



MODELAGEM E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REATORES COM
SATURAÇÃO CONTROLADA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Marcos Vinícius Gonçalves da Silva Farinha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Rio de Janeiro
Setembro de 2013

MODELAGEM E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REATORES COM
SATURAÇÃO CONTROLADA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Marcos Vinicius Gonçalves da Silva Farinha

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Prof. Sergio Gomes Junior, D.Sc.

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

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2013

Farinha, Marcos Vinícius Gonçalves da Silva

Modelagem e Análise do Desempenho de Reatores
com Saturação Controlada em Sistemas de Potência/
Marcos Vinícius Gonçalves da Silva Farinha – Rio de
Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XX, 165 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 142 - 146.

1. Reatores Saturados 2. Controle de Tensão 3.
Qualidade de Energia. I. Taranto, Glauco Nery. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha querida avó Maria da Silva Costa (*in
memorian*) cuja sabedora e ensinamentos permitiram
que eu superasse os mais diversos obstáculos e a todos
os brasileiros que, assim como ela, não tiveram a
oportunidade de adentrar as portas do conhecimento.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais retorna ao seu tamanho original.”

Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois dEle, por Ele e para Ele são feitas todas as coisas de bem.

Aos meus pais, João Pedro e Maria de Fátima, por todo apoio, carinho e compreensão. Por me auxiliarem em todos os momentos da minha vida e me ensinarem os valores pessoais que hoje eu tenho. Vocês foram e são fundamentais na minha formação e somente com vocês eu poderia chegar onde estou.

Ao meu orientador, Professor Glauco N. Taranto, pelo apoio na elaboração deste trabalho e por aceitado, desde o início, percorrer comigo os desafios desta dissertação. Por ter me ajudado nos pedidos de prorrogação de prazo, tão necessários para a conclusão deste trabalho.

Ao Paulo César Vaz Esmeraldo, ex-superintendente da Superintendência de Transmissão de Energia – STE – da EPE, que apoiou de forma incondicional a elaboração dessa dissertação e, no início de tudo, mostrou-se a pessoa mais entusiasmada com a sua realização.

Ao Marcio G. Serêno, por ter sido de ajuda fundamental nas etapas iniciais da minha pesquisa.

Ao Fernando Hevelton, ex-assessor da STE, que, com toda paciência e solicitude, me instruiu na preparação dos dados utilizados nas avaliações de curto-circuito.

À Jurema B. Ludwig, pelas oportunidades que me foram dadas desde minha entrada na EPE há cinco anos, que muito contribuíram para a minha formação, e pelos incentivos constantes à busca do meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu amigo Thiago Martins, por toda a orientação que recebi desde que comecei a fazer parte do Grupo de Estudos de Transmissão da Região Sul (GET-SUL) e pelo exemplo de determinação e dedicação que você é para mim.

Ao meu amigo Thiago Masseran, pelo auxílio nas avaliações dinâmicas e pelas intermináveis discussões que me levaram, em diversos momentos, a pensar em soluções alternativas aos problemas que enfrentei.

Aos professores Sergio Gomes Junior e Sebastião Ércules Melo de Oliveira por se disponibilizarem a participar da Banca Examinadora.

A todos os meus amigos que, mesmo não citados explicitamente aqui, me apoiaram ao longo dessa jornada, me incentivaram e souberam compreender a minha ausência por diversos momentos.

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

MODELAGEM E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REATORES COM
SATURAÇÃO CONTROLADA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Marcos Vinícius Gonçalves da Silva Farinha

Setembro/2013

Orientador: Glauco Nery Taranto

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho tem como objetivo avaliar os aspectos relacionados ao desempenho de reatores de saturação controlada do tipo MCSR (*Magnetically Controlled Shunt Reactor*) no controle de tensão dos sistemas de potência, ressaltando as potencialidades desse equipamento e as desvantagens de sua utilização.

Este trabalho também discute as diferentes modelagens adotadas para os estudos de regime permanente, de transitórios eletromagnéticos e de transitórios eletromecânicos. Além de avaliar o desempenho do MCSR de forma isolada, destacando características como o tempo de resposta e a injeção de correntes harmônicas, também é estudada a sua interação com sistemas teste e com um sistema de maior porte pertencente ao SIN – Sistema Interligado Nacional.

Os resultados obtidos apontam os benefícios da utilização do MCSR para o controle de tensão em sistemas de potência e mostram a sua aplicabilidade em substituição aos reatores fixos convencionais e na composição de compensadores estáticos. Além disso, no caso exemplo avaliado, a utilização de MCSRs propicia um aumento na capacidade de transmissão devido a uma utilização mais racional dos recursos de potência reativa do sistema.

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

MODELING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF SATURABLE CONTROLLED SHUNT REACTORS IN POWER SYSTEMS

Marcos Vinícius Gonçalves da Silva Farinha

September/2013

Advisor: Glauco Nery Taranto

Department: Electrical Engineering

This study aims to evaluate the aspects related to the operational performance of the saturable reactors known as MCSR (Magnetically Controlled Shunt Reactor) used to control the grid voltage. This study also highlights the potential uses of this equipment and the disadvantages associated to its operation.

Besides discussing the modeling adopted for the steady state, electromagnetic and electromechanical transient studies, this work evaluates some specific characteristics of this equipment such as the response time and the harmonic current injection. The performance of the MCSR is simulated under ideal conditions, by analyzing some small test systems, and under more realistic situations, where the interaction of the MCSR with the Brazilian National Interconnected System – SIN – is analyzed.

The results of this study show the benefits regarding the MCSR utilization for voltage control in power systems, and show some possible uses for this technology that includes replacing conventional fixed reactors and substituting static var compensator components. Furthermore, MCSRs provides a more efficient use of reactive power resources and it helps increase the transmission system capacity.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I INTRODUÇÃO.....	1
I.1 Considerações Iniciais	1
I.2 Contexto Histórico e Revisão Bibliográfica.....	4
I.3 Objetivo	8
I.4 Estrutura da Dissertação	9
I.5 Publicações Geradas por esta Dissertação.....	9
CAPÍTULO II REATORES A NÚCLEO SATURADO E A REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	10
II.1 Aspectos Gerais	10
II.2 Controle de tensão em sistemas de potência	12
II.3 Conceitos básicos sobre reatores de saturação controlada.	22
II.4 Estrutura física do MCSR.....	24
II.5 Princípio de funcionamento do MCSR.....	26
II.6 Cálculo da indutância equivalente do MCSR.....	32
II.7 Características dos componentes harmônicos do MCSR.	42
CAPÍTULO III AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE REATORES DE SATURAÇÃO CONTROLADA	48
III.1 Considerações iniciais.	48
III.2 Modelagem das unidades monofásicas e trifásicas dos MCSRs.	49
III.3 Avaliação do desempenho de um MCSR monofásico.	56
III.3.1 Desempenho do MCSR monofásico considerando a representação de um sistema ideal	57
III.3.2 Desempenho do MCSR monofásico considerando a representação do sistema de controle CC e de um sistema CA teste.	65
III.4 Avaliação do desempenho do MCSR trifásico para condições ideais de representação da rede CA.	75
III.5 Características das componentes harmônicas de corrente para a configuração trifásica do MCSR.	83
III.6 Considerações finais.	87
CAPÍTULO IV ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REATORES DE SATURAÇÃO CONTROLADA NO CONTROLE DE TENSÃO DO SIN.	88

IV.1	Considerações iniciais.	88
IV.2	Caracterização do sistema utilizado para as simulações computacionais.	88
IV.3	Caracterização dos cenários avaliados nas simulações computacionais.	94
IV.4	Avaliações do desempenho dos MCSRs sob condições transitórias e sob o ponto de vista da qualidade de energia.	96
IV.4.1	Resultados das avaliações para o patamar de carga leve.	99
IV.4.2	Resultados das avaliações para o patamar de carga média.	105
IV.5	Avaliações do desempenho dos MCSRs em regime permanente.	110
IV.6	Avaliações de desempenho dos MCSRs no controle de sobretensões dinâmicas.	125
IV.6.1	Resultados das avaliações de rejeição de carga no barramento de Marmeleiro da LT 525kV Povo Novo – Marmeleiro.	131
IV.6.2	Resultados das avaliações de rejeição de carga no barramento de Povo Novo da LT 525kV Povo Novo – Nova Santa Rita.	133
IV.6.3	Resultados das avaliações dinâmicas da contingência da LT 525kV Povo Novo – Nova Santa Rita.	135
CAPÍTULO V CONCLUSÕES.		137
V.1	Conclusões Gerais.	137
V.2	Sugestões de trabalhos futuros.	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		142
APÊNDICE A		147
APÊNDICE B.....		150
APÊNDICE C.....		158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1 – Diagrama esquemático simplificado de uma linha de transmissão.....	13
Figura II-2 – Diagrama simplificado de uma linha de transmissão.....	16
Figura II-3 – Curva característica Potência x Ângulo de carga.....	16
Figura II-4 – Potência reativa requerida no terminal emissor da linha em função da potência ativa transmitida.....	17
Figura II-5 – Efeito da compensação reativa em derivação na curva característica Potência x Ângulo de carga.....	20
Figura II-6 – Efeito da compensação reativa em derivação na curva característica Potência Reativa x Ângulo de carga.....	21
Figura II-7 –Efeito da componente contínua do fluxo na magnitude da corrente de excitação.....	23
Figura II-8 –Estrutura física padrão de uma unidade monofásica de um MCSR.....	24
Figura II-9 –Corte transversal de uma unidade monofásica de um MCSR e circuito magnético equivalente.....	25
Figura II-10 –Conexões dos enrolamentos em cada uma das fases de um MCSR trifásico.....	26
Figura II-11 –Alterações nas densidades de fluxo das colunas principais do reator.....	27
Figura II-12 –Densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético e corrente primária obtidos com corrente de excitação CC nula.....	29
Figura II-13 –Densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético e corrente primária obtidos com corrente de excitação diferente de zero e $\beta = \pi$	30
Figura II-14 –Variação na densidade de fluxo magnético e intensidade de campo magnético devido ao aumento na corrente de excitação CC: (a) ponto de operação onde não há simultaneidade na saturação das colunas principais; (b) ponto de operação onde a saturação ocorre durante metade de um período; (c) ponto de operação onde há simultaneidade no período de saturação das colunas principais.....	31
Figura II-15 –Densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético e corrente primária obtidos com corrente de excitação diferente de zero e $\beta = 2\pi$	32
Figura II-16 –Circuito equivalente simplificado de uma unidade monofásica de um MCSR.....	33
Figura II-17 –Figuras esquemáticas das seções transversais frontal (a) e superior (b) de uma coluna principal do reator saturado.....	35

Figura II-18 –Distorção na corrente primária de um a coluna do reator para dois pontos de operação.	43
Figura II-19 – Variação das componentes harmônicas da intensidade de campo em função do grau de saturação.	46
Figura III-1 – Modelo de uma unidade transformadora monofásica.....	49
Figura III-2 – Conexão das unidades transformadoras para representação de um MCSR monofásico.	50
Figura III-3 – Curva de magnetização característica do material que compõe o núcleo ferromagnético.....	52
Figura III-4 – Curva de magnetização adotada nas simulações.	54
Figura III-5 – Conexão das unidades transformadoras para representação trifásica de um MCSR.....	55
Figura III-6 – Diagrama esquemático de um MCSR monofásico para simulação com sistemas CA e CC ideais.....	57
Figura III-7 – Fluxo concatenado e corrente de magnetização com tensão de controle de 0V.	58
Figura III-8 – Fluxo concatenado e corrente de magnetização com tensão de controle de 60V.	59
Figura III-9 – Correntes nos enrolamentos primários e secundários do reator com tensão de controle de 60V.....	60
Figura III-10 – Fluxo concatenado e corrente de magnetização com tensão de controle de 260V.	61
Figura III-11 – Correntes nos enrolamentos primários e secundários do reator com tensão de controle de 260V.	62
Figura III-12 – Curva característica $V \times I$ do reator saturado.	64
Figura III-13 – Consumo de potência reativa para diversos pontos de operação.....	65
Figura III-14 – Circuito de controle do MCSR.	67
Figura III-15 – Diagrama de blocos associado ao controle de tensão do MCSR.....	68
Figura III-16 – Sistema teste simplificado.	69
Figura III-17 – Tensão no terminal primário do MCSR na perda intempestiva de 50% da carga.....	70
Figura III-18 – Variação na tensão CC e ângulo de disparo na perda intempestiva de 50% da carga.	71

Figura III-19 – Variação na corrente primária do MCSR na perda intempestiva de 50% da carga.....	71
Figura III-20 – Tensão no terminal primário do MCSR na perda intempestiva de 100% da carga.....	72
Figura III-21 – Variação na tensão CC e ângulo de disparo na perda intempestiva de 100% da carga.	73
Figura III-22 – Variação na corrente primária na perda intempestiva de 100% da carga.	73
Figura III-23 – Tensão no terminal primário do MCSR com tomada de 100% da carga.	74
Figura III-24 – Variação na tensão de controle e ângulo de disparo com tomada de 100% da carga.	74
Figura III-25 – Variação na corrente primária com tomada de 100% da carga.	75
Figura III-26 – Correntes nos enrolamentos primários da fase A do reator com tensão de controle de 20V para a configuração trifásica.	77
Figura III-27 – Correntes de magnetização e correntes nos enrolamentos secundários do reator com tensão de controle de 20V para a configuração trifásica.....	79
Figura III-28 – Correntes nos enrolamentos primários da fase A do reator com tensão de controle de 180V para a configuração trifásica.	80
Figura III-29 – Correntes de magnetização e correntes nos enrolamentos secundários do reator com tensão de controle de 180V para a configuração trifásica.....	81
Figura III-30 – Correntes nos enrolamentos primários da fase A do reator com tensão de controle de 390V para a configuração trifásica.	82
Figura III-31 – Correntes de magnetização e correntes nos enrolamentos secundários do reator com tensão de controle de 390V para a configuração trifásica.	83
Figura III-32 – Magnitudes das componentes harmônicas em função da potência reativa consumida pelo reator.....	84
Figura III-33 – Magnitudes das componentes harmônicas de 3 ^a , 5 ^a , 7 ^a e 9 ^a ordens para diversos pontos de operação.	85
Figura III-34 – Distorção Harmônica Total da forma de onda da corrente primária resultante.....	86
Figura IV-1 – Diagrama esquemático do sistema de transmissão do estado do Rio Grande do Sul.	89

Figura IV-2 – Sistema de transmissão planejado para 2014 para a integração do potencial eólico do estado do Rio Grande do Sul.....	91
Figura IV-3 – Sistema de transmissão originalmente planejado (a) e substituição de reatores convencionais por MCSRs (b).....	93
Figura IV-4 – Configuração adotada para o sistema de transmissão da região sul do RS.	94
Figura IV-5 – Diagrama unifilar da rede representada.....	98
Figura IV-6 – Tensões e correntes durante o processo de energização do MCSR sem atuação do sistema de controle.	100
Figura IV-7 – Tensões e correntes durante o processo de energização do MCSR com atuação do sistema de controle.	102
Figura IV-8 – Tensões e correntes do MCSR de Quinta durante o processo de energização do banco de capacitores da subestação.....	103
Figura IV-9 – Tensões e correntes durante manobra de rejeição de carga no terminal de Marmeleiro da linha Marmeleiro – Povo Novo.....	106
Figura IV-10 – Tensões e correntes durante manobra de rejeição de carga no terminal de Povo Novo da linha Povo Novo – Nova Santa Rita.	108
Figura IV-11 – Diagrama unifilar da região analisada no patamar de carga leve e Cenário 100/100 para condição normal de operação.....	116
Figura IV-12 – Diagrama unifilar da região analisada para o patamar de carga leve no Cenário 100/100 na contingência da linha de transmissão Povo Novo – Nova Santa Rita.	117
Figura IV-13 – Variação da geração de potência reativa do compensador síncrono e do MCSR de Marmeleiro para o patamar de carga leve.....	121
Figura IV-14 – Variação da geração de potência reativa do compensador síncrono e do MCSR de Marmeleiro para o patamar de carga média.	121
Figura IV-15 – Variação de tensão em função do aumento de geração eólica em Santa Vitória do Palmar.	124
Figura IV-16 – Variação de geração de potência reativa em função do aumento de geração eólica em Santa Vitória do Palmar.....	124
Figura IV-17 – Diagrama de blocos do Controlador Definido Pelo Usuário para representação do MCSR em estudos de estabilidade eletromecânica.	127

Figura IV-18 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV, Povo Novo 525kV e Marmeleiro 525kV no patamar de carga leve.	132
Figura IV-19 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV, Povo Novo 525kV e Marmeleiro 525kV no patamar de carga média.	132
Figura IV-20 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV, Povo Novo 525kV e Marmeleiro 525kV no patamar de carga leve.	134
Figura IV-21 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV, Povo Novo 525kV e Marmeleiro 525kV no patamar de carga média.	134
Figura IV-22 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV e Marmeleiro 525kV.	135
Figura A-1 Curva da resposta em frequência para o filtro adotado na configuração monofásica do MCSR.	148
Figura A-2 Forma de onda da tensão retificada com o filtro (a) e sem o filtro (b) para a configuração monofásica.	149
Figura A-3 Curva da resposta em frequência para o filtro adotado na configuração trifásica do MCSR.	149
Figura C-1 Sentido da inicialização dos blocos 20, 21 e 22.	165

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela II-1 – Resumo das características dos pontos de operação.....	42
Tabela III-1 – Dados da curva de magnetização original.....	54
Tabela III-2 – Dados da curva de magnetização adotada nas simulações.....	54
Tabela III-3 – Dados nominais de cada transformador que compõe o modelo do reator saturado.....	56
Tabela III-4 – Tempo de resposta do reator saturado em função da tensão de controle para tensão terminal nominal.....	63
Tabela III-5 – Valores adotados para os parâmetros físicos dos elementos do circuito de controle do MCSR monofásico.	67
Tabela III-6 – Valores adotados para os parâmetros da malha de controle do MCSR monofásico.	69
Tabela III-7 – Valores adotados para os parâmetros unitários da linha de transmissão.	70
Tabela III-8 – Valores adotados para os parâmetros físicos dos elementos do circuito de controle do MCSR trifásico.....	76
Tabela III-9 – Valores adotados para os parâmetros da malha de controle do MCSR trifásico.....	76
Tabela IV-1 – Empreendimentos eólicos contratados no RS a partir de 2009.....	90
Tabela IV-2 – Cenários avaliados.	96
Tabela IV-3 – Espectro harmônico das tensões e correntes na subestação Quinta após o processo de energização do banco de capacitores.....	104
Tabela IV-4 – Espectro harmônico das tensões e correntes no terminal do MCSR de Marmeleiro em condição de regime.....	107
Tabela IV-5 – Espectro harmônico das tensões e correntes no terminal do MCSR de Povo Novo.....	110
Tabela IV-6 – Lista de contingências simuladas.....	111
Tabela IV-7 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul em condição normal de operação para o patamar de carga média.....	112
Tabela IV-8 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul em condição normal de operação para o patamar de carga leve.....	113
Tabela IV-9 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul na emergência mais crítica com a configuração original do sistema para o patamar de carga leve.....	113

Tabela IV-10 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul na emergência mais crítica para o patamar de carga leve considerando a atuação dos MCSRs.....	114
Tabela IV-11 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul na emergência mais crítica com a configuração original do sistema para o patamar de carga média.	114
Tabela IV-12 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul na emergência mais crítica para o patamar de carga média considerando a atuação dos MCSRs.....	115
Tabela IV-13 – Geração de potência reativa das usinas térmicas da região sul do Rio Grande do Sul e dos MCSRs propostos em condição normal de operação para o patamar de carga leve.	118
Tabela IV-14 – Geração de potência reativa das usinas térmicas da região sul do Rio Grande do Sul e dos MCSRs propostos em condição normal de operação para o patamar de carga média.	119
Tabela IV-15 – Geração de potência reativa das usinas térmicas, do compensador síncrono e dos MCSRs na contingência da linha Povo Novo - Nova Santa Rita no patamar de carga leve.	119
Tabela IV-16 – Geração de potência reativa das usinas térmicas, do compensador síncrono e dos MCSRs na contingência da linha Povo Novo - Nova Santa Rita no patamar de carga média.	120
Tabela IV-17 – Limites de carregamento do sistema para os cenários e pontos de operação avaliados.....	122
Tabela IV-18 – Valores adotados para os parâmetros da função $f_1(x)$ dos CDUs dos MCSRs nos níveis de tensão de 230kV e 525kV.	126
Tabela IV-19 – Valores adotados para os parâmetros do CDU do MCSR conectado no nível de tensão de 230kV.....	128
Tabela IV-20 – Valores adotados para os parâmetros do CDU dos MCSRs conectados no nível de tensão de 525kV.....	128
Tabela IV-21 – Valores adotados para os parâmetros da função $f_2(x)$ do CDU do MCSR conectado no nível de tensão de 230kV.	129
Tabela IV-22 – Valores adotados para os parâmetros da função $f_2(x)$ do CDU do MCSR conectado no nível de tensão de 525kV.	129

Tabela B-1 Parâmetros elétricos utilizados para os transformadores da subestação Nova Santa Rita.....	151
Tabela B-2 Curva de saturação dos transformadores da subestação Nova Santa Rita.	151
Tabela B-3 Parâmetros elétricos utilizados para os transformadores da subestação Gravataí.	151
Tabela B-4 Curva de saturação dos transformadores da subestação Gravataí.	152
Tabela B-5 Parâmetros elétricos utilizados para o transformador da subestação Povo Novo.	152
Tabela B-6 Curva de saturação dos transformador da subestação Povo Novo.	152
Tabela B-7 Parâmetros elétricos utilizados para o transformador da subestação Quinta.	153
Tabela B-8 Curva de saturação do transformador da subestação Quinta.	153
Tabela B-9 Parâmetros elétricos utilizados para o transformador da subestação Marmeleiro.	153
Tabela B-10 Curva de saturação do transformador da subestação Marmeleiro.	153
Tabela B-11 Parâmetros unitários das linhas de transmissão em 525kV representadas no sistema equivalente do RS.....	154
Tabela B-12 Parâmetros unitários das linhas de transmissão em 230kV representadas no sistema equivalente do RS.....	155
Tabela B-13 Impedâncias de transferência representadas no sistema equivalente do RS.	156
Tabela B-14 Dados nominais de cada transformador que compõe o modelo do reator saturado da subestação Quinta no nível de tensão de 230kV.....	156
Tabela B-15 Dados nominais de cada transformador que compõe o modelo do reator saturado das subestações Povo Novo e Marmeleiro no nível de tensão de 525kV.	157
Tabela B-16 Cargas representadas nos barramentos de 230kV das subestações Pelotas 3 e Camaquã 3.	157

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CER	Compensador Estático de Reativo
CDU	Controlador Definido pelo Usuário
DHT	Distorção Harmônica Total
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FACTS	Flexible AC Transmission System
GEC	General Electric Company
HVDC	High Voltage Direct Current
LER	Leilão de Energia de Reserva
LFA	Leilão de Fontes Alternativas
MCSR	Magnetically Controlled Shunt Reactor
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional;
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TSR	Thyristor Switched Reactor

CAPÍTULO I INTRODUÇÃO

I.1 Considerações Iniciais

O sistema interligado nacional brasileiro (SIN) possui características específicas que o diferenciam da maioria dos sistemas elétricos no mundo. Duas das características marcantes do SIN são a sua grande extensão e a distribuição heterogênea dos centros de consumo e fontes de geração. Essas características representam um desafio aos estudos de planejamento da expansão e da operação uma vez que influenciam diretamente a capacidade do sistema elétrico manter-se dentro dos padrões de qualidade e de confiabilidade exigidos pela regulamentação vigente.

De uma forma geral, linhas de transmissão extensas interligam os centros de consumo às fontes geradoras, o que requer, na maioria dos casos, a utilização de equipamentos de compensação reativa fixa ou variável para auxiliar no controle das tensões dos barramentos do sistema. O controle de tensão pode se tornar um desafio ainda maior quando o sistema possui características radiais e o comportamento das cargas atendidas é sazonal.

Outro aspecto relevante relacionado ao controle de tensão no SIN é a inserção, em grande escala, de fontes intermitentes de geração de energia. A integração de grandes complexos eólicos, por exemplo, impõe variações bruscas nos fluxos de potência ativa das linhas de transmissão e, em função da característica radial de sua conexão, acaba impactando negativamente os níveis de tensão do sistema sendo necessário, na maioria dos casos, a implantação de diversos equipamentos de compensação reativa para garantir uma operação segura.

No que se refere à compensação de potência reativa, há diversos equipamentos que podem ser utilizados para essa finalidade. Alguns podem ser considerados bastante tradicionais, como é o caso dos bancos de capacitores e reatores em derivação, e outros mais sofisticados, pois utilizam técnicas modernas de eletrônica de potência em equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*).

Um dos elementos de compensação reativa mais simples é o reator em derivação, que tem sido tradicionalmente utilizado em linhas de transmissão de alta e extra alta tensão com o objetivo de minimizar efeitos indesejáveis, como as sobretensões decorrentes de manobras controladas ou intempestivas, e o Efeito Ferranti, que pode provocar sobretensões sustentadas que ultrapassam os limites suportados pelos equipamentos dos terminais dessas linhas.

A utilização de reatores convencionais, no entanto, pode apresentar efeitos negativos para o sistema em determinadas condições de operação. Os reatores fixos, por exemplo, representam uma demanda adicional de potência reativa ao sistema e, pelo fato de operarem independentemente do carregamento das linhas, podem reduzir sua capacidade de transmissão e acabam por diminuir a capacidade de regulação de tensão do sistema.

No caso de reatores manobráveis, a possibilidade de chaveamentos durante um ciclo de carga diário já apresenta uma vantagem, em termos de controle de tensão, quando comparada com os reatores fixos. No entanto, a própria manobra de chaveamento pode não ser adequada para otimizar esse controle, pois alterações discretas no consumo de potência reativa podem gerar variações acentuadas e indesejáveis nos níveis de tensão.

Os reatores controláveis e os reatores a núcleo saturado, sob essa ótica, tornam-se uma alternativa atraente, pois permitem um controle contínuo do consumo de potência reativa e evitam chaveamentos excessivos não só do próprio reator como de outros equipamentos do sistema. Além disso, possuem um tempo de atuação rápido e podem lidar com variações de tensão de forma automática e, quando associados a bancos de capacitores, podem se tornar uma alternativa atraente para a composição de Compensadores Estáticos.

Os reatores a núcleo saturado possuem uma regulação automática do seu consumo de potência reativa em função da tensão de seus terminais. Quando a tensão se encontra abaixo de um valor de referência, a corrente requerida pelo reator e, conseqüentemente, a potência reativa diminuem de forma significativa. Por outro lado, com o aumento da tensão terminal, o reator a núcleo saturado rapidamente aumenta a sua demanda por potência reativa, auxiliando no controle de tensão. Esse equipamento não possui

nenhum dispositivo de controle externo sendo praticamente autorregulável e, portanto, não permite a realização de um ajuste específico do seu ponto de operação.

No caso dos reatores controláveis, dois tipos podem ser destacados: o Reator Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Reactor* - TCR) e o Reator a Núcleo Saturado com Saturação Controlada (*Magnetically Controlled Shunt Reactor* – MCSR). Do ponto de vista da topologia da instalação, a principal diferença entre os TCRs e os MCSRs é a necessidade de um transformador elevador (*step-up transformer*) para integração dos TCRs à rede de alta ou extra alta tensão. Os MCSRs não necessitam desse equipamento adicional, podendo ser conectados diretamente à rede, mas diferentemente dos reatores a núcleo saturado mencionados anteriormente, possuem um circuito de eletrônica de potência associado aos seus enrolamentos de controle de forma a permitir a alteração do nível de saturação do núcleo e, conseqüentemente, da potência reativa consumida.

Esse tipo de tecnologia tem sido utilizado desde a década de 90 em países como a Rússia e a China [1], cujos sistemas elétricos possuem características análogas às do sistema brasileiro. Nesses países, a instalação de MCSRs foi realizada com diversos objetivos como, por exemplo, o aumento da capacidade de transmissão, a redução de perdas e a necessidade de evitar um número excessivo de chaveamentos em elementos do sistema [2], [3], [4], [5] e [6].

Essas aplicações são igualmente importantes para o sistema elétrico brasileiro e vem ao encontro das preocupações atuais crescentes relacionadas com a qualidade da energia oferecida aos consumidores. Essas exigências têm se tornado cada vez maiores principalmente por conta da utilização de equipamentos mais sofisticados, tanto na indústria quanto por consumidores residenciais, que são extremamente sensíveis às variações de tensão.

Diante desse quadro, a utilização de equipamentos de compensação reativa variável tecnicamente e economicamente atrativos apresentam um bom campo de aplicação para a tecnologia dos reatores saturados do tipo MCSR.

I.2 Contexto Histórico e Revisão Bibliográfica

Os primeiros relatos da utilização de reatores saturados em circuitos elétricos datam do início do século XX com o surgimento dos amplificadores magnéticos. Esse equipamento foi desenvolvido por *Ernst F. W. Alexanderson* da *General Electric Company* – GEC em 1912 [1] e [7] com o objetivo de controlar o fluxo de potência de uma fonte para a carga.

O amplificador magnético é composto basicamente por um reator a núcleo saturado com dois enrolamentos: um enrolamento primário, geralmente conectado em série com o circuito, e um enrolamento secundário ou de controle, responsável pela alteração do nível de saturação do núcleo. O nível de saturação é controlado por meio da injeção de uma corrente contínua, de pequena magnitude, que permite alterar a impedância do amplificador magnético conectado entre a fonte e a carga. Essa alteração de impedância limita não só a magnitude das correntes, mas também a potência entregue à carga.

É importante destacar que o circuito elétrico resultante da aplicação do amplificador magnético pode ser considerado um dos primeiros conversores CA-CA já construídos e que, por não possuir partes móveis sujeitas a desgastes mecânicos, esse equipamento apresenta uma boa robustez e durabilidade. Em 1916, com o aprimoramento dessa tecnologia, já era possível fabricar amplificadores magnéticos com capacidades de 70kW, que foram utilizados como componentes dos equipamentos que possibilitaram estabelecer a primeira comunicação via rádio entre os Estados Unidos da América e a Europa.

A utilização do amplificador magnético, no entanto, permaneceu limitada até meados da década de 50 em função do surgimento de novos dispositivos estáticos para o controle do fluxo de potência [8]. Os tubos a vácuo (*vacuum tubes*) contendo mercúrio, cuja ignição era controlada externamente para criar o arco no vapor de mercúrio e estabelecer a conexão entre o cátodo e anodo do dispositivo, rapidamente substituíram os amplificadores magnéticos para aplicações de mais baixas potências.

Na década de 40, a tecnologia de reatores saturados de múltiplos núcleos foi desenvolvida por *E. Friedlander*, mas somente em 1955 essa tecnologia foi utilizada

pela GEC no desenvolvimento do primeiro compensador estático a reator saturado. Esse equipamento, no entanto, apresentava algumas desvantagens intrínsecas associadas ao seu peso e volume exagerados, possuía altas perdas e seu tempo de resposta era relativamente lento [1] e [9].

Com o desenvolvimento dessa tecnologia, associado a avanços nos estudos dos materiais magnéticos, que propiciaram a obtenção núcleos ferromagnéticos com qualidade superior, tornou-se possível a construção de equipamentos muito mais eficientes e com melhor desempenho. As primeiras aplicações comerciais datam da década de 60 e estão relacionadas com o controle de variações bruscas de tensão nos barramentos de indústrias siderúrgicas.

Em sistemas de transmissão de grande porte, destaca-se a utilização de reatores saturados nos compensadores estáticos conectados ao sistema de 400kV do terminal inglês da interligação em corrente contínua entre a França e Inglaterra (*Cross Chanel Link*). Esse *link* HVDC (*High Voltage Direct Current*) de 2000MW entrou em operação em 1986 e a escolha dos reatores saturados foi justificada em [10] não só pela necessidade de prover compensação reativa indutiva variável, mas também pela capacidade inerente desse tipo de equipamento em suportar sobrecargas significativas.

Com a invenção e o desenvolvimento dos dispositivos semicondutores, a produção de compensadores estáticos baseados em reatores saturados foi sendo gradualmente substituída por compensadores controlados por tiristores. Os estudos envolvendo aplicações para os reatores a núcleo saturado, no entanto, continuaram a ser desenvolvidos em diversas partes do mundo.

Em 1986 na atual Rússia, *Alexander M. Bryantsev* [11], propôs uma estrutura diferenciada para os reatores saturados. Ao invés de utilizar vários núcleos na estrutura física do reator com diferentes combinações de enrolamentos, como ocorre nos arranjos denominados *quin*, *twin-tripler* e *treble-tripler* [9], [12], [13] e [14], a configuração proposta para o reator de saturação controlada denominado MCSR conta com apenas uma estrutura ferromagnética por fase com dois enrolamentos primários e dois enrolamentos de controle [4]. Essa configuração relativamente simples mostrou-se extremamente promissora e propiciou uma melhora no desempenho desse tipo de reator.

Ao final da década de 90 e início dos anos 2000, diversos estudos foram publicados sobre a aplicabilidade desse equipamento em sistemas de potência de alta e extra alta tensão. A maioria dos trabalhos envolvem análises do desempenho do MCSR no controle de tensão em sistemas com longas linhas de transmissão e propõem, na maioria dos casos, a substituição de reatores de linha convencionais por reatores saturados.

Nos trabalhos [2], [5], [6], [15], [16] e [17] são apresentados os resultados de estudos que exemplificam as vantagens de utilização do MCSR ressaltando principalmente ganhos na capacidade de transmissão, decorrentes do aumento da margem de estabilidade de tensão, e no controle de sobretensões provocadas por rejeições súbitas de carga. Outras vantagens apontadas nesses trabalhos estão relacionadas à redução de perdas sistêmicas, devido à utilização mais racional dos recursos de potência reativa; à redução na utilização de espaço útil em subestações, quando comparado com outros equipamentos de compensação variável e à possibilidade de realizar um controle de tensão de forma contínua, evitando assim uma grande quantidade de chaveamentos de outros reatores.

Dentre os estudos citados anteriormente é importante destacar que apenas em [17], publicado em 2005, foram apresentadas informações acerca do histórico de funcionamento de um MCSR, de 50Mvar, instalado no sistema de 400kV da Índia em 2001. Especificamente nesse caso, o MCSR opera com absorção de potência reativa quase nula durante a maior parte do ano. Apenas em algumas situações específicas, como manobras de energização de linhas de transmissão ou rejeição de cargas, houve necessidade efetiva de absorção de potência reativa.

Esse artigo apresenta, também, uma análise econômica comparando estimativas de custos dos investimentos na aquisição de 4 novos equipamentos para substituição um conjunto de reatores fixos do sistema de 400kV com o benefício advindo da redução dos custos das perdas elétricas no sistema de transmissão. Nesse trabalho foi demonstrado, de acordo com as premissas econômicas adotadas, que para o caso indiano o retorno dos investimentos se daria em um intervalo de tempo de apenas 5 anos.

No caso do trabalho [3], é apresentado um estudo de caso que avalia a substituição dos reatores de linha de 500kV das subestações Serra da Mesa e Imperatriz, integrantes da

interligação Norte-Sul, por MCSRs de mesma capacidade. Esse estudo de caso demonstra que a utilização de reatores saturados melhora o desempenho de linhas de transmissão que possuem algum tipo de compensação série, pois permitem regular com maior precisão a queda de tensão nos terminais dos capacitores série evitando que esse seja um motivo limitador de fluxo nesses equipamentos. Dessa forma, os reatores saturados possibilitam que a capacidade das linhas e dos equipamentos de compensação sejam utilizados em sua plenitude.

Esse trabalho, publicado em 2003, é um dos poucos presentes na literatura que analisam o desempenho do MCSR associado à equipamentos de compensação série e, em função da bibliografia sobre o tema ser relativamente recente e estar concentrada em publicações de autores estrangeiros, nenhum outro trabalho que abordasse um estudo de caso do SIN foi encontrado nos levantamentos feitos.

Ainda em termos das aplicações dos MCSRs em sistemas de potência, podem-se destacar os trabalhos [18] e [19] que abordam a utilização desse tipo de reator em compensadores estáticos de reativos - CERs. Esses trabalhos descrevem a experiência de sucesso da implantação do primeiro CER baseado nessa tecnologia em uma subestação russa com nível de tensão de 110kV. Esse compensador foi instalado em 1999 e, devido à associação de um MCSR de 25Mvar com bancos de capacitores de 42Mvar, possui uma faixa de operação nominal de -25Mvar a +42Mvar. São destacados, ainda, outros compensadores instalados posteriormente com níveis de tensão de 220kV, 330kV e 525kV com capacidades de absorção de potência reativa de 100Mvar ou 180Mvar.

Apesar de a maioria dos equipamentos em operação existentes hoje estarem instalados na Rússia [20], que é o berço da tecnologia, e em países integrantes da ex-URSS, a literatura apresenta, ainda, uma série de artigos de autores chineses relatando sua experiência na construção e operação desse equipamento. Na China, a primeira aplicação prática do MCSR ocorreu em 2007 [1] onde um reator de 30Mvar foi instalado em uma subestação de 110kV. Desde então a China tem investido na pesquisa e desenvolvimento de protótipos em tensões superiores.

Outro assunto de extrema relevância tratado em alguns trabalhos está relacionado à injeção de harmônicos no sistema elétrico devido às distorções na forma de onda de corrente, que são inerentes ao funcionamento de reatores a núcleo saturado. Em [11], [21], [22] e [23] são analisadas as amplitudes das componentes harmônicas de corrente e o espectro harmônico característico do MCSR em diversos pontos de operação. Esses trabalhos enfatizam que as componentes harmônicas de terceira ordem desse reator são minimizadas devido ao arranjo dos enrolamentos secundários, conectados em delta, e que as componentes de maior relevância nas correntes dos enrolamentos primários são as de ordem 5 e 7. Em [23] também é apresentado um estudo comparativo do desempenho do MCSR e do TCR sob a ótica da qualidade de energia e dos princípios de funcionamento.

A dissertação proposta aqui terá como ponto de partida os trabalhos [4], [11], [21], e [22] citados anteriormente. Além da modelagem do MCSR para simulação em ambiente MATLAB/SIMULINK pretende-se, também, realizar análises em regime permanente e dinâmico. Será apresentado um estudo de caso que avaliará o desempenho do sistema de transmissão da região sul do Rio Grande do Sul, cuja expansão foi planejada recentemente pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE [24], considerando a inserção de MCSRs em determinadas subestações estratégicas.

I.3 Objetivo

O objetivo da dissertação é a avaliar computacionalmente o desempenho de um reator de saturação controlada sob diferentes aspectos, ressaltando as vantagens e desvantagens desse equipamento. Para tanto serão realizados estudos em ambiente MATLAB/SIMULINK para as análises transitórias; em ANAREDE para as avaliações em regime permanente e em ANATEM para as análises dinâmicas.

Também faz parte dos objetivos dessa dissertação a investigação dos impactos associados às distorções harmônicas relacionadas às não linearidades da saturação do núcleo ferromagnético e a obtenção de um controlador específico que represente o comportamento dinâmico do MCSR.

I.4 Estrutura da Dissertação

Além do capítulo introdutório, este trabalho é composto por outros quatro capítulos desenvolvidos de acordo com a seguinte estrutura:

- O **Capítulo 2** apresenta os princípios básicos de funcionamento e aborda aspectos relacionados à estrutura física padrão de reatores com saturação controlada. Também são apresentados alguns fundamentos relacionados ao controle de tensão em sistemas elétricos de potência.
- O **Capítulo 3** apresenta a modelagem, as considerações e os critérios adotados para as simulações realizadas.
- O **Capítulo 4** apresenta os resultados de um estudo de caso contemplando a aplicação de reatores de saturação controlada no SIN.
- O **Capítulo 5** mostra as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

I.5 Publicações Geradas por esta Dissertação

1. FARINHA, M. V. G. S., et al., “A utilização de reatores de saturação controlada do tipo MCSR (Magnetically Controlled Shunt Reactor) no controle de tensão de sistemas de potência.”, *XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Brasília, Outubro 2013.

CAPÍTULO II REATORES A NÚCLEO SATURADO E A REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

II.1 Aspectos Gerais

A preocupação com os níveis de qualidade da energia elétrica – QEE – tem aumentado substancialmente nos últimos anos em função do crescimento da utilização de equipamentos elétricos mais sofisticados que possuem componentes eletrônicos sensíveis à QEE. Essa preocupação aflige tanto grandes consumidores, como é o caso das indústrias cujos processos produtivos podem ser prejudicados por uma energia de má qualidade, quanto consumidores residenciais de pequeno porte, usuários de equipamentos eletroeletrônicos variados.

A importância deste tema é tão grande que os documentos setoriais de caráter normativo, como os Procedimentos de Rede, elaborados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, e os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, possuem capítulos específicos dedicados à essa questão.

Esses capítulos tratam da definição de termos técnicos e indicadores de desempenho, além de normatizar, padronizar e disciplinar as atividades técnicas relacionadas à performance das redes de distribuição e de transmissão. Dentre os vários termos técnicos presentes nesses documentos, a definição de qualidade de energia elétrica, constante dos Procedimentos de Rede em [25], merece destaque por ser abrangente e reunir, já na definição de QEE, alguns dos aspectos mais relevantes associados a este tema.

Nesse documento, o termo “Qualidade de Energia Elétrica” é definido como: *“Desempenho do sistema em termos de continuidade de serviço e de conformidade na forma de onda da tensão, incluindo os efeitos de flutuação de tensão, desequilíbrio, distorção harmônica e variação de tensão de curta duração.”*

Dentre os aspectos citados na definição do termo QEE, é importante destacar a preocupação com o controle adequado e eficiente dos níveis de tensão do sistema, que

permite não só evitar danos aos equipamentos elétricos devido à superação limites admissíveis, mas também pode auxiliar na melhora da estabilidade sistêmica, na minimização de perdas ativas e reativas e na promoção de um aumento na capacidade de transmissão.

A manutenção dos níveis de tensão dentro de faixas de operação aceitáveis representa por si só um grande desafio na operação e planejamento dos sistemas elétricos, uma vez que as variações de tensão são inerentes ao funcionamento do sistema. Mudanças diárias dos patamares de carga, alterações não programadas e intempestivas de sua topologia bem como diferentes cenários de geração têm influência direta no controle das tensões e nas solicitações de potência reativa.

Diferentemente do controle de frequência, que depende basicamente do balanço de potência ativa entre a geração e carga, o controle de tensão é realizado localmente por meio de diversos equipamentos que alteram a injeção ou a absorção de potência reativa. Esses equipamentos podem ter uma característica de compensação passiva, como é o caso de bancos de reatores ou bancos de capacitores; ou podem contribuir de forma ativa para o controle de tensão, como os compensadores estáticos ou síncronos.

Especificamente no caso dos compensadores estáticos há um conjunto de diferentes tipos de equipamentos FACTS, que podem estar inclusive agregados a bancos de reatores ou capacitores convencionais e que permitem um controle variável dos níveis de tensão. Dentre os principais elementos de compensação estática em derivação pode-se citar:

- *Thyristor Controlled Reactor* (TCR) ou Reatores Controlados por Tiristores → Reatores controlados por tiristores, cuja reatância efetiva varia de forma contínua de acordo com o controle do ângulo de disparo dos tiristores;
- *Thyristor Switched Reactor* (TSR) ou Reatores Chaveados a Tiristores → Reatores similares aos TCRs, mas que utilizam apenas ângulos fixos de disparo dos tiristores (90° ou 180°) de forma que haja apenas dois modos de operação: condução total ou bloqueio de condução;
- *Thyristor Switched Capacitor* (TSC) ou Capacitores Chaveados a Tiristores → Capacitores controlados por tiristores, cuja reatância efetiva varia

de forma discreta, de acordo com o controle do ângulo de disparo dos tiristores, entre os modos de condução total e bloqueio de condução;

- Reatores com núcleo saturável → Reatores cuja reatância efetiva está associada à alteração da saturação do núcleo ferromagnético. Essa alteração pode depender apenas dos níveis de tensão nos terminais do equipamento, sem nenhum tipo de controle direto, ou pode ser controlada por meio do ângulo de disparo de tiristores conectados a enrolamentos especiais.

Destaca-se que com exceção do reator a núcleo saturado sem controle de saturação, que apresenta a propriedade de ser autorregulável, todos os dispositivos descritos anteriormente fazem uso da eletrônica de potência como uma ferramenta de controle. Como característica comum, a operação de todos os equipamentos objetiva flexibilizar a injeção ou absorção de potência reativa de acordo com as necessidades sistêmicas, o que propicia um controle mais coerente e efetivo dos níveis de tensão.

II.2 Controle de tensão em sistemas de potência

A manutenção dos níveis de tensão dentro dos limites operativos admissíveis está intrinsecamente ligada ao controle do fluxo de potência reativa no sistema. A variação nos requisitos de potência reativa sofre influência direta do ponto de operação ao qual o sistema está submetido e é influenciada, também, pelo desempenho de diversos elementos do sistema.

Geradores síncronos e os equipamentos de compensação reativa, por exemplo, têm atuação direta no balanço de potência reativa contribuindo com sua geração ou absorção nos mais diversos pontos de operação. Transformadores, por outro lado, tem um comportamento passivo e atuam sempre no sentido de absorver potência reativa.

Sob esse contexto, o desempenho das linhas de transmissão é extremamente importante na determinação dos requisitos de potência reativa do sistema. Dessa forma, serão apresentados a seguir alguns conceitos relacionados ao desempenho de linhas de transmissão e à compensação reativa em sistemas de potência.

O diagrama esquemático mostrado na Figura II-1 representa uma única fase de uma linha de transmissão, de extensão l , e considera que os parâmetros dessa linha estão uniformemente distribuídos em sua extensão. Nessa figura, está destacada uma seção diferencial de comprimento dx , localizado a uma distância x do terminal receptor, onde zdx e ydx são, respectivamente, os elementos diferenciais de impedância série e admitância em derivação da linha de transmissão. As variáveis V e I representam os fasores de tensão e corrente e os índices “e” e “r” referem-se aos terminais emissor e receptor da linha de transmissão.

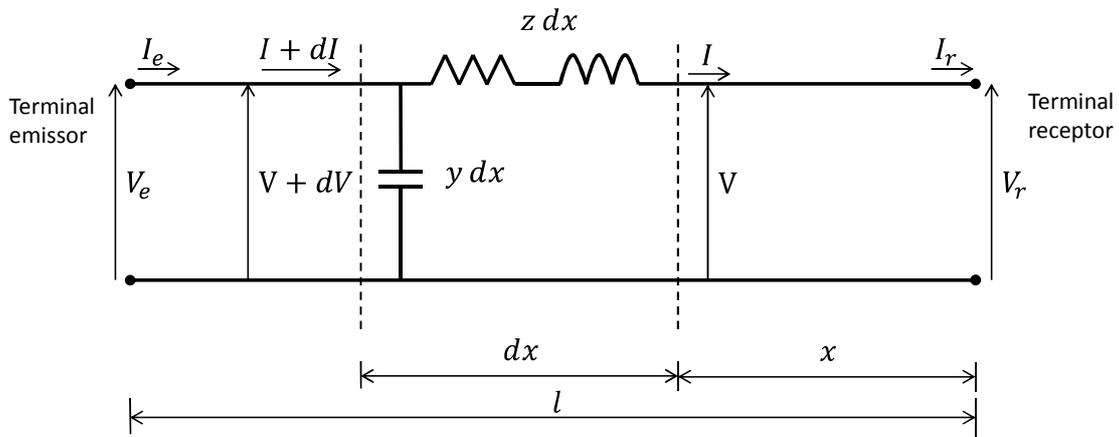


Figura II-1 – Diagrama esquemático simplificado de uma linha de transmissão.

