e, atreladas a tais alternativas

encontram-se variadas estratégias de controle. Portanto, as conclusões a esse respeito dependem intimamente das topologias implementadas.

Finalmente, pode-se considerar que, além de proporcionar as análises efetuadas ao longo desta tese, a ferramenta computacional disponibilizada servirá de base para futuras investigações do tipo:

- otimização das malhas de controle, por exemplo, em termos de tempo de resposta em estudos dinâmicos, uma vez que tal questão é bastante discutida no meio científico;
- configuração e estratégia de chaveamento das pontes inversoras, no sentido de se reduzir as injeções harmônicas provocadas por tais equipamentos;
- possibilidade de controle monofásico para o tratamento de desequilíbrios na rede;
- suporte e ponto inicial para implementações de modelos de filtros ativos na plataforma computacional SABER;
- implementação do modelo empregado neste trabalho em outras plataformas computacionais;
- construção de um protótipo do UPFC baseado nas estratégias aqui abordadas;
- investigação de custo/benefício associados com este equipamento, comparando com outra tecnologia de compensação dos itens de qualidade;
- Estudos de planejamento e operação do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – HINGORANI, N. G.. Flexible AC Transmission System. **IEEE Spectrum**. April 1993.pp 40-45.
- [2] – DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M. F.. Electrical Power Systems Quality. **Editora Mc Graw-Hill**, EUA - 1995.
- [3] – WATANABE, E. H., BARBOSA, P. G.. Principle of Operation of FACTS Devices. **Workshop on FACTS CIGRÉ/IEEE**. Rio de Janeiro, November 1995.
- [4] – GYUGYI, L.. A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems. **IEE Proceedings – C**, Vol. 139, No. 4. July 1992. pp. 323-331.
- [5] – GYUGYI, L.. Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 9, No. 2. April 1994. pp. 904-911.
- [6] – GYUGYI, L., SCHAUDER, C. D., WILLIAMS, S. L., RIETMAN, T. R., TORGERSON, D. R., EDRIS, A.. The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control. **IEEE/PES Summer Meeting**. São Francisco. July 1994. Paper 94 SM 474-7 PWRD.

- [7] – MAKOMBE, T.. **An Investigation of a Unified Power Flow Controller.**
PhD's Thesis. UMIST - 1997.
- [8] – HENDERSON, M. I., MOUNTFORD, J. D.. **General Planning Requirements for FACTS Controllers. IEEE/PES Summer Meeting.**
Alberta. July 1999. pp 1090-1102.
- [9] – CIGRE WG 14-19, on STATCOM. 1997.
- [10] – PAPIC, I., ZUNCO, P., POVH, D., WEINHOLD, M.. **Basic Control of Unified Power Flow Controller. IEEE Transactions on Power Systems.** January 1997.
- [11] – SCHAUDER, C., MEHTA, H.. **Vector Analysis and Control of Advanced Static VAr Compensators. Conference Publication no. 345 of the IEE 5th International Conference on AC and DC Power Transmission.** London. September 1991. pp 266-272.
- [12] – YU Q., ROUND, S. D., NORUM, L., UNDERLAND, T.. **A New Control Strategy for a Unified Power Flow Controller. Proceeding of European Power Eletronics – EPE'95.** Sevilla. September 1995. pp. 2.901-2.906.
- [13] – ROUND, S. D., YU Q., NORUM, L., UNDERLAND, T.. **Performance of a Unified Power Flow Controller Using a d-q Control System. Conference Publication no. 423 of the IEE 6th International Conference on AC and DC Power Transmission.** London. April – May 1996. pp 357-362.

- [14]– YU Q., ROUND, S. D., NORUM, L., UNDERLAND, T.. Dynamic Control of a Unified Power Flow Controller. **Proceeding of the 27th Annual IEEE Power Eletronics Specialists Conference – PESC.** Bavena. June 1996. pp. 508-514.
- [15]– DELARUE, PH., BOGUS, C., BAUSIERE, R., MILENT, E., CRAPPE, M., RENGLLET, M., TRECAT, J.. Modelling and Control Technique of Unified Power Flow Controller (UPFC). **ElectrIMACS'96.** St. Nazaire. Sepetember 1996. pp. 3.853-3.858.
- [16]– MANON, G., DELARUE, PH., BAUSIERE, R., CRAPPE, M., RENGLLET, M., DUPUIS, S.. Design of a Unified Power Flow Controller for Implementation into a Micronetwork. **Proceeding of European Power Eletronics – EPE'97.** Trondhein. September 1997. pp. 1.390-1.395.
- [17]– JIANG, Y., EKSTROM, A.. Optimal Controller for the Combination System of a UPFC and Conventional Series Capacitors. **Proceeding of European Power Eletronics – EPE'97.** Trondhein. September 1997. pp. 1.372-1.377.
- [18]– AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A.. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. **IEEE Transactions on Industry Applications.** Vol. IA-20, No. 3. May-June 1984. pp. 625-630.