Considerando a seção diferencial dessa linha de transmissão podemos obter as relações diferenciais entre tensões e correntes mostradas nas equações (II-1) e (II-2).

$$\frac{dV}{dx} = Iz \quad \text{(II-1)}$$

$$\frac{dI}{dx} = Vy \quad \text{(II-2)}$$

Diferenciando essas equações em relação à variável x , são obtidas as seguintes equações:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = Iyz \quad \text{(II-3)}$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = Vyz \quad \text{(II-4)}$$

A solução geral para as equações (II-3) e (II-4) podem ser estabelecidas analisando-se as condições de contorno no terminal receptor da linha. Nesse terminal, o valor da variável x é zero e os valores de tensão e corrente também são conhecidos e são iguais a V_r e I_r respectivamente. Dadas essas condições, os valores de tensão e corrente em qualquer ponto de uma linha de transmissão podem ser obtidos pelas equações (II-5) e (II-6) a seguir.

$$V = \frac{V_r + I_r Z_c}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_r - I_r Z_c}{2} e^{-\gamma x} \quad (\text{II-5})$$

$$I = \frac{V_r/Z_c + I_r}{2} e^{\gamma x} - \frac{V_r/Z_c - I_r}{2} e^{-\gamma x} \quad (\text{II-6})$$

onde:

$Z_c = \sqrt{z/y}$ é a impedância característica da linha

$\gamma = \sqrt{zy} = \alpha + j\beta$ é a constante de propagação que define a amplitude e a fase da onda ao longo da linha, onde α é a constante de atenuação [Néper/m] e β é a constante de fase da linha [rad/m].

Se forem desprezadas as perdas nas linhas de transmissão, ou seja, considerando-se que $R \ll \omega L$ e que a condutância é praticamente nula, as equações (II-5) e (II-6) podem ser simplificadas dando origem às equações (II-7) e (II-8) a seguir.

$$V = V_r \cos \beta x + jZ_c I_r \sin \beta x \quad (\text{II-7})$$

$$I = I_r \cos \beta x + j(V_r/Z_c) \sin \beta x \quad (\text{II-8})$$

Essas equações podem ser utilizadas na obtenção de relações que representem o fluxo de potência ativa e reativa entre os terminais receptor e emissor de uma linha de transmissão. Adotando a premissa de que a linha de transmissão não apresenta perdas, é

possível reescrever as equações (II-7) e (II-8) em termos da potência ativa P_r e potência reativa Q_r requeridas no terminal receptor.

Expressando I_r em termos de P_r e Q_r na equação (II-7) é possível obter a seguinte expressão:

$$V_e = V_r \cos \beta l + jZ_c \sin \beta l \left(\frac{P_r - jQ_r}{V_r^*} \right) \quad (\text{II-9})$$

Considerando V_r como o fasor de referência e δ o ângulo pelo qual V_e está adiantado de V_r , a equação (II-9) pode ser reescrita dando origem à equação (II-10).

$$V_e (\cos \delta + j \sin \delta) = V_r \cos \beta l + jZ_c \sin \beta l \left(\frac{P_r - jQ_r}{V_r^*} \right) \quad (\text{II-10})$$

Igualando as partes real e imaginária da equação anterior, obtém-se as seguintes expressões para as potências ativa e reativa no terminal receptor de uma linha de transmissão:

$$P_r = \frac{V_e V_r}{Z_c \sin \beta l} \sin \delta \quad (\text{II-11})$$

$$Q_r = \frac{V_r (V_e \cos \delta - V_r \cos \beta l)}{Z_c \sin \beta l} \quad (\text{II-12})$$

As equações (II-11) e (II-12) apresentam importantes expressões para o fluxo das potências ativa e reativa em linhas de transmissão. Em termos da transferência de potência ativa pode-se perceber, pela análise da equação (II-11), que a máxima transferência de potência está associada não só aos parâmetros da linha, mas também às suas tensões terminais e ao ângulo de carga.

Nessa equação, percebe-se que se forem mantidas as tensões terminais constantes e não havendo nenhum controle sobre os parâmetros da linha de transmissão, a potência transmitida varia apenas função do ângulo de carga. A Figura II-2 exemplifica essa

relação considerando uma linha de transmissão de 300km de extensão com um valor de constante de fase β de 0.0013rad/m. Os valores de potência mostrados nessa figura foram normalizados em função da potência natural da linha (P_n) e as magnitudes das tensões terminais foram consideradas constantes e iguais a 1pu.

Pela análise da Figura II-3, pode-se perceber que a máxima transferência de potência ocorre quando o ângulo de carga atinge 90°. A partir desse ponto qualquer aumento no ângulo de carga acarretará em uma diminuição da potência transmitida e será atingido um ponto instável para o sistema de transmissão.

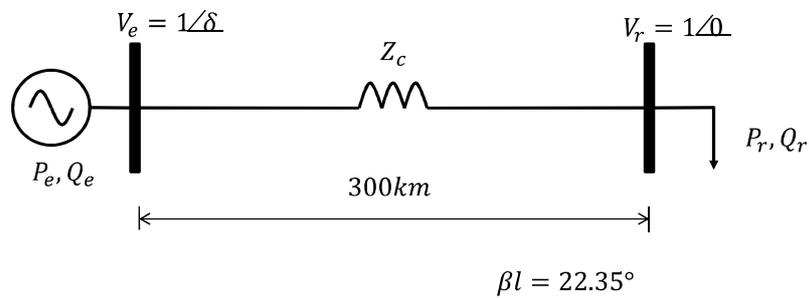


Figura II-2 – Diagrama simplificado de uma linha de transmissão.

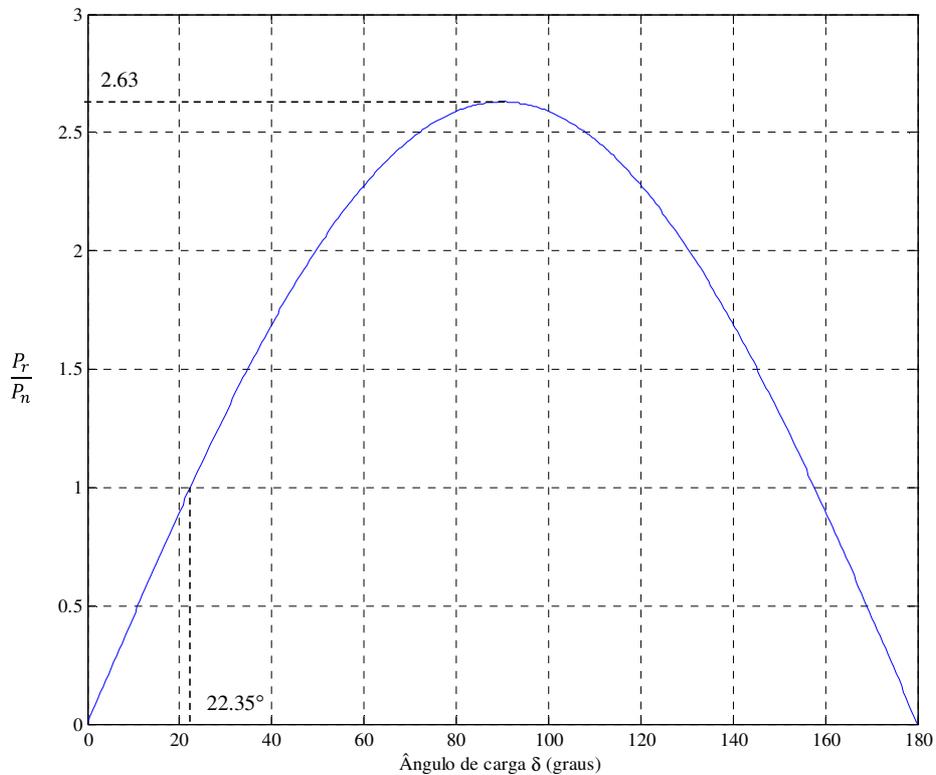


Figura II-3 – Curva característica Potência x Ângulo de carga

É importante destacar que as condições descritas anteriormente são bastante idealizadas, uma vez que não são consideradas variações nas magnitudes das tensões terminais decorrentes do aumento no fluxo da linha de transmissão. No entanto, essa análise simplificada permite obter informações importantes acerca do desempenho de linhas de transmissão e da relação entre o ângulo de carga e a potência ativa transmitida.

Outra característica importante para análise do desempenho de linhas de transmissão é a alteração da potência reativa requerida pelo sistema de transmissão para uma dada variação da potência ativa transmitida. A relação entre essas grandezas é dada pelas equações (II-12), para o terminal receptor, e (II-13) para o terminal emissor.

$$Q_e = \frac{V_e(V_r \cos \delta - V_e \cos \beta l)}{Z_c \sin \beta l} = -Q_r \quad (\text{II-13})$$

A Figura II-4 mostra a variação da potência reativa em função da alteração da potência ativa da carga para o mesmo sistema apresentado anteriormente. Nessa figura tanto os valores de potência ativa quanto reativa foram normalizados em função da potência natural da linha de transmissão.

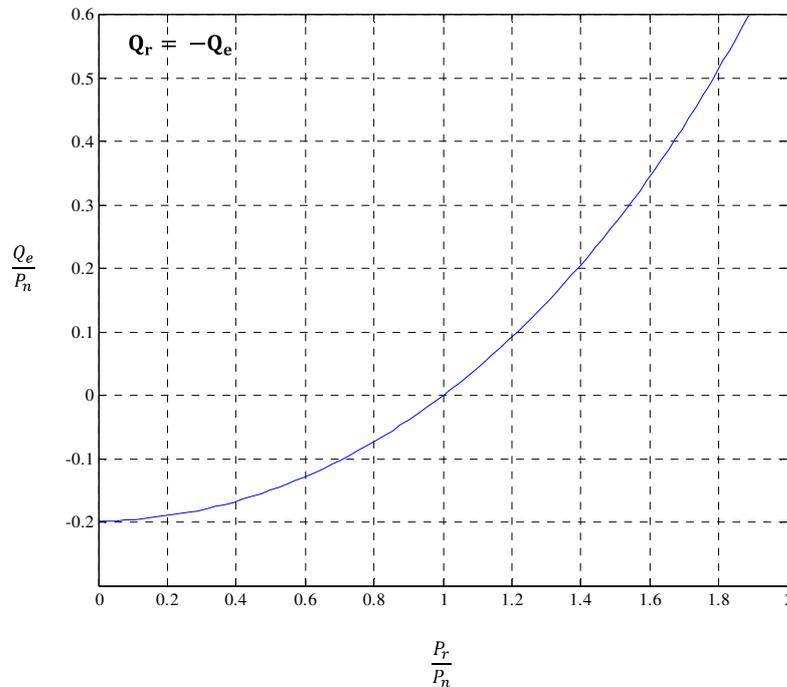


Figura II-4 – Potência reativa requerida no terminal emissor da linha em função da potência ativa transmitida.

Pela análise da Figura II-4 percebe-se a existência de três diferentes pontos de operação relacionados à demanda de potência reativa em linhas de transmissão. Quando $P_r < P_n$ há um excesso de potência reativa gerada pela linha e, como consequência, $Q_r > 0$ e $Q_s < 0$. Esses valores indicam uma injeção de potência reativa tanto no sistema receptor quanto no emissor. Por outro lado, quando $P_r > P_n$, a linha absorve potência reativa por ambos os terminais sendo $Q_r < 0$ e $Q_s > 0$. Por fim, apenas quando $P_r = P_n$ a linha de transmissão não absorve nem injeta potência reativa em seus terminais.

Cabe destacar que em condições normais de operação, o carregamento das linhas de transmissão pode variar substancialmente durante um ciclo de carga diário, o que faz com que sua demanda de potência reativa se altere conforme descrito anteriormente. De forma a evitar que essas alterações de demanda provoquem variações indesejáveis nos perfis de tensão, é imprescindível que haja recursos de controle capazes de suprir adequadamente a demanda por potência reativa.

Como a potência reativa não pode ser transmitida por longas distâncias, uma vez que demandaria um gradiente de tensão elevado entre os diferentes pontos do sistema, a forma mais eficiente de se realizar o controle de tensão é local, por meio da atuação de equipamentos de compensação reativa.

Os equipamentos de compensação reativa mais comumente utilizados são os bancos de reatores e de capacitores paralelos. Ambos apresentam característica de compensação passiva, ou seja, não possuem nenhum tipo de controle que possibilite alteração na potência reativa gerada (capacitores) ou absorvida (reatores) e contribuem para o controle de tensão modificando as características da rede.

No caso dos bancos de reatores, comumente utilizados para compensar os efeitos capacitivos das linhas de transmissão, a compensação reativa tem efeito sobre a impedância característica Z_c , aumentando-a, e sobre a constante de fase β , diminuindo-a. De forma análoga, uma compensação reativa capacitiva contribui com a diminuição do valor de Z_c e com o aumento de β . Essas relações podem ser identificadas nas equações (II-14) e (II-15) onde a variável B_{sh} representa o valor da susceptância em derivação referente à compensação indutiva ou capacitiva adicional, B_c representa a

susceptância original da linha de transmissão e as variáveis Z'_c e com o aumento de β' representam os valores de impedância característica e constante de fase do sistema compensado.

$$Z'_c = Z_c \sqrt{B_c / (B_c + B_{sh})} \quad (\text{II-14})$$

$$\beta' = \beta \sqrt{(1 + B_{sh} / B_c)} \quad (\text{II-15})$$

Essa alteração dos parâmetros Z_c e β afeta também o valor máximo de transferência de potência entre os terminais da linha de transmissão. Conforme pode ser observado na equação (II-11), tanto a diminuição da impedância característica como do comprimento elétrico da linha, dado por βl , resulta em um aumento no valor máximo da potência ativa que pode ser transmitida.

Para exemplificar esse o efeito A Figura II-5 mostra as curvas características de potência e ângulo de carga para quatro diferentes condições de compensação reativa. Utilizando o mesmo exemplo anterior, onde foi analisada uma linha de transmissão com 300km de extensão, foram traçadas as curvas de potência ativa em função do ângulo de carga para as seguintes condições:

- Condição base, ou seja, sem a adição de nenhum equipamento de compensação reativa.
- Incluindo dois bancos de reatores nas extremidades da linha de transmissão compensando 70% da sua susceptância.
- Incluindo dois bancos de capacitores nas extremidades da linha de transmissão com susceptância igual a 70% da susceptância da linha.
- Incluindo dois dispositivos de susceptância variável nas extremidades da linha de transmissão permitindo uma variação de até 5 vezes o valor da sua susceptância da linha.

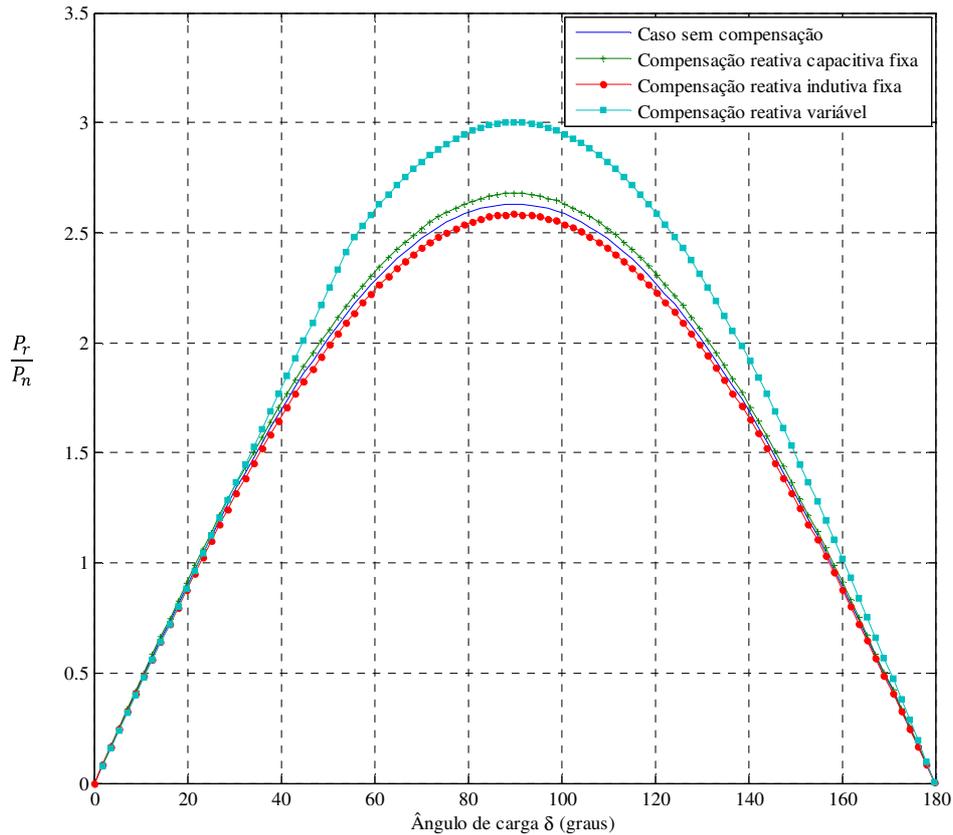


Figura II-5 – Efeito da compensação reativa em derivação na curva característica Potência x Ângulo de carga.

Esse exemplo mostra, de forma bem simplificada, a influência de elementos de compensação reativa, no desempenho das linhas de transmissão. Destaca-se na Figura II-5, as variações em torno do valor máximo de potência transmitida para os diferentes pontos de operação e, também, o comportamento da linha frente à atuação de um equipamento de compensação variável, que faz com que a relação entre potência transmitida e ângulo de carga apresente uma variação linear até o ponto onde se atinge o limite estabelecido para o equipamento. Após esse ponto, o comportamento da curva se assemelha ao de um banco de capacitores fixo de mesma susceptância.

Neste mesmo exemplo, também foram traçadas as curvas características de potência reativa requerida pela linha de transmissão em função do ângulo de carga. A Figura II-6 a seguir apresenta as curvas obtidas para a configuração base, que não possui nenhum dispositivo de compensação reativa, e para as configurações que consideram a implantação de equipamentos de compensação reativa fixa nas extremidades da linha de

transmissão. Em todos os casos avaliados foi considerado que as tensões nos terminais da linha mantiveram-se constantes e iguais a 1pu.

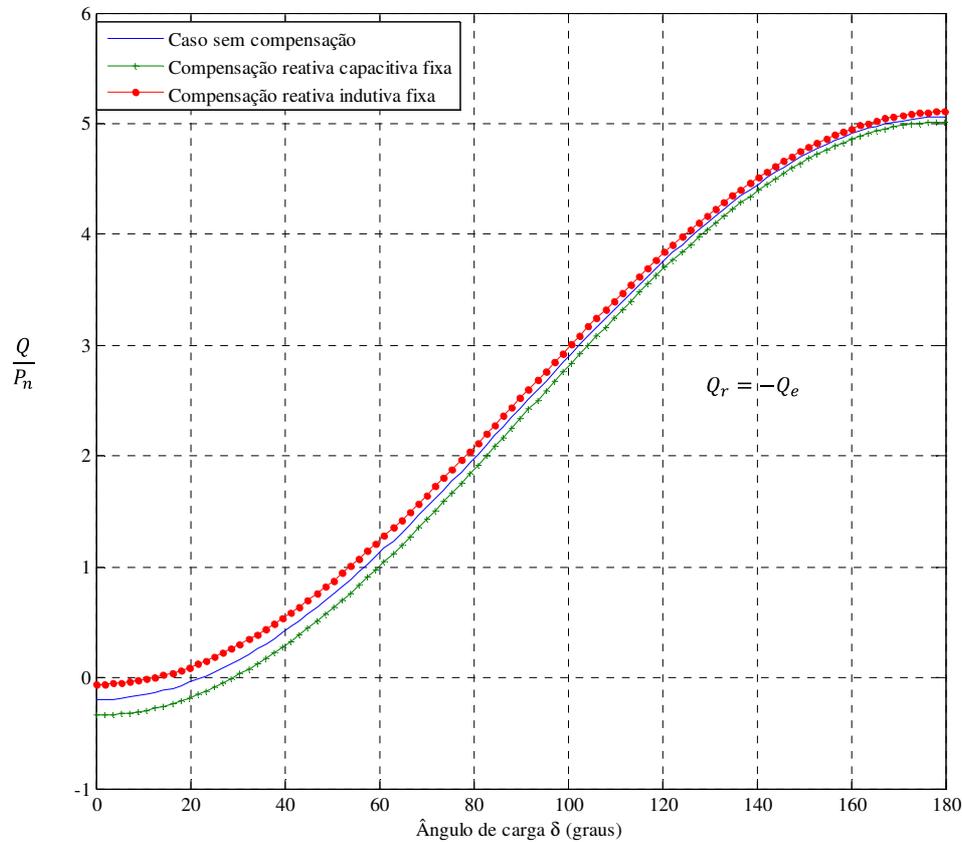


Figura II-6 – Efeito da compensação reativa em derivação na curva característica Potência Reativa x Ângulo de carga.

Conforme pôde ser observado na figura anterior, o aumento do ângulo de carga acarreta uma maior demanda por potência reativa na linha de transmissão. Essa demanda torna-se excessiva para valores elevados de ângulo de carga e, na condição de máxima transferência de potência ativa ($\delta = 90^\circ$), o valor de potência reativa requerida pela linha de transmissão é igual ao valor da potência ativa transmitida. Nesta figura, percebe-se ainda que a inserção de equipamentos de compensação reativa em derivação promove um deslocamento da curva característica original do sistema, alterando as demandas por potência reativa para os diversos ângulos de carga.

Todas as análises anteriores foram realizadas enfocando elementos conectados em paralelo para compensação reativa. Elementos conectados em série, como os capacitores série, também possuem grande influência na regulação de tensão em sistemas de

potência. No entanto, esses dispositivos não serão abordados com maior ênfase visto que o foco desse trabalho está associado à performance de reatores de saturação controlada, que são elementos de compensação em derivação.

II.3 Conceitos básicos sobre reatores de saturação controlada.

Os reatores a núcleo saturado são dispositivos cujo princípio de funcionamento está intimamente ligado às propriedades dos materiais ferromagnéticos. De uma forma geral, esses dispositivos de compensação reativa são compostos por um núcleo ferromagnético, de estrutura similar à dos transformadores de potência convencionais, sobre o qual são montados enrolamentos com arranjos especiais visando o controle do nível de saturação do núcleo.

O controle da saturação é uma peça fundamental no funcionamento do reator controlado do tipo MCSR. Nesse reator, o núcleo está exposto simultaneamente a correntes de excitação com componentes alternadas e contínuas. As componentes alternadas são provenientes dos enrolamentos primários, que são conectados diretamente à rede CA, e as componentes contínuas são originárias dos enrolamentos secundários, alimentados com tensão CC controlada. A partir da variação da componente CC dos enrolamentos secundários é possível alterar o ponto de operação do reator levando o núcleo a operar dentro da zona de saturação.

A Figura II-7 mostra uma curva de magnetização característica ($B \times H$) de um núcleo ferromagnético onde pode ser percebida a influência que o nível de saturação do núcleo possui sobre a magnitude da corrente de excitação. Nota-se que quando o núcleo opera com densidade de fluxo abaixo do seu valor de saturação, denotado pela variável B_s do gráfico, a magnitude da corrente associada à variação do fluxo é relativamente menor do que a apresentada quando o ponto de operação se desloca para a zona de saturação.

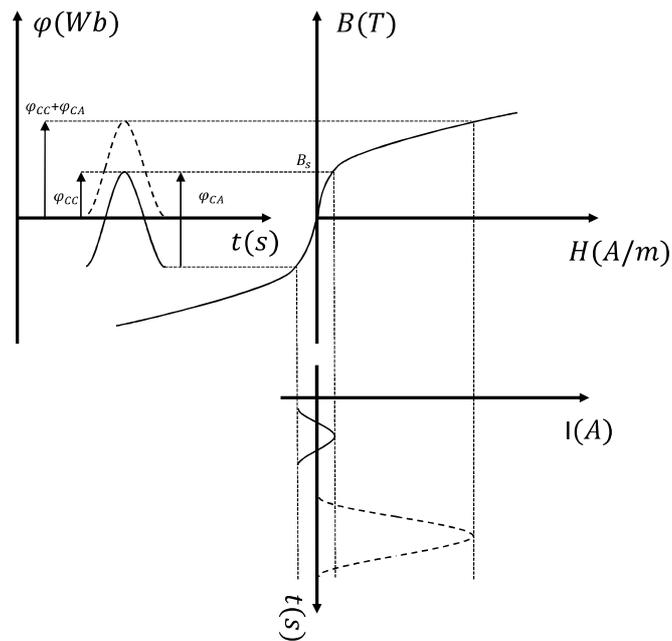


Figura II-7 –Efeito da componente contínua do fluxo na magnitude da corrente de excitação.

Nessa figura também é ressaltado que o deslocamento do ponto de operação é decorrente da existência de um fluxo adicional de componente contínua, denotado pela variável φ_{CC} , que quando somada à componente senoidal φ_{CA} , leva o núcleo a operar na região de saturação. Neste exemplo, a magnitude da corrente de excitação CC é de tal sorte que durante metade de um ciclo da componente alternada, o núcleo encontra-se saturado.

O controle da componente contínua permite, na verdade, alterar a permeabilidade equivalente do núcleo, que diminui substancialmente à medida que este passa a operar cada vez mais tempo dentro da zona de saturação. Essa diminuição da permeabilidade equivalente resulta, também, em uma diminuição na indutância equivalente do reator e, conseqüentemente, em um aumento da potência reativa consumida por esse equipamento.

Quanto maior for a componente contínua, levando-se em consideração que não há alteração na tensão do terminal CA, maior será a magnitude da corrente de excitação requerida nos enrolamentos primários, pois nessa condição pequenas variações no fluxo alternado correspondem a grandes variações nas magnitudes das correntes.

Utilizando-se desse princípio básico, os reatores de saturação controlada permitem variar sua capacidade desde valores relativamente baixos até a capacidade nominal de forma suave e contínua. No entanto, esse controle é apenas parte das características que influenciam o desempenho desse equipamento. Nas seções subsequentes serão abordados alguns aspectos relacionados aos princípios de funcionamento e à estrutura física desse reator, com ênfase na disposição e nos arranjos dos enrolamentos primários e secundários na estrutura do núcleo.

II.4 Estrutura física do MCSR.

A estrutura física padrão de uma unidade monofásica de um MCSR, esquematizada na Figura II-8, apresenta dois enrolamentos primários e dois secundários. Os enrolamentos primários, também chamados de enrolamentos de trabalho, estão conectados em paralelo diretamente à rede de alta tensão. Os enrolamentos secundários, ou de controle, são conectados em série, com polaridades opostas, e são alimentados por uma tensão controlada proveniente de um retificador CA-CC.

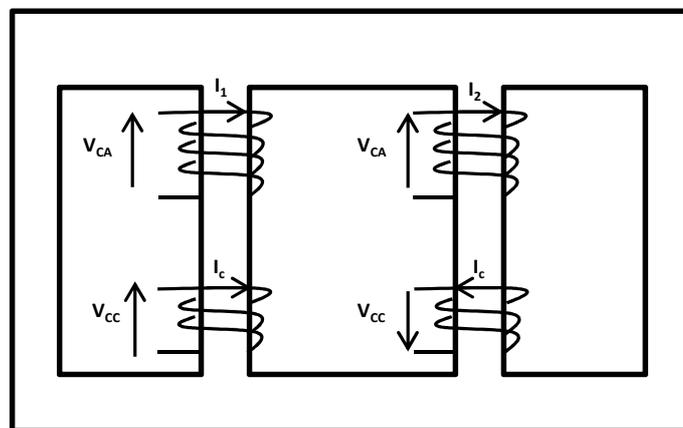


Figura II-8 –Estrutura física padrão de uma unidade monofásica de um MCSR.

Nessa mesma figura, nota-se que o núcleo de cada unidade monofásica é composto por quatro colunas dispostas simetricamente em relação ao eixo central. Nas duas colunas internas são montados os enrolamentos de trabalho e de controle, que são isolados eletricamente e dispostos como mostrado na Figura II-9. Geralmente, não há nenhum

tipo de enrolamento nas colunas externas, que servem basicamente para prover um caminho de retorno para o fluxo alternado.

É importante destacar que apenas nas colunas principais há a sobreposição dos fluxos alternado e contínuo que provocam a saturação do núcleo. Como os enrolamentos de trabalho são dispostos simetricamente e são conectados em paralelo, as componentes alternadas do fluxo magnético têm a mesma fase e magnitude, o que faz com que haja um cancelamento mútuo desse fluxo nas colunas central superior e central inferior.

Um raciocínio análogo pode ser utilizado para a componente contínua do fluxo magnético. Com os enrolamentos de controle conectados em série e com polaridades opostas, o fluxo CC possui a mesma magnitude, porém com direções opostas, o que faz com que o circuito fechado, representado na Figura II-9 por linhas contínuas, seja o caminho mandatório para esse fluxo.

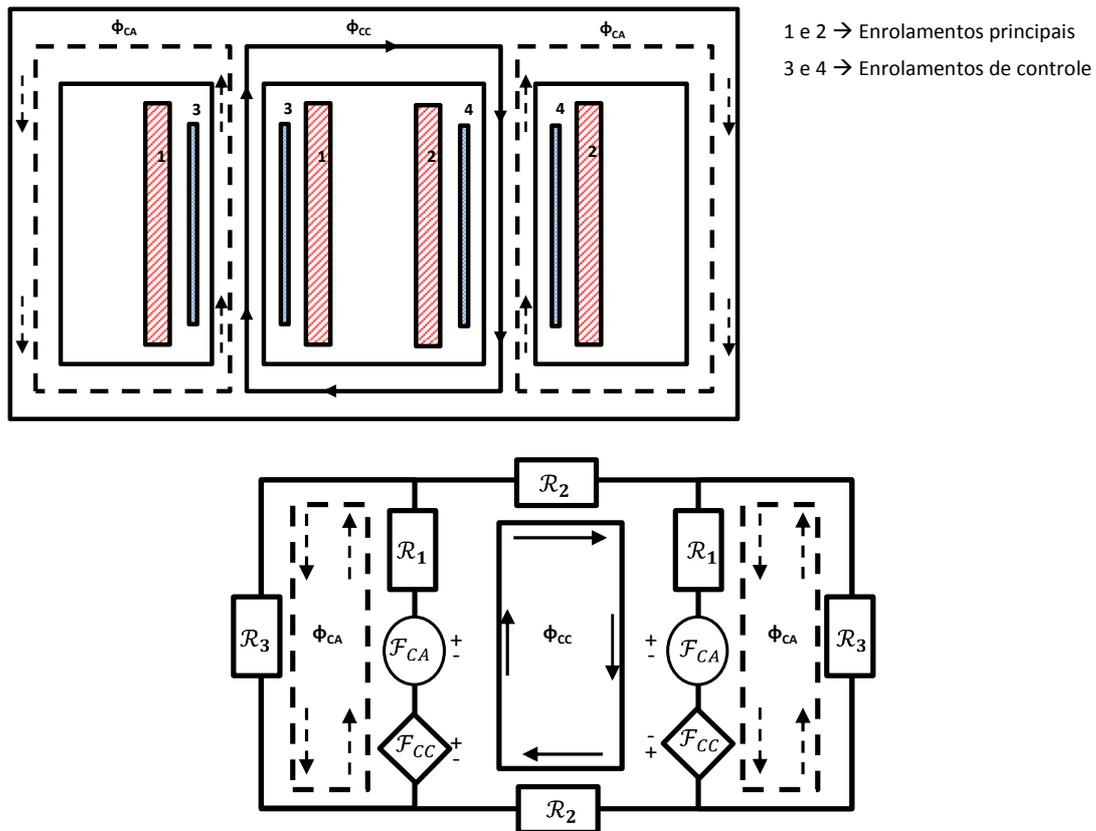


Figura II-9 – Corte transversal de uma unidade monofásica de um MCSR e circuito magnético equivalente.

As unidades monofásicas apresentadas são utilizadas normalmente na composição de bancos de reatores para a conexão em redes de alta e extra alta tensão. Apesar de ser perfeitamente viável a construção de um reator trifásico utilizando apenas um único núcleo [4], os bancos de reatores monofásicos são preferencialmente utilizados nesses níveis de tensão. Essa prática está associada não só a uma redução das dimensões do núcleo, que se altera em função da capacidade do equipamento, mas também a um aumento de confiabilidade na operação devido à possibilidade de substituir rapidamente unidades defeituosas por fases reserva.

Na configuração composta por bancos de reatores, a conexão dos enrolamentos de trabalho é normalmente realizada em estrela com ponto de neutro acessível. Este ponto pode estar solidamente aterrado, como ocorre na maioria dos casos, ou pode estar conectado à terra por meio de um reator de neutro. Os enrolamentos de controle, por sua vez, são conectados em série de tal forma que os enrolamentos das fases A, B e C estejam divididos em dois grupos com polaridades opostas. Esses grupos são então conectados em paralelo, conforme mostrado na Figura II-10, e alimentados com uma tensão contínua.

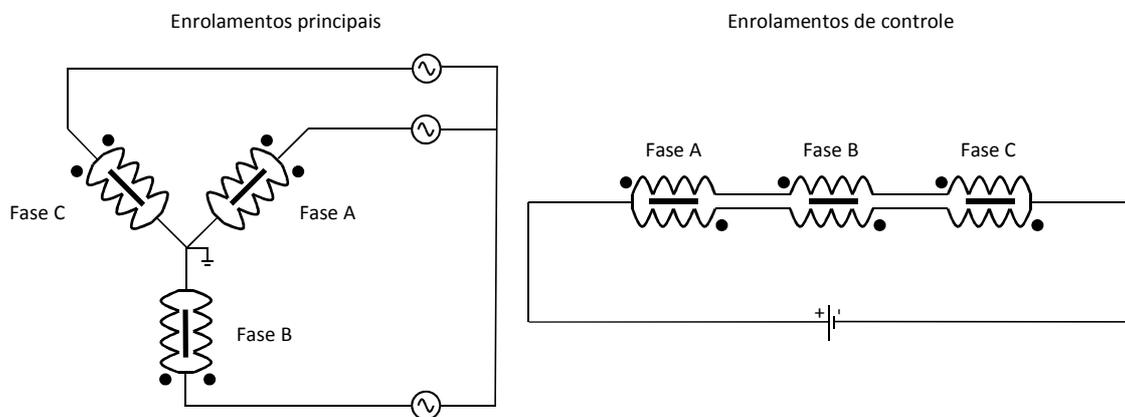


Figura II-10 –Conexões dos enrolamentos em cada uma das fases de um MSCR trifásico.

II.5 Princípio de funcionamento do MCSR.

Conforme descrito anteriormente, o núcleo do reator saturado está exposto simultaneamente a correntes de excitação com componentes alternadas e contínuas. Em função do arranjo e da disposição dos enrolamentos primários e secundários, assim

como da geometria do núcleo ferromagnético, os níveis de saturação das colunas principais apresentam variações diferenciadas que dependem fortemente da corrente de excitação CC.

Essa corrente, ao circular pelos enrolamentos de controle, estabelece fluxos contínuos com direções opostas em cada uma das colunas principais do reator. Quando somados aos fluxos alternados, que possuem mesma magnitude e fase, provocam variações periódicas na densidade de fluxo no núcleo, que pode atingir a saturação em momentos distintos para cada coluna.

Para exemplificar essa questão, a Figura II-11 destaca dois diferentes pontos de operação do reator saturado. No primeiro, representado por uma linha contínua, a componente φ_{CC} é nula e não há diferença entre as densidades de fluxo (B_{CA}) nas colunas de números 1 e 2. No segundo ponto de operação, representado pelas curvas tracejadas, a componente contínua do fluxo (φ_{CC}) (vide Figura II-9) eleva a densidade de fluxo no núcleo ($B_{CC} + B_{CA}$) de tal forma que durante metade do período de oscilação da componente alternada (φ_{CA}), as colunas de números 1 e 2 encontram-se saturadas.

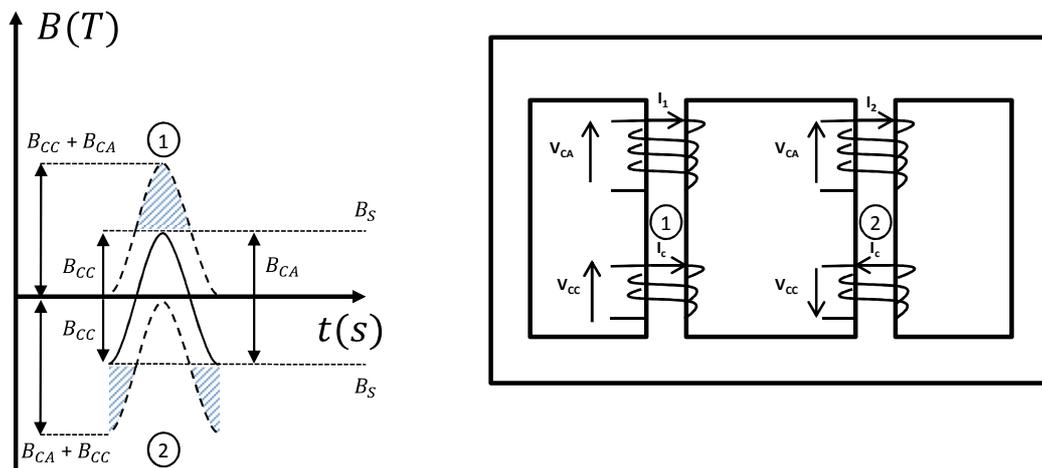


Figura II-11 – Alterações nas densidades de fluxo das colunas principais do reator.

É importante destacar que a transição entre os pontos de operação mostrados na Figura II-11 acontece de forma contínua e a velocidade em que essa transição ocorre é proporcional à variação da tensão de controle do reator. Outro ponto importante refere-

se à determinação do grau de saturação do núcleo (β), que pode ser definido segundo a equação (II-16) em função das variáveis B_{CC} e B_S considerando-se $B_{CA} = B_S$.

$$\beta = 2 \times \cos^{-1} \left(\frac{B_S - B_{CC}}{B_S} \right) \quad (\text{II-16})$$

Nessa equação, o grau de saturação β determina o período no qual a densidade de fluxo do núcleo apresenta valores superiores à densidade do ponto de saturação da curva de magnetização do reator. Por esse equacionamento, o ângulo β pode variar entre 0, onde $B_{CC} = 0$ e o núcleo não atinge a zona de saturação; e 2π , para o caso onde $B_{CC} = 2 \times B_S$ e o reator opera constantemente saturado.

Em termos práticos, é possível determinar três estados operativos básicos para os reatores saturados baseando-se na definição do grau de saturação e sua correlação com o consumo de potência reativa desse equipamento. De forma análoga ao que ocorre com o grau de saturação, a variação do consumo de potência reativa varia desde valores relativamente baixos, que correspondem a $\beta = 0$, até o seu valor máximo, onde $\beta = 2\pi$. Entre estes valores extremos de β , há uma série de estados operativos que podem ser agrupados em um único conjunto classificado como de consumo intermediário de potência reativa.

As principais características desses estados operativos, classificados como estados de *consumo mínimo*, *consumo intermediário* e *consumo máximo* de potência reativa serão detalhadas a seguir.

1. Consumo mínimo de potência reativa e grau de saturação $\beta = 0$.

Quando a tensão de excitação CC é nula, as componentes alternadas do fluxo são de tal magnitude que não permitem que a densidade de fluxo no interior do núcleo atinja a zona de saturação. Nessa condição, as duas colunas principais não estão saturadas, as correntes nos enrolamentos de trabalho possuem pequenas magnitudes e o reator apresenta o menor consumo de potência reativa possível.

Essa condição é retratada na Figura II-12 a seguir onde B_m representa a amplitude da componente alternada da indução magnética B_{CA} . Cumpre notar que durante todo o período $B_{\max} \leq B_s$ em ambas as colunas principais do reator.

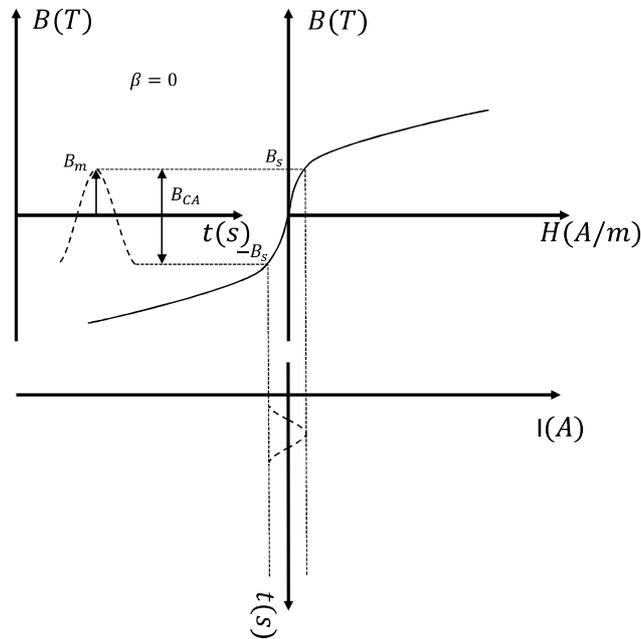


Figura II-12 –Densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético e corrente primária obtidos com corrente de excitação CC nula.

2. Consumo intermediário de potência reativa e grau de saturação $0 < \beta < 2\pi$.

O aumento da corrente nos enrolamentos de controle promove a alteração na densidade de fluxo em cada uma das colunas principais do reator, sendo possível identificar três diferentes condições de saturação do núcleo durante um período de oscilação da componente alternada B_{CA} . Com o grau de saturação apresentando valores contidos entre 0 e π , as colunas 1 e 2 não atingem a saturação simultaneamente. Ora a coluna 1 está saturada ora a coluna 2 encontra-se neste estado.

Na condição limite, ou seja, com grau de saturação exatamente igual a π , as colunas principais encontram-se saturadas durante metade do período sem que haja concomitância em seus estados de saturação. Esse ponto de operação é extremamente importante para este tipo de reator, pois possui algumas propriedades interessantes

relacionadas à corrente primária, que apresenta uma diminuição na distorção da sua forma de onda devido à simetria existente entre as correntes que circulam nos enrolamentos 1 e 2. Esta característica está delineada na Figura II-13, a seguir, onde são destacadas as correntes dos enrolamentos primários 1 e 2 denotadas, respectivamente, pelas variáveis I_1 e I_2 .

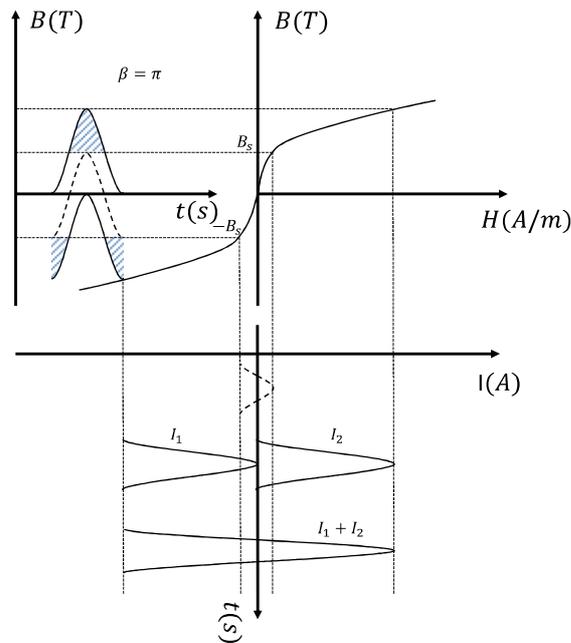


Figura II-13 –Densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético e corrente primária obtidos com corrente de excitação diferente de zero e $\beta = \pi$.

Por fim, quando o grau de saturação alcança valores entre π e 2π , há necessariamente períodos de simultaneidade na saturação das colunas principais do reator. Esse período de simultaneidade aumenta gradativamente até o ponto em que $\beta = 2\pi$ e ambas as colunas operam completamente saturadas.

Estas três condições são mostradas na Figura II-14 a seguir, onde são destacados os períodos de saturação das colunas principais do reator.

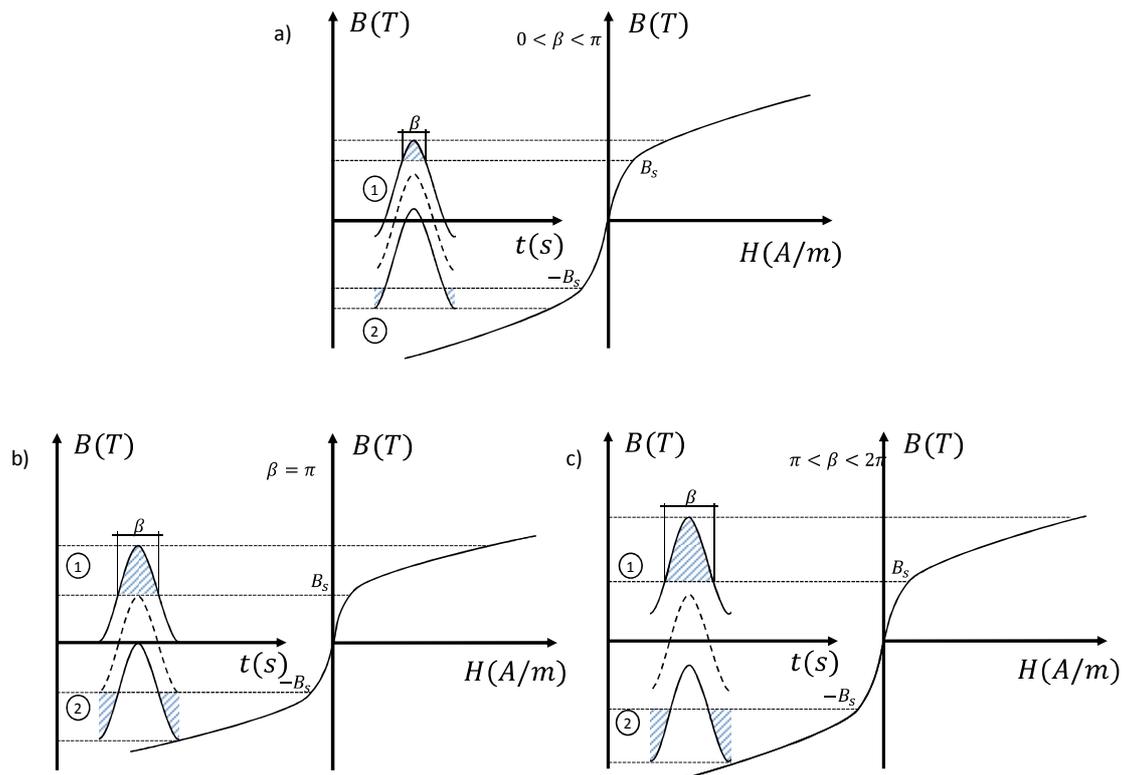


Figura II-14 –Variação na densidade de fluxo magnético e intensidade de campo magnético devido ao aumento na corrente de excitação CC: (a) ponto de operação onde não há simultaneidade na saturação das colunas principais; (b) ponto de operação onde a saturação ocorre durante metade de um período; (c) ponto de operação onde há simultaneidade no período de saturação das colunas principais.

3. Máximo consumo de potência reativa e grau de saturação $\beta = 2\pi$.

Neste ponto de operação, o grau de saturação β possui valor igual a 2π e o reator de saturação controlada atinge o ponto de operação de máximo consumo de potência reativa. Nessa condição, o fluxo estabelecido pela corrente de controle mantém as colunas principais do núcleo constantemente saturadas e $B_{CC} = 2 \times B_s$.

A partir deste ponto, qualquer incremento na tensão dos enrolamentos de controle passa a ter pouca influência na magnitude das correntes primárias do reator. Ao operar constantemente na zona de saturação, são necessárias grandes variações nas tensões dos enrolamentos de controle para provocar um aumento na densidade de fluxo no interior das colunas principais e, conseqüentemente, qualquer esforço de controle realizado no sentido de se aumentar a tensão CC surte pouco efeito nas correntes primárias do reator.

A Figura II-15 mostra as relações entre a densidade de fluxo, a intensidade de campo e a magnitude das correntes primárias do reator quando o grau de saturação atinge seu valor máximo.

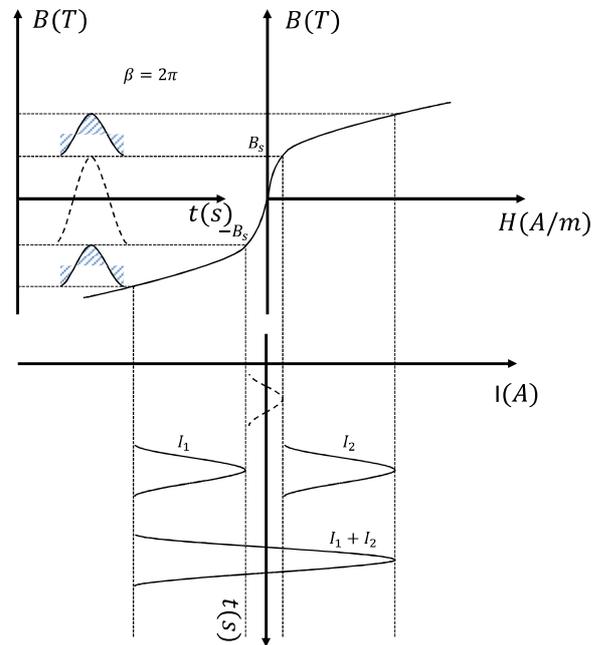


Figura II-15 –Densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético e corrente primária obtidos com corrente de excitação diferente de zero e $\beta = 2\pi$.

II.6 Cálculo da indutância equivalente do MCSR.

Os estados operativos descritos na seção anterior foram classificados de acordo com o consumo de potência reativa e o grau de saturação do núcleo ferromagnético do reator saturado. Conforme mencionado anteriormente, a variação do grau de saturação acarreta uma alteração da magnitude das correntes primárias do reator e, conseqüentemente, do seu consumo de potência reativa.

Essa variação do consumo de potência reativa está diretamente ligada à mudança na permeabilidade magnética do núcleo do reator quando este opera com diferentes graus de saturação. A alteração na permeabilidade magnética tem influência direta no valor da indutância do reator, que diminui à medida que o nível de saturação do núcleo aumenta. Além disso, também ocorrem variações na magnitude e na forma de onda das correntes

primárias, que tendem a apresentar maiores distorções em condições de consumo reduzido de potência reativa.

A alteração no valor da indutância do MCSR pode ser avaliada a partir da análise da Figura II-16, que apresenta um circuito equivalente simplificado para uma unidade monofásica de um MCSR, e das características físicas já descritas para esse tipo de tipo de reator.

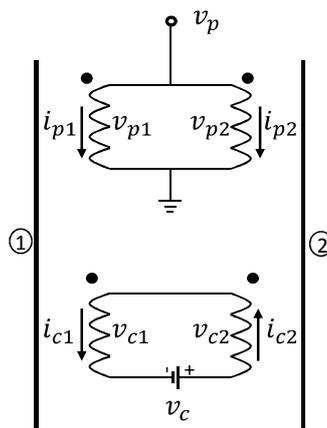


Figura II-16 –Circuito equivalente simplificado de uma unidade monofásica de um MCSR.

Cumprir notar, que em função da disposição dos enrolamentos primários e secundários em torno das colunas principais, torna-se extremamente importante levar em consideração os fluxos de dispersão entre os enrolamentos. Além disso, é necessário adotar algumas simplificações e considerações, destacadas nos itens subsequentes e descritos nas referências [4], [21], [22] e [26], para que se possam obter expressões para a indutância equivalente deste reator nos principais pontos de operação existentes.

Considerações e simplificações adotadas:

1. As perdas ôhmicas nos enrolamentos de controle são desprezíveis. Dessa forma, pode-se considerar que, em regime permanente, a tensão no terminal dos enrolamentos de controle é praticamente nula, uma vez que o circuito equivalente é, para efeitos de análise, puramente indutivo.
2. A relação entre a densidade de fluxo e a intensidade de campo magnético será dada pela Equação (II-17), onde foi adotada uma simplificação para uma curva

de saturação característica de materiais ferromagnéticos. Essa equação representa uma função linear por partes, onde a permeabilidade relativa do núcleo (μ_r) é aproximadamente igual a 1 na zona de saturação e é infinita para valores de densidade de fluxo menores do que B_s . Nesta simplificação, é desconsiderado o efeito da histerese.

$$H = f(B) = \begin{cases} 0, & \text{quando } B < B_s \\ (B - B_s)/\mu_r\mu_0, & \text{quando } B \geq B_s \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

3. As colunas de retorno do núcleo são dispostas simetricamente e não atingem a saturação em nenhuma das condições operativas. Considera-se, ainda, que estas colunas possuem permeabilidade relativa infinita e, dessa forma, não contribuem para aumentar o fluxo de dispersão no interior do reator.
4. O valor da indução magnética no interior das colunas principais é o mesmo em toda a sua extensão e a alteração nos níveis de saturação do núcleo conserva essa propriedade em todos os modos de operação.
5. Os parâmetros físicos de cada par de enrolamentos primários e secundários são idênticos, ou seja, não há diferença construtiva (altura, número de espiras, seção transversal) entre os enrolamentos primários de número 1 e 2 ou entre os enrolamentos secundários 1 e 2. Além disso, todos os enrolamentos possuem espessura desprezível.
6. Os enrolamentos de controle são dispostos internamente aos enrolamentos de trabalho e possuem ambos a mesma altura h . Conforme destacado na Figura II-17, a área da seção transversal delimitada pelos enrolamentos secundários e pela coluna principal do núcleo é denominada S_C . A área da seção transversal entre os enrolamentos de controle e de trabalho é denominada S_P e, finalmente, define-se $S_T = S_P + S_C$ como a área de seção transversal delimitada pelo enrolamento de trabalho e a coluna principal do reator.

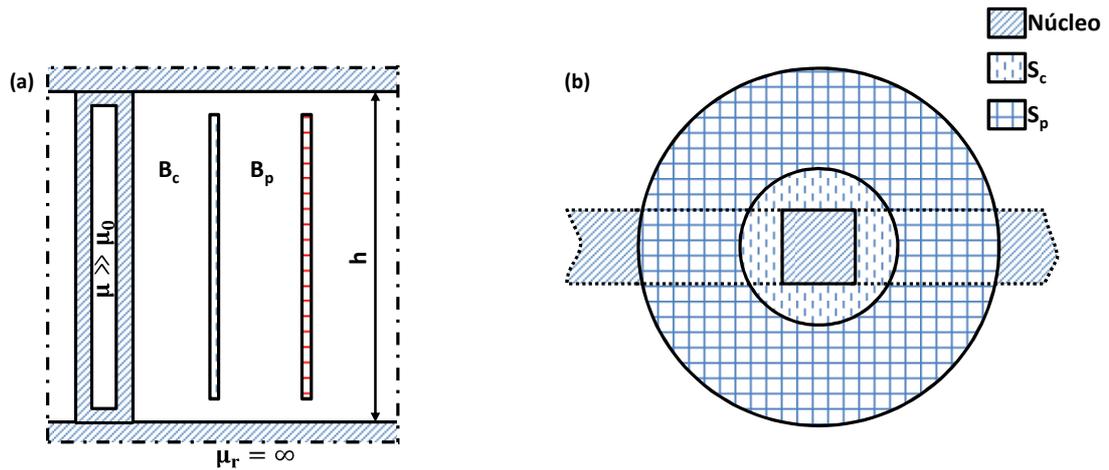


Figura II-17 – Figuras esquemáticas das seções transversais frontal (a) e superior (b) de uma coluna principal do reator saturado.

7. Os enrolamentos de trabalho e os de controle apresentam o mesmo número de espiras ($N_p = N_c = N$). Essa consideração apenas simplifica as expressões que envolvem as correntes e tensões dos enrolamentos, pois implica em uma relação de transformação $N_p/N_c = 1$.
8. A tensão aplicada nos enrolamentos de potência (v_p) é senoidal, com frequência de oscilação $f = \omega/2\pi$, valor rms V_p , e pode ser representada pela equação (II-18) a seguir.

$$v_p = \sqrt{2}V_p \sin \omega t \quad \text{(II-18)}$$
9. Todas as variáveis associadas a valores instantâneos das tensões ou correntes serão representadas por letras minúsculas enquanto os valores eficazes dessas grandezas adotarão letras maiúsculas nas suas representações.

Baseando-se nas considerações apresentadas, é possível desenvolver um conjunto de expressões que definem o valor da indutância equivalente do reator saturado para os diferentes pontos de operação descritos neste capítulo.

Considerando que a configuração dos enrolamentos é aquela apresentada na Figura II-16, é possível estabelecer as relações entre os as tensões e correntes dos enrolamentos primários e secundários apresentadas no conjunto de equações (II-19).

$$\left\{ \begin{array}{l} v_p = v_{p1} = v_{p2} \\ i_{p1} = i_{p2} = i_p/2 \\ v_c = v_{c1} + v_{c2} \\ i_c = i_{c1} = i_{c2} \end{array} \right. \quad \text{(II-19)}$$

As relações entre os fluxos e as densidades de fluxos nas colunas principais do reator podem ser obtidas ao se analisar as características físicas construtivas adotadas e as informações contidas na Figura II-17. No conjunto de equações (II-20) a seguir, os índices *1* e *2* referem-se, respectivamente, às grandezas ou variáveis associadas às colunas principais dos reator enquanto os índices *p* e *c* se referem aos enrolamentos de potência e de controle.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{p1} = \frac{L_{p1}I_{p1}}{NS_{p1}} \\ B_{p2} = \frac{L_{p2}I_{p2}}{NS_{p2}} \\ B_{p1} = B_{p2} = B_p = \frac{L_p I_p}{2NS_p} \\ \varphi_{p1} = \varphi_{p2} = B_{p1}S_{p1} = B_{p2}S_{p2} = B_p S_p \\ \varphi_{T1} = \varphi_{p1} + \varphi_{c1} \\ \varphi_{T2} = \varphi_{p2} + \varphi_{c2} \end{array} \right. \quad \text{(II-20)}$$

É importante destacar que no conjunto de equações (II-20) foi introduzida a variável L_p , que corresponde ao valor da indutância de dispersão associada apenas ao enrolamento primário. O cálculo desse valor de indutância só leva em consideração o fluxo de dispersão φ_p , que atravessa a superfície S_p delimitada pelos enrolamentos de trabalho e de controle. De forma análoga, também pode ser definida a indutância de dispersão L_c , cujo valor é obtido considerando somente o fluxo φ_c que atravessa a superfície S_c delimitada pelo enrolamento de controle e pelo núcleo do reator.

As expressões para as indutâncias de dispersão L_p e L_c podem ser obtidas de forma simples analisando-se a operação do núcleo na zona de saturação conforme descrito em [4] e [22]. Segundo a consideração 2, neste estado, as regiões denominadas S_p e S_c , bem como a própria coluna do reator, apresentam a mesma permeabilidade relativa ($\mu_r = 1$) e, portanto, levam esse equipamento a ter um comportamento similar ao de um reator com núcleo de ar.

Além disso, nessa condição, as indutâncias L_p e L_c possuem expressões semelhantes que correspondem às equações mostradas a seguir.

$$L_p = \frac{\mu_0 N^2 S_p}{h} \quad (\text{II-21})$$

$$L_c = \frac{\mu_0 N^2 S_c}{h} \quad (\text{II-22})$$

Tomando por base as equações (II-21) e (II-22) e as considerações 5 e 6 descritas anteriormente, pode-se concluir que a indutância de dispersão total (L_T), calculada em função do fluxo total φ_T que atravessa a superfície denominada S_T , pode ser dada pela soma do valor das indutâncias de dispersão L_p e L_c , conforme mostrado na equação (II-23).

$$L_T = L_p + L_c = \frac{\mu_0 N^2 S_T}{h} \quad (\text{II-23})$$

Dadas as expressões empregadas para o cálculo das indutâncias de dispersão do reator saturado, é possível desenvolver um conjunto de equações que permitem avaliar o valor da indutância equivalente desse equipamento nos principais pontos de operação estudados.

Para o estado operativo de mínimo consumo de potência reativa, onde ambas as colunas principais não estão saturadas e o valor da intensidade de campo no interior das colunas 1 e 2 é igual a zero, as seguintes expressões são válidas:

$$\begin{cases} NI_{p1} + NI_{c1} = 0 \\ NI_{p2} - NI_{c2} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

Pela análise das equações (II-19) e (II-24) pode-se concluir que a única solução que satisfaz simultaneamente a todas as equações e condições apresentadas é dada por $I_c = I_p = 0$. Essa solução implica na constatação de que só há corrente nos enrolamentos primários quando há saturação de pelo menos uma das colunas do núcleo ferromagnético e que, do ponto de vista do sistema para esse ponto de operação, o reator saturado se comporta como se tivesse uma indutância infinita.

No caso específico do estado operativo de consumo intermediário em que o grau de saturação $\beta = \pi$, ou seja, no ponto de operação em que as colunas principais operam saturadas exatamente durante metade de um período, é necessário avaliar separadamente o desempenho de cada uma das colunas principais.

Nessa condição, se torna necessário alterar as equações (II-24) de forma a refletir a influência da saturação de uma das colunas no desempenho do reator. Essa mudança é mostrada nas equações (II-25), que retratam a condição onde somente a coluna 1 está saturada.

$$\begin{cases} NI_{p1} + NI_{c1} = (B - B_s)/\mu_r\mu_0 \\ NI_{p2} - NI_{c2} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

Ao se avaliar o sistema de equações (II-19) e (II-25) é possível depreender que, sob essas condições, as correntes I_{p1} , I_{p2} , I_{c1} e I_{c2} apresentam todas a mesma magnitude. Essa situação é análoga ao se considerar apenas a coluna 2 saturada, com a pequena diferença de que, neste caso, $I_{p1} = I_{p2} = -I_{c1} = -I_{c2}$.

Essa solução apresenta, ainda, uma característica singular quando se avaliam os valores de indução magnética B_p e B_c nas colunas principais do reator. Para a coluna que não opera saturada, o fluxo estabelecido pelos enrolamentos de controle e de potência encontram-se em oposição e, por possuírem a mesma magnitude, acabam cancelando-se mutuamente. Dessa forma, o valor de indução B_c é nulo para esta coluna e o de B_p

depende apenas da corrente do enrolamento primário e pode ser dado pela equação (II-26).

$$B_p = \frac{\mu_0 N I_p / 2}{h} \quad (\text{II-26})$$

Por outro lado, na coluna que opera saturada, os fluxos estabelecidos pelos enrolamentos primários e secundários se somam ao atravessar a superfícies S_c e, deste modo, contribuem para elevar o valor da indução B_c . Conforme apresentado na equação (II-27), o módulo de B_c é duas vezes maior do que o de B_p .

$$B_c = \frac{\mu_0 N (I_p / 2 + I_c)}{h} = 2B_p \quad (\text{II-27})$$

Para que se possa obter uma expressão para a indutância equivalente do reator quando somente uma das colunas está operando na zona de saturação, é preciso recorrer às expressões da energia armazenada sob forma de campo magnético em um indutor [27]. As equações (II-28) e (II-29) apresentam duas diferentes formas de se obter o valor da energia W armazenada em um indutor. Na primeira, a energia é dada em função da indutância do reator, que neste caso é o valor procurado, e na outra forma, é explorada a relação entre densidade de fluxo e intensidade do campo magnético.

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad (\text{II-28})$$

$$W = \frac{1}{2} \int_{vol} (\vec{B} \cdot \vec{H}) dv \quad (\text{II-29})$$

Combinando essas equações, destacando-se a variável L para obter uma expressão para a indutância equivalente L_{eq} em função das correntes primárias, obtém-se:

$$\begin{aligned}
L_{eq} &= \frac{8W}{I_p^2} = \frac{1}{I_p^2} \int_{vol} (\vec{B} \cdot \vec{H}) dv = \frac{1}{\mu_0 I_p^2} \int_{vol} B^2 dv \\
L_{eq} &= \frac{4}{\mu_0 I_p^2} [4B_p^2 h S_c + B_p^2 h S_p + B_p^2 h S_p] \\
L_{eq} &= \frac{4B_p^2 h}{\mu_0 I_p^2} [4S_c + 2S_p] \\
L_{eq} &= \frac{\mu_0 N^2}{h} [4S_c + 2S_p] = 4L_c + 2L_p = 2(L_T + L_c) \tag{II-30}
\end{aligned}$$

O valor da indutância equivalente do reator (L_{eq}), dado pela equação (II-30), apresenta-se constante quando esse equipamento opera na condição de consumo intermediário de potência e possui o grau de saturação $\beta = \pi$. Como cada um das colunas principais opera saturada exatamente durante metade de um período, o sistema ao qual o reator está conectado não percebe a variação da permeabilidade relativa de cada coluna, pois ambas operam saturadas em períodos de tempo complementares.

Nessa condição, as correntes e as tensões nos enrolamentos primários apresentam uma variação senoidal assim como os valores de indução na região S_p . Na região S_c , o valor da densidade de fluxo é zero durante metade de um período e, no intervalo subsequente, apresenta uma variação senoidal de amplitude $2B_p$.

Quanto aos enrolamentos de controle, destaca-se que a amplitude de suas correntes é, em módulo, igual à das correntes dos enrolamentos primários e a tensão nos seus terminais também possui variação senoidal podendo ser calculada a partir das equações (II-20), (II-23) e (II-30) resultando na expressão (II-31) a seguir.

$$\begin{aligned}
v_c &= N \frac{d\varphi_c}{dt} = NS_c \frac{dB_c}{dt} = 2NS_c \frac{dB_p}{dt} \\
v_c &= \frac{\mu_0 N^2 S_c}{h} \frac{di_p}{dt} = \frac{L_c}{L_{eq}} v_p \\
v_c &= \frac{L_c}{2(L_T + L_c)} v_p \tag{II-31}
\end{aligned}$$

Por fim, na condição onde ambas as colunas principais do reator operam constantemente saturadas, não ocorrem mais variações na permeabilidade relativa do núcleo durante um período, o que resulta em um valor constante para a indutância equivalente do reator que pode ser dada pela expressão (II-32) a seguir.

$$L_{eq} = 2(L_p + L_c) = 2L_T \quad \text{(II-32)}$$

Nessa condição, as variações nas tensões dos enrolamentos primários provocam alterações idênticas nos valores dos fluxos e das induções no interior das duas colunas principais do reator. Como consequência desse modo de operação, não são mais verificadas componentes alternadas na forma de onda da tensão secundária resultante nos terminais externos dos enrolamentos de controle.

A tensão em cada um dos enrolamentos, no entanto, pode ser dada pela expressão (II-33), que apresenta uma equação similar à encontrada para o ponto de operação com consumo intermediário de potência.

$$v_c = \frac{L_c}{L_{eq}} v_p = \frac{L_c}{2L_T} v_p \quad \text{(II-33)}$$

Outra característica marcante deste ponto de operação é que a corrente nos enrolamentos de controle é constante e sua magnitude depende somente dos parâmetros do circuito de controle, especificamente do valor da resistência em condições de regime; e da tensão CC aplicada. Além disso, qualquer incremento no valor da corrente de controle nesse estado operativo surte pouco efeito nas correntes primárias e, no caso de um equipamento não idealizado onde o valor da resistência desses enrolamentos é pequena, porém, não desprezível, o aumento da corrente de controle contribui para elevar as perdas ôhmicas.

As expressões obtidas para as indutâncias equivalentes, correntes e tensões de controle, assim como os valores da permeabilidade relativa em cada uma das colunas do reator para os pontos de operação abordados nesta seção estão resumidos na Tabela II-1 a seguir.

Tabela II-1 – Resumo das características dos pontos de operação

Ponto de operação	Permeabilidade relativa (μ_r)		Correntes primárias e secundárias	Tensões secundárias	Indutância Equivalente
	Coluna 1	Coluna 2			
Consumo mínimo	∞	∞	$i_p = i_c = 0$	$v_c = 0$	∞
Consumo intermediário	1	∞	$ i_p = i_c $	$v_c = \frac{L_c}{2(L_T + L_c)} v_p$	$L_{eq} = 2(L_T + L_c)$
	∞	1			
Consumo máximo	1	1	$i_c = constante$	$v_c = \frac{L_c}{2L_T} v_p$	$L_{eq} = 2(L_p + L_c)$

II.7 Características dos componentes harmônicos do MCSR.

As seções anteriores avaliaram diversos aspectos relacionados às características construtivas do MCSR e às particularidades do seu funcionamento nos pontos de operação aos quais esse equipamento pode ser submetido. Nessas seções foram avaliadas as particularidades das correntes primárias e secundárias do reator sem, no entanto, abordar analiticamente as distorções nas formas de onda inerentes à operação desse tipo de reator.

A não linearidade existente na relação entre o fluxo magnético (φ) e corrente elétrica é responsável por provocar uma deformação na forma de onda das correntes dos enrolamentos primários do reator. Essa distorção é consequência do efeito de saturação do núcleo ferromagnético e possui relação direta com a tensão de controle do reator saturado e o seu grau de saturação.

Quanto menor for o grau de saturação, maiores serão as distorções apresentadas nas correntes primárias, pois as variações na permeabilidade relativa e, conseqüentemente, na indutância equivalente do núcleo serão mais expressivas. Conforme pode ser observado na Figura II-18, a forma de onda da corrente de cada enrolamento apresenta uma grande distorção quando o grau de saturação é menor (curva contínua) e é

praticamente livre de distorções quando o reator opera inteiramente na zona de saturação (curva tracejada).

Nessa figura, a curva de saturação do núcleo foi representada de forma simplificada, pois a relação entre a indução e intensidade de campo apresenta um valor constante e igual a zero, na região fora da zona de saturação; e uma variação linear quando o núcleo encontra-se operando na zona de saturação. Destaca-se que nessa representação, o coeficiente angular da reta, dado pela tangente do ângulo δ mostrado na figura, corresponde ao valor da permeabilidade magnética do núcleo.

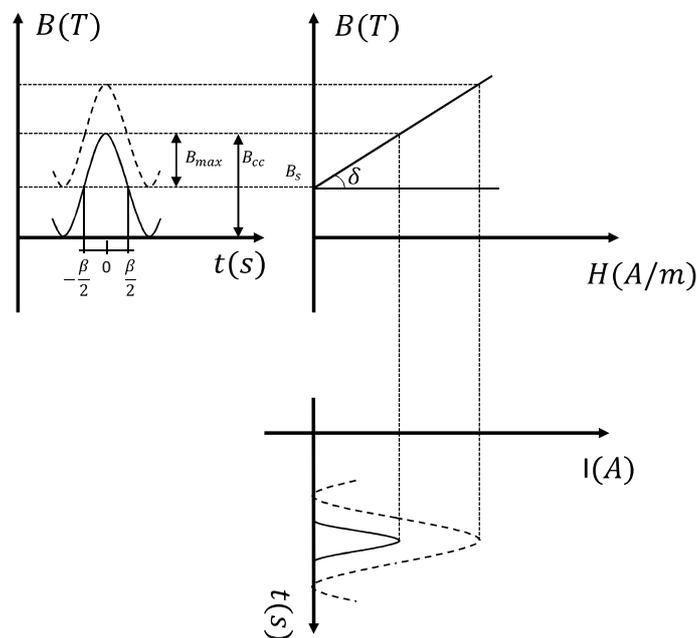


Figura II-18 –Distorção na corrente primária de um a coluna do reator para dois pontos de operação.

As distorções existentes nas formas de onda das correntes do reator podem ser obtidas a partir da análise da função da intensidade de campo, que pode ser descrita em função de seus conteúdos harmônicos utilizando-se a decomposição em séries de Fourier. Para obtenção dessas expressões, considerou-se que a indução no núcleo do reator varia de forma periódica e pode ser dada pela equação (II-34) a seguir.

$$b(t) = B_{max} \cos \omega t \tag{II-34}$$

onde B_{max} representa a amplitude da componente fundamental da densidade de fluxo.

Além disso, a intensidade de campo magnético pode ser descrita em função da indução magnética e do grau de saturação β pela seguinte expressão:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } |b| \leq B_s \\ B_{max}(\cos \omega t - \cos \frac{\beta}{2}) \cot \delta, & \text{se } |b| > B_s \end{cases} \quad (\text{II-35})$$

onde $\cot \delta = 1/\mu_0$.

A equação geral da série de Fourier, que representa uma função periódica em séries trigonométricas infinitas dadas pela equação (II-36), permite determinar as expressões para as magnitudes das componentes harmônicas da função da intensidade de campo, representada pela equação (II-35), sendo apenas necessário efetuar o cálculo dos coeficientes a_0 , a_h e b_h .

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\} \quad (\text{II-36})$$

onde

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) d(\omega t)$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 0, \dots, \infty$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 0, \dots, \infty$$

A determinação dos coeficientes de Fourier para decomposição da função intensidade de campo é simplificada pela existência de simetria da função em relação ao eixo das ordenadas. Essa simetria caracteriza $h(t)$ como uma função par e, dessa forma, $b_h = 0$ e os coeficientes a_h e a_0 assumem, respectivamente, as expressões mostradas nas equações (II-37) e (II-38).

$$a_h = \frac{2B_{max} \cot \delta}{\pi} \int_0^{\frac{\beta}{2}} \left[\cos(\omega t) - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \cos(h\omega t) d\omega t \quad (\text{II-37})$$

$$a_0 = \frac{B_{max} \cot \delta}{\pi} \int_0^{\frac{\beta}{2}} \left[\cos(\omega t) - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] d\omega t \quad (\text{II-38})$$

A solução dessas integrais permite obter as expressões gerais para as magnitudes das componentes harmônicas da intensidade de campo apenas em função do grau de saturação e de constantes associadas às propriedades do material ferromagnético do núcleo.

$$h_0 = \frac{B_{max} \cot \delta}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) - \left(\frac{\beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \quad (\text{II-39})$$

$$h_1 = \frac{B_{max} \cot \delta}{\pi} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right) - \frac{\sin \beta}{2} \right] \quad (\text{II-40})$$

$$h_n = \frac{B_{max} \cot \delta}{n\pi} \left[\frac{\sin(n-1)\frac{\beta}{2}}{n-1} - \frac{\sin(n+1)\frac{\beta}{2}}{n+1} \right] \quad (\text{II-41})$$

onde $n = 2,3,4,5, \dots$

Ao analisar as equações (II-39), (II-40) e (II-41) pode-se observar alguns aspectos interessantes relacionados às componentes harmônicas da função da intensidade de campo em determinados pontos de operação. Quando o grau de saturação β atinge o seu valor máximo, por exemplo, as magnitudes da componente fundamental (h_1) e do valor médio da função (h_0) possuem ambas o mesmo valor e todas as componentes (h_n) são nulas. Isto equivale afirmar que a forma de onda da intensidade de campo, e consequentemente a da corrente, não apresenta distorções quando o reator opera constantemente na zona de saturação.

Essa propriedade reflete as considerações adotadas para a curva de magnetização do reator, pois nessa condição a relação entre fluxo e corrente (ou densidade de fluxo e intensidade de campo) é linear durante todo o período e, portanto, não provoca distorções nas formas de onda das correntes. Destaca-se ainda que, apesar de ser uma condição idealizada, uma curva usual de magnetização de um material ferromagnético apresenta variações praticamente lineares na zona de saturação e, portanto, essa

aproximação tende a não acarretar erros significativos entre os resultados obtidos com uma curva real e a idealizada.

Quando o reator opera na condição de semisaturação, ou seja, com o grau de saturação $\beta = \pi$, a razão $h_1/h_0 = 0.5$, as componentes harmônicas de ordem ímpar são nulas e há o aparecimento de componentes de ordem par em virtude da magnetização assimétrica do núcleo nos semiciclos positivo e negativo. Cabe destacar, no entanto, que essa distorção não é percebida na forma de onda da corrente primária total, uma vez que a disposição dos enrolamentos primários promove o cancelamento de tais harmônicos. Essas componentes são mais expressivas, em termos de magnitude, nos enrolamentos de controle dada a existência da excitação CC.

Outra característica marcante das componentes harmônicas está relacionada à variação dos módulos de cada componente para os diferentes níveis de saturação existentes. Conforme pode ser observado na Figura II-19, cada componente de ordem n possui $n-1$ valores de pico distribuídos simetricamente em relação ao ponto onde $\beta = \pi$. Além disso, nota-se que o máximo valor absoluto dessas funções também se encontra nas proximidades desse ponto.

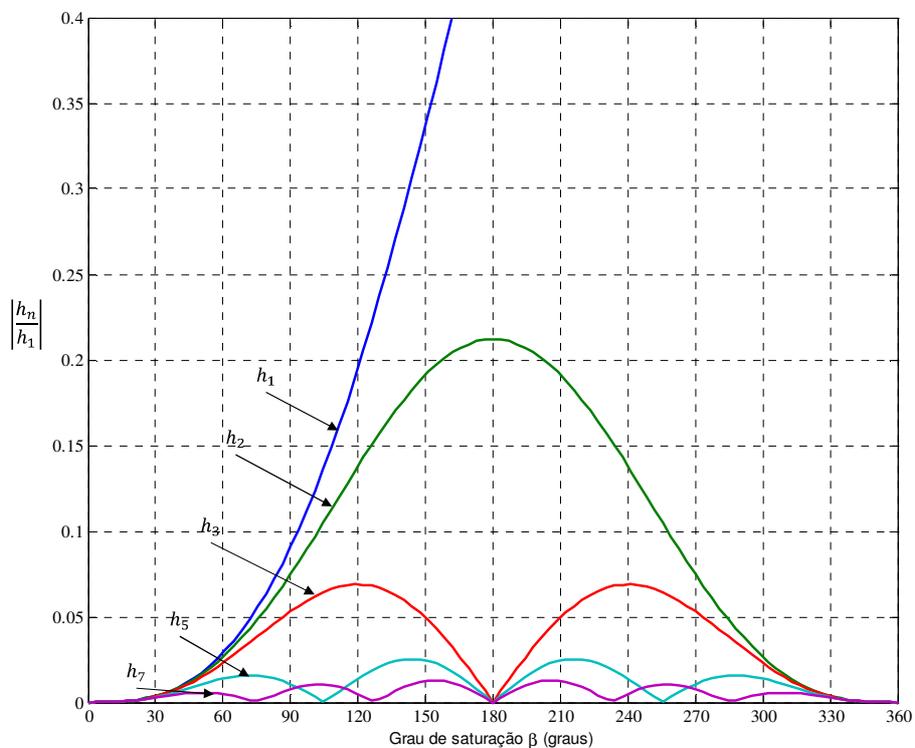


Figura II-19 – Variação das componentes harmônicas da intensidade de campo em função do grau de saturação.

É importante destacar que apesar de as deduções realizadas nesta seção considerarem algumas condições idealizadas para a representação da curva de magnetização do reator, a adoção de curvas com propriedades mais próximas às verificadas em equipamentos convencionais não alteraria de forma significativa os resultados e as propriedades apontadas para as componentes harmônicas do reator saturado.

A adoção de uma curva de saturação mais realista teria maior influência na determinação das magnitudes das componentes harmônicas em condições onde o grau de saturação é baixo, pois nas deduções realizadas, a transição do ponto de operação do núcleo para a zona de saturação acontece de forma brusca, diferentemente do que ocorreria ao se considerar uma curva de saturação convencional. Com níveis de saturação mais elevados, a relação entre indução e intensidade de campo é praticamente linear e, dessa forma, não há diferenças relevantes nas respostas encontradas ao se utilizar diferentes curvas características.

CAPÍTULO III AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE REATORES DE SATURAÇÃO CONTROLADA

III.1 Considerações iniciais.

Os reatores de saturação controlada do tipo MCSR são compostos basicamente de duas partes principais: o reator propriamente dito, cujas propriedades ferromagnéticas são o cerne do princípio de funcionamento desse equipamento; e o sistema de excitação CC, que permite controlar o nível de saturação do reator e conseqüentemente o seu ponto de operação.

Para que se possam avaliar as diferentes propriedades associadas a esse equipamento, descritas na seção anterior, faz-se necessária a sua modelagem em um programa que realize simulações no domínio do tempo. Além da avaliação do desempenho do equipamento de forma isolada, ou seja, desconsiderando a influência da rede elétrica e do circuito de controle na performance do reator, é necessário avaliar, também, a sua interação com a rede existente.

Em diversas das referências estudadas [6], [17], [21], [23], [28] e [29], são adotadas diferentes abordagens para a modelagem do reator saturado, que dependem necessariamente das ferramentas disponibilizadas por cada simulador utilizado. Em todos os casos, no entanto, os procedimentos adotados para a modelagem do reator exploraram a combinação de elementos básicos, como reatores ou indutores, presentes nas bibliotecas de dispositivos para emular o comportamento dos reatores de saturação controlada.

Nas avaliações realizadas neste capítulo foi adotado o simulador *Simulink/MATLAB R2009b* para as análises dos efeitos transitórios relacionados aos reatores de saturação controlada. Este aplicativo fornece ferramentas apropriadas para as avaliações deste tipo de equipamento, pois permite modelar tanto o reator saturado, por meio de componentes elementares presentes em sua biblioteca de *templates*, quanto os componentes do sistema de controle, composto basicamente por dispositivos semicondutores e blocos que representam funções matemáticas diversas. Além disso, a utilização dessa

ferramenta permite uma comparação direta com os resultados apresentados nas referências citadas anteriormente.

Diferentemente da abordagem adotada nas referências supracitadas, que enfocam apenas as questões relativas ao funcionamento de unidades trifásicas dos MCSRs, serão apresentados nas seções seguintes os resultados das análises do desempenho desse tipo de reator também para a configuração monofásica. Por motivos didáticos, as características da modelagem adotada para as unidades monofásicas precederão as avaliações dos reatores trifásicos.

III.2 Modelagem das unidades monofásicas e trifásicas dos MCSRs.

Dentre os dispositivos disponibilizados pelo simulador, aqueles de maior interesse para a representação dos reatores de saturação controlada são os modelos de transformadores que consideram o efeito da saturação do núcleo ferromagnético. De uma forma geral, esses modelos permitem representar concomitantemente as propriedades elétricas relativas aos enrolamentos primários e secundários, existentes em ambos os equipamentos, e as propriedades magnéticas do núcleo ferromagnético.

O modelo para transformadores monofásicos existente na biblioteca de dados do simulador representa as resistências dos enrolamentos primários e secundários bem como suas indutâncias de dispersão. Conforme apresentado Figura III-1, essas grandezas são designadas, respectivamente, pelas variáveis R_1 , R_2 , L_1 e L_2 . Esse modelo também leva em consideração a curva de magnetização característica e as perdas ôhmicas no material ferromagnético, representadas pela indutância L_{sat} e por uma resistência linear R_{mag} .

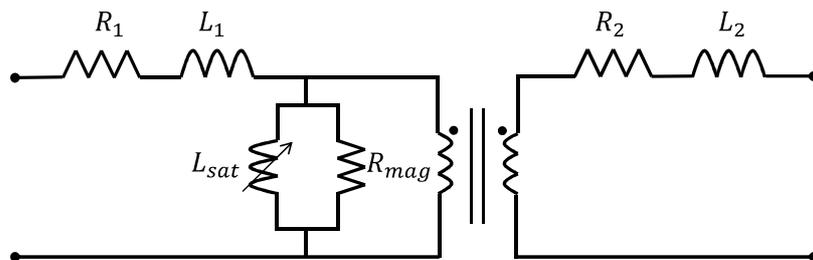


Figura III-1 – Modelo de uma unidade transformadora monofásica.

Tendo como ponto de partida a modelagem convencional de uma unidade monofásica de um transformador é possível replicar, por meio de ligações específicas entre duas dessas unidades, o desempenho de uma fase de um reator de saturação controlada. As propriedades relacionadas às características elétricas dos enrolamentos primários e secundários, como por exemplo as resistências e indutâncias de dispersão, podem ser facilmente reproduzidas nesse modelo pela simples implementação dos valores das grandezas elétricas envolvidas.

Com relação às interconexões dos enrolamentos, pode-se verificar através da análise do diagrama esquemático da Figura III-2 que as ligações realizadas entre os enrolamentos primários e secundários das duas unidades transformadoras monofásicas (TR_1 e TR_2), apresentam essencialmente a mesma conexão que existe na configuração física de uma fase de reator de saturação controlada. Enquanto os enrolamentos primários apresentam-se conectados em paralelo, os enrolamentos de controle estão interligados em série e com polaridades opostas.

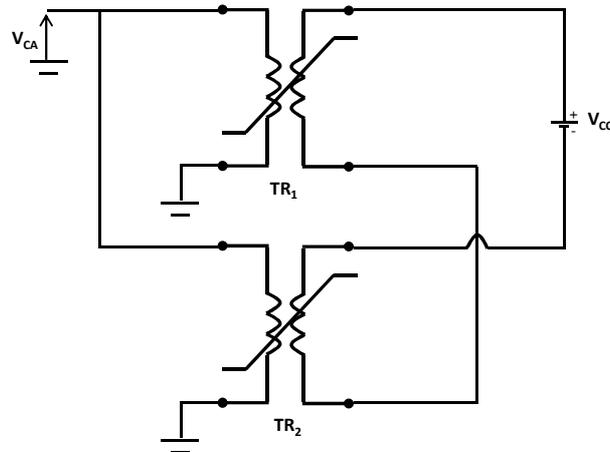


Figura III-2 – Conexão das unidades transformadoras para representação de um MCSR monofásico.

Em termos das propriedades inerentes ao núcleo do reator destaca-se que apesar dessa representação adotar dois núcleos ferromagnéticos independentes, o que se diferencia da configuração física original do MCSR, o desempenho de cada unidade transformadora é basicamente o mesmo que o de cada coluna principal do reator. Na estrutura física original, os fluxos alternados estabelecidos pelos enrolamentos primários se distribuem apenas pela colunas principais onde são originados e pelas colunas de retorno mais

próximas. Dessa forma, a distribuição de fluxos alternados ocorre como se o núcleo do reator fosse, de fato, dividido em duas seções independentes.

O fluxo contínuo originado nos enrolamentos de controle, por outro lado, percorre apenas as seções das colunas principais, onde efetivamente ocorre a saturação, e das colunas centrais superior e inferior do reator, que não atingem a saturação em nenhum ponto de operação e servem apenas para completar o circuito magnético. Nessa representação, apesar de não serem mantidas as características físicas originais do reator, as conexões dos enrolamentos secundários permitem manter as propriedades das colunas principais, no que diz respeito à magnitude e ao sentido dos fluxos no interior do núcleo.

Quanto às propriedades relacionadas à saturação, torna-se indispensável representar adequadamente a curva de magnetização dada, nesse modelo, pela relação entre corrente de magnetização (i_{mag}) e o fluxo concatenado ($\lambda = N\varphi$). O conjunto de pares (i_{mag}, λ) especificado é utilizado para representar a curva de saturação por meio da combinação de diversos segmentos de reta sequenciais. Essa simplificação implica em uma relação linear entre fluxo e corrente para cada um dos segmentos adotados, no entanto, não afeta significativamente a precisão dos resultados, pois não há limitações quanto ao número de segmentos de reta que podem ser utilizados. Dessa forma, na região de transição para a zona de saturação é possível incrementar a quantidade de pares especificados e evitar variações bruscas nas relações entre fluxo e corrente, o que permite aproximar a curva de saturação adotada de uma curva mais realista.

Os dados referentes às curvas de saturação de um núcleo ferromagnético são geralmente levantadas através de ensaios específicos realizados durante a fabricação desse componente do reator. Contudo, quando essa informação não está disponível pode-se realizar uma aproximação dessa curva baseando-se na característica de magnetização do material magnético que compõe o núcleo e das características nominais do reator.

As curvas de magnetização de materiais comumente utilizados em núcleos ferromagnéticos de transformadores e reatores são encontrados com relativa facilidade na literatura e são usualmente fornecidos por fabricantes das chapas metálicas

produzidas com a finalidade de compor o núcleo de equipamentos elétricos. Em [30] e [31], por exemplo, são encontradas diversas curvas de magnetização para diferentes tipos de materiais dentre as quais foi selecionada a curva correspondente à Figura III-3, para uma chapa de aço-silício com grãos orientados. Esta curva apresenta algumas das características desejadas para o reator saturado como alta permeabilidade inicial e alta densidade de fluxo na zona de saturação.

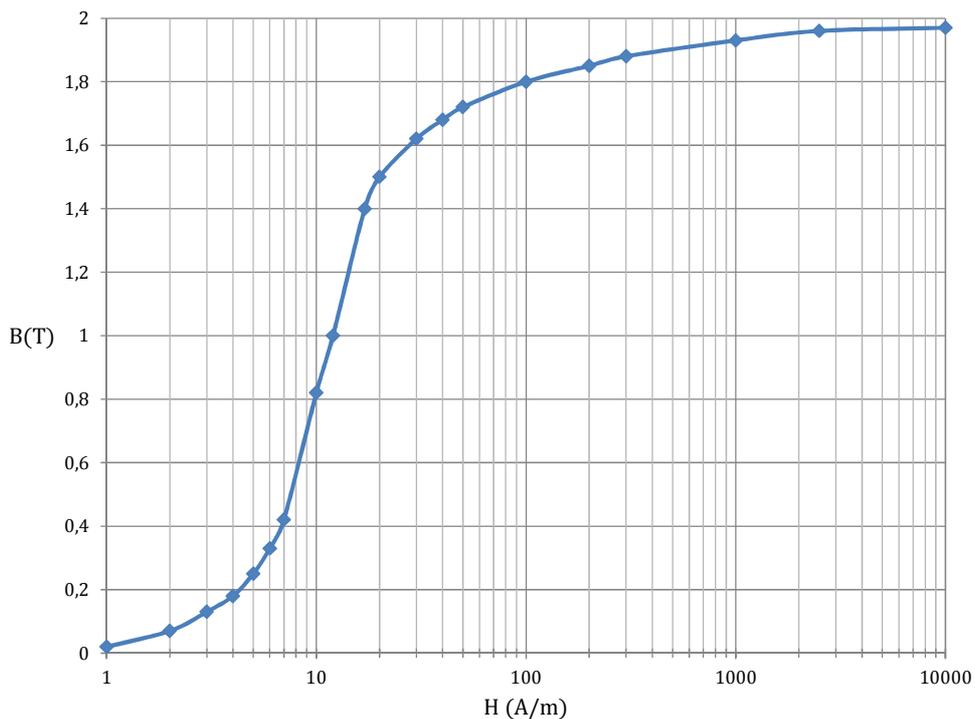


Figura III-3 – Curva de magnetização característica do material que compõe o núcleo ferromagnético.

A partir dos dados da curva de magnetização selecionada, pode-se estabelecer a correspondência entre a intensidade de campo e a corrente de magnetização assim como entre a indução e o fluxo utilizando-se de sucessivas aproximações lineares em torno dos pontos da curva original. Os valores de fluxo podem ser obtidos diretamente dos dados da curva de magnetização tendo em vista a relação linear entre essa variável e a densidade de fluxo.

Neste caso, o valor de indução associado ao fluxo nominal do reator foi definido como sendo 1,85T, pois este representa o ponto a partir do qual o núcleo opera efetivamente dentro da zona de saturação e a intensidade de campo passa a ser mais significativa.

Adotando a representação em valores por unidade, tanto o fluxo quanto a indução apresentam a mesma magnitude, o que simplifica a obtenção da curva de magnetização. É importante destacar, no entanto, que o valor base para o fluxo é dado em função do valor de pico dessa grandeza e pode ser dado pela expressão (III-1).

$$\lambda = N\varphi = \frac{V_p}{2\pi f} \sqrt{2} \quad (\text{III-1})$$

onde f é a frequência de operação e V_p é o valor eficaz da tensão primária nominal.

Para a corrente de magnetização, utiliza-se a expressão (III-2) a seguir, onde são calculados para cada ponto da curva de magnetização o valor correspondente da corrente considerando como ponto de partida a condição de fluxo nominal e adotando-se a magnitude da corrente igual a 1.5% nesse ponto.

$$I_{i+1} = \frac{H_{i+1}}{H_i} I_i \quad (\text{III-2})$$

Com base nas considerações adotadas é possível obter o conjunto de pares (i_{mag}, λ) que servirá como dado de entrada para a representação das características do núcleo nas simulações. O conjunto de dados da curva original que permitiu a obtenção da relação entre as correntes de magnetização e o fluxo são mostrados na Tabela III-1. Destaca-se, ainda, que para a entrada de dados no modelo utilizado foi desconsiderada a maioria dos dados referentes à região de baixa saturação, pois a influência dessa região no desempenho do reator é muito singela. Os valores efetivamente adotados para a curva de saturação nas simulações são mostradas na Tabela III-2 e na Figura III-4.

O último ponto de destaque quanto ao modelo adotado está relacionado às perdas ôhmicas no núcleo, que foram representadas por uma resistência linear de forma a corresponder a perdas de 0.2% à tensão nominal de operação.

Tabela III-1 – Dados da curva de magnetização original.

Dados da curva de magnetização			
B(T)	H(A/m)	B(T)	H(A/m)
0,02	1	1,50	20
0,07	2	1,62	30
0,13	3	1,68	40
0,18	4	1,72	50
0,25	5	1,80	100
0,33	6	1,85	200
0,42	7	1,88	300
0,82	10	1,91	1000
1,00	12	1,96	2500
1,40	17	1,97	10000

Tabela III-2 – Dados da curva de magnetização adotada nas simulações.

Dados da curva de magnetização			
$I_{mag}(pu)$	$\phi(pu)$	$I_{mag}(pu)$	$\phi(pu)$
0	0	0,0150	1,000
0,00015	0,0378	0,0225	1,016
0,0030	0,9081	0,0750	1,032
0,0038	0,9297	0,1875	1,059
0,0075	0,9729	0,7500	1,065

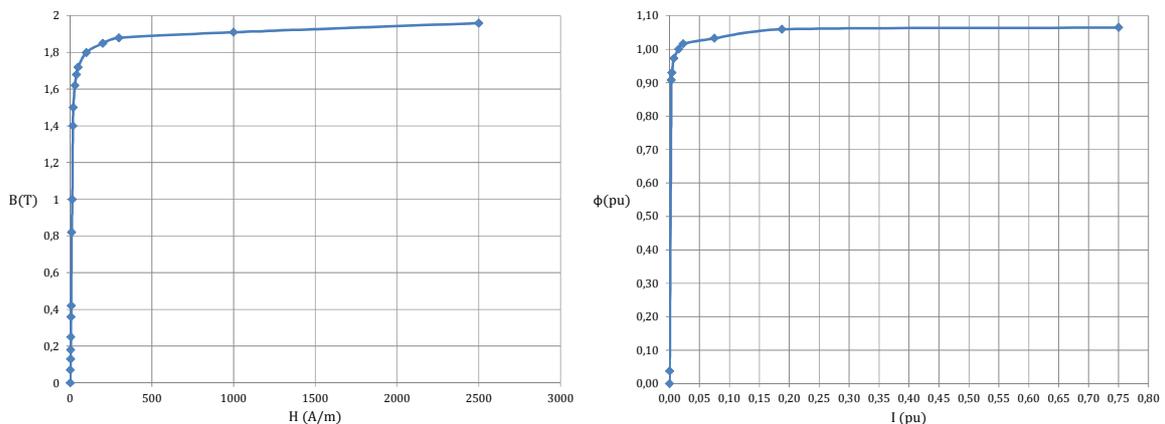


Figura III-4 – Curva de magnetização adotada nas simulações.

Todas as condições adotadas para a representação de uma unidade monofásica de um MCSR podem ser utilizadas na representação trifásica deste reator. Expandindo a configuração adotada na Figura III-2, onde dois transformadores foram utilizados, pode-se emular o desempenho de um banco de reatores monofásicos. Conforme pode ser observado na Figura III-5, a combinação de seis transformadores monofásicos com parâmetros idênticos, sendo dois para cada fase, permite analisar o desempenho trifásico de um MCSR.