- [19]– SCHAUDER, C., GERNHARDT, M., STACEY, E., LEMAK, T., GYUGYI, L., CEASE, T., EDRIS, A.. Development of a ± 100 MVar Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 10, No. 3. July 1995. pp. 1486-1493.
- [20]– RENZ, B., KERI, A., MEHRABAN, A., KESSINGER, J., SCHAUDER, C., GYUGYI, L., KOVALSKY, L., EDRIS, A.. World's First Unified Power Flow Controller on the AEP System. **CIGRE Paper 14-107**. 1998.
- [21]– SCHAUDER, C., GYUGYI, L., LUND, M., HAMAI, D., RIETMAN, T., TORGERSON, D., EDRIS, A.. Operation of the Unified Power Flow Controller (UPFC) under Practical Constraints. **IEEE PES Winter Power Meeting**. 1997. Paper No. PE-511-PWRD-0-11-1996.
- [22]– RAHMAN, M. E.. Unified Power Flow Controller System Studies and its Application on the AEP System. **FACTS/HVDC Workshop**. Albany, New York. September 1995.
- [23]– RENZ, B. A.. AEP's Inez Project – The World's First Demonstration of Unified Power Flow Control. **IEEE – Power Engineering Society – Summer Meeting – Plenary Session**. Denver, Colorado. July 1996.
- [24]– MIHALIC, R., ZUNKO, P., POVH, D.. Modeling of Unified Power Flow Controller and its Impact on Power Oscillation Damping. **CIGRE Symposium**. Tokyo. 1995. Paper 320-01.

- [25]– SENJYU, T., SHIROMA, T., UEZATO, K.. The Control Concept of Unified Power Flow Controller in Power Systems for Improving Transient Stability and Damping of Synchronous Generators. **CIGRE Symposium**. Tokyo. 1995. Paper 510-02.
- [26]– JONCQUEL, E., LOMBARD, X.. A Unified Power Flow Controller Model for the Electromagnetic Transients Program. **Proceeding of European Power Eletronics – EPE'95**. Sevilla. September 1995. pp. 2.173-2.178.
- [27]– 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.
- [28]– MIHALIC, R., ZUNKO, P., POVH, D.. Improvement of Transient Stability Using Unified Power Flow Controller. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 11, No. 1. January 1996. pp. 485-491.
- [29]– SMITH, K. S., RAN, L., PENMAN, J.. Dynamic Modelling of a Unified Power Flow Controller. **IEE Proceeding – Gen./Transm./Distrib..** Vol. 144, No. 1. January 1997. pp. 7-12.
- [30]– LIMYINGCHAROEN, S., ANNAKKAGE, U., PAHALAWATHTHA, N.. Fuzzy Logic Based Unified Power Flow Controller for Transient Stability Improvement. **IEE Proceeding – Gen./Transm./Distrib..** Vol. 145, No. 3. May 1998. pp. 225-232.

- [31]– BLAN, J., RAMEY, D., NELSON, R., EDRIS, A.. A Study of Equipment Sizes and Constraints for a Unified Power Flow Controller. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 12, No. 3. July 1997. pp. 1385-1391.
- [32]– YACAMINI, R., PASCHOARELI, D.. Inverter Constraints and Harmonic Distortion in a Unified Power Flow Controller. **ElectrIMACS'96**. St. Nazaire. September 1996.
- [33]– ZOUITI, M., SAADATE, S.. UPFC Application to Suppress Flicker in Arc Furnace Supply System. **Proceeding of European Power Electronics – EPE'97**. Trondheim. September 1997. pp. 3.983-3.987.
- [34]– SCHAUDER, C.. STATCOM for Compensation of Large Electric Arc Furnace Installations. **IEEE/PES Summer Meeting**. Alberta. July 1999. pp 1109-1112.
- [35]– BARBOSA, P. G., LIMA, A.C., WATANABE, E. H.. Modeling of Thyristor and GTO Based Shunt Compensators for FACTS Applications. **Proceeding of COBEP'97**. Belo Horizonte. December 1997.
- [36]– SANTOS, S. B.. **Análise de Unidades UPFC sob o Enfoque da Qualidade da Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Fevereiro, 1998.

- [37]– 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.
- [38]– RELATÓRIO PETROBRAS. **Plataformas de Petróleo**. Outros detalhes. Mês, Ano.
- [39]– MURPHY, J. M. D, TURNBULL, F. G.. **Power Electronic Control of AC Motors**. Editora Pergamon Press, 1989.
- [40]– RIBEIRO, P. F., ARSOY, A., LIU, Y.. **Transmission Power Quality Benefits Realized by a SMES-FACTS Controller. Proceeding of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP'2000**. Orlando, October 2000. pp. 307-312.
- [41]– WILKOSZ, K., SOBIERAJSKI, M., KWASNICKI, W.. **Harmonics Generation by STATCOM in a Meshed Network: The Impact of Neighbouring Circuits. Proceeding of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP'2000**. Orlando, October 2000. pp. 313-317.
- [42]– WANG, H. F., LI, F.. **Design of STATCOM Multivariable Sampled Regulator. Proceeding of International Conference on Electric Utility Deregulation and Power Technologies – DRPT 2000**. London, April 2000. pp. 1-6.