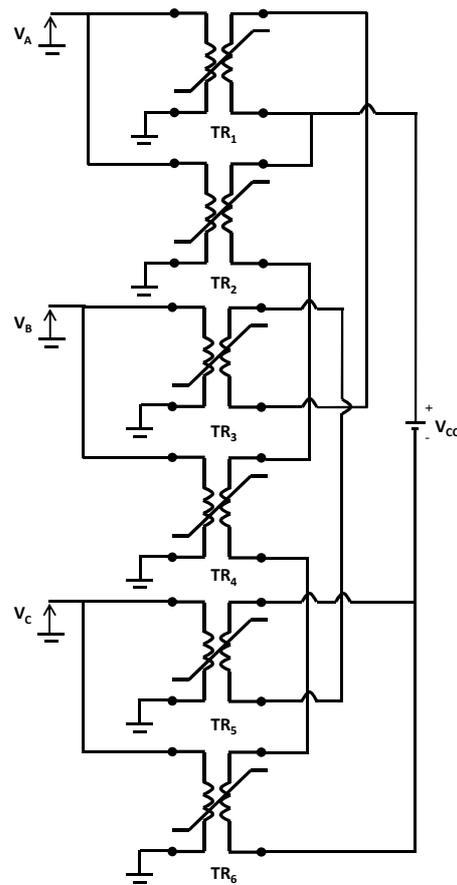


Figura III-5 – Conexão das unidades transformadoras para representação trifásica de um MCSR.

É importante notar que nessa configuração as conexões dos enrolamentos secundários assemelham-se àquelas apresentadas no capítulo II, aproximando-se das conexões físicas existentes.

III.3 Avaliação do desempenho de um MCSR monofásico.

Para que seja realizada a avaliação do desempenho do MCSR e das configurações propostas para a representação de unidades monofásicas, assim como de suas associações em bancos de reatores, faz-se necessário adotar, inicialmente, condições idealizadas para as representações do circuito de controle e do sistema de potência ao qual o reator está conectado.

Essas as avaliações iniciais visam minimizar a influência das variações do ponto de operação do sistema e do comportamento do circuito de controle sobre o desempenho do reator, permitindo focar exclusivamente nas propriedades inerentes a esse equipamento e no seu desempenho sob condições idealizadas. Dessa forma, nas análises iniciais, tanto o sistema de controle quanto a rede CA serão representadas por fontes equivalentes ideais.

Todos os resultados e discussões das simulações apresentadas nas seções subsequentes representarão um reator monofásico com capacidade de 15Mvar, dimensionado para o nível de tensão de 230kV e modelado por meio de unidades transformadoras monofásicas cujas características nominais e parâmetros elétricos estão descritos na Tabela III-3.

Tabela III-3 – Dados nominais de cada transformador que compõe o modelo do reator saturado.

Dados Nominais	
Potência	<i>7.5Mvar</i>
Frequência	<i>60Hz</i>
Tensão primária	<i>$230/\sqrt{3}$ kV</i>
Tensão secundária	<i>20kV</i>
Indutância de dispersão primária	<i>6.2H</i>
Indutância de dispersão secundária	<i>10mH</i>
Resistência dos enrolamentos primários	<i>43Ω</i>
Resistência dos enrolamentos secundários	<i>0.2Ω</i>
Tensão de controle nominal	<i>260V</i>
Corrente de controle nominal	<i>650A</i>

Cumprir notar que de acordo com [4] e [21] os valores de tensão secundária nominal geralmente adotados para os MCSRs encontram-se situados na faixa entre 11kV e 35kV

e a escolha desse nível de tensão depende exclusivamente de especificações de projeto relacionadas ao dimensionamento dos componentes do circuito de controle. Esse circuito, por sua vez, é composto por um ou até dois retificadores trifásicos responsáveis por aplicar uma tensão média aos enrolamentos secundários, com valores nominais que variam entre 220V e alguns poucos quilovolts, e seu dimensionamento depende da corrente de controle requerida e dos parâmetros elétricos dos enrolamentos secundários.

III.3.1 Desempenho do MCSR monofásico considerando a representação de um sistema ideal

Utilizando-se do modelo proposto para o reator de saturação controlada foi avaliado o desempenho computacional do modelo desse equipamento quando submetido à tensão nominal de operação nos enrolamentos primários e a diferentes tensões de controle nos enrolamentos secundários. Conforme apresentado na Figura III-6 tanto o sistema de controle quanto a rede elétrica foram representados por fontes ideais nessa simulação.

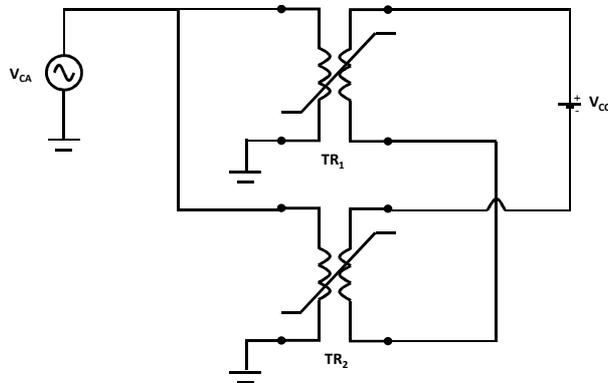


Figura III-6 – Diagrama esquemático de um MCSR monofásico para simulação com sistemas CA e CC ideais.

Considerando inicialmente a tensão de controle igual a 0V partindo de um ponto de operação em regime permanente sob essa mesma condição, pode-se depreender, pela análise dos gráficos apresentados na Figura III-7, que os fluxos concatenados em cada um dos núcleos dos transformadores que representam a unidade monofásica do MCSR apresentam amplitude nominal (498V.s) e que, em virtude da ausência da tensão de controle CC, não existe nenhum tipo deslocamento entre esses sinais. Nesse ponto de

operação, o núcleo não atinge a zona de saturação e, dessa forma, as correntes de magnetização possuem magnitudes reduzidas e uma distorção da forma de onda relacionada apenas com a variação de fluxo alternado no núcleo.

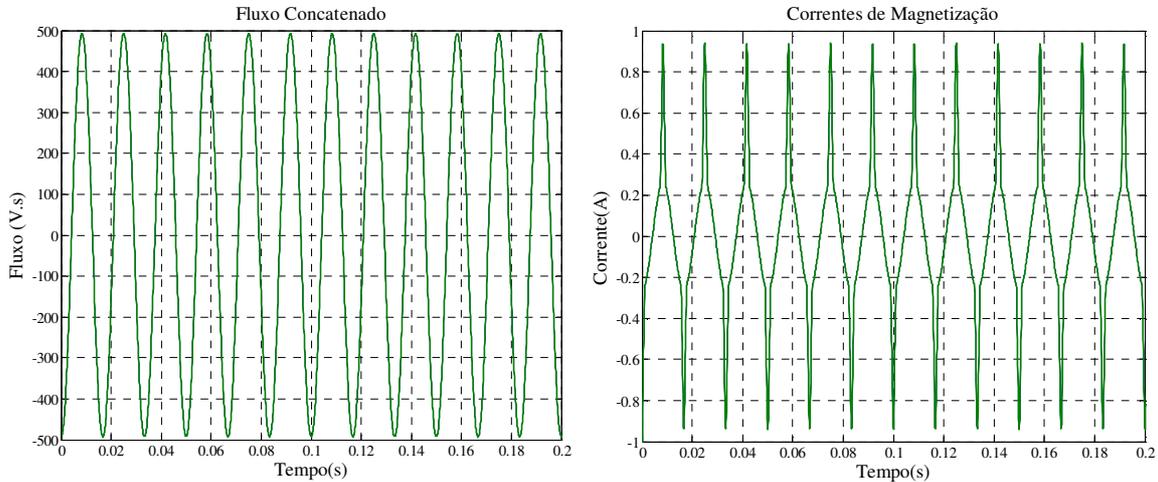


Figura III-7 – Fluxo concatenado e corrente de magnetização com tensão de controle de 0V.

Ao se elevar a tensão de controle para um patamar superior, no entanto, a componente contínua do fluxo concatenado força um deslocamento da forma de onda dessa grandeza em direções opostas em cada um dos núcleos. Nessa condição, cada núcleo passa operar parcialmente na zona de saturação, alterando momentaneamente a sua permeabilidade relativa, o que implica em uma variação acentuada da corrente de magnetização durante a transição entre os pontos de operação não-saturado e o saturado.

Conforme pode ser observado na Figura III-8, ao se aplicar uma tensão CC de 60V nos enrolamentos de controle, o que corresponde a cerca de 20% da tensão de controle nominal, há um aumento do nível de saturação do núcleo associado a uma maior amplitude das correntes de magnetização. Ressalta-se que nesta condição não há concomitância entre os períodos de saturação dos dois núcleos, o que indica um grau de saturação β necessariamente menor do que 180° .

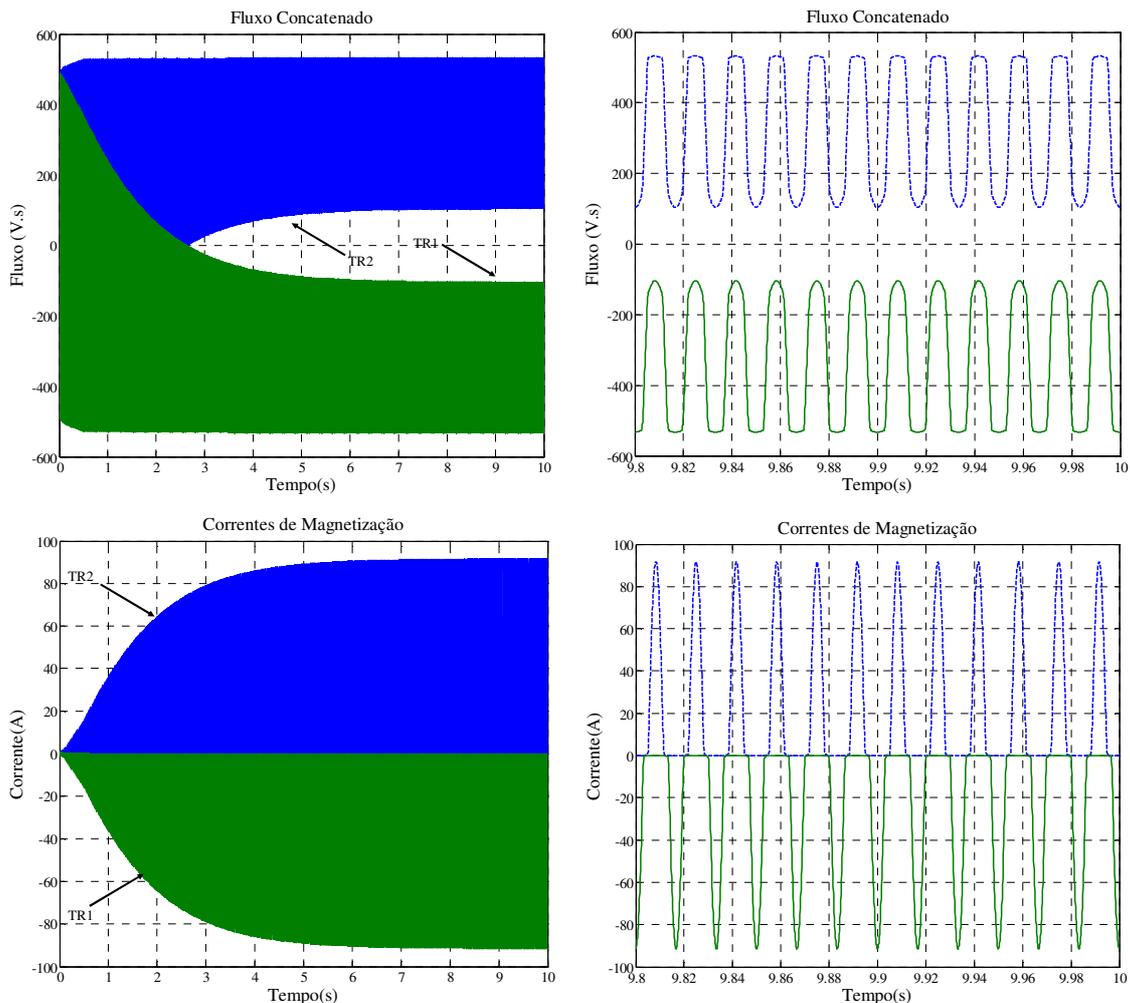


Figura III-8 – Fluxo concatenado e corrente de magnetização com tensão de controle de 60V.

A alteração da permeabilidade relativa também repercute na magnitude das correntes primárias e secundárias do reator. No caso das correntes primárias, além da alteração na sua amplitude, a Figura III-9 mostra uma distorção notável da forma de onda e um pequeno deslocamento em relação ao eixo das abscissas (*offset*). Esse pequeno *offset*, no entanto, não é percebido na corrente primária total uma vez que a simetria das correntes e da conexão de cada enrolamento primário permite anular essa característica.

Diferentemente do que ocorre com os sinais associados aos fluxos concatenados e as correntes de magnetização, as correntes primárias não apresentam sinais com variações em diferentes direções. Destaca-se, ainda, que a corrente dos enrolamentos de controle apresenta uma componente alternada com o dobro da frequência fundamental e uma componente contínua em regime permanente dada simplesmente pela relação entre a tensão de controle e a resistência desses enrolamentos. Essa componente alternada nos

enrolamentos secundários é responsável, também, pelo aparecimento de correntes harmônicas de ordens superiores à fundamental nos enrolamentos de trabalho.

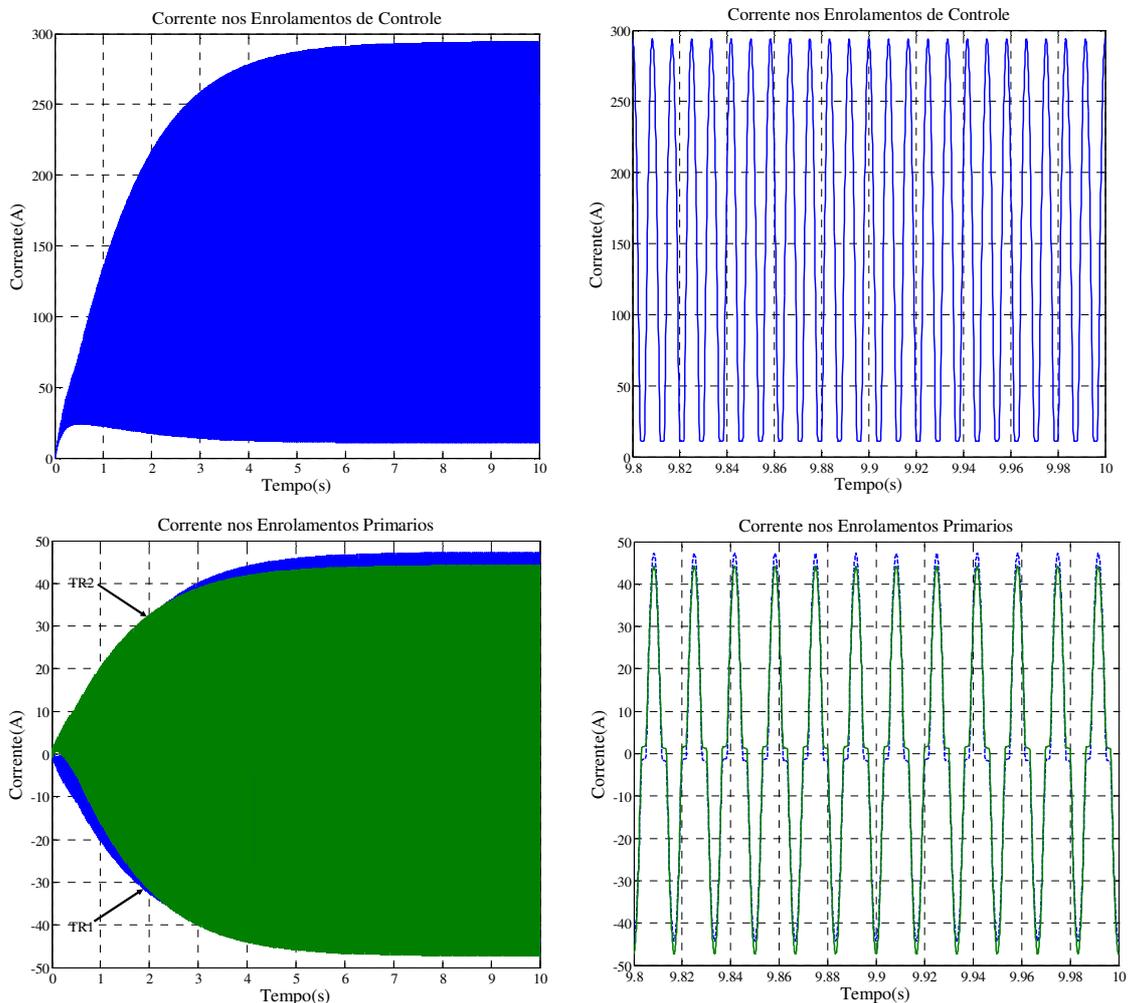


Figura III-9 – Correntes nos enrolamentos primários e secundários do reator com tensão de controle de 60V.

Alterando-se a tensão de controle para o seu valor nominal, há um aumento significativo da componente contínua do fluxo concatenado no interior do núcleo ferromagnético, que passa a ser predominante e permite o reator operar continuamente dentro da zona de saturação com grau de saturação β igual a 2π . Nesse ponto de operação, apresentado na Figura III-10, a corrente de magnetização apresenta uma forma de onda aproximadamente senoidal, o que evidencia uma relação quase linear entre fluxo e corrente nessa condição.

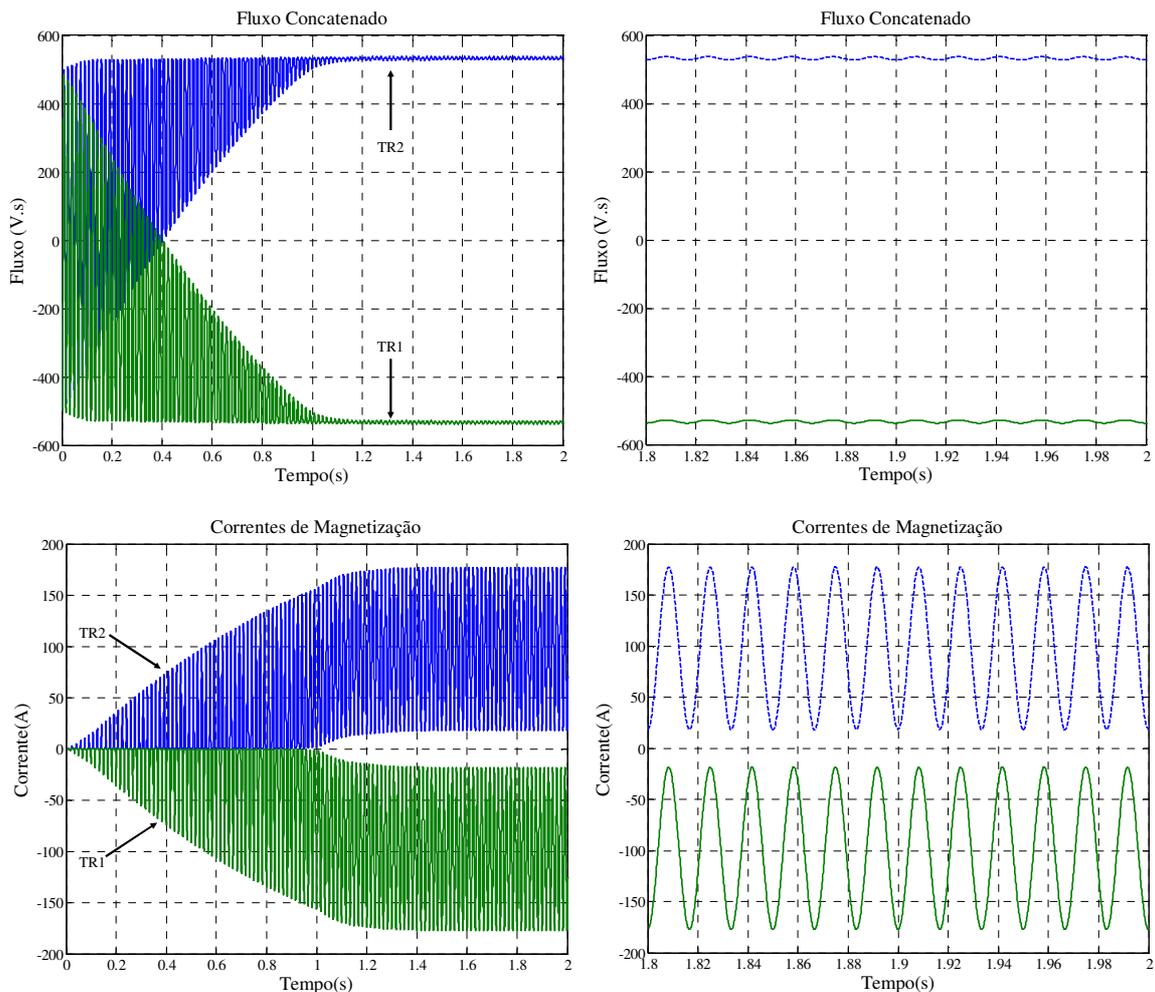


Figura III-10 – Fluxo concatenado e corrente de magnetização com tensão de controle de 260V.

Quando o reator atinge a condição de operação em regime permanente com tensão de controle nominal, a corrente dos enrolamentos secundários não apresenta mais componentes alternadas e sua amplitude é determinada apenas pela relação entre a tensão CC aplicada e a resistência dos enrolamentos. Como nessa condição a permeabilidade relativa do núcleo encontra-se bastante reduzida e permanece praticamente constante durante todo o período, não são verificadas distorções significativas na forma de onda das correntes dos enrolamentos de trabalho que, de acordo com os resultados apresentados na Figura III-11, apresentam amplitude nominal.

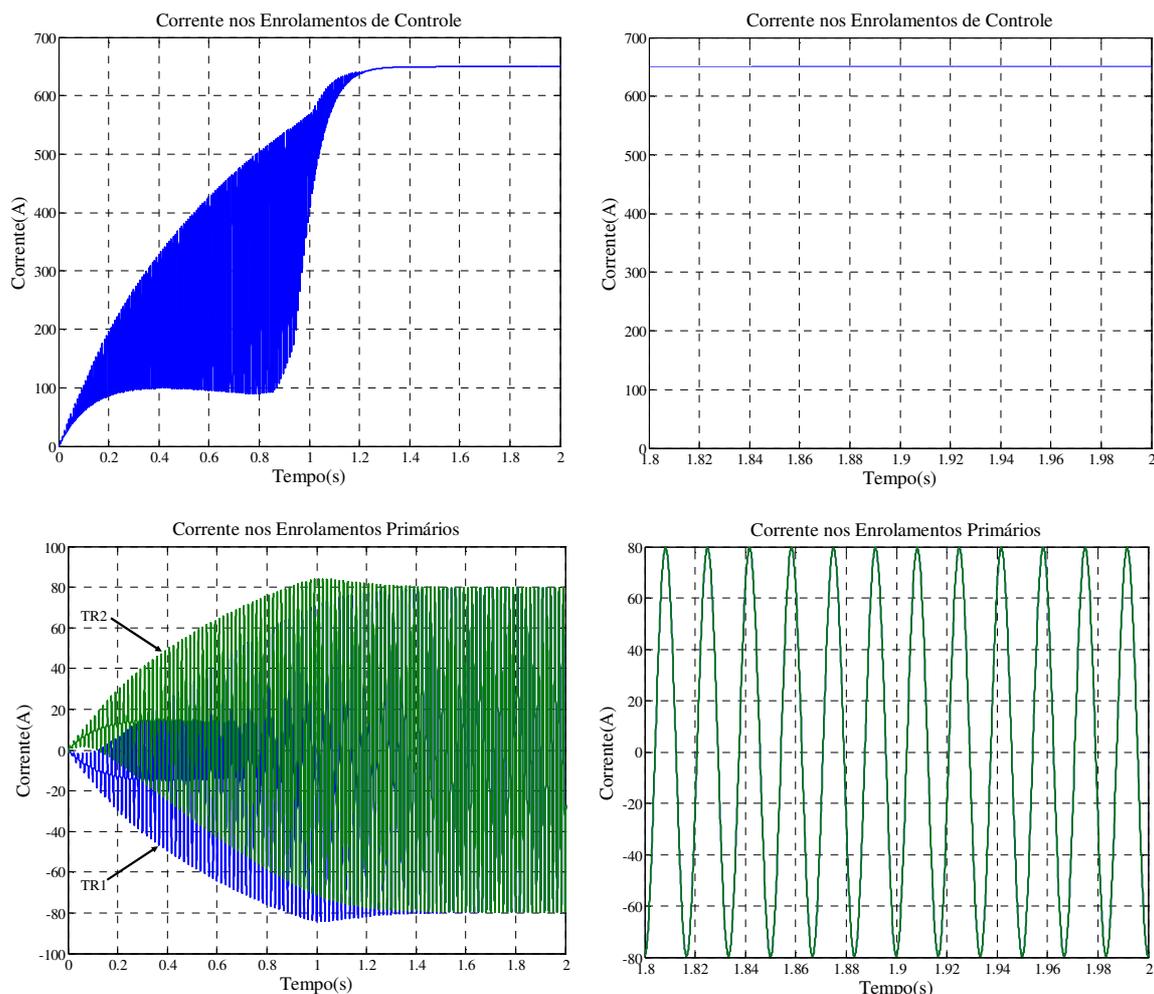


Figura III-11 – Correntes nos enrolamentos primários e secundários do reator com tensão de controle de 260V.

A comparação entre os resultados das simulações realizadas anteriormente (Figura III-8 a Figura III-11) permite identificar uma característica marcante dos reatores de saturação controlada no tocante ao tempo de resposta desse equipamento. Nos resultados apresentados foi considerada a condição de mínimo consumo de potência reativa como condição inicial e, após a aplicação de tensões de controle de 60V ou 260V, foram apresentadas as formas de onda das correntes dos enrolamentos primários desde o instante inicial da simulação até o ponto de regime.

Nota-se que a tensão de controle afeta diretamente o tempo de resposta do reator que diminui conforme a tensão CC aplicada aumenta. Para a simulação com tensão de controle de 60V, por exemplo, o reator atinge a condição de regime em

aproximadamente sete segundos de simulação ao passo que com a tensão nominal de controle, o tempo de resposta cai para cerca de 1.2 segundos.

Em caso de haver alguma necessidade sistêmica, como ocorre na utilização deste equipamento em substituição a reatores fixos, o tempo de resposta pode ser reduzido ainda mais com a aplicação de uma tensão de controle superior à nominal durante um curto intervalo de tempo. Esse modo de operação “forçada” faz com que o reator atinja a condição nominal de operação em alguns milissegundos, conforme pode ser observado nos dados da Tabela III-4, permitindo assim cumprir alguns requisitos de performance da resposta transitória.

Tabela III-4 – Tempo de resposta do reator saturado em função da tensão de controle para tensão terminal nominal.

Tensão de controle (pu)	Tempo de resposta (s)	Tensão de controle (pu)	Tempo de resposta (s)
0.2	8.3184	2.2	0.4015
0.4	7.3184	2.4	0.3667
0.6	2.9582	2.6	0.3339
0.8	1.7243	2.8	0.3087
1.0	1.1843	3.0	0.2844
1.2	0.8662	3.5	0.2424
1.4	0.6998	4.0	0.2095
1.6	0.5912	4.5	0.1850
1.8	0.5090	5.0	0.1678
2.0	0.4503	10.0	0.0861

Em continuidade às avaliações computacionais do modelo do reator saturado sob condições idealizadas de representação dos sistemas CA e CC, pode-se traçar a curva característica que relaciona a tensão terminal do reator com a corrente solicitada. Especificamente no caso deste tipo de reator é preciso considerar, também, a tensão de controle aplicada, uma vez que esta possui participação determinante no seu desempenho.

A Figura III-12 mostra a relação entre a componente fundamental da corrente primária e a tensão terminal do reator, ambas representadas por seus valores por unidade, para

algumas tensões de controle. De acordo com os resultados obtidos, pode-se perceber que as correntes primárias do reator apresentam uma relação predominantemente não linear com a tensão terminal para valores de tensão de controle abaixo de 0.5 p.u. Com o aumento da tensão de controle, no entanto, a curva característica passa a apresentar uma variação praticamente linear entre essas grandezas, o que aproxima o desempenho desse equipamento ao de um reator a núcleo de ar.

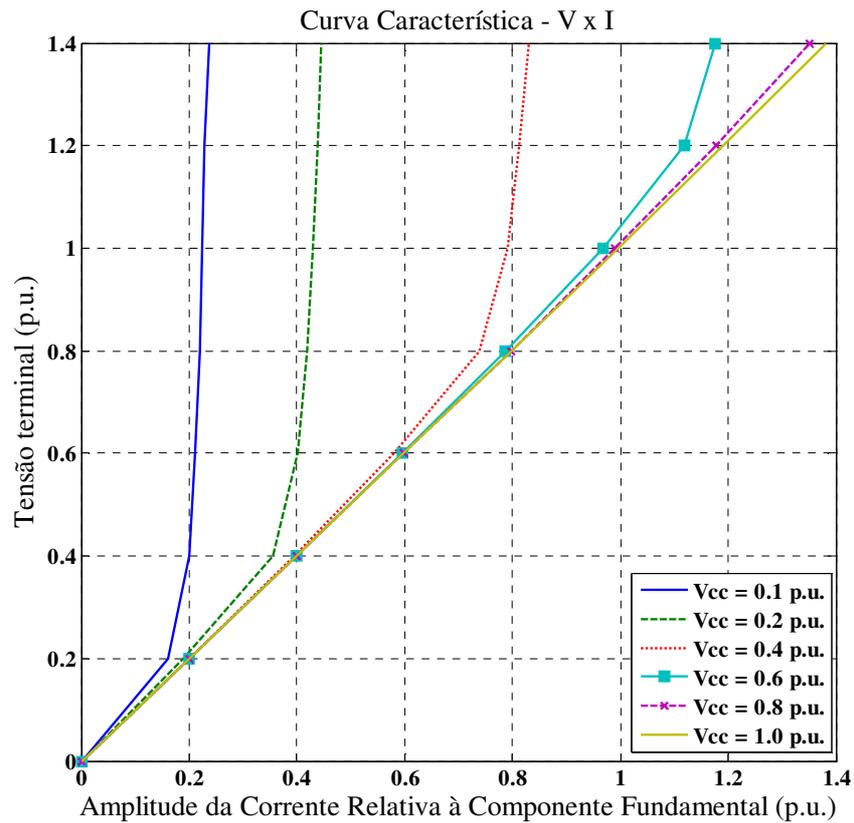


Figura III-12 – Curva característica V x I do reator saturado.

Expandindo essa última análise considerando diversos pontos de operação e diferentes tensões de controle, obtém-se os resultados mostrados na Figura III-13. Essa figura mostra uma superfície que representa a variação no consumo de potência reativa desse tipo de reator para os diversos pontos de operação ao qual ele pode ser submetido.

Pela análise desse gráfico nota-se que o consumo de potência reativa desse equipamento está mais fortemente ligado à tensão de controle do que à sua tensão terminal. Para valores de tensão de controle relativamente baixos, grandes alterações na tensão terminal têm pouca influência no consumo de potência reativa, ao passo que para uma

mesma tensão terminal, a variação na tensão de controle pode elevar ou reduzir substancialmente esse consumo.

Outra característica marcante mostrada nessa figura, e já salientada anteriormente, está relacionada ao comportamento do reator quando é aplicada a tensão de controle nominal, que faz com que a relação entre a tensão terminal e potência consumida seja praticamente linear.

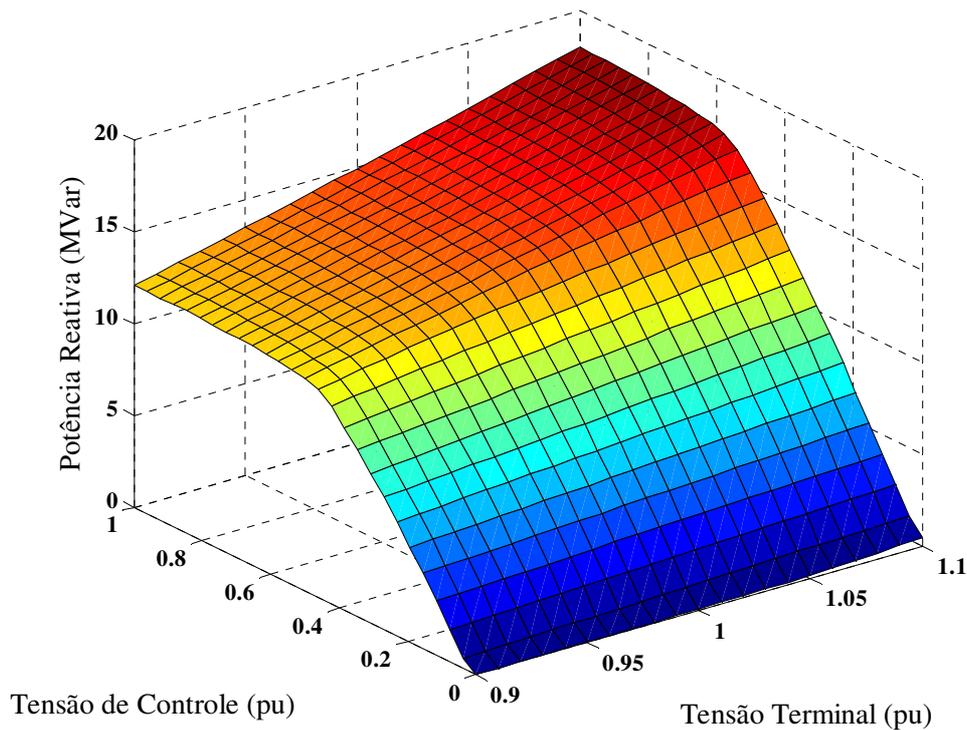


Figura III-13 – Consumo de potência reativa para diversos pontos de operação.

III.3.2 Desempenho do MCSR monofásico considerando a representação do sistema de controle CC e de um sistema CA teste.

A seção anterior teve por objetivo elucidar diversos aspectos relacionados ao desempenho do reator saturado de forma independente das condições do sistema elétrico e do comportamento de seu circuito de controle. Nesta seção, as fontes CC e CA ideais serão substituídas, respectivamente, por um circuito de controle composto por um retificador trifásico controlado por tiristores e por um sistema teste contendo dois barramentos interligados por uma linha de transmissão.

O circuito de controle comumente utilizado nos MCSRs possui dois retificadores trifásicos, dispostos em paralelo, dimensionados para potências da ordem de 1% a 3% da capacidade nominal do reator [4] e [16]. Como a potência desses conversores CA-CC são relativamente baixas, quando comparadas com a capacidade nominal do reator, a utilização de dois conversores não apresenta um grande impacto nos custos do circuito de controle e agrega um benefício considerável à confiabilidade de sua operação.

Além disso, a utilização da capacidade máxima das conversoras só é requisitada durante curtos períodos de tempo em situações onde há a necessidade de diminuir o tempo de resposta do reator. Na maioria dos casos, no entanto, os retificadores operam abaixo de sua capacidade nominal.

Nas simulações realizadas foram adotados os blocos de controle existentes na biblioteca de *templates* do MATLAB/Simulink referentes ao retificador controlado a tiristores e ao gerador de pulsos responsável por determinar os sinais de disparo. A Figura III-14 apresenta os componentes do circuito de controle utilizados tanto nas simulações com a representação monofásica quanto com a trifásica.

Nessa figura estão destacadas as indutâncias internas por fase ($L_{sa1}, L_{sb1}, L_{sc1}$), associadas à fonte de alimentação CA, as indutâncias por fase relativas ao próprio conversor ($L_{sa2}, L_{sb2}, L_{sc2}$) e o arranjo adotado para o filtro acoplado à saída do retificador trifásico. O dimensionamento dos parâmetros físicos dos componentes utilizados no filtro foi realizado de acordo com a referência [32] e levou em consideração a condição de máximo carregamento do circuito de controle. Os cálculos realizados, assim como as demais considerações acerca do dimensionamento dos filtros utilizados nas simulações podem ser obtidos no APÊNDICE A desta dissertação. O resultado dessas avaliações assim como os parâmetros físicos adotados, no entanto, estão discriminados na Tabela III-4 a seguir.

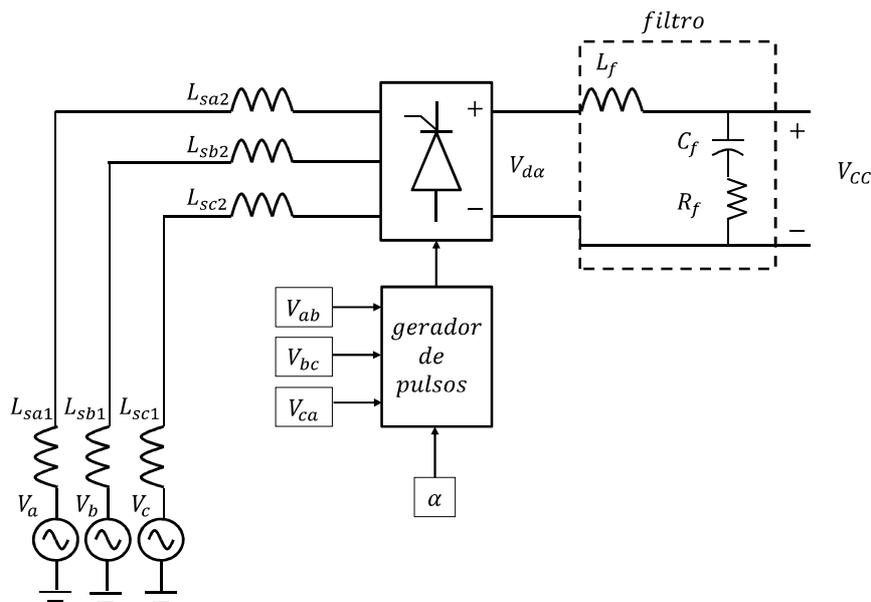


Figura III-14 – Circuito de controle do MCSR.

Tabela III-5 – Valores adotados para os parâmetros físicos dos elementos do circuito de controle do MCSR monofásico.

Variável	Valor utilizado
V_a, V_b e V_c	127V
$L_{sa1}, L_{sb1}, L_{sc1}$	0.02mH
$L_{sa2}, L_{sb2}, L_{sc2}$	0.08mH
L_f	0.66mH
C_f	6mF
R_f	0.1Ω

Associados aos blocos fundamentais que compõem o circuito de controle adotado para o MCSR, foi adicionada uma malha de controle para permitir regular a tensão terminal do reator saturado. Essa malha de controle teve como o objetivo principal determinar o valor do ângulo de disparo dos tiristores da ponte retificadora de tal forma que a tensão de controle CC nos terminais secundários tenha o valor médio necessário para elevar a saturação do núcleo e, conseqüentemente, a corrente nos enrolamentos primários e o consumo de potência reativa, alterando dessa forma a tensão terminal do reator.

A Figura III-15 apresenta o diagrama de blocos correspondente à malha de controle utilizada nas simulações. Nessa malha de controle, é realizada uma comparação entre o

valor eficaz da tensão medida no terminal do reator (V_{term}) e o valor pré-definido de referência (V_{ref}), retornando a magnitude da tensão CC (V_{def}) desejada nos enrolamentos de controle do reator. Esse sinal de tensão é então comparado com a tensão média efetivamente verificada (V_{CC}) e, de acordo com a equação (III-3), o ângulo de disparo dos tiristores (α) é determinado.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\pi V_{d\alpha}}{3\sqrt{2}V_{LL}} \right) \quad \text{(III-3)}$$

onde $V_{d\alpha}$ é a tensão média de saída na ponte de tiristores e V_{LL} é o valor eficaz da tensão fase-fase do terminal CA do conversor.

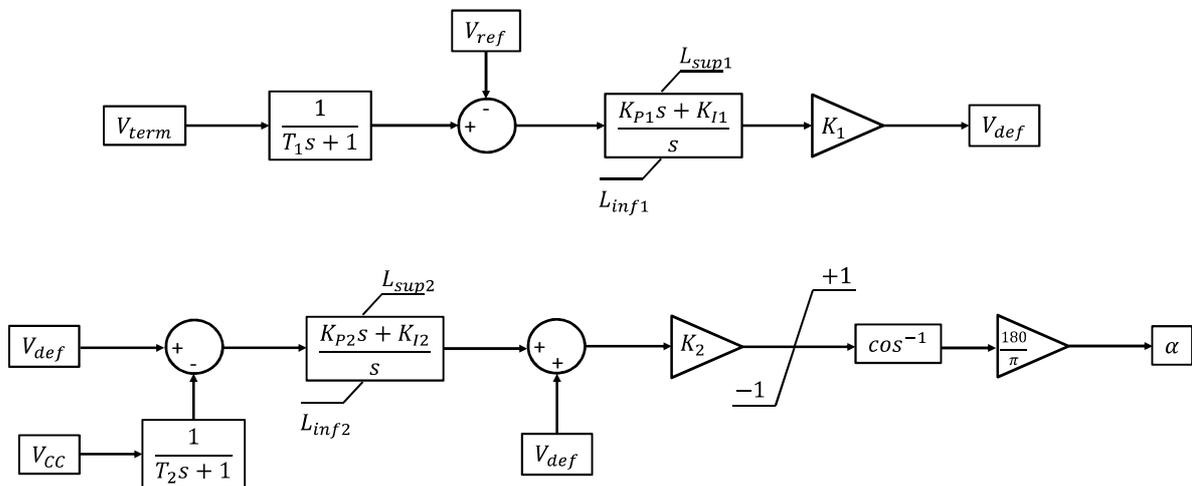


Figura III-15 – Diagrama de blocos associado ao controle de tensão do MCSR.

O diagrama de blocos anterior possui dois blocos que apresentam ação de controle do tipo proporcional-integral com limitação da sua variável de saída. O primeiro bloco objetiva zerar a diferença entre a tensão terminal do reator e o seu valor de referência, não permitindo que a sua variável de saída exceda o valor máximo de tensão CC. O segundo bloco, por sua vez, permite corrigir o valor da variável V_{def} de forma a contemplar a diferença existente entre a tensão CC aplicada nos terminais secundários do reator e a tensão $V_{d\alpha}$ controlada pela conversora. Os limites superior e inferior adotados neste caso servem para evitar excursões exageradas na correção do valor da tensão V_{def} .

Em todas as simulações realizadas nesta seção foram utilizados os parâmetros constantes da Tabela III-6 a seguir.

Tabela III-6 – Valores adotados para os parâmetros da malha de controle do MCSR monofásico.

Parâmetro	Valor utilizado	Parâmetro	Valor utilizado
T_1	0.01	K_{I1}	10
T_2	0.01	K_{I2}	15
K_1	260	L_{sup1}	1
K_2	$\pi/(3\sqrt{2} \times 220)$	L_{sup2}	50
K_{P1}	20	L_{inf1}	-0.05
K_{P2}	1	L_{inf2}	-50

O sistema teste apresentado na Figura III-16 foi utilizado para averiguar o desempenho de um MCSR monofásico de 15MVar. Esse sistema simplificado é composto por uma fonte ideal com nível de tensão nominal de 230kV responsável pela alimentação de uma carga de 29.2MW. A linha de transmissão que interliga os barramentos de geração e carga possui uma extensão de 300km e apresenta os parâmetros unitários mostrados na Tabela III-7.

O MCSR avaliado foi alocado no barramento de carga e seu sistema de controle foi programado para manter a tensão terminal em 0.98p.u. Nestas simulações o ponto de operação inicial foi ajustado de tal forma que haja uma maior exigência de controle por parte do reator saturado quando da ocorrência de alterações no atendimento à carga. Em todos os casos, a tensão no lado emissor da linha de transmissão foi mantido em 1.040p.u.

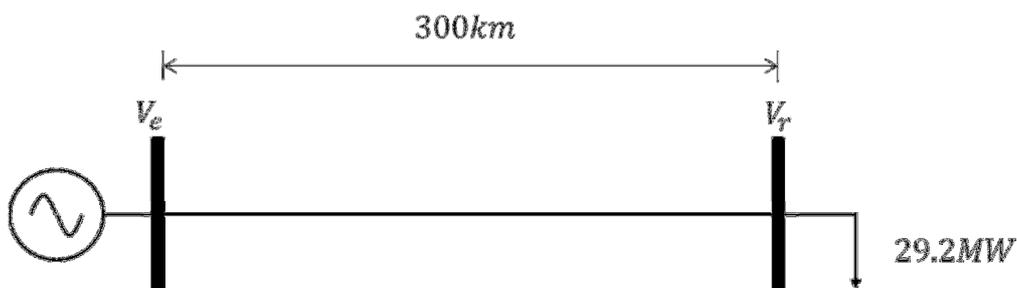


Figura III-16 – Sistema teste simplificado.

Tabela III-7 – Valores adotados para os parâmetros unitários da linha de transmissão.

Parâmetro	Valor utilizado
Resistência	0.0657 Ω /km
Indutância	1.358mH/km
Capacitância	8.628nF/km

O desempenho do reator foi avaliado sob as seguintes condições:

1. Condição inicial com atendimento pleno da carga considerada e posterior perda intempestiva de 50% do montante atendido.
2. Condição inicial com atendimento pleno da carga considerada e posterior perda intempestiva de 100% do montante atendido.
3. Condição inicial com fluxo nulo na linha de transmissão e posterior tomada de 100% da carga.

Para cada uma das condições descritas anteriormente foram plotadas as tensões e correntes nos terminais primários assim como a tensão de controle CC e o ângulo de disparo da ponte de tiristores que compõem o retificador controlado. Para a condição 1, Figura III-17 apresenta os gráficos referentes à variação de tensão no terminal CA do reator saturado durante a redução instantânea de 50% da carga do terminal receptor aos 500ms de simulação. Conforme apresentado nessa figura, a perda da carga acarreta uma elevação no nível de tensão no terminal do MCSR que atua no sentido de restabelecer a condição inicial previamente definida.

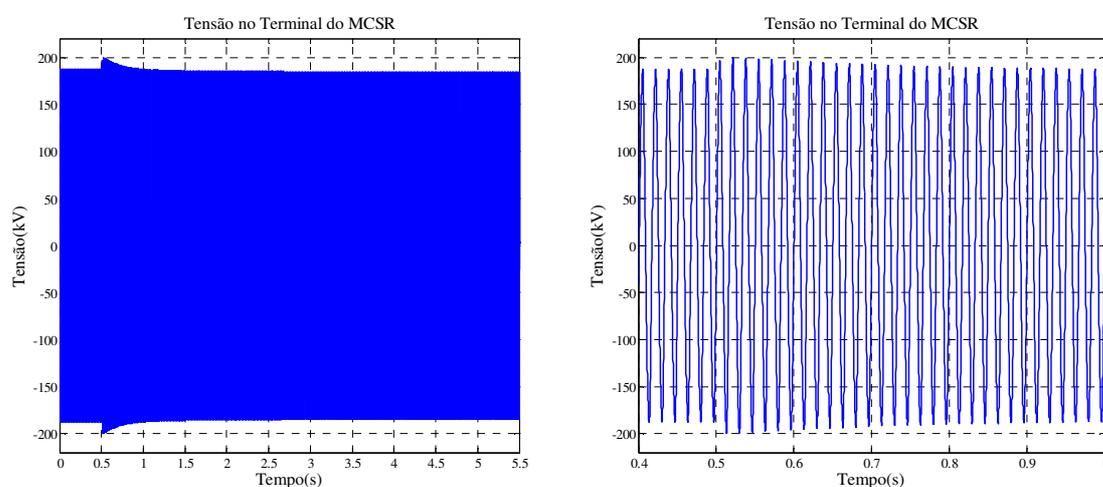


Figura III-17 – Tensão no terminal primário do MCSR na perda intempestiva de 50% da carga.

A Figura III-18 apresenta a atuação do sistema de controle do reator, que permite definir o novo ângulo de disparo do retificador e consequentemente o novo valor médio da tensão de controle capaz de elevar a potência consumida e, desse modo, minimizar o desvio da tensão terminal em relação à tensão de referência.

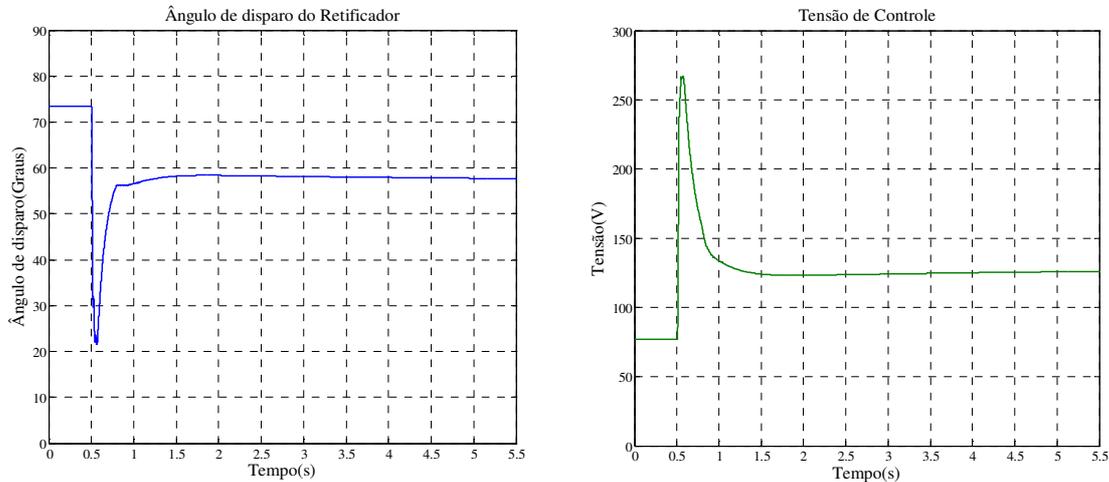


Figura III-18 – Variação na tensão CC e ângulo de disparo na perda intempestiva de 50% da carga.

A Figura III-19 mostra a alteração na magnitude da corrente primária do reator decorrente da elevação da tensão média nos enrolamentos de controle. No ponto de operação inicial, a componente fundamental da corrente dos enrolamentos primários possui valor eficaz de 68.5A, o que corresponde a um consumo de potência reativa de aproximadamente 8.9Mvar. Após a perda parcial da carga e da ação do circuito de controle, as magnitudes da corrente e da potência consumida, elevam-se respectivamente para 102.7A e 13.3Mvar na condição de regime.

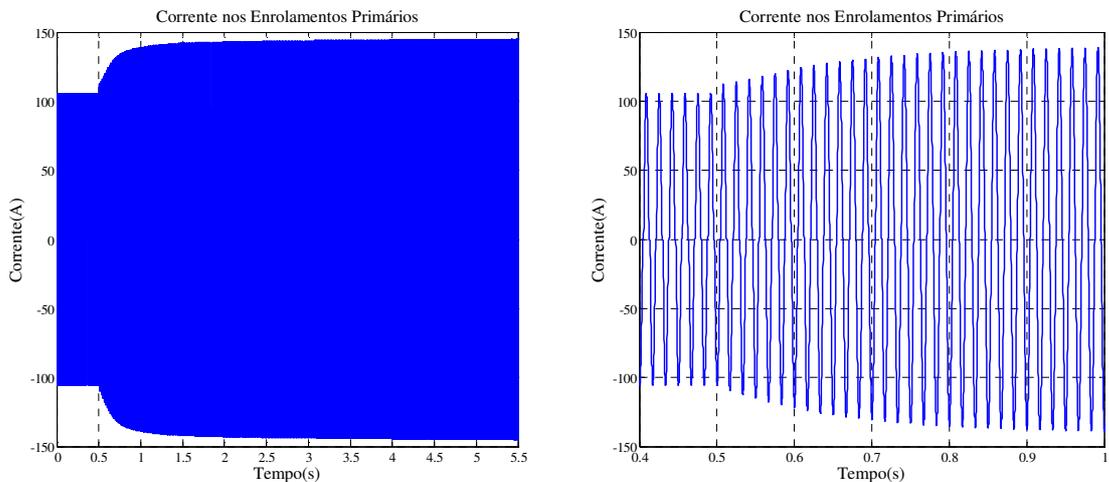


Figura III-19 – Variação na corrente primária do MCSR na perda intempestiva de 50% da carga.

Para a segunda condição avaliada, a perda total da carga atendida provoca uma elevação mais severa nos níveis de tensão, quando comparada com a condição 1, pois reduz a zero o fluxo ativo na linha de transmissão acentuando o seu efeito capacitivo. A Figura III-20 mostra a variação do valor da tensão terminal do MCSR após a perda intempestiva de toda a carga alimentada pela linha de transmissão aos 500ms de simulação.

A tensão inicial no terminal do MCSR é de 0.98p.u., o que corresponde à tensão de referência escolhida, e após a ocorrência do evento simulado, um novo ponto de regime é atingido com tensão terminal de 0.994p.u. Esse novo ponto de operação evidencia o esgotamento da capacidade de controle de tensão do reator nesta situação e permite avaliar o comportamento do circuito de controle sob condições mais rigorosas de operação.

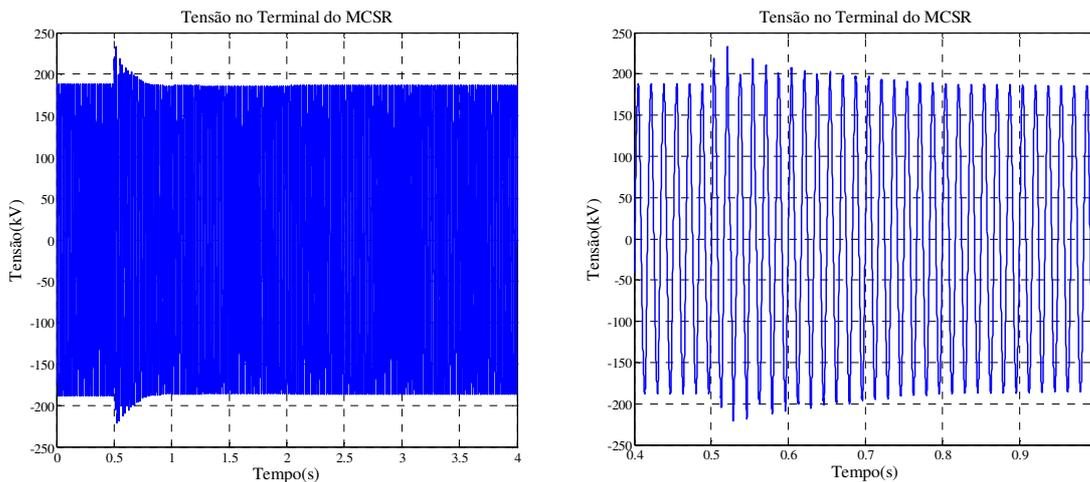


Figura III-20 – Tensão no terminal primário do MCSR na perda intempestiva de 100% da carga.

A Figura III-21 mostra a atuação do sistema de controle do MCSR durante a ocorrência do evento simulado na condição 2. Pela análise desses gráficos, pode-se perceber que devido à maior amplitude na variação da tensão terminal nos instantes iniciais, o sistema de controle rapidamente satura atingindo o valor máximo (260V) da tensão de controle. Como a capacidade nominal do reator é insuficiente para manter a tensão terminal no valor especificado, a tensão secundária no ponto de operação final também atinge a sua máxima amplitude.

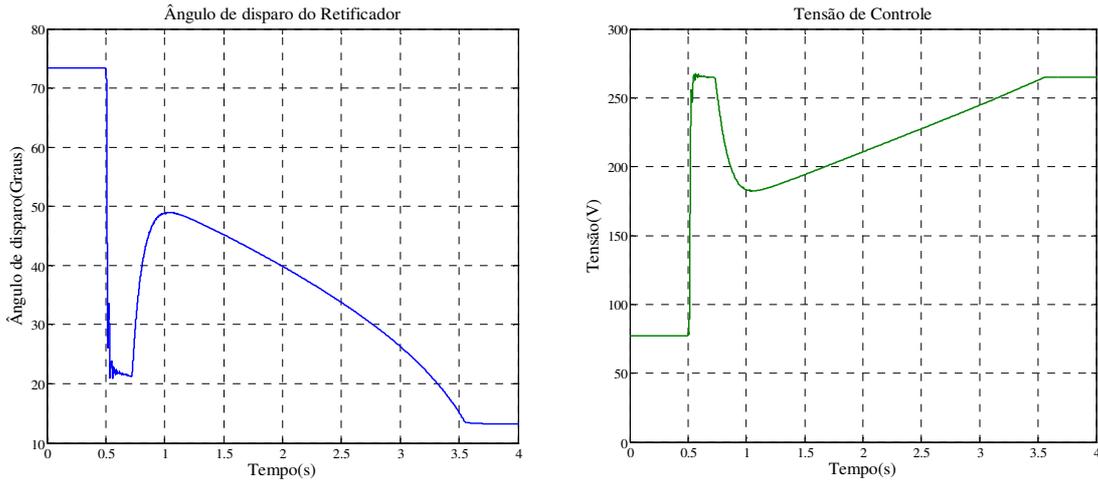


Figura III-21 – Variação na tensão CC e ângulo de disparo na perda intempestiva de 100% da carga.

A Figura III-22 mostra a alteração na magnitude da corrente primária do reator decorrente da elevação da tensão média nos enrolamentos de controle. No ponto de operação inicial, a componente fundamental da corrente dos enrolamentos primários possui valor eficaz de 68.5A, o que corresponde a um consumo de potência reativa de aproximadamente 8.9Mvar. Após a perda total da carga e da ação do circuito de controle, as magnitudes da corrente e da potência consumida, elevam-se respectivamente para 111.8A e 14.8Mvar na condição de regime.

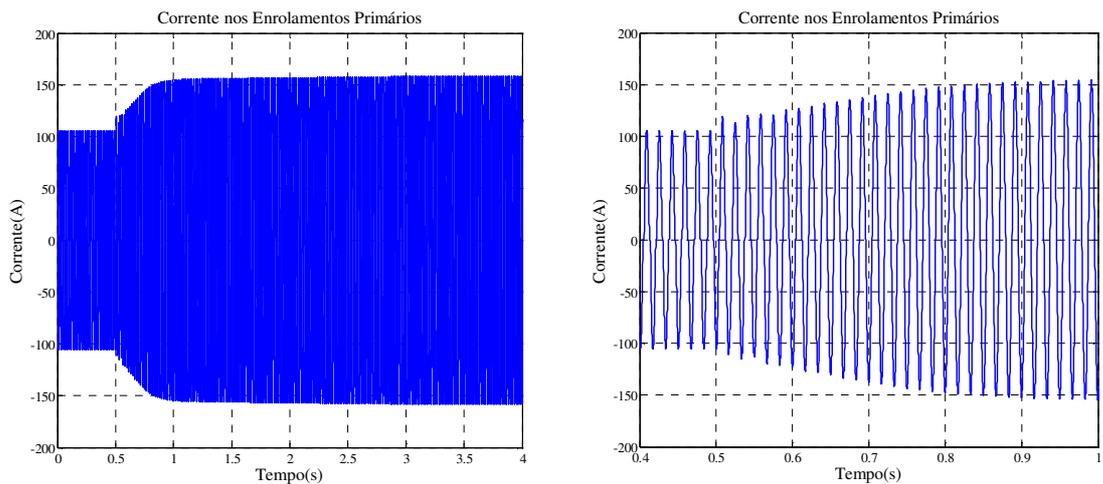


Figura III-22 – Variação na corrente primária na perda intempestiva de 100% da carga.

A última condição simulada avaliou o desempenho do reator saturado frente a um aumento expressivo na carga atendida pelo sistema de transmissão teste. O ponto de

operação inicial desta simulação corresponde ao ponto de operação final obtido na simulação da condição 2 avaliada anteriormente.

Com o aumento da carga para 100% do valor nominal considerado, há uma queda nos níveis de tensão no terminal receptor da linha de transmissão, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura III-23. Essa queda de tensão faz com que o sistema de controle do MCSR atue reduzindo a tensão de controle e a potência consumida pelo reator, fazendo com que a tensão terminal retorne ao valor de referência especificado.

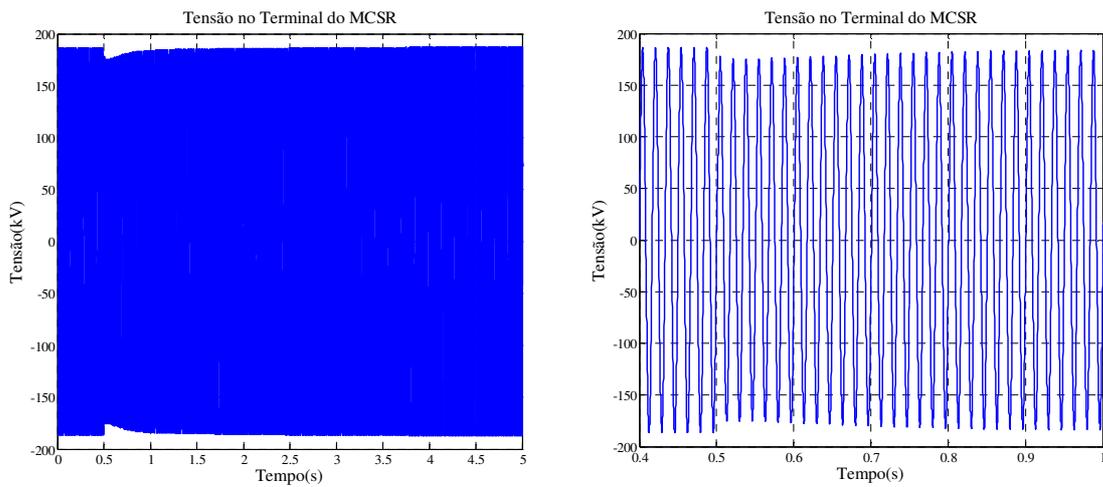


Figura III-23 – Tensão no terminal primário do MCSR com tomada de 100% da carga.

A Figura III-24 mostra a atuação do sistema de controle do reator, que permite definir o novo ângulo de disparo do retificador e o novo valor médio da tensão de controle capaz de reduzir a potência consumida e, desse modo, minimizar o desvio da tensão terminal em relação à tensão de referência.

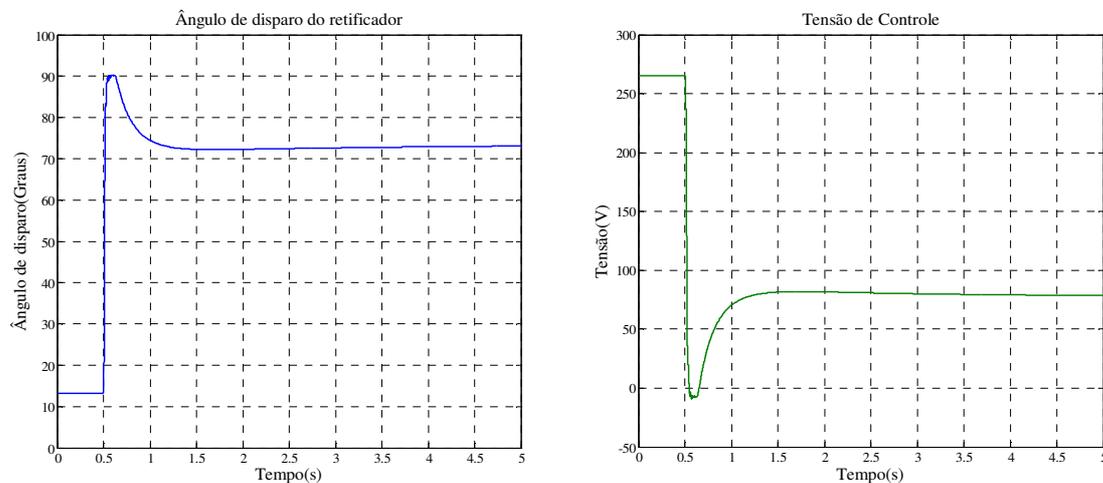


Figura III-24 – Variação na tensão de controle e ângulo de disparo com tomada de 100% da carga.

Por fim, a Figura III-25 a seguir apresenta a variação da magnitude corrente primária do reator decorrente da redução da tensão média nos enrolamentos de controle. No ponto de operação inicial, a componente fundamental da corrente dos enrolamentos primários possui valor eficaz de 111.8A, o que corresponde a um consumo de potência reativa de aproximadamente 14.8Mvar. Após a tomada de carga e a ação do circuito de controle, as magnitudes da corrente e da potência consumida, reduzem-se respectivamente para 69A e 8.9Mvar na condição de regime.

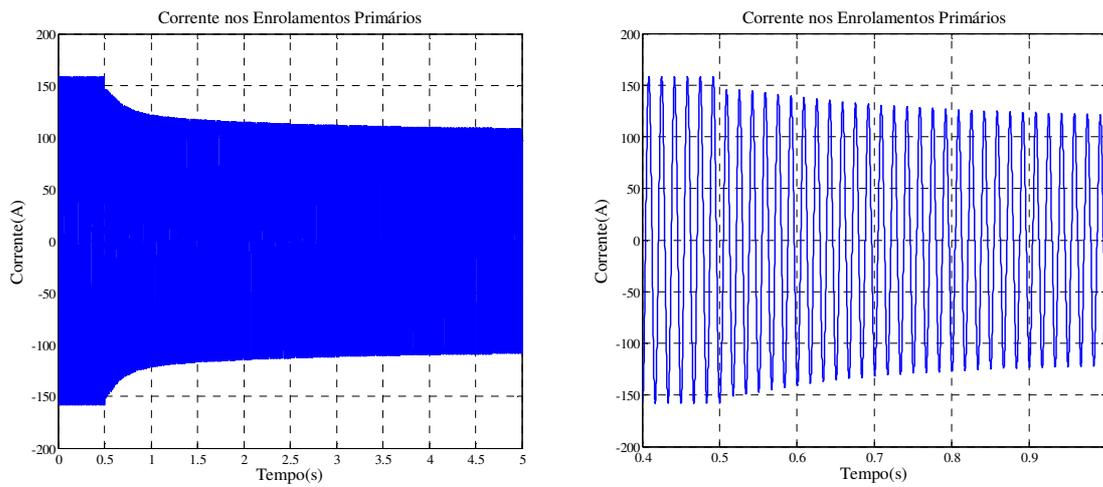


Figura III-25 – Variação na corrente primária com tomada de 100% da carga.

III.4 Avaliação do desempenho do MCSR trifásico para condições ideais de representação da rede CA.

De forma análoga ao realizado nas seções anteriores, o desempenho computacional do modelo proposto para a configuração trifásica do reator de saturação controlada foi avaliado sob condições idealizadas para a representação da rede CA. O sistema de controle CC composto por um retificador trifásico controlado, contudo, foi considerado em todas as simulações desta seção e adotou a mesma filosofia e topologia do circuito utilizado para a configuração monofásica do MCSR. Alguns dos parâmetros físicos e os blocos de controle, no entanto, necessitaram de reajustes em virtude do aumento da potência requerida pelos enrolamentos secundários na configuração trifásica.

Nesta configuração, a tensão de controle nominal elevou-se dos 260V, utilizados originalmente na configuração monofásica, para 390V de forma a obter a mesma

corrente de controle nominal de 650A em cada um dos ramos paralelos formados pela conexão dos enrolamentos secundários das seis unidades monofásicas que compõem o modelo adotado para o MCSR trifásico.

A Tabela III-8 e a Tabela III-9 apresentam os novos parâmetros considerados para os elementos do circuito de controle da configuração trifásica do MCSR nas simulações desta seção.

Tabela III-8 – Valores adotados para os parâmetros físicos dos elementos do circuito de controle do MCSR trifásico.

Variável	Valor utilizado
$V_a, V_b \text{ e } V_c$	220V
$L_{sa1}, L_{sb1}, L_{sc1}$	0.015mH
$L_{sa2}, L_{sb2}, L_{sc2}$	0.06mH
L_f	0.5mH
C_f	8mF
R_f	0.4Ω

Tabela III-9 – Valores adotados para os parâmetros da malha de controle do MCSR trifásico.

Parâmetro	Valor utilizado	Parâmetro	Valor utilizado
T_1	0.01	K_{I1}	10
T_2	0.01	K_{I2}	15
K_1	390	L_{sup1}	1
K_2	$\pi / (3\sqrt{2} \times 380)$	L_{sup2}	100
K_{P1}	20	L_{inf1}	-0.05
K_{P2}	1	L_{inf2}	-100

Utilizando-se da configuração proposta para a representação trifásica do reator de saturação controlada, foi avaliado o desempenho computacional desse equipamento quando submetido à tensão nominal de operação nos enrolamentos primários e a diferentes tensões de controle nos enrolamentos secundários.

Considerando como condição inicial das simulações um ponto de operação em regime permanente no qual a tensão de controle é igual a 0V, foi avaliada a performance do

reator saturado quando da aplicação de uma tensão de controle de 20V. Esse valor corresponde a cerca de 5% do valor da tensão de controle nominal e permite averiguar o desempenho do reator sob condições de baixa saturação do núcleo.

A Figura III-26 apresenta em destaque a corrente dos enrolamentos primários da fase A para o ponto de operação selecionado.

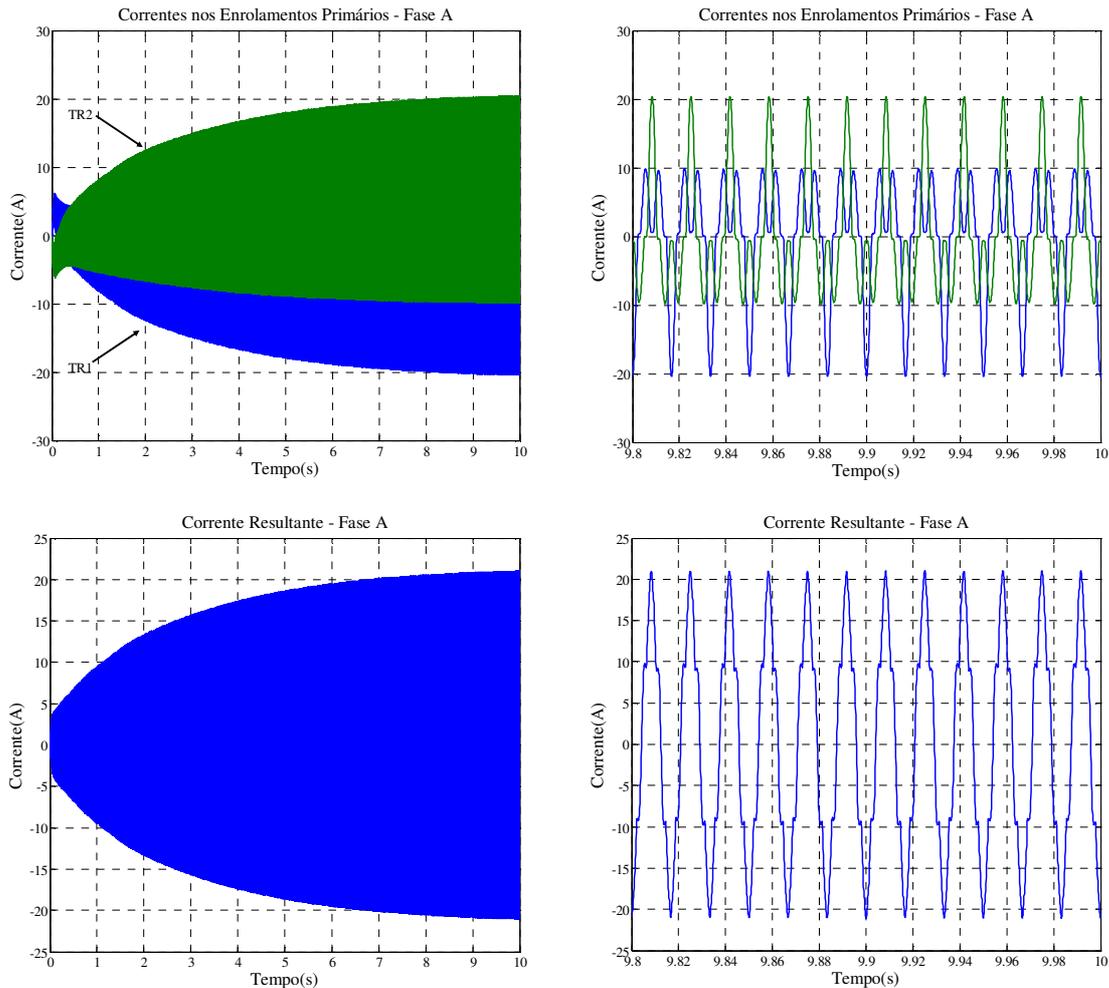


Figura III-26 – Correntes nos enrolamentos primários da fase A do reator com tensão de controle de 20V para a configuração trifásica.

Os resultados obtidos nessa simulação são similares aos mostrados anteriormente para a configuração monofásica no tocante ao tempo de resposta do reator e ao *offset* existente nas formas de onda das correntes e do fluxo concatenado. A forma de onda das correntes primárias apresenta uma deformação específica decorrente da ligação dos enrolamentos secundários, que promove uma forte interação entre as fases A, B e C.

Neste ponto de operação, o núcleo ferromagnético do reator opera dentro da zona de saturação por curtos períodos de tempo e nesses intervalos a permeabilidade relativa do núcleo encontra-se bastante reduzida, o que afeta diretamente as magnitudes das correntes dos enrolamentos primários e secundários, além das correntes de magnetização.

Devido à defasagem natural das tensões primárias e, conseqüentemente, das componentes alternadas do fluxo no interior do núcleo, cada um dos pares de transformadores que representam as fases do reator atinge a saturação em momentos distintos. Em função da conexão existente entre os enrolamentos secundários dos transformadores, a corrente de controle é a mesma em cada um dos ramos das fases A, B e C e, graças a essa característica, quaisquer alterações nas magnitudes das correntes secundárias influenciam simultaneamente todas as fases.

De forma análoga ao que ocorre na representação monofásica do reator, a corrente de controle é formada por componentes alternadas e contínuas. Na configuração trifásica, no entanto, a componente alternada da corrente secundária apresenta uma frequência de oscilação que corresponde ao triplo da frequência fundamental da tensão aplicada nos enrolamentos primários. Essa característica está relacionada, mais uma vez, à variação da permeabilidade relativa de cada uma das fases do reator em momentos distintos.

A componente contínua, por sua vez, possui uma magnitude dada pela relação entre a tensão de controle CC e a resistência equivalente vista pelos terminais do retificador que, neste caso, corresponde ao valor da resistência de cada enrolamento multiplicada por um fator de 1.5.

Para este mesmo ponto de operação, a Figura III-27 apresenta as correntes de magnetização em cada uma das fases do reator e as correntes dos enrolamentos de controle nos ramos paralelos existentes no modelo. Conforme pode ser observado, a variação da magnitude das correntes de magnetização, decorrente da alteração do grau de saturação do núcleo de cada uma das fases, influencia diretamente a forma de onda da corrente de controle, que reflete as alterações nas permeabilidades relativas de cada um dos núcleos que compõem as fases do reator.

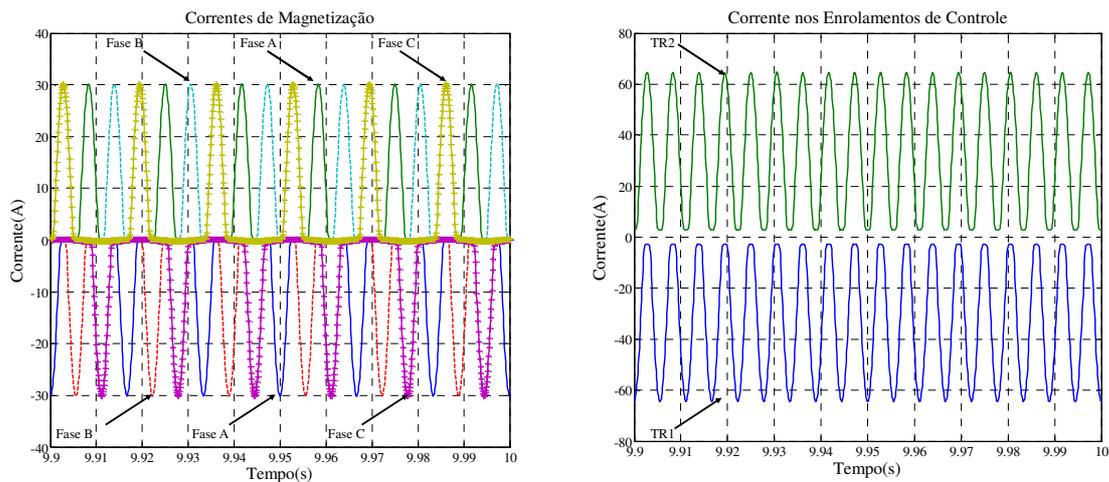


Figura III-27 – Correntes de magnetização e correntes nos enrolamentos secundários do reator com tensão de controle de 20V para a configuração trifásica.

Elevando-se a tensão de controle para um valor de 180V, o que corresponde a cerca de 45% da tensão nominal de controle, altera-se o ponto de operação do reator para uma condição de consumo intermediário de potência reativa com grau de saturação β superior a π . Nessa condição, onde ocorre simultaneidade entre os períodos em que os núcleos das diferentes fases encontram-se saturados, há uma redução significativa na distorção na forma de onda das correntes primárias conforme mostrado na Figura III-28.

Esta figura destaca, ainda, a redução do tempo de resposta do reator, que atinge sua condição de regime em aproximadamente três segundos. Este desempenho assemelha-se ao observado para a configuração monofásica, onde foi verificada a relação inversamente proporcional entre a tensão de controle CC e o tempo de resposta do reator.

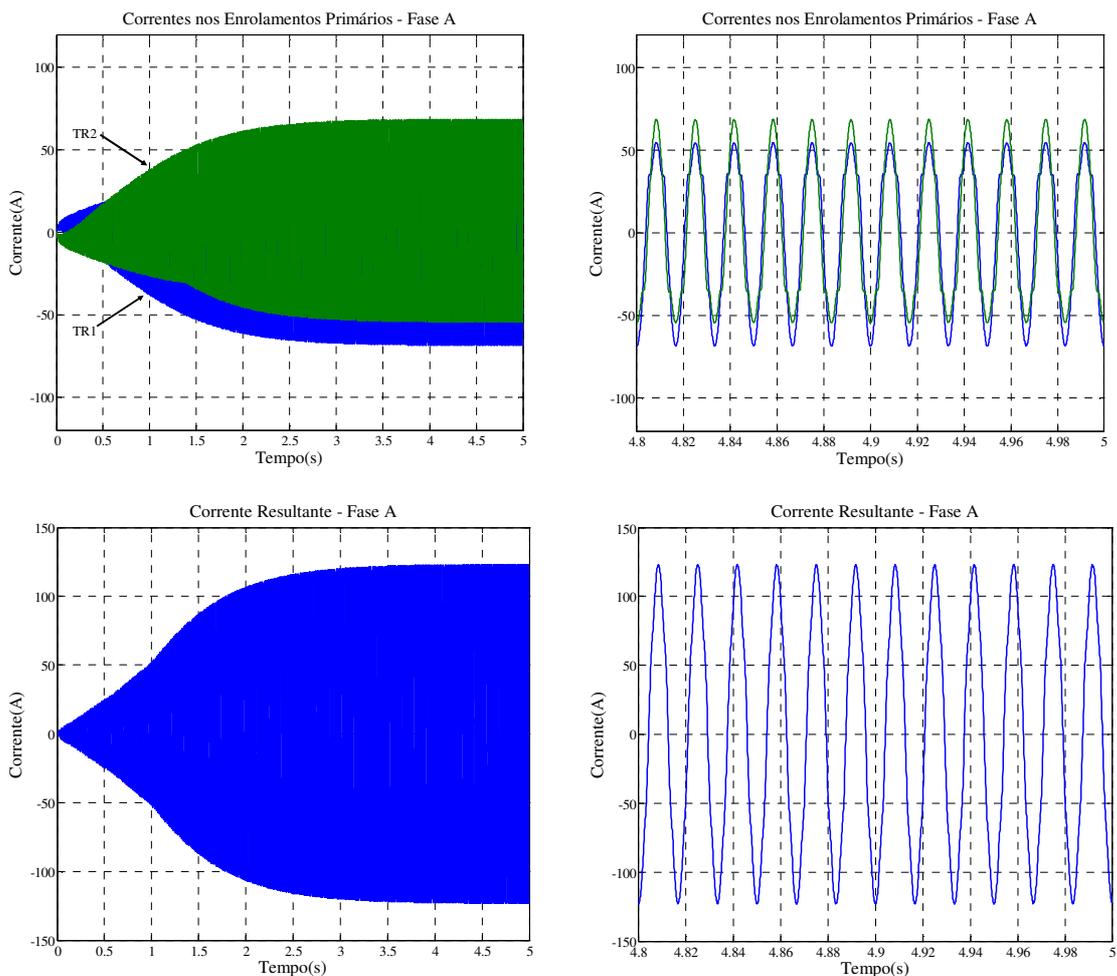


Figura III-28 – Correntes nos enrolamentos primários da fase A do reator com tensão de controle de 180V para a configuração trifásica.

A Figura III-29 apresenta as correntes de magnetização e as correntes nos enrolamentos secundários quando aplicada tensão de controle de 180V. Nesta figura, observa-se que com o aumento na tensão de controle, há também uma elevação na magnitude das correntes de magnetização em cada uma das fases do reator sem alterar, contudo, a sua influência na forma de onda da corrente de controle.

A corrente nos enrolamentos secundários permanece apresentando uma componente alternada com uma frequência três vezes superior à fundamental, porém, devido à tensão CC de maior magnitude, a componente contínua da corrente passa a tornar-se preponderante nesses enrolamentos.

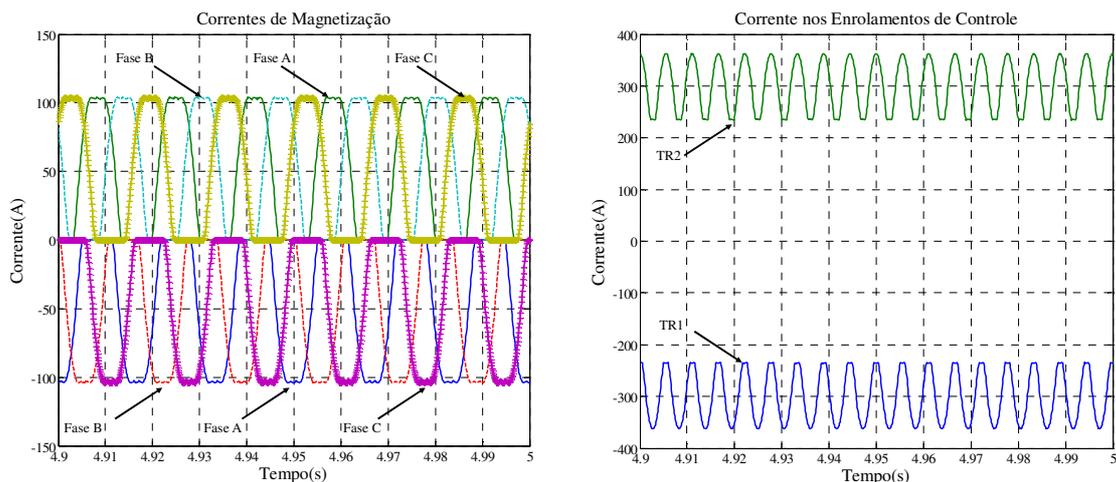


Figura III-29 – Correntes de magnetização e correntes nos enrolamentos secundários do reator com tensão de controle de 180V para a configuração trifásica.

Por fim, ao se aplicar a tensão de controle nominal (390V) o reator passa a operar na sua condição de consumo máximo de potência reativa. Nesse ponto de operação, todos os núcleos ferromagnéticos representados no modelo trifásico operam constantemente dentro da zona de saturação, fazendo com que as correntes nos enrolamentos de trabalho das três fases possuam formas de onda praticamente livres distorções harmônicas.

Conforme pode ser observado na Figura III-30, para esse ponto de operação, a corrente primária resultante da fase A apresenta amplitude de 160A e um valor eficaz de 113A, o que resulta em um consumo de potência reativa nominal de 45MVar.

Outro ponto de destaque do resultado dessa simulação está relacionado ao tempo de resposta do reator. Conforme pode ser observado na figura a seguir, são necessários aproximadamente 1.2 segundos para que o reator atinja a sua condição de regime permanente a partir de uma condição inicial de mínimo consumo de potência reativa. Este resultado está de acordo com o encontrado na seção III.3.1, onde foram realizadas simulações semelhantes para a configuração monofásica do MCSR.

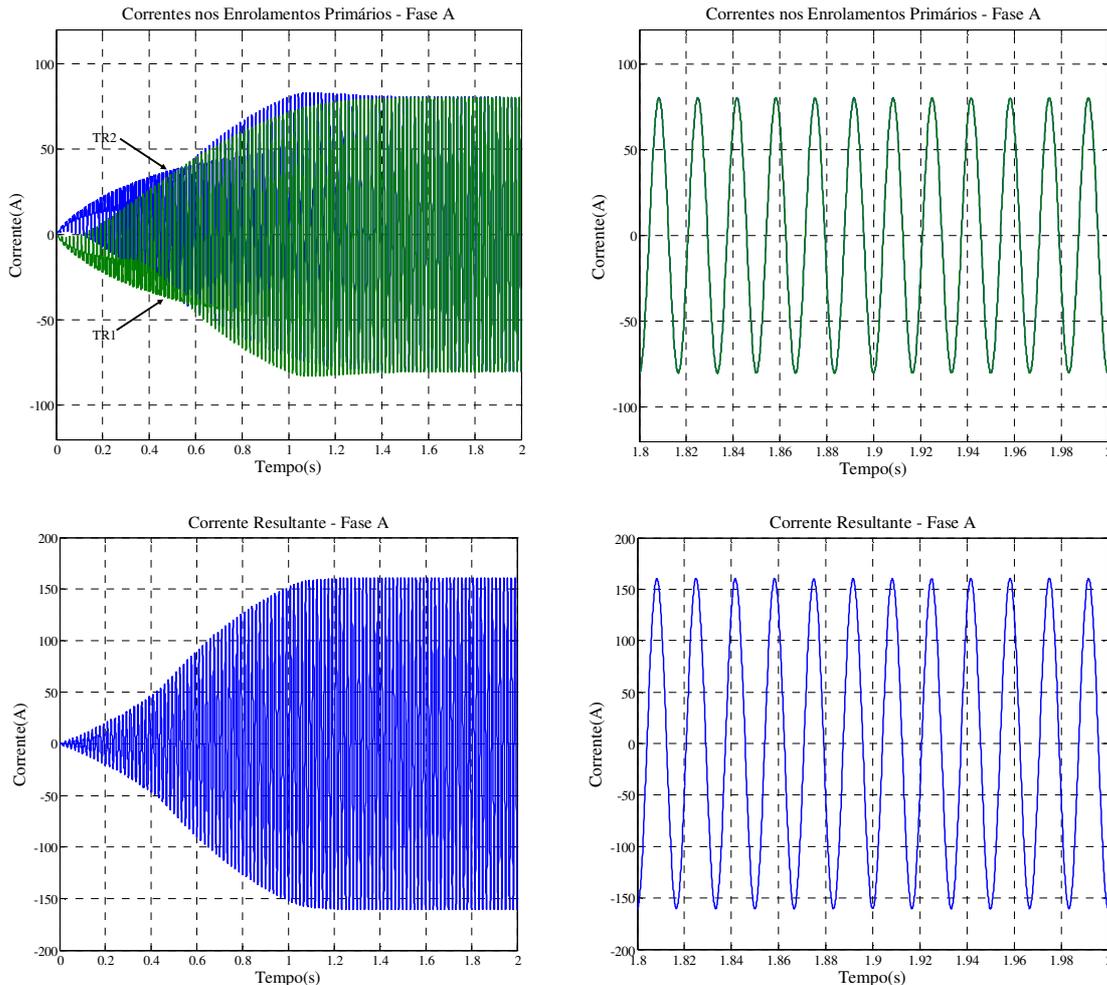


Figura III-30 – Correntes nos enrolamentos primários da fase A do reator com tensão de controle de 390V para a configuração trifásica.

Para este mesmo ponto de operação, a Figura III-31 apresenta as correntes de magnetização em cada uma das fases do reator e as correntes nos enrolamentos secundários nos ramos paralelos que compõem o modelo trifásico do MCSR. De forma análoga ao que ocorria na configuração monofásica, ao operar constantemente na zona de saturação, as correntes de magnetização apresentam variações praticamente senoidais.

Além disso, as correntes dos enrolamentos de controle não possuem mais componentes alternadas e são formadas apenas por uma componente contínua cuja magnitude é dada pela relação entre a tensão de controle CC e a resistência equivalente dos enrolamentos secundários.

Neste ponto de operação, a magnitude da corrente nos ramos paralelos do circuito de controle é de 1300A, o que corresponde ao dobro do valor da corrente de controle nominal da configuração monofásica.

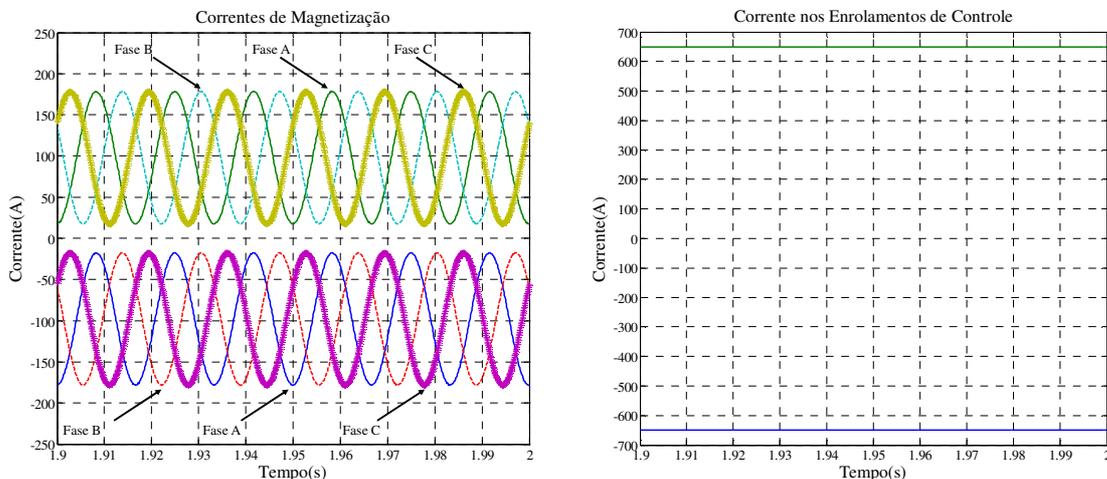


Figura III-31 – Correntes de magnetização e correntes nos enrolamentos secundários do reator com tensão de controle de 390V para a configuração trifásica.

III.5 Características das componentes harmônicas de corrente para a configuração trifásica do MCSR.

Conforme apresentado nas seções anteriores, a injeção de correntes harmônicas por parte do MCSR depende essencialmente do grau de saturação do núcleo, que determina a distorção existente nas correntes de magnetização em cada uma das fases do reator. Outros dois aspectos relevantes que influenciam diretamente as distorções nas correntes primárias estão relacionados às conexões dos enrolamentos primários e secundários.

Enquanto a conexão dos enrolamentos de trabalho elimina completamente as componentes harmônicas de ordem par na corrente resultante do reator, a conexão dos enrolamentos secundários contribui significativamente para a redução das componentes ímpares múltiplas de 3, diminuindo-as a ponto de apresentarem magnitudes inferiores às harmônicas de 5ª e 7ª ordens.

A Figura III-32 apresenta a variação na magnitude das componentes harmônicas da corrente das fases do reator em função da potência reativa consumida. Para obtenção

deste resultado foi considerada a aplicação da tensão de 390V nos terminais de controle a partir de um ponto de operação de mínimo consumo de potência reativa. Para cada um dos pontos de operação foram calculadas, então, as magnitudes das componentes harmônicas da corrente primária resultante na fase A.

Os resultados apresentados na figura a seguir contemplam os valores das magnitudes em unidades do sistema internacional (Ampere) e em valores relativos à magnitude da componente fundamental da corrente nominal (pu).

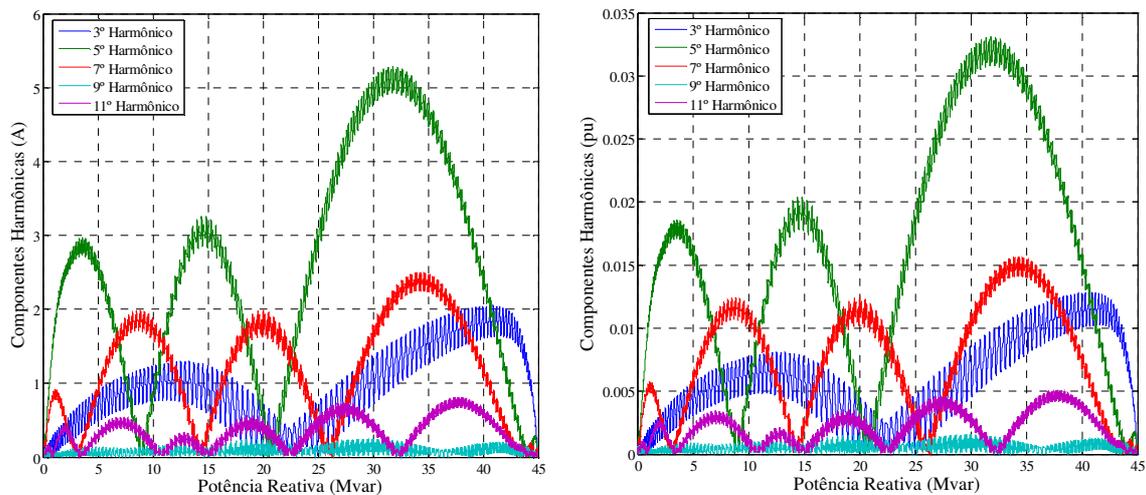


Figura III-32 – Magnitudes das componentes harmônicas em função da potência reativa consumida pelo reator.

Conforme pode ser observado nesta figura, e previsto na seção 0, cada uma das componentes harmônicas de ordem n possui $n-1$ valores máximos distribuídos entre os pontos de operação de mínimo e máximo consumos de potência reativa. Destaca-se, também, que para a condição simulada os valores máximos obtidos para as magnitudes das harmônicas de terceira, quinta, sétima e nona ordens são, respectivamente, 1,28% (2.05A), 3,3% (5.29A), 1,57% (2.50A) e 0,05% (0.81A).

Os resultados desta última análise apresentaram a variação das componentes harmônicas mais relevantes considerando uma tensão nominal e fixa no terminal primário do reator. Generalizando esta avaliação, adotando diferentes tensões primárias e secundárias, é possível obter uma mostra do comportamento do MCSR em diversos pontos de operação aos quais o reator poderá estar submetido. A Figura III-33 apresenta gráficos

de superfície que representam as magnitudes das correntes harmônicas ímpares do MCSR para tensões terminais primárias que variam de 0.9 a 1.1pu e tensões de controle entre 0 e 1pu.

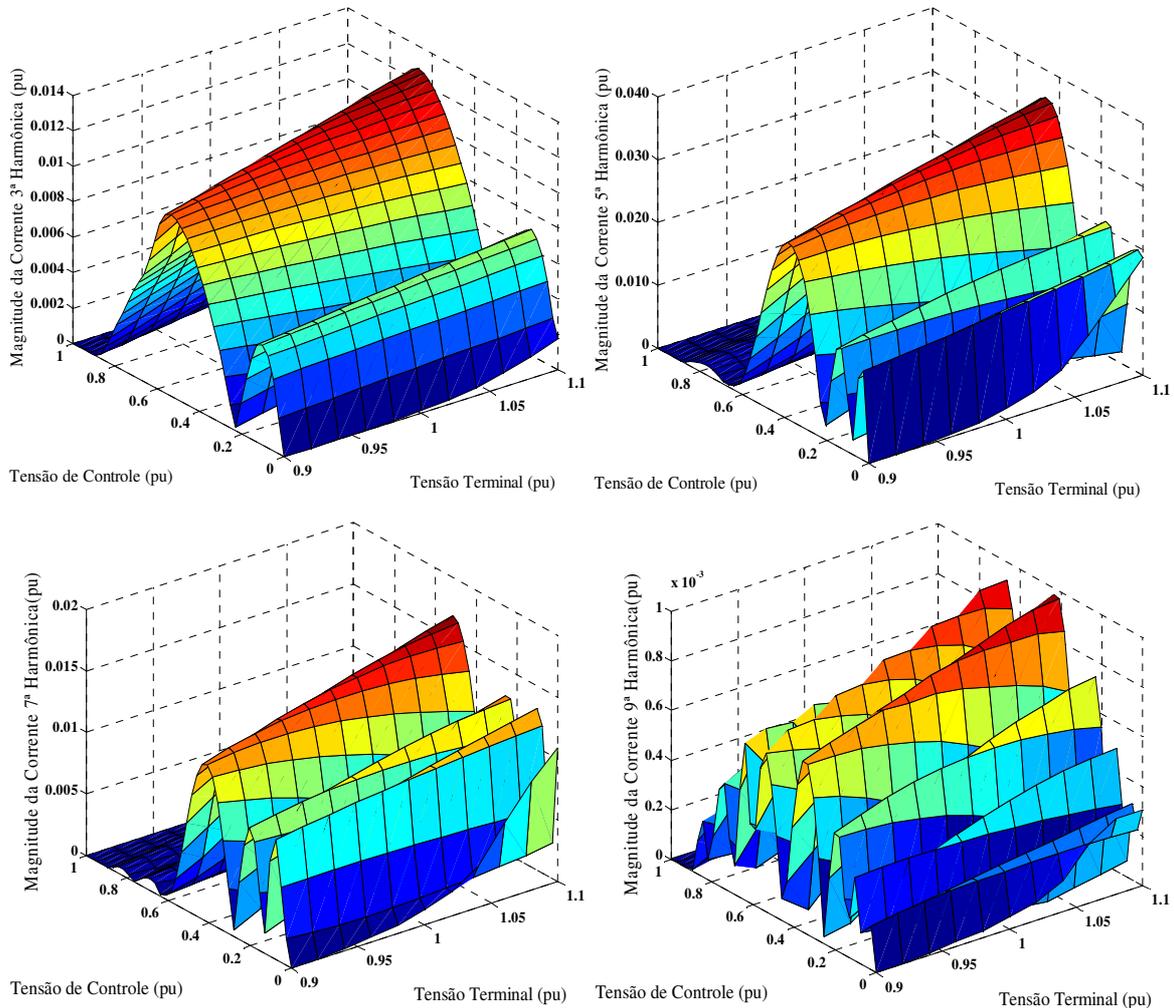


Figura III-33 – Magnitudes das componentes harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordens para diversos pontos de operação.

Pela avaliação dos resultados obtidos, pode-se notar que as componentes harmônicas de corrente apresentam variações fortemente relacionadas com a tensão de controle e que, em todos os casos, os valores máximos dessas componentes ocorrem em pontos de operação de consumo intermediário de potência reativa. Além disso, verifica-se que ao atingir seu consumo nominal, a corrente resultante quase não apresenta distorções.

Dentre todas as condições avaliadas, o máximo valor obtido para a amplitude das correntes harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordens foi, respectivamente, de 1.23% (1.96A),

3.57% (5.70A), 1.69% (2.69A) e de 0.09% (0.14A). Destaca-se, no entanto, que apesar de possuírem valores máximos relativamente modestos, quando comparados com as correntes nominais, as distorções da forma de onda são mais acentuadas para condições de consumo de potência reativa mais baixos devido à amplitude reduzida da componente fundamental da corrente nesses pontos de operação.

Conforme pode ser observado na Figura III-34, a Distorção Harmônica Total – DHT da forma de onda da corrente primária, considerando a amplitude da componente fundamental em cada ponto de operação, apresenta valores da ordem de 35% para tensões de controle abaixo de 0.05pu e tensão primária nominal. Ao se aumentar a tensão de controle, contudo, o valor da DHT diminui rapidamente, permanecendo abaixo de 5% na maior parte dos pontos de operação.

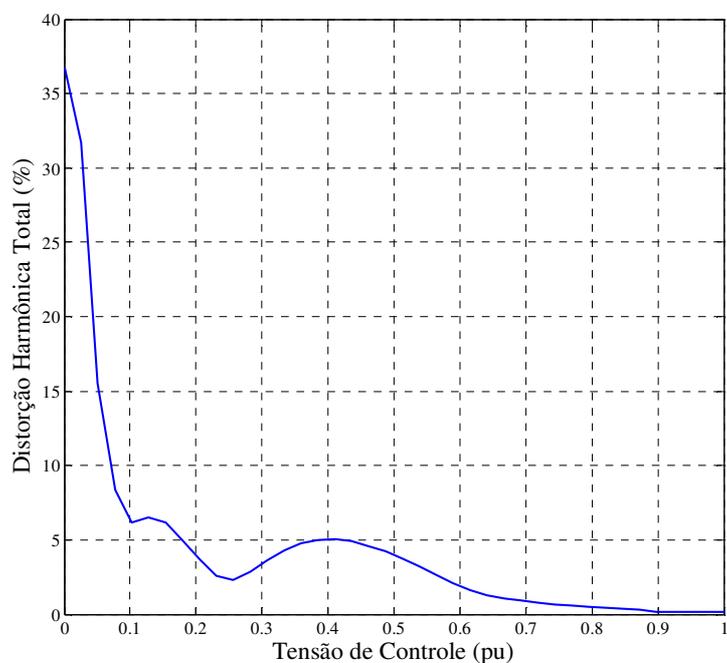


Figura III-34 – Distorção Harmônica Total da forma de onda da corrente primária resultante.

É importante destacar também que a trajetória decrescente do valor da DHT da Figura III-34 é interrompida na região onde a faixa de tensão de controle situa-se entre 0.25 e 0.4pu basicamente pela influência da corrente harmônica de 5ª ordem. Ao se avaliar a Figura III-33 e a Figura III-34 conjuntamente, pode-se constatar que esta faixa de operação coincide com a região onde essa harmônica possui uma elevação mais acentuada.

A partir do valor de tensão de controle de 0.4pu, a DHT diminui continuamente até atingir patamares inferiores a 0.2% no ponto de operação onde o consumo de potência reativa é o nominal.

III.6 Considerações finais.

O presente capítulo apresentou os resultados das simulações realizadas visando o estabelecimento de um modelo computacional capaz de emular o desempenho de um reator de saturação controlada do tipo MCSR. Foram avaliados os diversos aspectos relacionados ao funcionamento desse tipo de equipamento em suas configurações monofásica e trifásica, observando características relevantes tais quais: a modelagem da curva de magnetização, as formas de onda das correntes de trabalho e de controle, a influência das tensões primárias e de controle no funcionamento do reator, o conteúdo harmônico das correntes primárias, dentre outras.

Foram apresentados, inicialmente, os resultados das simulações que consideraram a utilização da modelagem monofásica do reator, tendo como ponto de partida configurações simplificadas para os sistemas CA e CC aos quais o reator está conectado. Posteriormente, foram incorporados ao modelo adotado o circuito de controle CC, composto por uma ponte de tiristores, e um sistema CA teste sobre o qual foram realizadas simulações para verificar a atuação do MCSR no controle da sua tensão terminal.

Para a configuração trifásica foi avaliada a performance do MCSR considerando a representação de um sistema de controle CC similar ao da configuração monofásica, atualizando-se apenas o valor das grandezas físicas associadas. Essas análises também contemplaram a obtenção do espectro harmônico das correntes primárias do reator e a avaliação da Distorção Harmônica Total para diversos pontos de operação.

Este capítulo não abordou, por questões puramente didáticas, a avaliação da performance da representação trifásica do MCSR em um sistema CA teste de maior porte. Essas avaliações serão deixadas para o próximo capítulo, onde será realizada uma descrição mais apurada do sistema teste utilizado.

CAPÍTULO IV ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REATORES DE SATURAÇÃO CONTROLADA NO CONTROLE DE TENSÃO DO SIN.

IV.1 Considerações iniciais.

A abordagem das avaliações realizadas no CAPÍTULO III teve por objetivo averiguar o desempenho do MCSR sob o ponto de vista do próprio equipamento. A influência das condições operativas sobre a performance do reator foi avaliada sob condições idealizadas ou simplificadas do sistema CA ao qual o reator está conectado. A sua interação com o sistema elétrico e os impactos advindos de sua operação serão discutidos com maior ênfase neste capítulo.

Além de dar continuidade às avaliações no domínio do tempo, verificando o desempenho do MCSR durante sua energização e em condições severas de variação dos níveis de tensão da rede, também serão realizadas simulações complementares em regime permanente e dinâmico utilizando, respectivamente, como ferramentas computacionais os programas ANAREDE e ANATEM desenvolvidos pelo CEPEL. Essas avaliações complementares têm por objetivo evidenciar a eficácia do MCSR em prover uma adequada regulação de tensão ao sistema e apresentar algumas formas de modelagem deste equipamento em outras ferramentas de análise comumente utilizadas no Brasil.

Para realização dessas análises foi selecionado um sistema teste de grande porte pertencente à Rede Básica do estado do Rio Grande do Sul. Este sistema, descrito com maiores detalhes na seção seguinte, possui características singulares que requerem a utilização de equipamentos capazes de prover compensação reativa variável, dentre os quais o MCSR se enquadra.

IV.2 Caracterização do sistema utilizado para as simulações computacionais.

O sistema elétrico da Rede Básica que supre o estado do Rio Grande do Sul, esquematizado no diagrama simplificado da Figura IV-1, é composto por linhas de

transmissão nos níveis de tensão de 525kV e 230kV. Além de auxiliar no suprimento à demanda do estado, essas linhas de transmissão interligam o Rio Grande do Sul ao estado de Santa Catarina e permitem, ainda, a integração do SIN com os sistemas elétricos de países vizinhos por meio das conversoras de Garabi (2200MW – Argentina), Uruguaiana (50MW – Argentina) e Livramento (70MW – Uruguai).

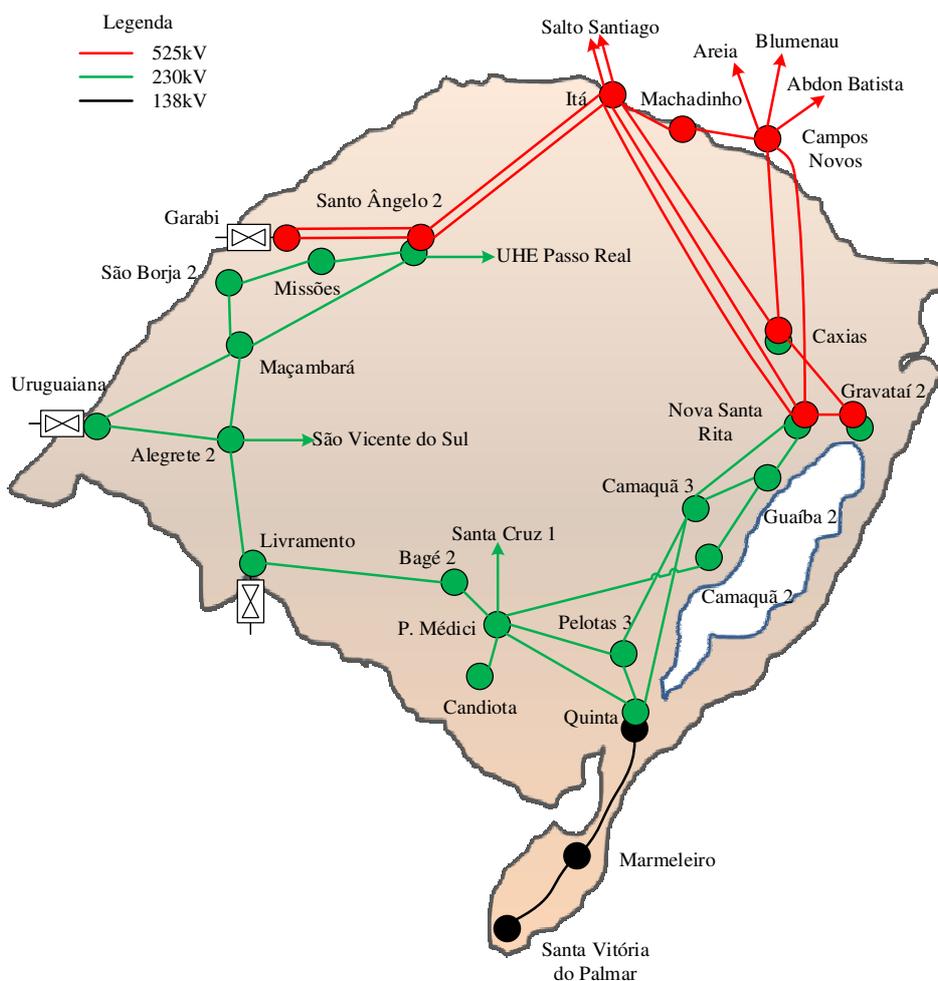


Figura IV-1 – Diagrama esquemático do sistema de transmissão do estado do Rio Grande do Sul.

Em complementação ao sistema de transmissão existente, a demanda do estado do Rio Grande do Sul é atendida por um parque gerador com predominância de fontes hídricas e térmicas. As fontes geradoras hídricas de maior importância para o estado estão localizadas na Bacia do rio Uruguai, com destaque especial para as usinas instaladas ao longo dos rios Passo Fundo e Jacuí. Quanto à geração térmica existente, destacam-se as usinas a carvão de Presidente Médici (420MW), Candiota (350MW) e Charqueadas (60MW), além das usinas a gás de Uruguaiana (600MW) e Sepé Tiaraju (250MW).

Somando-se as capacidades instaladas das fontes hídricas, térmicas aos 230MW provenientes de usinas eólicas contratadas sob a modalidade PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), o estado possui atualmente um parque gerador com uma potência instalada total da ordem de 6700MW [33].

A ampliação da oferta de energia no estado do Rio Grande do Sul tem se realizado de forma mais acentuada a partir de 2009 com o advento de leilões de energia específicos para as fontes alternativas. Devido à grande vocação do estado para o aproveitamento de empreendimentos eólicos, a participação desta fonte na sua matriz energética tem crescido substancialmente.

Conforme apresentado nos dados da Tabela IV-1, extraídos de [34], foram contratados mais de 1000MW de geração eólica no RS desde o ano de 2009. Estas contratações ocorreram nos diversos leilões realizados dentre os quais se destacam os Leilões de Energia de Reserva – LER, o Leilão de Fontes Alternativas – LFA e os Leilões de Energia Nova A-3 e A-5.

Tabela IV-1 – Empreendimentos eólicos contratados no RS a partir de 2009.

Ano	Leilão	Quantidade de Empreendimentos	Potência Contratada (MW)
2009	LER	8	186
2010	LFA	9	208
	LER	1	20
2011	LER	5	132,4
	A-3	21	492
2012	A-5	1	28
TOTAL			1066,4

Especificamente no caso do Rio Grande do Sul, a contratação realizada no Leilão A-3 de 2011, a de maior monta até então, concentrou um grande número de empreendimentos eólicos na região do litoral sul do estado. Dos 492MW contratados nesse leilão, 402MW estão localizados no município de Santa Vitória do Palmar, no extremo sul do estado. O sistema elétrico existente nesta região é composto por um único circuito no nível de tensão de 138kV, pertencente à rede de distribuição, com extensão de aproximadamente 200km.

Naturalmente, esse sistema não é capaz de permitir o escoamento da geração contratada de forma adequada requerendo, portanto, a implantação de reforços estruturais capazes de incorporar a geração existente e permitir futuras expansões da geração local. A determinação dos reforços necessários para permitir o escoamento dessa energia foi realizada no estudo de planejamento da expansão da transmissão [24], onde foi recomendada para o ano de 2014 a expansão do sistema do litoral sul do RS no nível de tensão de 525kV a partir da subestação Nova Santa Rita, localizada nas proximidades da região metropolitana de Porto Alegre.

O sistema proposto neste estudo teve suas especificações técnicas detalhadas nos relatórios [35] e [36], culminando com a determinação do sistema mostrado na Figura IV-2.

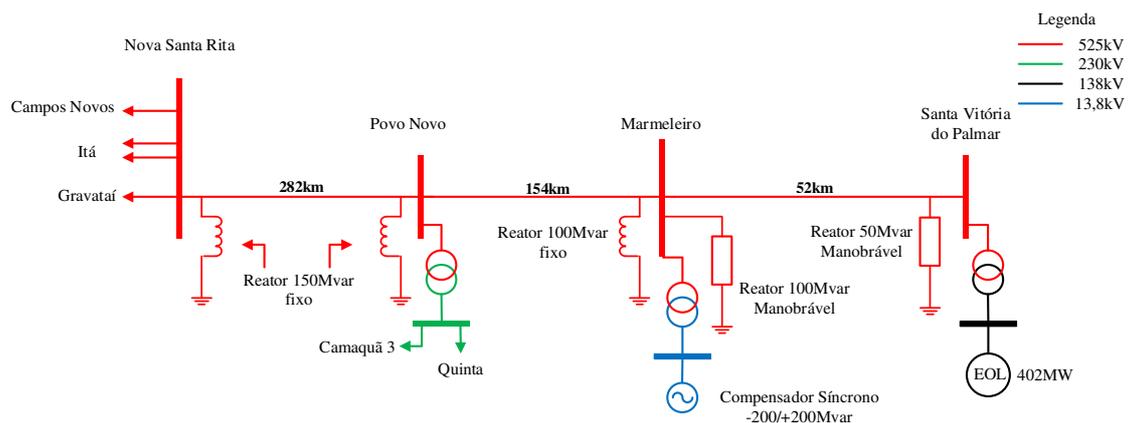


Figura IV-2 – Sistema de transmissão planejado para 2014 para a integração do potencial eólico do estado do Rio Grande do Sul.

Conforme pode ser observado na figura anterior, o sistema de escoamento da energia das usinas eólicas é constituído por três novas subestações interligadas por linhas de transmissão em 525kV que possuem uma extensão total de 488km. Nota-se que a partir da subestação Povo Novo, o sistema recomendado adota uma configuração essencialmente radial até o ponto de conexão das usinas. Também compõem o sistema de transmissão um conjunto de equipamentos de controle de tensão dentre os quais se

destacam 550Mvar em bancos de reatores monofásicos, dispersos nas novas instalações, e um compensador síncrono de 200MVA alocado na subestação Marmeleiro.

A característica radial do sistema elétrico recomendado, associado à intermitência na geração eólica e às variações acentuadas dos patamares de carga da região representam grandes desafios para realização de um controle de tensão adequado tanto em regime normal de operação quanto na ocorrência de contingências no sistema. De acordo com [24], a recomendação da implantação de um compensador síncrono na subestação Marmeleiro advém basicamente de dois motivos: o primeiro está relacionado à necessidade de prover compensação reativa variável ao sistema e o segundo, à necessidade de prover um aumento na potência de curto-circuito das subestações da região.

Outro ponto de destaque desse sistema está relacionado à necessidade de implantação de reatores fixos de grande porte (150Mvar e 100Mvar) nos terminais das linhas de transmissão com o intuito de evitar sobretensões sustentadas quando da ocorrência de manobras de rejeição de carga. Apesar de estritamente necessários, estes reatores acabam por diminuir a capacidade de regulação de tensão do compensador síncrono, pois atuam constantemente absorvendo potência reativa independentemente do ponto de operação do sistema.

Sob esse contexto, os MCSRs poderiam ser utilizados no sistema elétrico da região sul do Rio Grande do Sul em substituição aos reatores fixos convencionais alocados nas linhas de transmissão, permitindo assim um aproveitamento mais racional dos recursos de controle de tensão. Nesta avaliação é proposta a substituição de alguns dos reatores do sistema planejado por MCSRs de porte similar conforme apresentado na Figura IV-3, onde os reatores fixos dos terminais de Marmeleiro e Povo Novo são substituídos por MCSRs de 180Mvar cada.

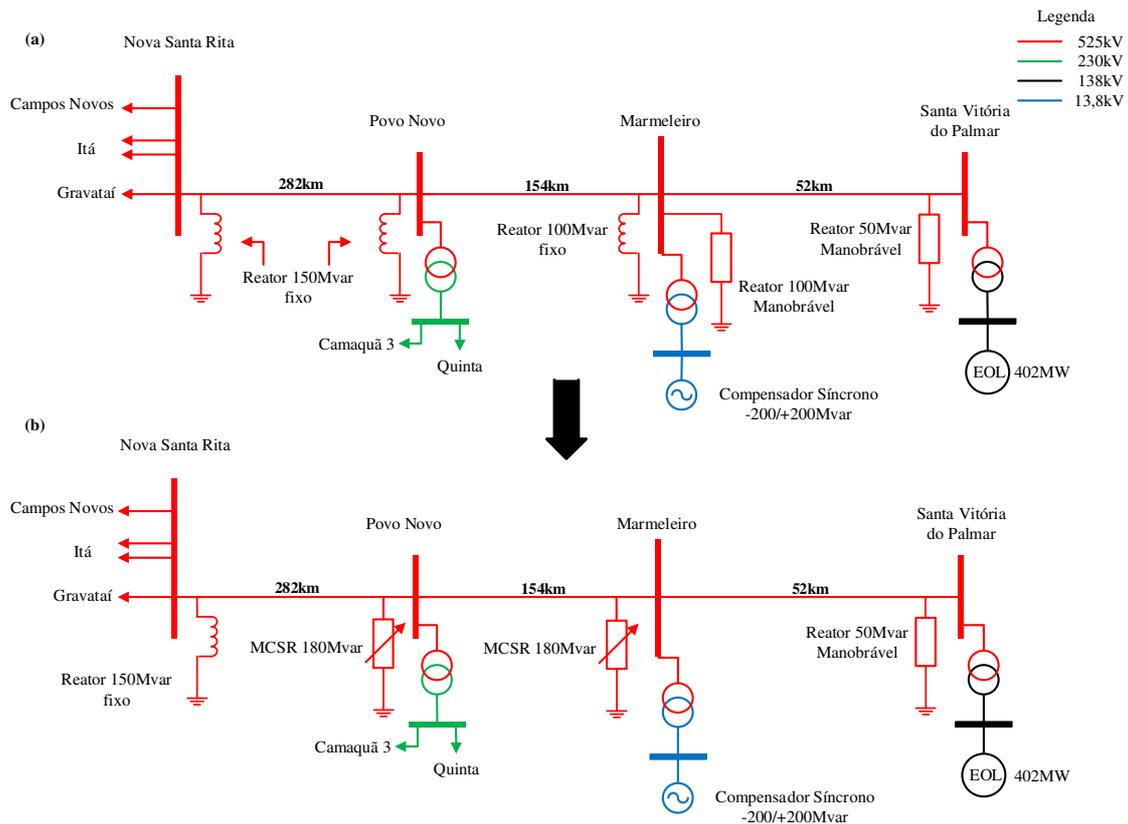


Figura IV-3 – Sistema de transmissão originalmente planejado (a) e substituição de reatores convencionais por MCSRs (b).

A configuração de MCSRs proposta para o sistema da região sul do RS visa permitir uma otimização no conjunto de reatores sem que haja prejuízo no atendimento às necessidades sistêmicas. Dessa forma, a substituição dos reatores convencionais por MCSRs foi realizada necessariamente nos terminais das linhas de transmissão Nova Santa Rita – Povo Novo e Povo Novo – Marmeleiro, pois a presença de reatores nesses terminais é obrigatória para que não haja superação das tensões terminais nessas linhas de transmissão.

Especificamente no caso da subestação Marmeleiro, a inclusão de um MCSR de 180Mvar no terminal de uma das linhas permite realizar a substituição dos dois reatores de 100Mvar planejados, dado que o novo equipamento supre as necessidades sistêmicas atuando tanto no controle de sobretensões dinâmicas sustentadas no terminal da linha de transmissão Povo Novo – Marmeleiro quanto na manutenção dos níveis de tensão do barramento desta subestação.

Além dos reatores de saturação controlada citados anteriormente, foi adicionado ao sistema de transmissão um MCSR de 50Mvar no barramento de 230kV da subestação Quinta, onde existem, atualmente, um banco de reatores e um banco de capacitores com potências nominais de 25Mvar cada. Neste caso, o novo equipamento substituiu o banco de reatores existente e, em associação com o banco de capacitores, objetiva compor um compensador estático com potência nominal de -25/25Mvar conforme apresentado na Figura IV-4.

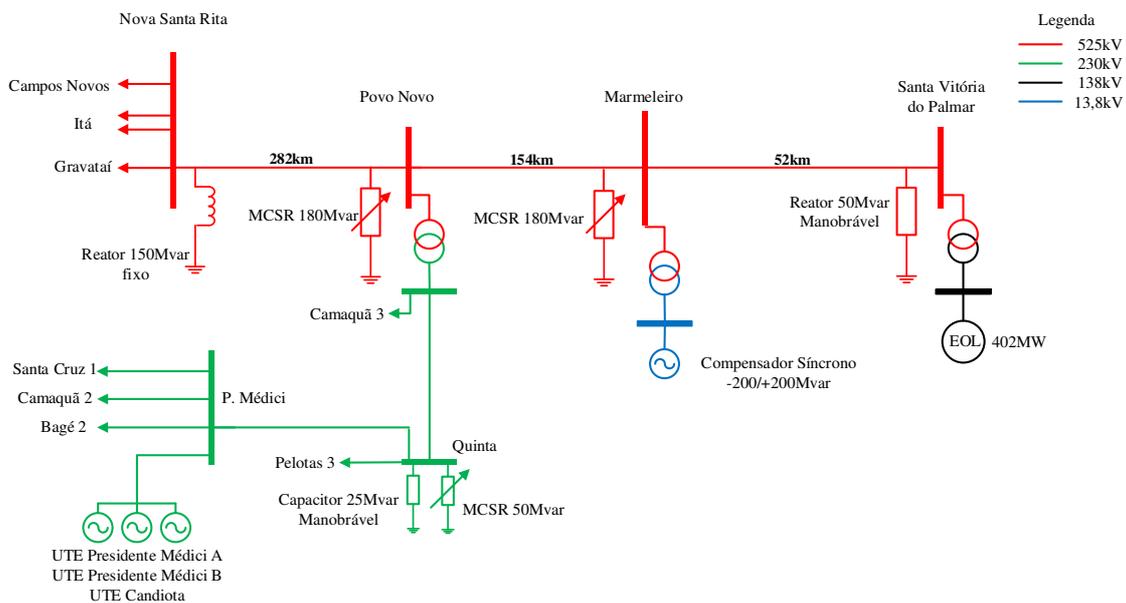


Figura IV-4 – Configuração adotada para o sistema de transmissão da região sul do RS.

IV.3 Caracterização dos cenários avaliados nas simulações computacionais.

Definida a topologia do sistema elétrico que será adotada, é imprescindível determinar as condições operativas que serão avaliadas nas simulações computacionais. Especificamente no caso do estado do Rio Grande dos Sul, os patamares de carga média e leve são considerados decisivos para as avaliações de desempenho sistêmico. Enquanto o patamar de carga média se configura como a condição de maior demanda do estado, o que requer uma atenção especial no que diz respeito à ocorrência de sobrecargas e subtensões, o patamar de carga leve demanda cuidado no tocante à ocorrência de sobretensões.

Além disso, o despacho adotado para as usinas da região sul influencia diretamente o desempenho do sistema elétrico. Para composição dos cenários avaliados nas simulações deste capítulo foram estabelecidas as seguintes combinações entre despachos de usinas térmicas, eólicas e hidráulicas:

1. Despacho das usinas eólicas → foram adotadas duas condições para o despacho das usinas eólicas: despacho nulo e 100% da capacidade instalada. Essas considerações refletem a intermitência dessa fonte geradora, que pode variar de 0% a 100% da potência instalada em um ciclo de carga diário.
2. Despacho das usinas térmicas → foram adotadas duas condições para o despacho das usinas térmicas da área de influência deste estudo: despacho nulo e 100% da potência disponível. O despacho nulo das UTEs Presidente Médici A, Presidente Médici B e Candiota retira um importante recurso de controle de tensão da região, dificultando a manutenção dos níveis de tensão em patamares aceitáveis. Por outro lado o despacho de 100% da potência disponível, o que corresponde a 90% da capacidade instalada, tende a elevar o fluxo nas linhas de transmissão da região sobretudo quando acompanhado de um despacho elevado das usinas eólicas. Essas considerações permitem avaliar condições com elevados fluxos no sistema elétrico da região.
3. Despacho das usinas hidráulicas → por não existirem usinas hidráulicas na região foco destas avaliações, foi adotado um único cenário de geração para este tipo de fonte. Este cenário representa um período de baixa hidraulicidade nas bacias da região sul do Brasil, onde foi admitido um despacho máximo de 45% da capacidade instalada das usinas. Essa consideração implica em uma menor quantidade de máquinas despachadas na região sul e a um aumento nos níveis de intercâmbio entre as regiões Sul e Sudeste.

A combinação entre os patamares de carga média e leve e os despachos de geração das usinas eólicas e térmicas permite estabelecer três cenários representativos e seis diferentes casos para as avaliações deste capítulo. As combinações entre os patamares de carga e os despachos das usinas são mostradas na Tabela IV-2.

Tabela IV-2 – Cenários avaliados.

Patamar de carga	Percentual do despacho por tipo de fonte		
	Térmico/Eólico	Térmico/Eólico	Térmico/Eólico
Média	0%/0%	0%/100%	100%/100%
Leve	0%/0%	0%/100%	100%/100%

É importante destacar que a combinação entre os patamares de carga e os despachos de 100% para as usinas térmicas e nulo para as eólicas foi excluído das análises, pois representa uma situação de pouca criticidade para o sistema.

A partir deste ponto da dissertação, com o intuito de simplificar as notações utilizadas, os cenários definidos anteriormente serão referenciados apenas pelos valores de despacho adotados para as usinas térmicas e eólicas. Dessa forma, os três cenários avaliados serão referenciados como “Cenário 0/0”, “Cenário 0/100” e “Cenário 100/100”.

IV.4 Avaliações do desempenho dos MCSRs sob condições transitórias e sob o ponto de vista da qualidade de energia.

Tendo como base a configuração proposta para o sistema elétrico da região sul do Rio Grande do Sul tornou-se necessário executar a modelagem da rede elétrica na plataforma MATLAB/SIMULINK de forma a permitir a avaliação adequada do desempenho transitório dos MCSRs.

Em virtude do porte avantajado do sistema elétrico da região de interesse deste estudo, que requer um tempo de simulação relativamente grande para as avaliações transitórias, optou-se por utilizar uma representação simplificada da rede. Nessa representação, foram preservados os elementos adjacentes às linhas de transmissão ou às barras monitoradas, mantendo-se sempre que possível os elementos até duas barras eletricamente distantes dos terminais avaliados.

Nos barramentos de fronteira dessa representação, visando preservar a potência de curto-circuito na região de interesse, foram adicionadas impedâncias equivalentes, próprias e de transferência, calculadas na frequência fundamental a partir das informações constantes na Base de Dados de Curto-Circuito do Plano Decenal 2021 [37] e da função de cálculo de equivalentes para curto-circuito do programa ANAFAS do CEPEL [38].

As ligações equivalentes calculadas pelo programa ANAFAS com conexão à referência foram representadas no MATLAB pelo modelo clássico de fonte de tensão constante atrás de reatância. No caso dos barramentos onde há usinas hidráulicas, foram desconsideradas as atuações dos reguladores de tensão e de velocidade. Apenas para o compensador síncrono da subestação de Marmeleiro foi adotada uma representação mais completa dos reguladores da máquina. Para esse compensador síncrono, foram adotados os modelos padrão dos *templates* de máquinas síncronas de polos salientes e dos reguladores de tensão e de velocidade, substituindo-se os parâmetros *default* do programa pelos valores considerados nos estudos [24], [35] e [36].

Todas as informações necessárias para a representação dos elementos da rede modelados, que incluem os parâmetros unitários de linhas de transmissão, dos MCSRs nos níveis de tensão de 230kV e 525kV, as ligações dos transformadores bem como os parâmetros dos controles e do compensador síncrono utilizados nas simulações desta seção são apresentados no APÊNDICE B desta dissertação.

Na Figura IV-5 a seguir é apresentado o diagrama unifilar contendo todos os elementos modelados nas simulações deste estudo.

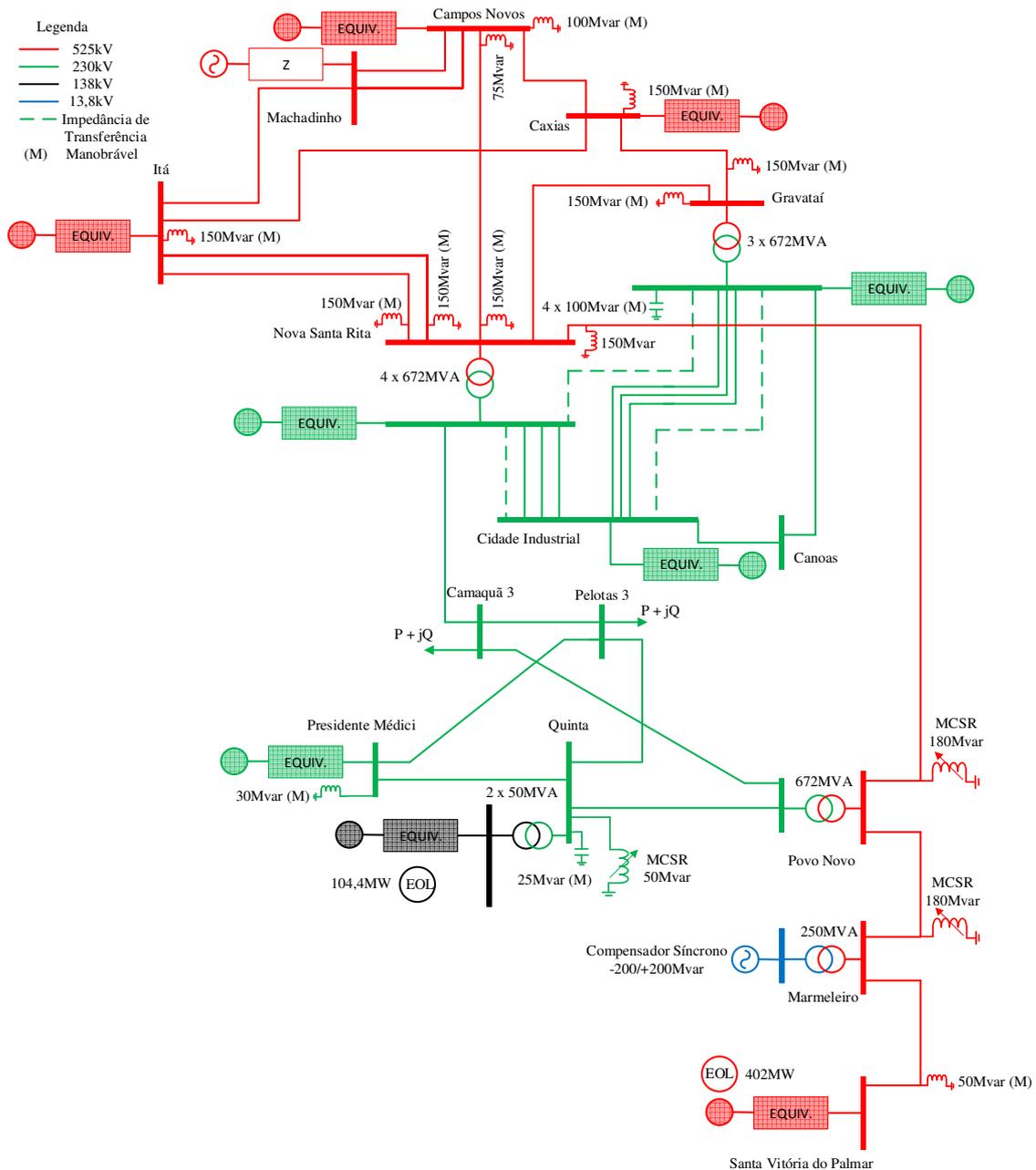


Figura IV-5 – Diagrama unifilar da rede representada.

Concluída a montagem da base de dados, foram reproduzidas as condições operativas mais críticas para o sistema da região, que correspondem ao Cenário 0/0, no patamar de carga leve; e o cenário 0/100, no patamar de carga média, e foram avaliadas as condições de energização e rejeição na presença dos MCSRs.

Para o patamar de carga leve, foram avaliadas as condições de energização do MCSR alocado no barramento de 230kV da subestação de Quinta. Nesta simulação buscou-se

identificar as implicações de tal manobra e averiguar o impacto da inserção deste equipamento na rede. Já no caso dos MCSRs conectados no nível de tensão de 525kV, foram averiguados os desempenhos dos equipamentos conectados nos terminais das linhas Marmeleiro – Povo Novo e Povo Novo – Nova Santa Rita quando da ocorrência de uma abertura intempestiva nos terminais onde estes equipamentos estão conectados.

Para essa avaliação, duas condições são desejadas: altos fluxos nas linhas de transmissão na condição pré-manobra e uma menor disponibilidade de recursos de controle de tensão, o que justifica a adoção do despacho nulo das usinas térmicas e elevado das usinas eólicas em um patamar de carga média.

Em todas as simulações as condições pré-manobra foram ajustadas de tal forma que as tensões nos terminais avaliados pudessem atingir valores o mais próximo possível de 1.050pu sem que houvesse violação das tensões operativas nos demais barramentos do sistema. O carregamento do sistema foi implementado através do ajuste das diferenças angulares das barras, obtendo-se cenários aproximados aos determinados na seção anterior.

IV.4.1 Resultados das avaliações para o patamar de carga leve.

1 – *Energização do MCSR da subestação Quinta.*

Os primeiros resultados obtidos com o sistema de grande porte referem-se à avaliação da manobra de energização do MCSR de 50Mvar alocado no barramento de 230kV da subestação Quinta. Esta avaliação tem por objetivo averiguar, de forma isolada, o impacto da conexão deste equipamento no sistema no que se refere à alteração dos níveis de tensão e às correntes solicitadas por esse equipamento nos instantes iniciais e finais do processo de energização.

Para esta simulação, a condição inicial de operação considerou uma tensão eficaz de 241.5kV (1.050pu) no terminal de Quinta e não foi permitida a atuação do sistema de controle do MCSR. A inserção do MCSR à rede foi realizada aos 100ms de simulação e

foi considerada, ainda, a presença do capacitor de 25Mvar no barramento dessa subestação.

A Figura IV-6 apresenta as formas de onda das tensões no terminal do reator e suas correntes antes e após a manobra de energização deste equipamento.

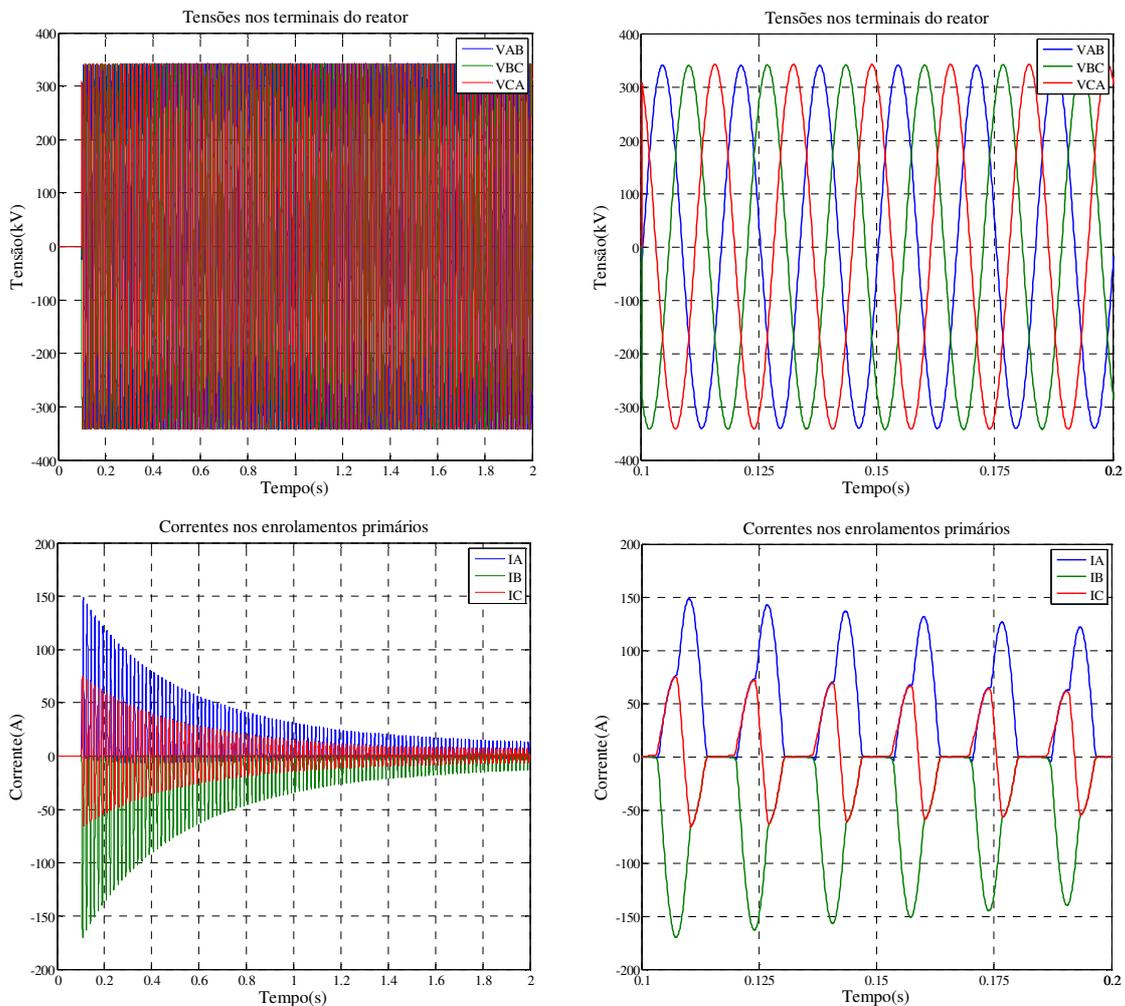


Figura IV-6 – Tensões e correntes durante o processo de energização do MCSR sem atuação do sistema de controle.

Conforme pode ser observado nas figuras anteriores, apesar de a manobra de energização do MCSR requisitar correntes de magnetização com amplitudes significativas (valor máximo instantâneo de 169A) nos instantes iniciais de simulação, essas correntes possuem magnitudes inferiores às encontradas no ponto de operação de máxima saturação do núcleo, onde o reator opera com corrente eficaz nominal de 125.5A (177.5A de valor de pico).

As correntes de magnetização do MCSR durante o processo de energização apresentam um comportamento similar ao que ocorre nos transformadores convencionais. Além das amplitudes elevadas, que no caso dos transformadores são valores muitas vezes superiores à corrente nominal de operação, as correntes transitórias de magnetização (correntes de *inrush*) do MCSR também apresentam uma forte distorção das suas formas de onda.

Essas distorções são provocadas pela saturação dos núcleos ferromagnéticos de cada uma das fases do reator e, para o caso dos MCSRs, é possível perceber ainda uma forte interação entre as fases A, B e C durante a energização do reator, o que provoca uma elevação das distorções existentes, diferenciando as correntes de *inrush* do MCSR das normalmente encontradas em transformadores.

A ausência da atuação do sistema de controle faz com que o MCSR consuma 1.28Mvar, ao atingir a condição de regime, e apresente correntes de fase com valores eficazes de 3.05A e valores máximos instantâneos de 13A.

Ao se permitir a atuação do sistema de controle do reator desde o início da manobra de energização, conforme mostrado na Figura IV-7, é possível perceber uma diminuição no tempo necessário para atingir um ponto de operação em regime. Nota-se ainda, que o sistema de controle não possui influência expressiva nos instantes iniciais após a inserção do reator à rede, porém, com o acréscimo da corrente de controle nos enrolamentos secundários, as distorções verificadas nas correntes primárias praticamente desaparecem.

Neste caso, ao atingir a condição de regime, o reator consome 55.9Mvar e as correntes de fase possuem valores eficazes de 134.3A e valores máximos instantâneos de 189.9A. Durante a simulação, a tensão eficaz fase-fase no terminal do MCSR variou de 241.5kV(1.050pu) para 240.3kV(1.045pu).

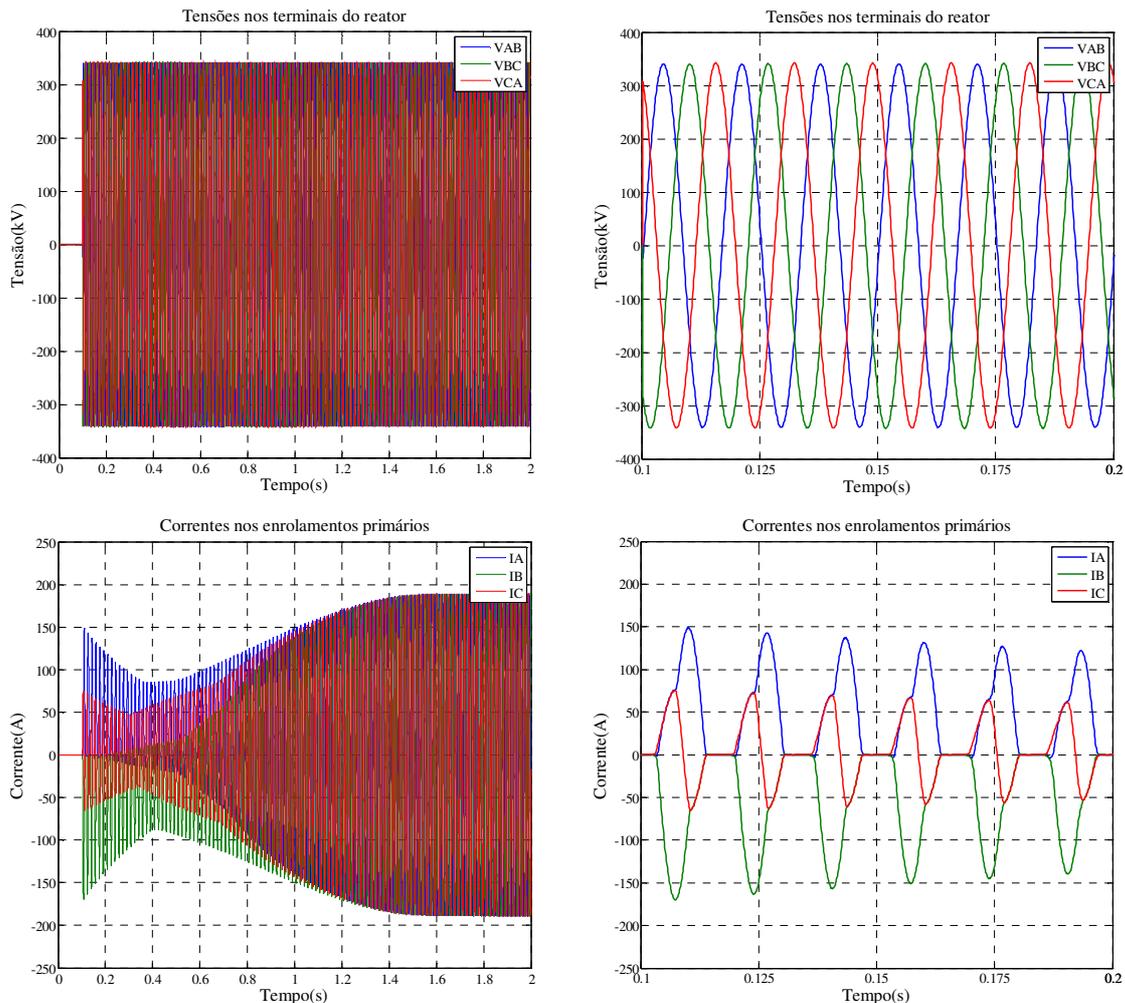


Figura IV-7 – Tensões e correntes durante o processo de energização do MCSR com atuação do sistema de controle.

2 – Energização do banco de capacitores da subestação Quinta na presença do MCSR.

Considerando uma condição inicial com tensão eficaz de 239.7kV(1.042pu) e com o MCSR de Quinta no ponto de operação de máximo consumo de potência reativa, avaliou-se o desempenho do sistema quando do chaveamento do banco de capacitores alocado no barramento dessa subestação.

Os resultados apresentados na Figura IV-8 mostram que, após o chaveamento do banco de capacitores, há um aumento dos níveis de tensão no barramento de 230kV da subestação, decorrentes da manobra de energização do banco de capacitores. Nesta mesma condição, a corrente solicitada pelos enrolamentos primários do MCSR

apresenta uma pequena variação devido apenas do aumento da tensão dos seus terminais primários.

Destaca-se ainda que em função de o reator já se encontrar completamente saturado antes da energização do banco de capacitores e, conseqüentemente, estar consumindo o máximo valor de potência reativa possível para o ponto de operação corrente, não foi possível retornar os níveis de tensão aos patamares pré-chaveamento.

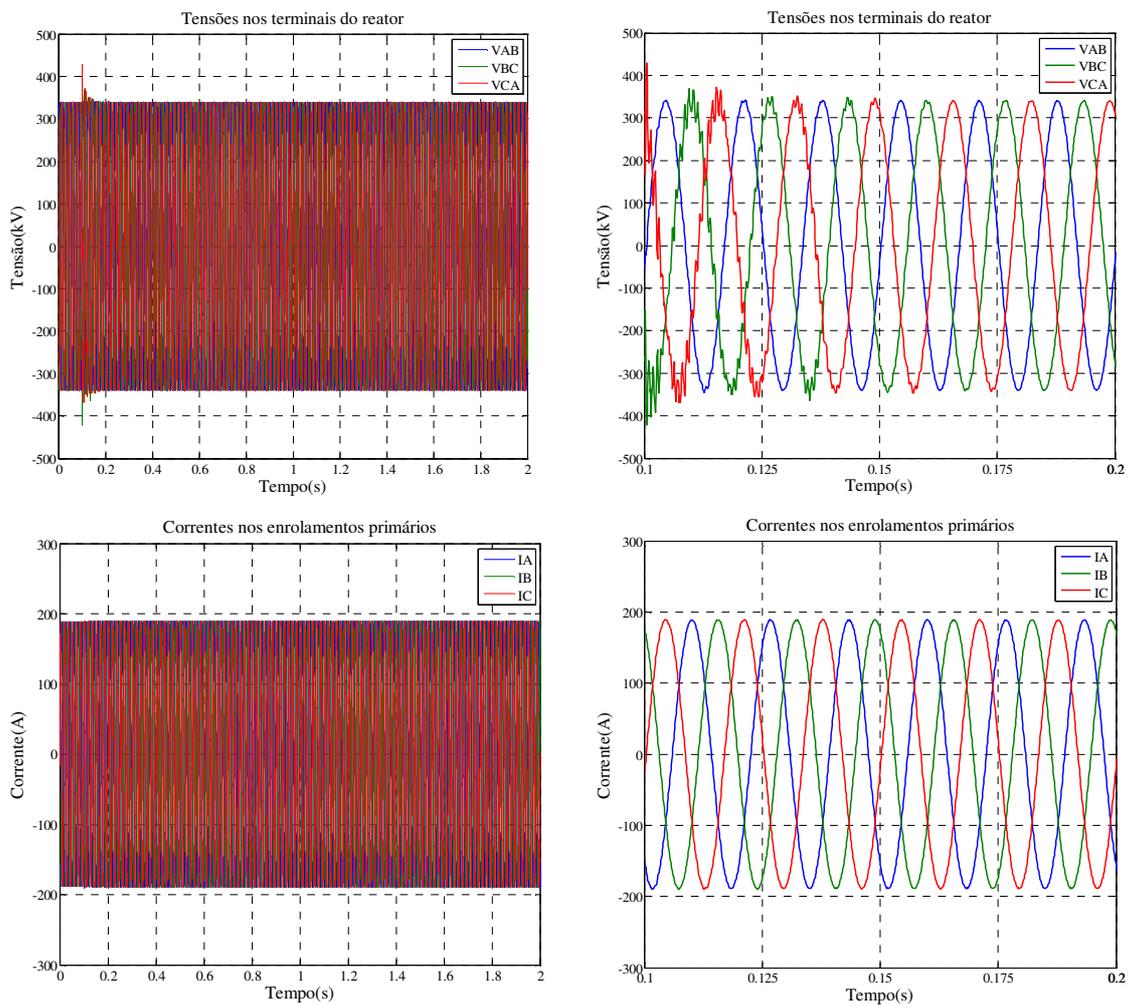


Figura IV-8 – Tensões e correntes do MCSR de Quinta durante o processo de energização do banco de capacitores da subestação.

Os demais resultados obtidos nestas simulações mostram que:

- A máxima corrente eficaz solicitada pelo reator após o evento simulado foi de 134.3A.
- O máximo valor de tensão transitória encontrado foi de 284.9kV (1.517pu) fase-neutro e de 428.61kV(1.317pu) fase-fase. O valor de tensão eficaz verificado ao final da simulação foi de 240.4kV(1.045pu).
- O consumo de potência reativa verificado após o término do evento foi de 55.9Mvar.

No que tange às distorções harmônicas, tanto da forma de onda da corrente quanto da forma de onda de tensão, o MCSR não apresenta impactos significativos no desempenho do sistema. Nessa condição, valor das DHTs das formas de onda da tensão e da corrente são, respectivamente, 0.11% e 0.40%. Esses resultados corroboram a característica de baixa distorção na condição de máximo consumo de potência reativa já explicitado nos capítulos anteriores.

A Tabela IV-3 a seguir apresenta as amplitudes das principais componentes harmônicas de tensão e de corrente do MCSR que foram verificadas ao final da simulação.

Tabela IV-3 – Espectro harmônico das tensões e correntes na subestação Quinta após o processo de energização do banco de capacitores.

Grandeza	Fundamental Amplitude	Componente harmônica – Amplitude			DHT (%)*
		3 ^a	5 ^a	7 ^a	
Corrente (A)	189.9	0.656	0.336	0.02	0.40
Tensão (kV)	196.2	0.098	0.119	0.125	0.11

*Relativo à componente fundamental atual e não à nominal.

IV.4.2 Resultados das avaliações para o patamar de carga média.

1 – Manobra de Rejeição de carga no terminal de Marmeleiro da Linha de Transmissão em 525kV Povo Novo – Marmeleiro.

As avaliações realizadas no Cenário 0/100 para o patamar de carga média objetivaram observar o desempenho do MCSR frente a uma manobra de rejeição de carga no sistema de 525kV. Conforme explicitado nas seções anteriores, o sistema de 525kV recomendado para expansão da região sul do Rio Grande do Sul é composto por um conjunto de equipamentos de compensação reativa em derivação responsáveis pelo controle de tensão do sistema.

Nas avaliações deste capítulo, parte da compensação em derivação originalmente proposta foi substituída por MCSRs de 180Mvar nos terminais das linhas de transmissão Povo Novo – Marmeleiro e Povo Novo – Nova Santa Rita.

Na primeira simulação deste cenário, é realizada uma abertura intempestiva do terminal Marmeleiro, pertencente à linha Marmeleiro – Povo Novo, aos 100ms de simulação. Após essa manobra o terminal de Marmeleiro é mantido aberto e a linha de transmissão permanece operando em vazio conectada apenas pelo terminal de Povo Novo.

Ressalta-se que neste cenário o despacho das usinas térmicas é considerado nulo, as usinas eólicas estão despachadas em sua plenitude e, de forma a aumentar a criticidade da condição avaliada do ponto de vista de ocorrência de sobretensões, o ponto de operação inicial adotado considerou o MCSR de Marmeleiro operando na condição de consumo mínimo de potência reativa. Além disso, o caso simulado foi ajustado para que a tensão no terminal de Marmeleiro fosse a maior possível sem que ocorressem violações nos demais barramentos do sistema.

A Figura IV-9 a seguir mostra os resultados dessa simulação onde é possível perceber que após a abertura intempestiva do terminal de Marmeleiro há um aumento nos níveis de tensão nos terminais do MCSR. Esse aumento da tensão provoca a atuação do sistema de controle do reator, ajustado para manter a tensão terminal em 1.050pu,

umentando a magnitude das correntes primárias e, conseqüentemente, da potência reativa consumida.

Destaca-se que nessa simulação o MCSR de Marmeleiro mostrou-se capaz de regular a tensão terminal sem a necessidade de atingir sua capacidade máxima.

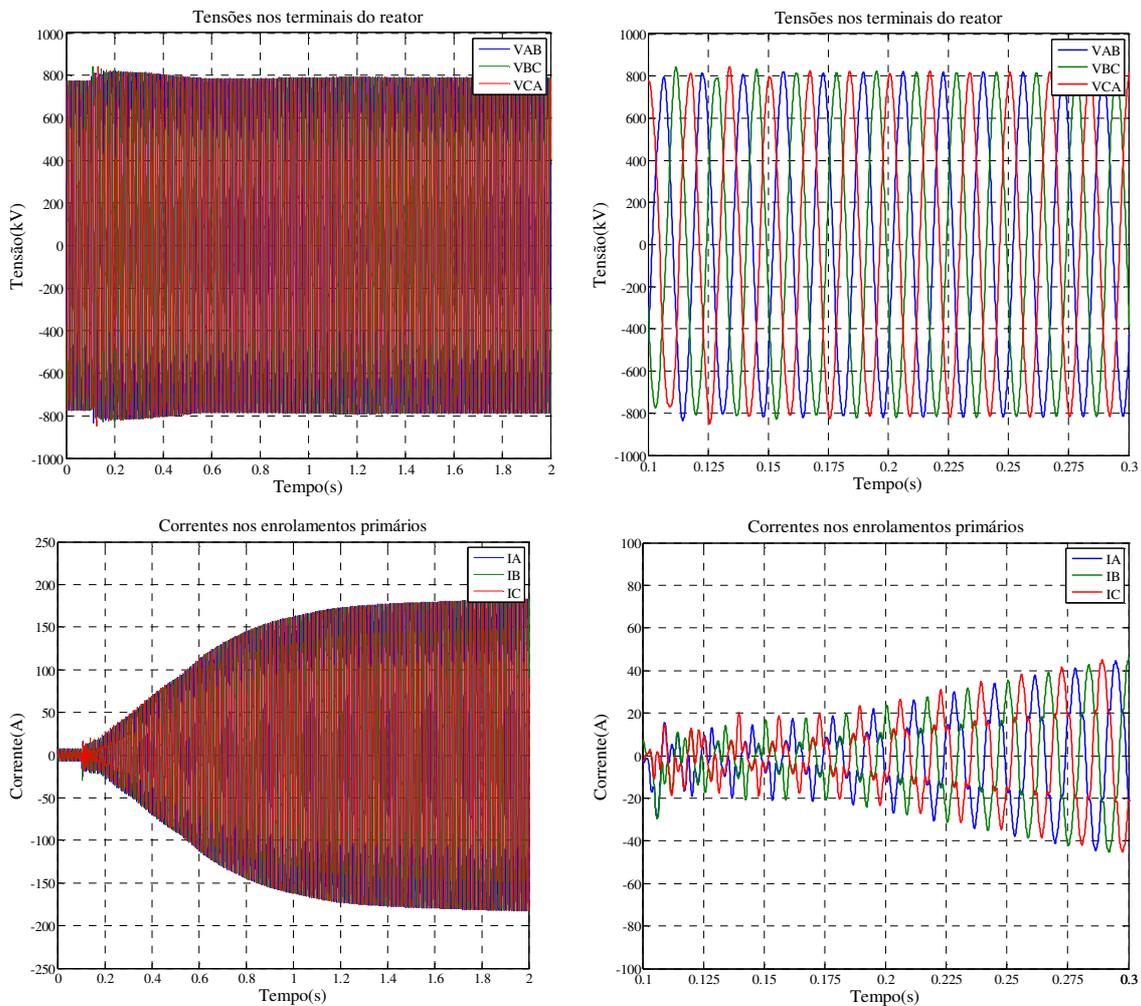


Figura IV-9 – Tensões e correntes durante manobra de rejeição de carga no terminal de Marmeleiro da linha Marmeleiro – Povo Novo.

Os demais resultados obtidos nessa simulação mostram que:

- A tensão obtida no terminal de Marmeleiro no ponto de operação inicial foi de 549,8kV(1.047pu).
- A máxima corrente eficaz solicitada pelo reator após o evento simulado foi de 129.4A.

- O máximo valor de tensão transitória encontrado foi de 538.1kV(1.255pu) fase-neutro e de 849.1kV(1.144pu) fase-fase. O valor de tensão eficaz verificado no terminal aberto da linha de transmissão ao final da simulação foi de 551.8kV(1.051pu).
- O consumo de potência reativa verificado após a ocorrência do evento foi de 123.7Mvar.

No que tange às distorções harmônicas da forma de onda da corrente e da tensão, o MCSR apresenta, na condição de regime, valores de DHT da ordem de 4% e 2%, respectivamente. Ressalta-se que as distorções mais evidentes na forma de onda da corrente devem-se basicamente ao ponto de operação do reator saturado, que não atingiu a condição de máxima saturação.

Conforme explicitado nos capítulos anteriores, as condições de operação com saturação intermediária acentuam as características não lineares deste equipamento resultando em valores de DHT mais elevadas. A Tabela IV-4 a seguir apresenta as amplitudes das principais componentes harmônicas de tensão e de corrente do MCSR que foram verificadas ao final da simulação.

Tabela IV-4 – Espectro harmônico das tensões e correntes no terminal do MCSR de Marmeleiro em condição de regime.

Grandeza	Fundamental Amplitude	Componente harmônica – Amplitude			DHT (%)*
		3 ^a	5 ^a	7 ^a	
Corrente	183.3	0.988	7.551	1.788	4.34
Tensão (kV)	451.2	6.687	5.822	0.547	1.98

*Relativo à componente fundamental atual e não à nominal.

2 – Manobra de Rejeição de carga no terminal de Povo Novo da Linha de Transmissão em 525kV – Povo Novo – Nova Santa Rita.

De forma análoga ao realizado para o MCSR da subestação Marmeleiro, procedeu-se à avaliação da rejeição de carga no terminal de Povo Novo da linha de transmissão em 525kV Povo Novo – Nova Santa Rita. Adotando-se as mesmas premissas da simulação anterior, com a exceção de que desta vez é o MCSR da subestação de Povo Novo que encontra-se na condição de mínimo consumo de potência reativa, foram obtidos os resultados mostrados na Figura IV-10.

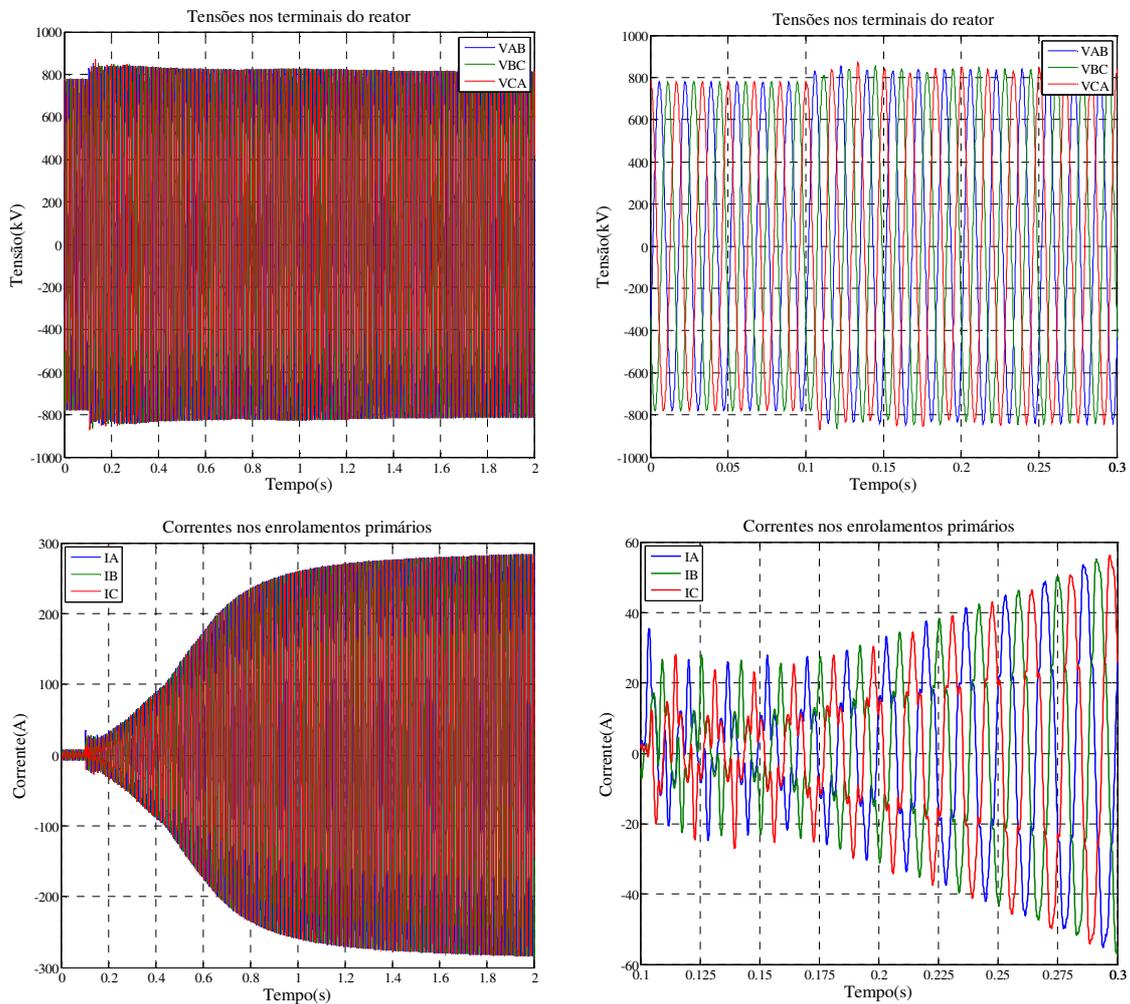


Figura IV-10 – Tensões e correntes durante manobra de rejeição de carga no terminal de Povo Novo da linha Povo Novo – Nova Santa Rita.

Pela avaliação dos resultados apresentados nas figuras anteriores pode-se perceber que a manobra de rejeição de carga no terminal de Povo Novo é mais severa, do ponto de vista de ocorrência de sobretensões, do que a rejeição no terminal de Marmeleiro. Nesta simulação, a corrente solicitada nos enrolamentos primários do reator atinge rapidamente o valor nominal de operação fazendo com que o MCSR opere na sua capacidade máxima na tentativa de restabelecer a tensão para o valor de tensão definido no seu controle.

Os demais resultados obtidos nessa simulação mostram que:

- A tensão obtida no terminal de Povo Novo no ponto de operação inicial foi de 549,7kV(1.047pu).
- A máxima corrente eficaz solicitada pelo reator após o evento simulado foi de 206.6A.
- O máximo valor de tensão transitória encontrado foi de 517.3kV(1.206pu) fase-neutro e de 872,6kV(1.175pu) fase-fase. O valor de tensão eficaz verificado no terminal aberto da linha de transmissão ao final da simulação foi de 555.5kV(1.058pu).
- O consumo de potência reativa verificado após a ocorrência do evento foi de 198.8Mvar.

No que tange às distorções harmônicas, tanto da forma de onda da corrente quanto da forma de onda de tensão, o MCSR não apresenta impactos significativos no desempenho do sistema. Nessa condição, valor das DHTs das formas de onda da tensão e da corrente são, respectivamente, 0.76% e 3.27%. Esses resultados corroboram a característica de baixa distorção da forma de onda da corrente na condição de máximo consumo de potência reativa já explicitada nos capítulos anteriores.

A Tabela IV-5 a seguir apresenta as amplitudes das principais componentes harmônicas de tensão e de corrente que foram verificadas na condição de regime do MCSR.

Tabela IV-5 – Espectro harmônico das tensões e correntes no terminal do MCSR de Povo Novo.

Grandeza	Fundamental Amplitude	Componente harmônica – Amplitude			THD (%)*
		3 ^a	5 ^a	7 ^a	
Corrente	295.0	1.348	0.506	0.152	0.50
Tensão (kV)	453.4	14.819	0.174	0.043	3.2

*Relativo à componente fundamental atual e não à nominal.

Ao se avaliar os resultados das duas simulações realizadas nesse cenário pode-se constatar que em ambos os casos os MCSRs mostraram-se eficazes no controle de tensão dos terminais abertos das linhas de transmissão. Ainda que as condições iniciais críticas tenham sido consideradas, não foram detectadas violações nos limites admissíveis de tensão em nenhum ponto do sistema.

Destaca-se, no entanto, que o tempo de resposta do MCSR pode, em determinadas situações, ser um fator limitante à sua utilização, uma vez que sobretensões de maior monta podem ultrapassar os limites admissíveis para sobretensões instantâneas descritas em [39].

Outra questão importante relacionada à utilização dos MCSRs refere-se à injeção de correntes harmônicas de amplitude considerável em condições de consumo intermediário de potência reativa. Sob essas condições a utilização de filtros pode ser requerida objetivando de mitigar os impactos da operação do MCSR.

IV.5 Avaliações do desempenho dos MCSRs em regime permanente.

Sob o ponto de vista da operação em regime permanente, os MCSRs propostos em substituição aos reatores fixos das linhas de transmissão Povo Novo – Marmeleiro e Povo Novo – Nova Santa Rita, assim como do reator de barra da subestação Quinta, podem ser representados no programa ANAREDE como compensadores estáticos convencionais onde, naturalmente, apenas a parcela reativa indutiva está presente.

Tendo como ponto de partida a configuração original planejada para o sistema elétrico da região sul do Rio Grande do Sul, constante dos casos base de fluxo de potência do Plano Decenal da Transmissão [40], é possível averiguar os benefícios da inserção dos novos MCSRs no desempenho elétrico do sistema proposto.

Comparando-se os perfis de tensão de todos os cenários avaliados para as condições de operação em regime normal e na ocorrência de contingências simples de linhas de transmissão, constatou-se que tanto na configuração original do sistema quanto na configuração proposta nesta avaliação, o controle de tensão ocorre de forma satisfatória, não sendo verificadas violações dos limites admissíveis em quaisquer barramentos.

Dentre todas as contingências simuladas, constantes da Tabela IV-6, a perda da linha de transmissão em 525kV entre as subestações Nova Santa Rita e Povo Novo configura-se como a contingência mais crítica avaliada. A perda dessa linha de transmissão provoca a radialização do sistema de 525kV da região sul do Rio Grande do Sul e faz com que o fluxo proveniente da geração eólica conectada na subestação Santa Vitória do Palmar seja redirecionado, nos Cenários 0/100 e 100/100, para o sistema de 230kV da região.

Tabela IV-6 – Lista de contingências simuladas.

Linha de Transmissão	Tensão (kV)
Povo Novo – Marmeleiro	525
Povo Novo – Nova Santa Rita	525
Marmeleiro – Santa Vitória do Palmar	525
Nova Santa Rita – Gravataí	525
Nova Santa Rita – Itá	525
Nova Santa Rita – Campos Novos	525
Povo Novo – Quinta	230
Povo Novo – Camaquã 3	230
Quinta – Presidente Médici	230
Quinta – Pelotas 3	230
Camaquã 3 – Nova Santa Rita	230

Esse aumento de fluxo no sistema de 230kV provoca um acréscimo nas perdas elétricas e na demanda por potência reativa especialmente no Cenário 100/100 onde os

despachos térmicos e eólicos concorrem pelo mesmo sistema de transmissão. É importante destacar que esse sistema de transmissão interliga o sul do Rio Grande do Sul à região metropolitana de Porto Alegre, que apresenta a maior demanda do estado e, dessa forma, tende a absorver o excedente de geração térmico e eólico tanto no patamar de carga média quanto no patamar de carga leve.

Conforme pode ser observado pela análise conjunta dos resultados apresentados na Tabela IV-7 e Tabela IV-8, para o regime normal de operação, e na Tabela IV-9 e Tabela IV-10, para a contingência da linha em 525kV Povo Novo – Nova Santa Rita, as maiores variações dos níveis de tensão ocorrem no patamar de carga leve no Cenário 100/100.

Tabela IV-7 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul em condição normal de operação para o patamar de carga média.

SUBESTAÇÃO	Tensão (kV)	Tensões (%) por Patamar-Cenário					
		SEM MCSR			COM MCSR		
		Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100	Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100
S. Vitória do Palmar	525	102,6%	101,9%	101,9%	101,9%	102,3%	101,0%
Marmeleiro	525	102,5%	102,0%	102,0%	101,9%	102,3%	101,1%
Povo Novo	525	104,4%	104,4%	104,1%	102,9%	104,1%	102,6%
Nova Santa Rita	525	102,9%	102,8%	104,9%	102,1%	104,2%	104,5%
Gravataí	525	102,0%	102,5%	103,7%	101,9%	103,4%	103,7%
Povo Novo	230	103,0%	103,0%	103,5%	102,0%	103,0%	104,6%
Quinta	230	102,7%	102,9%	103,2%	101,5%	102,6%	104,2%
Presidente Médici	230	103,1%	104,0%	102,9%	101,9%	103,5%	103,5%
Candiota	230	103,1%	104,0%	102,9%	101,9%	103,5%	102,9%
Pelotas 3	230	101,6%	102,0%	101,8%	100,3%	101,6%	103,5%
Camaquã 3	230	103,2%	103,7%	103,3%	101,9%	103,3%	103,5%
Camaquã	230	102,0%	102,7%	101,0%	100,5%	102,3%	101,7%
Nova Santa Rita	230	103,0%	104,0%	103,5%	102,0%	103,0%	103,0%

Tabela IV-8 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul em condição normal de operação para o patamar de carga leve.

SUBESTAÇÃO	Tensão (kV)	Tensões (%) por Patamar-Cenário					
		SEM MCSR			COM MCSR		
		Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100	Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100
S. Vitória do Palmar	525	100,9%	100,8%	101,8%	101,9%	101,8%	100,4%
Marmeleiro	525	101,0%	101,0%	102,0%	102,0%	102,0%	100,6%
Povo Novo	525	103,5%	103,3%	102,7%	104,4%	104,3%	100,9%
Nova Santa Rita	525	101,8%	101,9%	102,2%	102,8%	103,3%	101,7%
Gravataí	525	102,9%	102,8%	101,4%	103,7%	104,0%	101,0%
Povo Novo	230	103,5%	103,0%	100,0%	103,0%	103,5%	102,0%
Quinta	230	103,4%	103,0%	99,6%	103,0%	103,5%	101,5%
Presidente Médici	230	104,4%	103,9%	98,4%	104,3%	104,4%	98,8%
Candiota	230	104,5%	103,9%	98,4%	104,3%	104,4%	98,8%
Pelotas 3	230	103,4%	102,9%	98,9%	103,1%	103,4%	100,2%
Camaquã 3	230	104,1%	103,7%	101,2%	103,9%	104,0%	102,0%
Camaquã	230	103,7%	103,4%	99,3%	103,7%	103,7%	99,6%
Nova Santa Rita	230	103,0%	103,0%	102,0%	103,0%	103,0%	102,0%

Tabela IV-9 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul na emergência mais crítica com a configuração original do sistema para o patamar de carga leve.

SUBESTAÇÃO	Tensão (kV)	Tensões (%) por Patamar-Cenário			Variação em relação ao regime normal (%)		
		Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100	Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100
		S. Vitória do Palmar	525	100,9%	100,8%	101,8%	0,0%
Marmeleiro	525	101,0%	101,0%	102,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Povo Novo	525	103,1%	102,5%	101,0%	-0,4%	-0,8%	-1,7%
Nova Santa Rita	525	100,3%	99,7%	97,5%	-1,5%	-2,2%	-4,7%
Gravataí	525	101,5%	100,8%	96,7%	-1,4%	-2,0%	-4,7%
Povo Novo	230	103,5%	103,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Quinta	230	103,4%	102,8%	99,4%	0,0%	-0,2%	-0,2%
Presidente Médici	230	104,2%	102,9%	96,8%	-0,2%	-1,0%	-1,6%
Candiota	230	104,2%	102,9%	96,8%	-0,3%	-1,0%	-1,6%
Pelotas 3	230	103,3%	102,0%	96,6%	-0,1%	-0,9%	-2,3%
Camaquã 3	230	103,9%	102,5%	96,3%	-0,2%	-1,2%	-4,9%
Camaquã	230	103,5%	102,5%	94,9%	-0,2%	-0,9%	-4,4%
Nova Santa Rita	230	103,0%	103,0%	102,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela IV-10 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul na emergência mais crítica para o patamar de carga leve considerando a atuação dos MCSRs.

SUBESTAÇÃO	Tensão (kV)	Tensões (%) por Patamar-Cenário			Variação em relação ao regime normal (%)		
		Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100	Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100
S. Vitória do Palmar	525	101,9%	101,5%	99,9%	0,0%	-0,3%	-0,5%
Marmeleiro	525	102,0%	101,7%	100,1%	0,0%	-0,3%	-0,5%
Povo Novo	525	104,3%	103,2%	98,5%	-0,1%	-1,1%	-2,4%
Nova Santa Rita	525	101,2%	100,8%	97,8%	-1,6%	-2,5%	-3,9%
Gravataí	525	102,3%	101,9%	97,0%	-1,4%	-2,1%	-4,0%
Povo Novo	230	103,0%	102,5%	102,0%	0,0%	-1,1%	0,0%
Quinta	230	102,9%	101,0%	101,3%	-0,1%	-1,9%	-0,2%
Presidente Médici	230	104,0%	103,5%	97,3%	-0,3%	0,0%	-1,5%
Candiota	230	104,0%	103,3%	97,3%	-0,3%	-0,2%	-1,5%
Pelotas 3	230	103,0%	103,3%	98,1%	-0,1%	-1,1%	-2,1%
Camaquã 3	230	103,6%	103,3%	97,3%	-0,3%	-1,1%	-4,7%
Camaquã	230	103,4%	102,4%	95,3%	-0,3%	-1,0%	-4,3%
Nova Santa Rita	230	103,0%	102,8%	102,0%	0,0%	-1,2%	0,0%

Tabela IV-11 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul na emergência mais crítica com a configuração original do sistema para o patamar de carga média.

SUBESTAÇÃO	Tensão (kV)	Tensões (%) por Patamar-Cenário			Variação em relação ao regime normal (%)		
		Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100	Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100
S. Vitória do Palmar	525	102,6%	101,9%	101,9%	0,0%	0,0%	0,0%
Marmeleiro	525	102,5%	102,0%	102,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Povo Novo	525	103,4%	104,0%	102,2%	-1,0%	-0,4%	-1,9%
Nova Santa Rita	525	99,3%	100,8%	102,0%	-3,6%	-2,0%	-2,9%
Gravataí	525	98,4%	100,6%	100,8%	-3,6%	-1,9%	-2,9%
Povo Novo	230	103,0%	103,0%	103,5%	0,0%	0,0%	0,0%
Quinta	230	102,6%	102,8%	103,1%	-0,1%	-0,1%	-0,1%
Presidente Médici	230	102,0%	103,6%	102,0%	-1,1%	-0,4%	-0,9%
Candiota	230	102,0%	103,6%	102,0%	-1,1%	-0,4%	-0,9%
Pelotas 3	230	101,0%	101,6%	100,7%	-0,6%	-0,4%	-1,1%
Camaquã 3	230	102,0%	103,5%	101,1%	-1,2%	-0,2%	-2,2%
Camaquã	230	101,0%	102,5%	98,7%	-1,0%	-0,2%	-2,3%
Nova Santa Rita	230	103,0%	104,0%	103,5%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela IV-12 – Perfis de tensão nas principais subestações da região sul do Rio Grande do Sul na emergência mais crítica para o patamar de carga média considerando a atuação dos MCSRs.

SUBESTAÇÃO	Tensão (kV)	Tensões (%) por Patamar-Cenário			Variação em relação ao regime normal (%)		
		Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100	Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100
S. Vitória do Palmar	525	101,7%	102,1%	100,3%	-0,2%	-0,2%	-0,7%
Marmeleiro	525	101,7%	102,1%	100,4%	-0,2%	-0,2%	-0,7%
Povo Novo	525	102,0%	103,1%	100,0%	-0,9%	-1,0%	-2,6%
Nova Santa Rita	525	99,0%	103,1%	102,2%	-3,1%	-1,1%	-2,3%
Gravataí	525	98,8%	102,3%	101,4%	-3,1%	-1,1%	-2,3%
Povo Novo	230	102,0%	103,0%	103,5%	0,0%	0,0%	0,0%
Quinta	230	101,4%	102,5%	102,9%	-0,1%	-0,1%	0,0%
Presidente Médici	230	100,8%	103,2%	102,6%	-1,1%	-0,3%	-0,9%
Candiota	230	100,8%	103,2%	102,6%	-1,1%	-0,3%	-0,9%
Pelotas 3	230	99,7%	101,2%	100,6%	-0,6%	-0,4%	-1,1%
Camaquã 3	230	100,8%	103,0%	100,7%	-1,1%	-0,3%	-2,3%
Camaquã	230	99,4%	102,1%	98,5%	-1,1%	-0,2%	-2,2%
Nova Santa Rita	230	102,0%	103,0%	103,0%	0,0%	0,0%	0,0%

O comportamento verificado para o patamar de carga leve é decorrente de sua baixíssima demanda, que favorece a exportação de energia da região sul do Rio Grande do Sul para as demais regiões do estado.

Esse cenário, implementado nos casos de fluxo de potência, está representado no diagrama unifilar da Figura IV-11 e apresenta um fluxo de exportação de cerca de 600MW pelo sistema de 525kV. Na indisponibilidade desse sistema, apresentado na Figura IV-12, a malha de 230kV torna-se responsável por escoar toda a geração despachada e, devido ao aumento expressivo nos fluxos das linhas de transmissão, são verificadas as maiores variações de tensão nos barramentos das subestações Nova Santa Rita 525kV(-4,7%), Gravataí 525kV(-4,7%), Camaquã 230kV(-4,4%) e Camaquã 3 230kV(-4,9%).

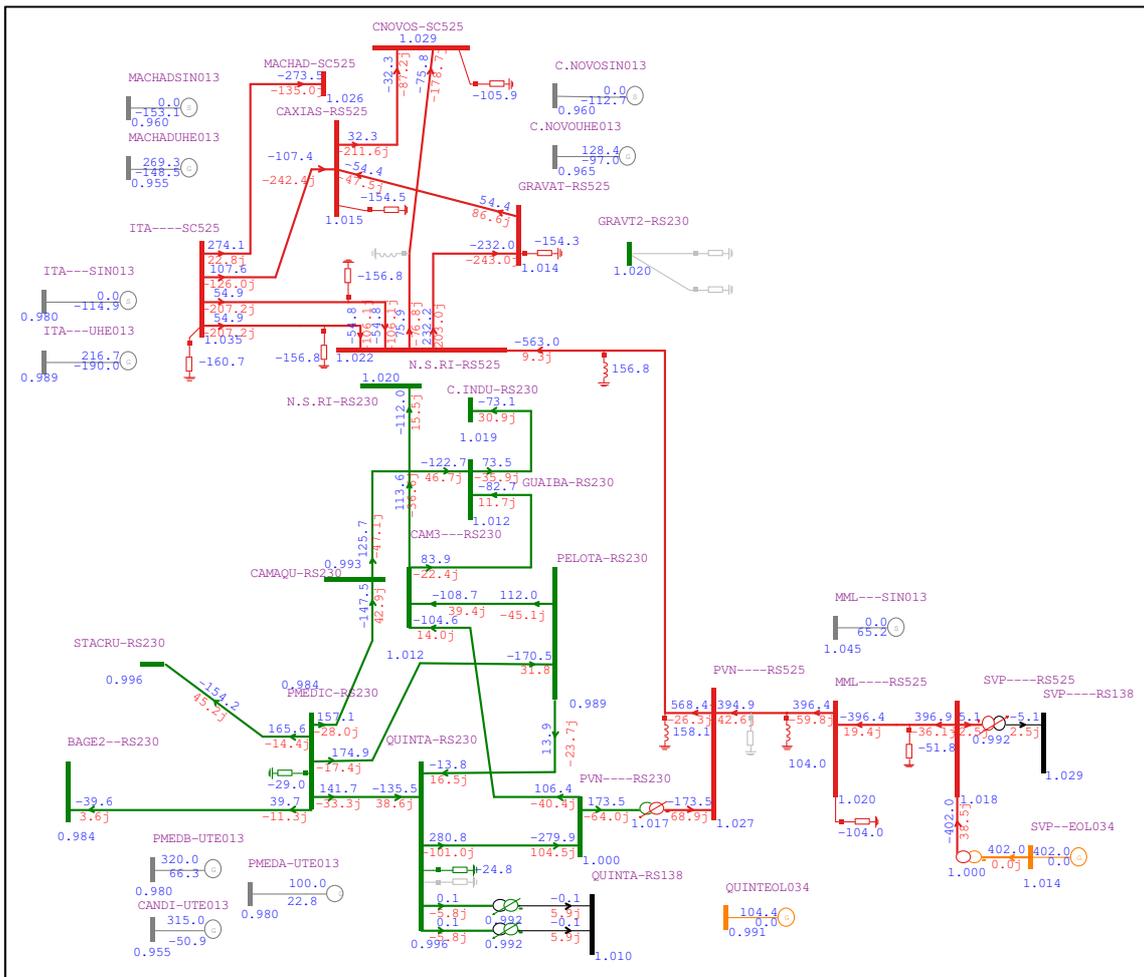


Figura IV-11 – Diagrama unifilar da região analisada no patamar de carga leve e Cenário 100/100 para condição normal de operação.

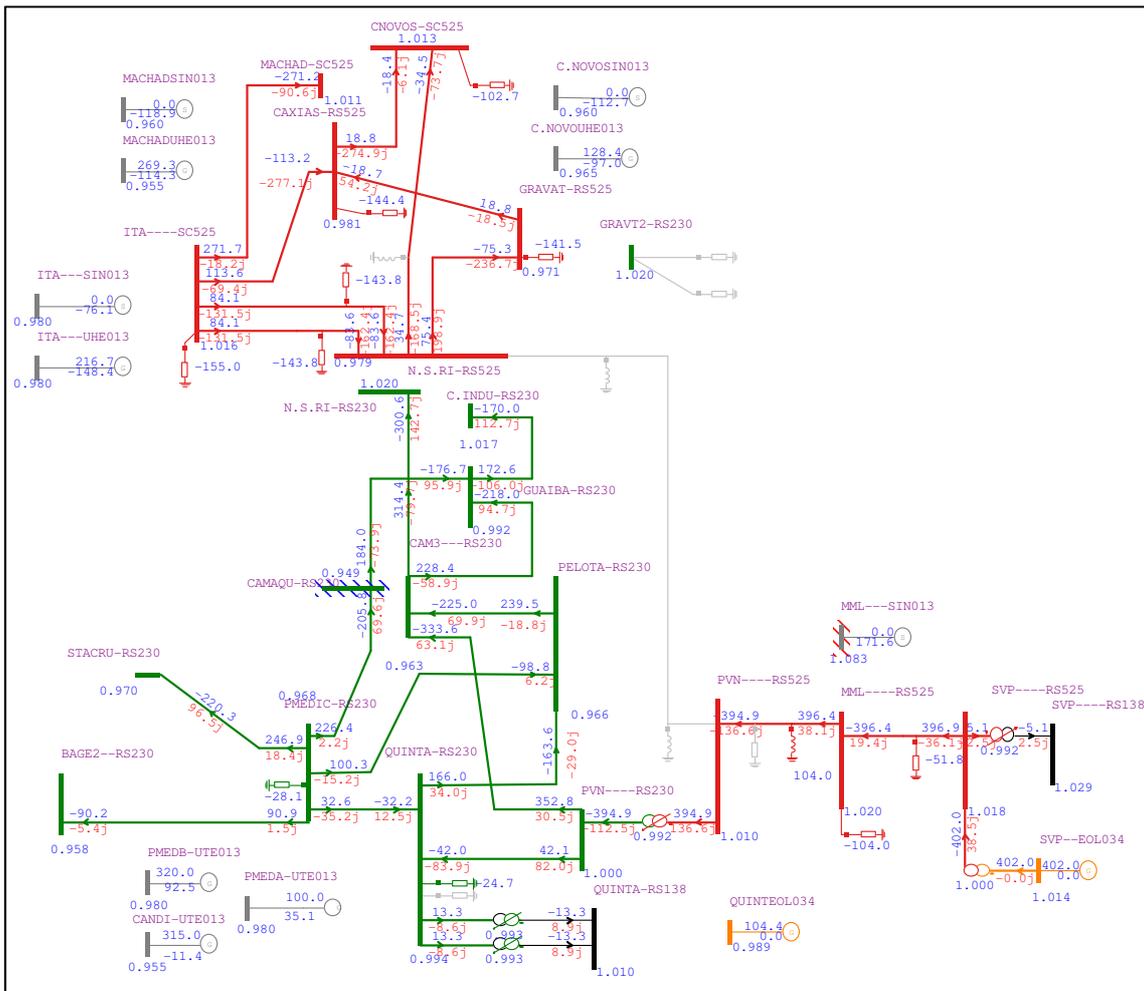


Figura IV-12 – Diagrama unifilar da região analisada para o patamar de carga leve no Cenário 100/100 na contingência da linha de transmissão Povo Novo – Nova Santa Rita.

Pela análise dos resultados apresentados nas tabelas anteriores pode-se verificar que o desempenho do sistema, do ponto de vista da manutenção dos níveis de tensão, apresentou pouca ou nenhuma diferença entre a configuração onde há a atuação dos MCSRs e a configuração original. Contudo, o efeito da atuação dos MCSRs pode ser melhor percebida ao se analisar o desempenho das usinas térmicas da região e do compensador síncrono de Marmeleiro nos diversos cenários estudados.

A Tabela IV-13 e a Tabela IV-14 apresentam, respectivamente, os valores de consumo ou geração de potência reativa para todos cenários avaliados nos patamares de carga leve e média. Nessas tabelas duas importantes diferenças podem ser observadas. A primeira refere-se à geração potência reativa do compensador síncrono no Cenário 100/100 do patamar de carga leve. Nesta condição, é necessário manter em operação os

dois reatores de 100Mvar da subestação Marmeleiro para evitar sobretensões quando da perda da linha de transmissão Marmeleiro – Santa Vitória do Palmar. Contudo, a operação desses reatores acaba por consumir parte da potência reativa gerada pelo compensador síncrono, o que ocasiona a necessidade de manter sua geração um pouco mais elevada em condição normal de operação. Essa situação não ocorre quando da atuação dos MCSRs uma vez que sua absorção de potência reativa pode ser ajustada para cada um dos cenários.

O segundo ponto de destaque está relacionada à elevada absorção de potência reativa do compensador síncrono nos cenários associados ao patamar de carga média sem a atuação dos MCSRs. Esse comportamento é explicado pela necessidade de se manter a maioria dos reatores manobráveis do tronco de 525kV desligados para evitar subtensões no sistema de transmissão após a ocorrência de contingências simples. De forma análoga ao ocorrido no patamar de carga leve, a atuação dos MCSRs permite diminuir as exigências impostas ao compensador síncrono, o que aumenta a capacidade de controle de tensão do sistema.

Tabela IV-13 – Geração de potência reativa das usinas térmicas da região sul do Rio Grande do Sul e dos MCSRs propostos em condição normal de operação para o patamar de carga leve.

Usinas/Equipamentos de Compensação Reativa Variável	SEM MCSR			COM MCSR		
	Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100	Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100
	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar
Presidente Médici A	-	-	22,8	-	-	19,2
Presidente Médici B	-	-	66,3	-	-	58,8
Candiota	-	-	-50,9	-	-	-62,2
Compensador Síncrono de Marmeleiro	-77,9	-30,0	65,2	-90,8	-51,6	9,7
MCSR Quinta	-	-	-	-53,0	-53,6	-51,5
MCSR Marmeleiro	-	-	-	-187,3	-187,3	-124,5
MCSR Povo Novo	-	-	-	-182,8	-175,5	-178,5

Tabela IV-14 – Geração de potência reativa das usinas térmicas da região sul do Rio Grande do Sul e dos MCSRs propostos em condição normal de operação para o patamar de carga média.

Usinas/Equipamentos de Compensação Reativa Variável	SEM MCSR			COM MCSR		
	Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100	Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100
	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar
Presidente Médici A	-	-	19,5	-	-	23,1
Presidente Médici B	-	-	24,1	-	-	30,9
Candiota	-	-	7,4	-	-	18,2
Compensador Síncrono de Marmeleiro	-159,9	-153,3	-140,9	-46,7	-58,5	-27,1
MCSR Quinta	-	-	-	-37,3	-52,6	-44,0
MCSR Marmeleiro	-	-	-	-177,0	-173,0	-183,9
MCSR Povo Novo	-	-	-	-187,4	-195,0	-189,4

A avaliação dos benefícios da atuação dos MCSRs ficam mais evidentes ao se analisar o desempenho do sistema frente à contingência da linha de transmissão Povo Novo – Nova Santa Rita. A Tabela IV-15 e a Tabela IV-16 apresentam a geração de potência reativa das usinas térmicas, do compensador síncrono de Marmeleiro e dos MCSRs propostos em cada um dos cenários avaliados para o ponto de operação em regime sem a linha de transmissão em questão.

Tabela IV-15 – Geração de potência reativa das usinas térmicas, do compensador síncrono e dos MCSRs na contingência da linha Povo Novo - Nova Santa Rita no patamar de carga leve.

Usinas/Equipamentos de Compensação Reativa Variável	SEM MCSR			COM MCSR		
	Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100	Leve 0/0	Leve 0/100	Leve 100/100
	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar
Presidente Médici A	-	-	35,1	-	-	31,0
Presidente Médici B	-	-	92,5	-	-	83,8
Candiota	-	-	-11,4	-	-	-24,5
Compensador Síncrono de Marmeleiro	-58,5	16,5	171,6	-85,5	-44,1	22,1
MCSR Quinta	-	-	-	-53,0	-53,4	-51,3
MCSR Marmeleiro	-	-	-	-187,3	-143,0	-25,3

Tabela IV-16 – Geração de potência reativa das usinas térmicas, do compensador síncrono e dos MCSRs na contingência da linha Povo Novo - Nova Santa Rita no patamar de carga média.

Usinas/Equipamentos de Compensação Reativa Variável	SEM MCSR			COM MCSR		
	Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100	Média 0/0	Média 0/100	Média 100/100
	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar
Presidente Médici A	-	-	26,4	-	-	30,0
Presidente Médici B	-	-	38,4	-	-	45,2
Candiota	-	-	30,0	-	-	40,8
Compensador Síncrono de Marmeleiro	-107,2	-132,5	-39,4	-42,0	-53,3	-10,7
MCSR Quinta	-	-	-	-22,9	-52,5	-38,1
MCSR Marmeleiro	-	-	-	-138,4	-130,4	-86,1

Os resultados apresentados demonstram que em todos os casos onde houve a atuação dos MCSRs, a variação de potência reativa gerada pelo compensador síncrono foi bastante reduzida. Para as usinas térmicas, no entanto, a presença dos MCSRs teve pouca ou nenhuma influência. Novamente, o Cenário 100/100 no patamar de carga leve mostrou-se como o cenário de maior criticidade, exigindo uma utilização mais acentuada dos recursos de controle disponíveis. Neste cenário, a variação de potência reativa total, comparando-se as condições de regime pré-falta e pós falta das usinas e do compensador síncrono, foi de 185Mvar, sendo 106Mvar providos pelo compensador e os 79Mvar restantes pelas usinas térmicas.

Para este mesmo cenário, quando considerada a contribuição dos MCSRs, também foi verificada uma variação de potência reativa total de cerca de 185Mvar. Contudo, a variação na geração do compensador síncrono foi de apenas 12Mvar, ao passo que o MCSR de Marmeleiro deixou de absorver 98Mvar.

As variações de potência reativa dos demais cenários estão mostradas na Figura IV-13, para o patamar de carga leve, e na Figura IV-14, para o patamar de carga média. Nessas figuras é possível perceber uma diminuição expressiva na geração de potência reativa por parte do compensador síncrono, devido à atuação dos MCSRs, em todos os cenários do patamar de carga média e, especialmente, no Cenário 100/100 do patamar de carga leve.

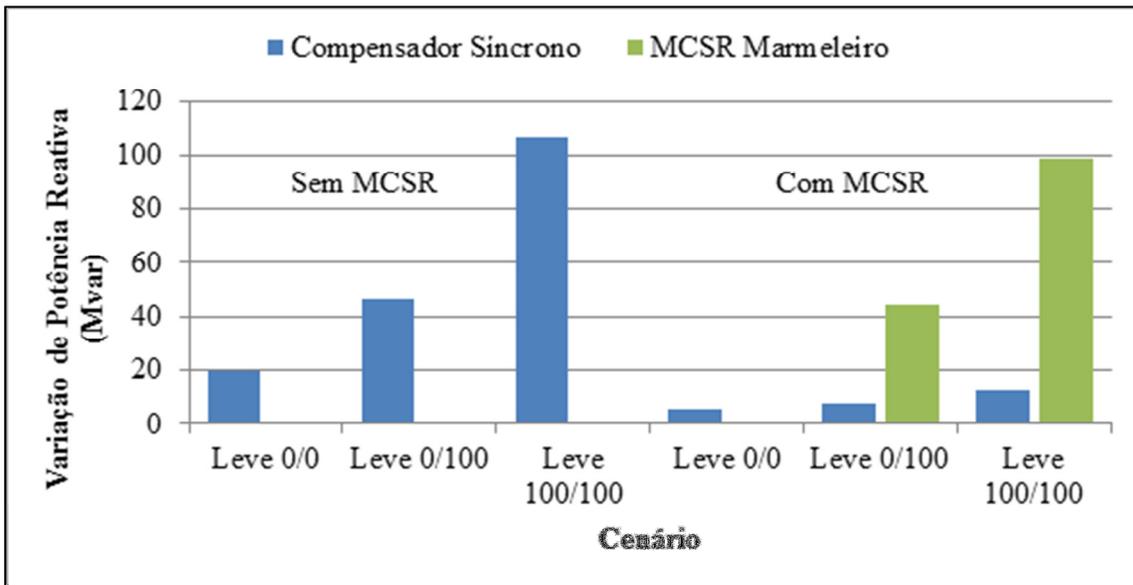


Figura IV-13 – Variação da geração de potência reativa do compensador síncrono e do MCSR de Marmeleiro para o patamar de carga leve.

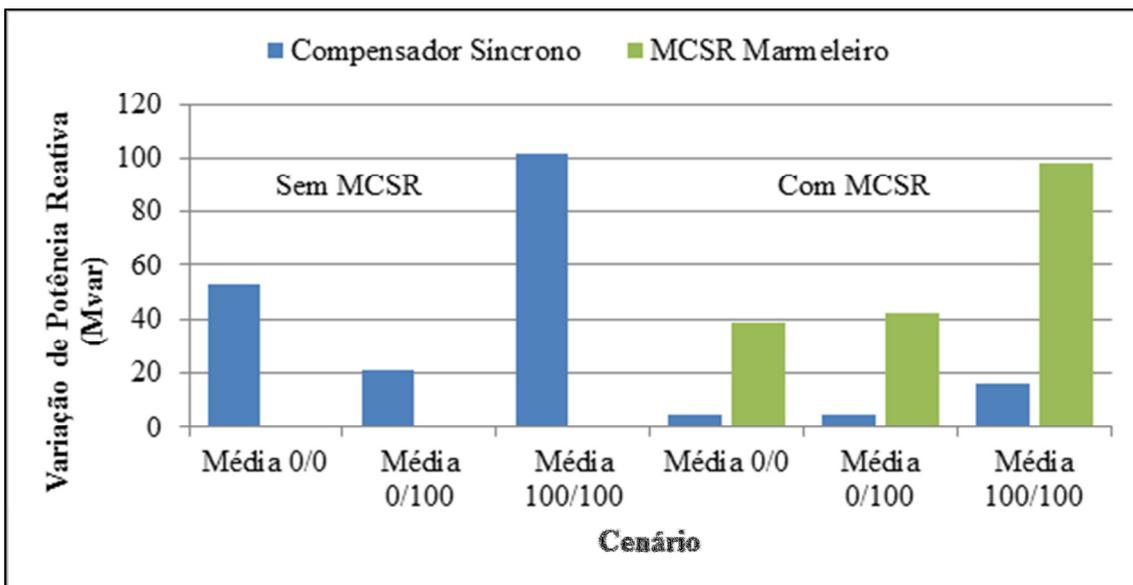


Figura IV-14 – Variação da geração de potência reativa do compensador síncrono e do MCSR de Marmeleiro para o patamar de carga média.

Com a diminuição da demanda por potência reativa, propiciada pela atuação dos MCSRs conectados ao sistema de 525kV, há um aumento na disponibilidade de recursos de controle de tensão na região, especialmente na rede de 525kV que é atendida de forma radial a partir da subestação Povo Novo. Como consequência direta

desse aumento de flexibilidade operativa, a capacidade de exportação de energia do sistema elétrico da região também é aumentada.

De forma a quantificar os ganhos na capacidade de transmissão foi utilizada a ferramenta de Fluxo de Potência Continuado disponibilizado pelo programa ANAREDE. Para estas avaliações foram realizados aumentos sequenciais da geração eólica conectada à subestação Santa Vitória do Palmar, a partir dos 402MW existentes, e foram monitorados os níveis de tensão nos barramentos de 230kV e 525kV, os carregamentos nas linhas de transmissão e transformadores de Rede Básica, além da geração de potência reativa dos MCSRs e do compensador síncrono de Marmeleiro.

A determinação dos limites de exportação do sistema foi realizado para os patamares de carga média e leve, apenas nos Cenários 0/100 e 100/100, em regime normal de operação e na emergência da linha de transmissão Povo Novo – Nova Santa Rita. A Tabela IV-17 apresenta um resumo dos resultados alcançados.

Tabela IV-17 –Limites de carregamento do sistema para os cenários e pontos de operação avaliados.

Limites	Condição	Leve 0/100	Leve 100/100	Média 0/100	Média 100/100
Caso Base(MW)	SEM MCSR	1164	1011	1251	1209
	COM MCSR	1457	1212	1471	1372
Emergência(MW)	SEM MCSR	643	440	806 (886)*	733
	COM MCSR	806 (854)*	629	806 (918)*	806 (814)*

*Os valores em parênteses referem-se ao limite de carregamento caso fosse desconsiderada a sobrecarga no transformador 525/230kV da SE Povo Novo.

Pela avaliação dos resultados obtidos pode-se perceber uma elevação dos limites de carregamento para todos os casos em que foi considerada a atuação dos MCSRs. É importante destacar que na maioria das condições avaliadas o limite no escoamento do excedente de geração da região é decorrente do esgotamento dos recursos de controle de tensão, que provoca subtensões em diversos pontos do sistema à medida que o montante de geração eólica considerado aumenta. Apenas nos quatro casos destacados da tabela o

valor máximo do carregamento é restringido pela superação da capacidade de curta duração do transformador 525/230kV da SE Povo Novo que é de 806MVA.

O menor limite alcançado para o escoamento do potencial eólico da região, com a atuação dos MCSRs e sem a inclusão de reforços adicionais, foi de 629MW no Cenário 100/100 do patamar de carga leve. Esse valor, obtido na condição de emergência da linha de transmissão em 525kV Povo Novo – Nova Santa Rita, corresponde a um aumento de 56% da capacidade instalada de geração eólica da região. Nesta mesma condição, o sistema originalmente proposto permite um acréscimo de apenas 9,5% dos montantes eólicos já contratados, totalizando os 440MW mostrados anteriormente.

Para exemplificar a questão do esgotamento dos recursos de controle de tensão no cenário de menor limite com atuação dos MCSRs serão apresentados na Figura IV-15 e na Figura IV-16, a seguir, as variações nos níveis de tensão das principais subestações da malha de 525kV da região e as variações das potências reativas dos equipamentos de controle de tensão conectados à subestação Marmeleiro.

Pela análise desses gráficos constata-se que o sistema de transmissão atinge o seu limite quando a capacidade de regulação de tensão do compensador síncrono e do MCSR de Marmeleiro se esgotam. A partir de 588MW de geração eólica, o compensador síncrono atinge o seu limite de geração (200Mvar), fazendo com que as tensões de Marmeleiro e Santa Vitória do Palmar comecem a reduzir gradativamente. O sistema finalmente colapsa quando o MCSR atinge o seu ponto de consumo mínimo de potência, esgotando definitivamente todos os recursos disponíveis na malha de 525kV.

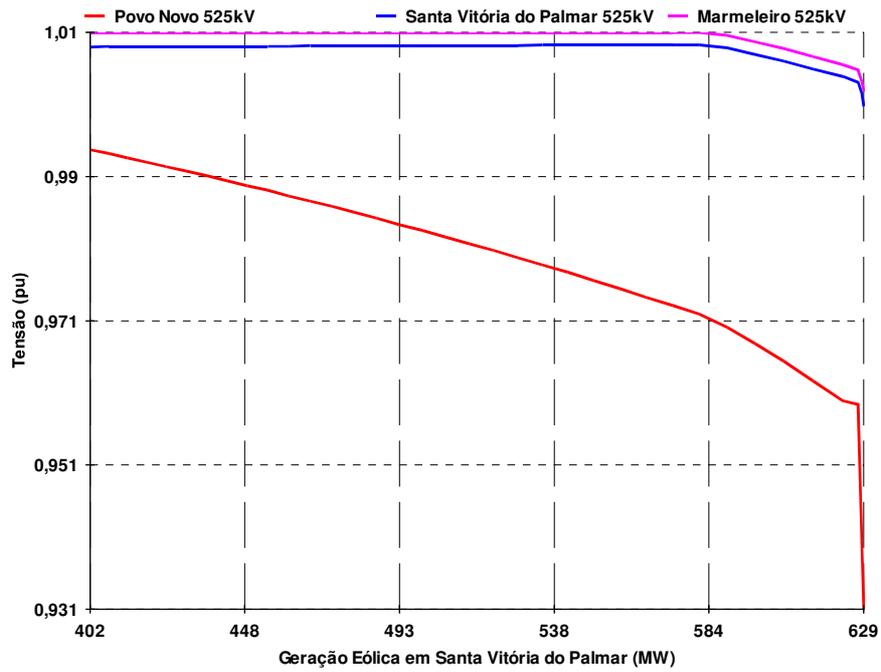


Figura IV-15 – Variação de tensão em função do aumento de geração eólica em Santa Vitória do Palmar.

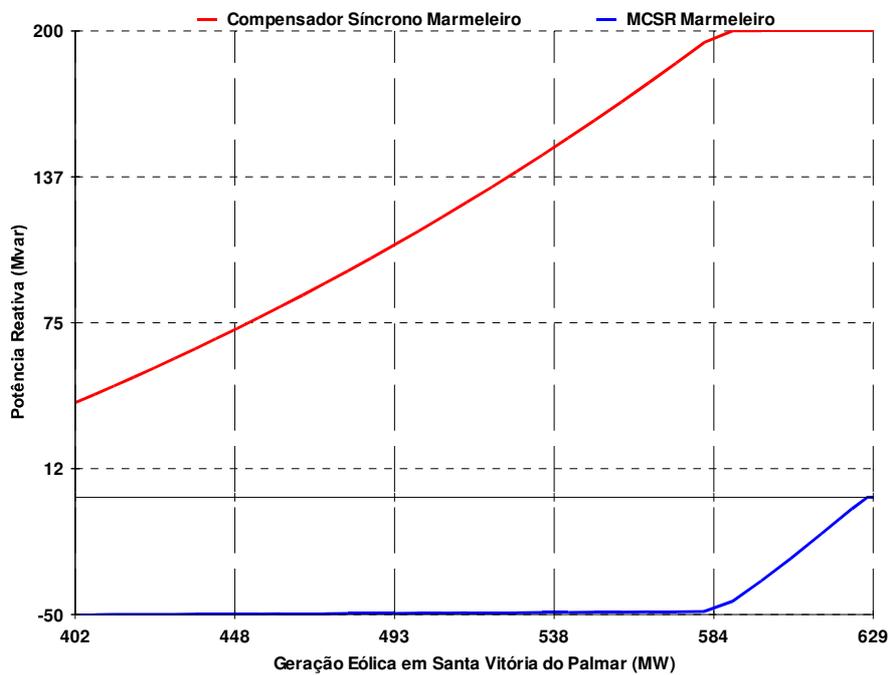


Figura IV-16 – Variação de geração de potência reativa em função do aumento de geração eólica em Santa Vitória do Palmar.

IV.6 Avaliações de desempenho dos MCSRs no controle de sobretensões dinâmicas.

Em complementariedade às avaliações em regime permanente, que identificaram alguns dos benefícios da inserção dos reatores controlados no sistema, foram realizadas análises do desempenho dos MCSRs no controle de sobretensões dinâmicas. Essas avaliações, realizadas com o programa ANATEM, objetivaram verificar a possibilidade de ocorrência de valores proibitivos nos níveis de tensão dos barramentos de subestações e dos terminais das linhas de transmissão decorrentes de manobras intempestivas no sistema de transmissão.

Para realização dessas avaliações tornou-se necessário modelar os MCSRs por meio de Controladores Definidos pelo Usuário – CDUs – desenvolvidos a partir dos equacionamentos apresentados nos CAPÍTULOS II e III desta dissertação. As equações básicas utilizadas para a representação do comportamento dos MCSRs em simulações dinâmicas foram as Equações (II-16) e (II-40), reproduzidas novamente a seguir por uma questão de comodidade.

$$h_1 = \frac{B_{max} \cot \delta}{\pi} \left[\left(\frac{\beta}{2} \right) - \frac{\sin \beta}{2} \right]$$
$$\beta = 2 \times \cos^{-1} \left(\frac{B_S - B_{CC}}{B_S} \right)$$

A primeira dessas equações relaciona a componente fundamental da função intensidade de campo ao grau de saturação do núcleo do reator permitindo obter de forma praticamente direta a componente fundamental da corrente primária requerida pelo reator. A segunda equação, por sua vez, define o grau de saturação do núcleo a partir da componente contínua do fluxo concatenado, que pode ser obtido através dos resultados das simulações realizadas anteriormente para as avaliações de transitórios eletromagnéticos.

Além dessas equações, foi aproveitada a configuração do circuito de controle projetada originalmente para os MCSRs trifásicos. Na implementação do CDU, os circuitos de controle foram simplificados, desconsiderando-se a representação da ponte de tiristores, e foi representada apenas a malha de controle de tensão mantendo-se os mesmos parâmetros da Tabela III-9.

Também foi incluída na malha principal do CDU um conjunto de blocos, destacados no diagrama da Figura IV-17, cujo objetivo é reproduzir de forma mais acurada o tempo de resposta do MCSR para diferentes tensões de controle aplicadas. Deste conjunto de blocos consta uma função denominada $f_1(x)$, composta basicamente da combinação de diferentes segmentos de reta sequenciais que representam de forma aproximada a relação entre a tensão de controle aplicada e o tempo de resposta do MCSR.

Os pontos dessa função foram calculados a partir dos dados da Tabela III-4 considerando que os valores apresentados nessa tabela correspondem ao tempo necessário para a resposta do MCSR alcançar 99% do valor de regime caso fosse aplicada uma tensão de controle constante. Os valores utilizados para os pares de pontos dessa função são mostrados na Tabela IV-18 para os MCSRs conectados nos níveis de tensão de 230kV e 525kV.

Tabela IV-18 – Valores adotados para os parâmetros da função $f_1(x)$ dos CDUs dos MCSRs nos níveis de tensão de 230kV e 525kV.

$f_1(x)$ MCSR 230kV		$f_1(x)$ MCSR 525kV	
x	y	x	y
0.0	2.1013	0.0	2.1013
0.1	2.0578	0.1	2.0578
0.2	1.8842	0.2	1.8842
0.3	1.8679	0.3	1.8679
0.4	1.8063	0.4	1.8063
0.5	1.3284	0.5	1.2852
0.6	1.3206	0.6	1.1904
0.7	1.2564	0.7	1.1262
0.8	1.2254	0.8	1.0952
0.9	1.1587	0.9	1.0718
1.0	1.1206	1.0	0.9904

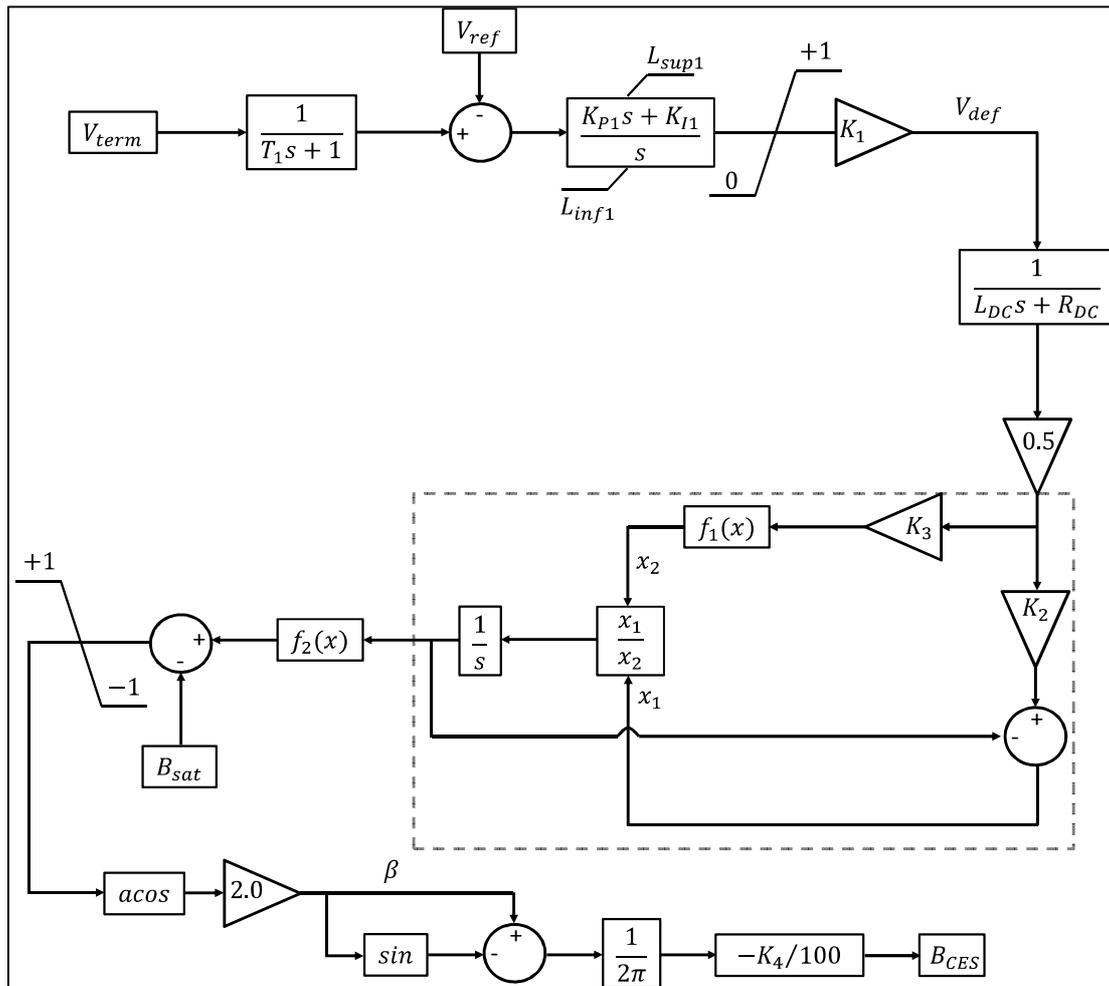


Figura IV-17 – Diagrama de blocos do Controlador Definido Pelo Usuário para representação do MCSR em estudos de estabilidade eletromecânica.

Cabe destacar que os parâmetros dos blocos dos CDUs elaborados apresentam valores diferenciados para os MCSRs conectados no nível de tensão de 230kV e 525kV, conforme pôde ser observado na Tabela IV-18. Estas diferenças são decorrentes das características físicas de cada equipamento, que incluem não apenas os níveis de tensão, mas os valores nominais de fluxo concatenado, capacidade e correntes de controle.

Essas diferenças podem ser igualmente observadas nos demais parâmetros dos CDUs mostrados na Tabela IV-19, para o MCSR conectado no nível de tensão de 230kV, e na Tabela IV-20, para o MCSR conectado no nível de tensão de 525kV.

Tabela IV-19 – Valores adotados para os parâmetros do CDU do MCSR conectado no nível de tensão de 230kV.

Parâmetro	Valor considerado	Parâmetro	Valor considerado
T_1	0.02	K_2	0.001697
K_{p1}	10.0	K_3	1/650
K_{I1}	20.0	K_4	50
L_{sup1}	1.0	B_{sat}	1.0
L_{inf1}	0.0	L_{DC}	0.015
K_1	390	R_{DC}	0.3

Tabela IV-20 – Valores adotados para os parâmetros do CDU dos MCSRs conectados no nível de tensão de 525kV.

Parâmetro	Valor considerado	Parâmetro	Valor considerado
T_1	0.02	K_2	0.00081317
K_{p1}	10.0	K_3	1/1500
K_{I1}	20.0	K_4	180
L_{sup1}	1.0	B_{sat}	1.0
L_{inf1}	0.0	L_{DC}	0.015
K_1	900	R_{DC}	0.3

Por fim, o diagrama de blocos do CDU dos MCSRs apresenta na sua malha principal uma função denominada $f_2(x)$, que representa a relação entre a magnitude da corrente de controle e a densidade de fluxo no núcleo do reator. De forma análoga à representação da função $f_1(x)$, a função $f_2(x)$ também é composta por uma combinação de segmentos de reta sequenciais definidos por um conjunto de pares de pontos (x,y).

Os valores adotados para os pares de pontos dessa função são mostrados na Tabela IV-21, para o CDU do MCSR conectado no nível de tensão de 230kV, e na Tabela IV-22, para o CDU do MCSR conectado no nível de tensão de 525kV.

Tabela IV-21 – Valores adotados para os parâmetros da função $f_2(x)$ do CDU do MCSR conectado no nível de tensão de 230kV.

$f_2(x)$ MCSR 230kV			
x	y	x	y
0.0000	0.0000	0.5940	1.8978
0.0424	0.3303	0.6364	1.9191
0.0849	0.5489	0.6788	1.9351
0.1273	0.7245	0.7212	1.9481
0.1697	0.8785	0.7637	1.9584
0.2121	1.0187	0.8061	1.9656
0.2546	1.1485	0.8485	1.9725
0.2970	1.2703	0.8910	1.9784
0.3394	1.3857	0.9334	1.9840
0.3818	1.4957	0.9758	1.9894
0.4243	1.6010	1.0182	1.9944
0.4667	1.7022	1.0607	1.9991
0.5091	1.7971	1.1031	2.0000
0.5515	1.8632	-	-

Tabela IV-22 – Valores adotados para os parâmetros da função $f_2(x)$ do CDU do MCSR conectado no nível de tensão de 525kV.

$f_2(x)$ MCSR 525kV			
x	y	x	y
0.0000	0.0000	0.6709	1.8826
0.0610	0.4029	0.7319	1.9119
0.1220	0.6494	0.7928	1.9338
0.1830	0.8513	0.8538	1.9515
0.2440	1.0294	0.9148	1.9634
0.3049	1.1914	0.9758	1.9729
0.3659	1.3416	1.0368	1.9810
0.4269	1.4825	1.0978	1.9887
0.4879	1.6158	1.1588	1.9959
0.5489	1.7416	1.2198	2.0000
0.6099	1.8357	-	-

Uma vez definidos e implementados os CDUs dos MCSRs propostos, procedeu-se à avaliação do desempenho dinâmico desses equipamentos. A base de dados utilizada nessas avaliações corresponde à Base de Dados para Estudos Eletromecânicos – PDE21 da EPE, disponibilizada em [41], acrescida dos CDUs desenvolvidos para os MCSRs. Cumpre notar que o código dos CDUs desenvolvidos encontra-se no APÊNDICE C dessa dissertação.

Para avaliar o desempenho dinâmico dos MCSRs foram realizadas simulações de rejeição de carga, sem aplicação de curto-circuito, nos terminais das linhas de transmissão Povo Novo – Nova Santa Rita e Povo Novo – Marmeleiro. Em todos os casos avaliados foram consideradas aberturas intempestivas apenas nos terminais onde há MCSRs e foram monitoradas as tensões dos terminais em vazio e dos principais barramentos do sistema assim como variação na absorção de potência reativa dos MCSRs.

As simulações realizadas analisaram apenas no Cenário 100/100 do patamar de carga leve e no Cenário 0/100 do patamar de carga média, pois estes cenários representam as situações mais críticas para o sistema devido ao perfil de tensão mais elevado e aos maiores fluxos nas linhas de transmissão da região.

Os ajustes dos casos de fluxo de potência, que determinam as condições iniciais das avaliações dinâmicas, foram ajustados de tal forma que as tensões nos terminais das linhas de transmissão onde é simulada a rejeição de carga sejam as maiores possíveis sem que ocorram violações nos níveis de tensão das demais barras do sistema em condição normal de operação. Além disso, o ponto de operação foi ajustado para que os MCSRs dos terminais onde ocorre a rejeição estivessem na condição de mínimo consumo de potência reativa.

Destaca-se que para avaliação do desempenho dos MCSRs no controle das sobretensões dinâmicas foram considerados os critérios descritos em [39] e [42] onde são determinados os limites nos níveis de tensão dos terminais em vazio de linhas de transmissão e a variação máximas admitida nas tensões dos barramentos do sistema. Esses documentos de critérios estabelecem que a tensão no terminal em vazio de linhas de transmissão de 525kV não pode ultrapassar 1.150pu em condição de regime e que a

máxima variação de tensão, comparando os pontos de operação em regime antes e após a rejeição de carga, não deve ser superior a 5%.

O comportamento dinâmico dos MCSRs também foi avaliado frente à pior contingência do sistema. Apenas neste caso, foi simulada a aplicação de um curto-circuito monofásico no barramento de 525kV da SE Povo Novo, com duração de 100ms, seguido pela abertura da linha de transmissão em 525kV Povo Novo – Nova Santa Rita.

Os resultados dessas simulações serão apresentados e discutidos nas seções a seguir.

IV.6.1 Resultados das avaliações de rejeição de carga no barramento de Marmeleiro da LT 525kV Povo Novo – Marmeleiro.

Nesta simulação foi realizada a abertura intempestiva do terminal Marmeleiro, pertencente à linha Marmeleiro – Povo Novo, aos 100ms de simulação, nos cenários 0/100 e 100/100 para os patamares de carga média e leve, respectivamente, considerando a configuração proposta com MCSRs nas subestações de Marmeleiro, Povo Novo e Quinta. Após a ocorrência da manobra de rejeição, o terminal de Marmeleiro foi mantido aberto e a linha de transmissão permaneceu operando em vazio conectada apenas pelo terminal de Povo Novo.

As tensões nos terminais de Marmeleiro e Povo Novo, assim como a variação na absorção de potência reativa dos MCSRs considerados são mostrados na Figura IV-18, para o patamar de carga leve, e na Figura IV-19, para o patamar de carga média. Cumpre notar que em função da característica radial do sistema de 525kV que supre as regiões de Marmeleiro e Santa Vitória do Palmar, a abertura do circuito Povo Novo – Marmeleiro provoca o ilhamento das usinas eólicas conectadas no extremo sul do estado assim como da subestação de Marmeleiro. Por esse motivo, não serão mostradas as tensões desses barramentos e tampouco a variação no consumo ou absorção de potência reativa por parte do compensador síncrono.

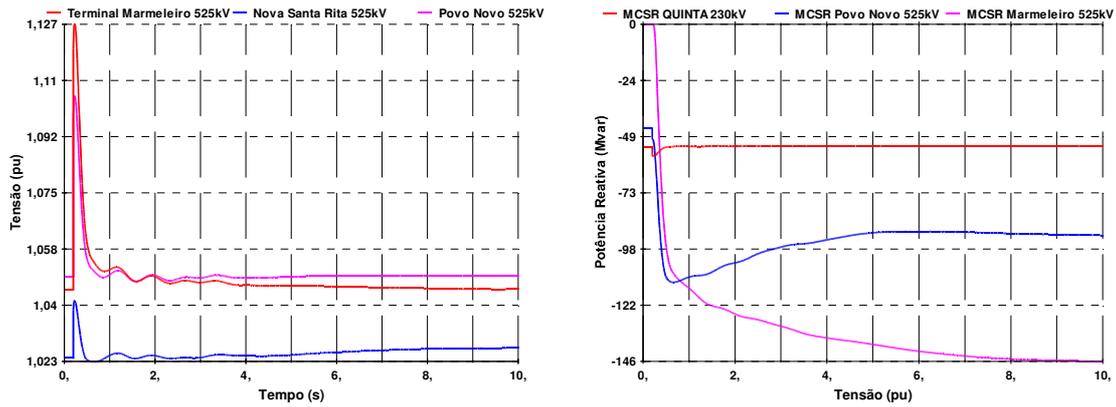


Figura IV-18 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV, Povo Novo 525kV e Marmeleiro 525kV no patamar de carga leve.

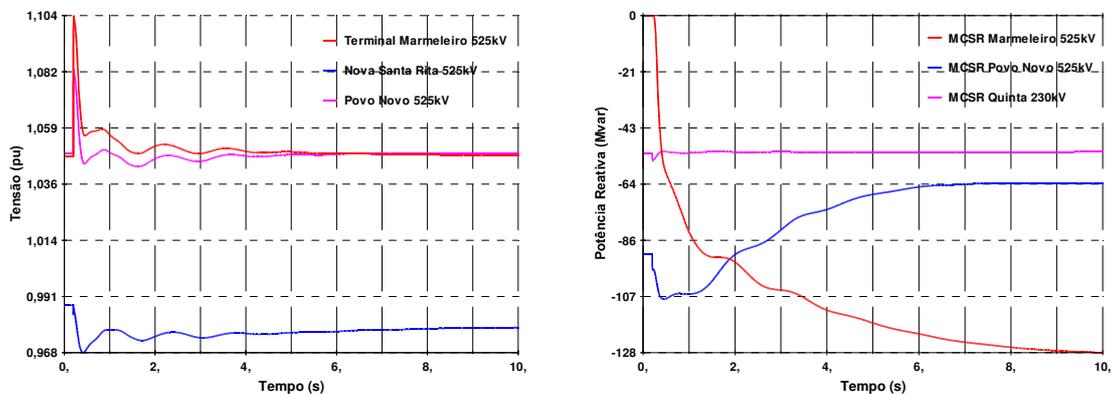


Figura IV-19 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV, Povo Novo 525kV e Marmeleiro 525kV no patamar de carga média.

Pela avaliação dos resultados apresentados nas figuras anteriores pode-se perceber que a manobra de rejeição de carga no terminal de Marmeleiro não exige toda a capacidade dos MCSRs conectados no nível de tensão de 525kV. Dessa forma, a atuação desses dispositivos de controle permite retornar os níveis de tensão do sistema às condições iniciais de simulação evitando a ocorrência de sobretensões dinâmicas.

Os demais resultados obtidos nessa simulação mostram que:

- A tensão sustentada no terminal em vazio da linha de transmissão na condição de regime foi de 1.045pu para o patamar de carga leve e 1.049pu para o patamar de carga média.

- O máximo valor de tensão verificada foi de 1.127pu no patamar de carga leve.
- Na condição de regime após a manobra de rejeição o consumo de potência reativa do MCSR de Marmeleiro foi de 146Mvar, para o patamar de carga leve, e de 128Mvar para o patamar de carga média.

IV.6.2 Resultados das avaliações de rejeição de carga no barramento de Povo Novo da LT 525kV Povo Novo – Nova Santa Rita.

Nesta simulação foi realizada a abertura intempestiva do terminal Povo Novo, pertencente à linha Nova Santa Rita – Povo Novo, aos 100ms de simulação, nos cenários 0/100 e 100/100 para os patamares de carga média e leve, respectivamente, considerando a configuração proposta com MCSRs nas subestações de Marmeleiro, Povo Novo e Quinta. Após a ocorrência da manobra de rejeição, o terminal de Povo Novo foi mantido aberto e a linha de transmissão permanece operando em vazio conectada apenas pelo terminal de Nova Santa Rita.

As tensões nos terminais de Nova Santa Rita, Povo Novo, Marmeleiro e Santa Vitória do Palmar, assim como a variação na absorção de potência reativa dos MCSRs considerados são mostrados na Figura IV-20, para o patamar de carga leve, e na Figura IV-21, para o patamar de carga média.

Destaca-se que a abertura dessa linha de transmissão interrompe a ligação do sistema elétrico da região do extremo sul do Rio Grande do Sul com as demais subestações de 525kV do estado. Além disso, há um redirecionamento da geração das usinas eólicas conectadas na subestação 525kV Santa Vitória do Palmar para o sistema de 230kV aumentando o fluxo de potência nesse sistema e provocando, em um primeiro momento, quedas nos níveis de tensão dos barramentos das subestações monitoradas. Posteriormente, a atuação dos dispositivos de controle restabelece as tensões para patamares admissíveis até mesmo em condição normal de operação.

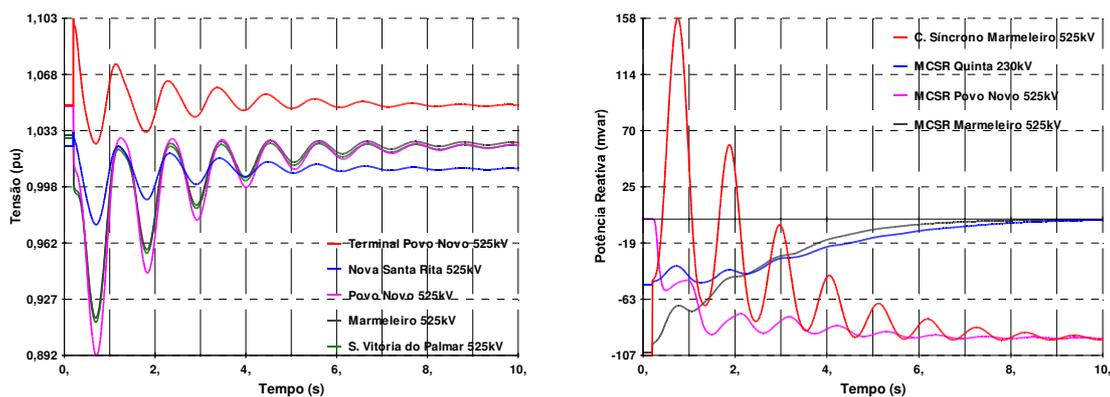


Figura IV-20 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV, Povo Novo 525kV e Marmeleiro 525kV no patamar de carga leve.

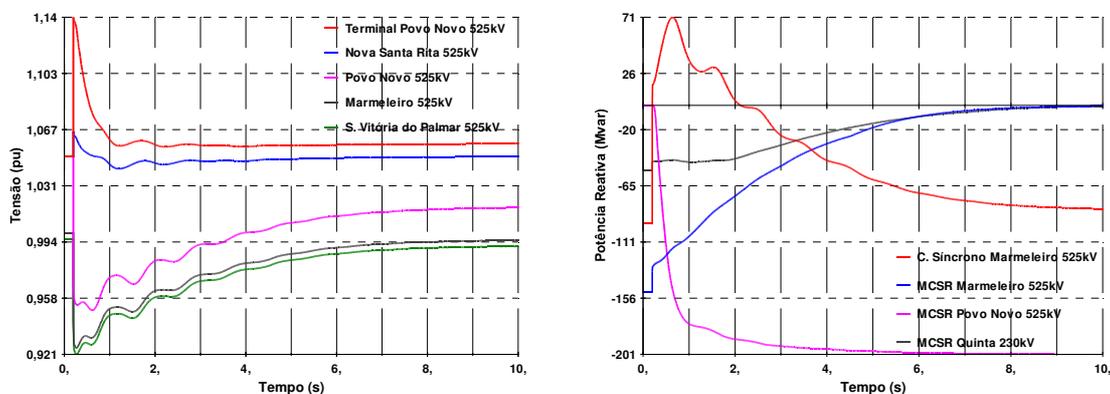


Figura IV-21 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV, Povo Novo 525kV e Marmeleiro 525kV no patamar de carga média.

Pela avaliação dos resultados apresentados nas figuras anteriores pode-se perceber que a manobra de rejeição de carga no terminal de Povo Novo exige toda a capacidade do MCSR conectado neste terminal para manter a tensão o mais próximo possível da condição inicial de operação.

Os demais resultados obtidos nessa simulação mostram que:

- A tensão sustentada no terminal em vazio da linha de transmissão na condição de regime foi de 1.049pu para o patamar de carga leve e 1.058pu para o patamar de carga média.
- O máximo valor de tensão verificada foi de 1.140pu no patamar de carga média.

- Na condição de regime após a manobra de rejeição o consumo de potência reativa do MCSR de Povo Novo foi de 94Mvar, para o patamar de carga leve, e de 201Mvar para o patamar de carga média.

IV.6.3 Resultados das avaliações dinâmicas da contingência da LT 525kV Povo Novo – Nova Santa Rita.

Nesta avaliação foi realizada a simulação de um curto-circuito monofásico, com duração de 100ms, no barramento de 525kV da Povo Novo seguido da abertura do circuito Povo Novo – Nova Santa Rita. Esta avaliação foi realizada apenas no cenário 100/100 do patamar de carga leve.

Para simular a ocorrência de um curto monofásico no programa ANATEM, foi inserido no barramento de 525kV de Povo Novo um reator paralelo com potência nominal equivalente à potência de curto-circuito monofásico, de cerca de 5000MVA neste caso, calculada pelo programa ANAFAS. Esse reator foi incluído no sistema aos 100ms de simulação, mantido conectado por 100ms e retirado aos 200ms de simulação juntamente com o circuito Povo Novo – Nova Santa Rita.

Nesta simulação foram monitoradas as tensões dos barramentos de 525kV da região e a geração de potência reativa dos MCSRs e do compensador síncrono da subestação Marmeleiro. Os resultados dessa simulação são mostrados nos gráficos da Figura IV-22 a seguir.

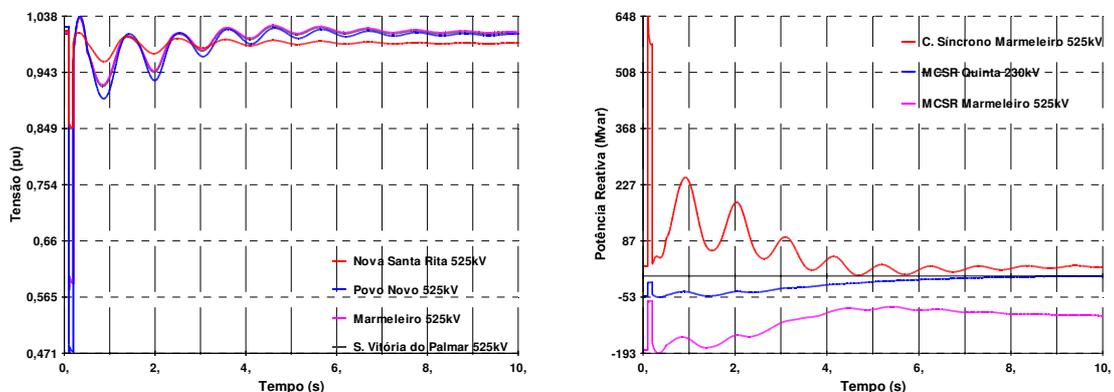


Figura IV-22 – Variações nos níveis de tensão e na potência reativa consumida pelos MCSRs das subestações de Quinta 230kV e Marmeleiro 525kV.

Pela avaliação dos resultados apresentados figura anterior pode-se perceber que o sistema apresenta-se estável frente à contingência mais severa e que os níveis de tensão permanecem dentro de limites admissíveis. Após a eliminação do curto-circuito, o MCSR da subestação de Quinta passa à condição de mínimo consumo de potência reativa enquanto o MCSR de Marmeleiro, juntamente com o compensador síncrono, auxiliam na regulação da tensão dessa subestação no valor de sua condição inicial (1.010pu).

Os demais resultados obtidos nessa simulação mostram que:

- O menor valor de tensão verificado durante a aplicação do curto-circuito foi de 0,471pu no barramento de 525kV da subestação Povo Novo.
- A amplitude das oscilações de tensão encontram-se abaixo de 2% em aproximadamente quatro segundos após a eliminação da falta.
- Na condição de regime após a eliminação da falta o consumo de potência reativa do MCSR de Marmeleiro é de 99Mvar. Nesta mesma condição, o MCSR de Quinta encontra-se na condição de mínimo consumo de potência reativa e o compensador síncrono de Marmeleiro gera 21Mvar.

CAPÍTULO V CONCLUSÕES.

V.1 Conclusões Gerais.

Não obstante as considerações e comentários feitos ao término de alguns capítulos e ao longo do texto desta dissertação, torna-se essencial, neste momento, destacar as principais constatações obtidas nos estudos realizados.

O CAPÍTULO I foi direcionado a uma avaliação contextual do tema central desta pesquisa, com destaque para a apresentação de uma síntese das principais referências bibliográficas encontradas. Além de descrever alguns exemplos de aplicações dos reatores de saturação controlada, dentre os quais se enquadra o MCSR, esse capítulo analisou o contexto histórico da utilização desse tipo de equipamento e expôs algumas das características marcantes relacionadas ao seu funcionamento.

O CAPÍTULO II teve por objetivo apresentar os conceitos teóricos associados ao princípio de funcionamento do MCSR. Em um primeiro momento, foram detalhadas as características da estrutura física comumente adotada para este tipo de reator, descrevendo as conexões de seus enrolamentos primários, secundários e a geometria do núcleo ferromagnético. Posteriormente, foram abordadas questões relacionadas aos estados operativos do MCSR, frisando a sua capacidade de alterar o consumo de potência reativa por meio do controle do nível de saturação do núcleo.

Com base nas características desse tipo de reator, foram obtidas as relações matemáticas que descrevem a variação do valor de sua indutância equivalente e as relações entre o grau de saturação do núcleo e o espectro harmônico das correntes primárias do reator. Esses equacionamentos, realizados a partir de uma série de premissas descritas ao longo dessa dissertação, fundamentaram a elaboração dos modelos empregados para as representações do MCSR nas plataformas computacionais utilizadas.

A avaliação do desempenho dos MCSRs no controle de tensão de sistemas teste foi realizada no CAPÍTULO III, onde foi verificada sua capacidade de regular a tensão nos terminais primários mediante ação de um sistema de controle nos enrolamentos secundários do reator. Neste capítulo foram avaliadas configurações monofásicas e

trifásicas dos MCSR e foram definidas algumas de suas principais propriedades tais quais o tempo de resposta e as características das componentes harmônicas de corrente.

Foi demonstrado que a magnitude da tensão de controle possui forte relação com o tempo de resposta do reator, que diminui à medida que esta variável de controle aumenta. Em condições nominais de operação, o tempo de resposta do MCSR é de aproximadamente um segundo, ao passo que uma elevação brusca na tensão de controle pode reduzir esse tempo ao patamar dos milissegundos.

As análises realizadas nesse capítulo também contemplaram a obtenção do espectro harmônico das correntes primárias do reator e a avaliação da Distorção Harmônica Total para diversos pontos de operação. Os resultados dessas avaliações mostraram que as componentes harmônicas predominantes nas correntes primárias do MCSR são as de ordem 3, 5 e 7 e que a magnitude dessas componentes varia de acordo com o grau de saturação do núcleo. Apesar de as correntes primárias possuírem altas distorções para baixos graus de saturação, as magnitudes das correntes nessas condições são relativamente pequenas. Além disso, verificou-se que a DHT da forma de onda das correntes é inferior a 5% para grande maioria dos pontos de operação.

Estas duas propriedades dos MCSRs podem ser consideradas inconvenientes de sua operação, porém, tanto as distorções harmônicas quanto o tempo de resposta do reator podem ser alterados mediante utilização de soluções mitigadoras. No caso das distorções harmônicas, a utilização de filtros pode reduzir a influência desse equipamento nos índices de QEE. Já para a redução do tempo de resposta, é preciso dotar o sistema do controle do reator de capacidade adicional para permitir a aplicação de uma tensão CC superior à nominal durante curtos intervalos de tempo.

Terminadas as análises de performance do MCSR com foco no equipamento e sua interação com sistemas de pequeno porte, procedeu-se à avaliação do desempenho desse reator em um sistema teste de grande porte pertencente à Rede Básica do estado do Rio Grande do Sul. Nas simulações realizadas no CAPÍTULO IV, foi considerada a implantação de três MCSRs em substituição a reatores de linha e de barra convencionais, objetivando evidenciar a eficácia do MCSR em prover uma adequada regulação de tensão ao sistema.

Foram realizadas simulações de energização do MCSR e de rejeição de carga nos terminais das linhas de transmissão onde os novos MCSRs foram conectados. Nessas avaliações foram considerados cenários críticos para o atendimento à região estudada, avaliando-se não apenas a capacidade de regular a tensão, mas também o impacto decorrente da introdução de componentes harmônicas no sistema.

Em todos os casos verificou-se que a atuação do MCSR evitou a ocorrência de sobretensões indesejadas nos barramentos do sistema não sendo verificada a necessidade de diminuir o tempo de resposta do reator. Além disso, constatou-se que a máxima DHT obtida para a forma de onda da tensão foi de 3.2%, o que é um valor relativamente baixo quando comparado com outros equipamentos não-lineares utilizados em sistemas elétricos, a exemplo de retificadores de potência.

As análises em regime permanente identificaram uma elevação na capacidade de escoamento da geração da região sul do Rio Grande do Sul propiciado pela atuação dos MCSRs propostos. Em todos os cenários simulados, o limite de escoamento do sistema foi aumentado sem a necessidade de inclusão de reforços no sistema de transmissão. No pior cenário avaliado, os MCSRs permitiram um aumento de até 56% na capacidade instalada da região.

Por fim, foi elaborado um controlador específico (CDU) para utilização no programa ANATEM do CEPEL visando permitir o estudo do comportamento dinâmico do MCSR. A concepção do CDU proposto levou em consideração os equacionamentos e os resultados das simulações apresentadas nos CAPÍTULOS II e III e foi utilizado para avaliar a capacidade do MCSR de controlar sobretensões dinâmicas.

As simulações realizadas nesse capítulo não apontaram quaisquer violações nos critérios estabelecidos para estudos de estabilidade eletromecânica e permitiram evidenciar os diferentes tempos de resposta dos dispositivos de controle existentes na região analisada.

Muito embora os resultados obtidos nas diversas simulações realizadas tenham sido esclarecedoras sobre a operação deste tipo de reator e tenham evidenciado sua eficiência

no controle de tensão de sistemas de potência, é importante destacar que a utilização de reatores de saturação controlada, como qualquer outro equipamento do sistema elétrico, precisa ser averiguada nas mais diversas condições operativas do sistema ao qual se propõe a inclusão desse equipamento. Condições operativas específicas de determinados sistemas podem requerer avaliações complementares e a implementação de soluções classicamente empregadas na engenharia elétrica como a instalação de filtros harmônicos, reatores de neutro, dentre outros.

V.2 Sugestões de trabalhos futuros.

Neste trabalho foram realizadas avaliações da utilização do MCSR em sistemas de potência de grande porte, com enfoque no desempenho desse equipamento no controle de tensão e sua interação com a rede. Foram realizadas análises do comportamento transitório, em regime permanente e dinâmico. Baseado nos resultados obtidos podem ser realizadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

1. Avaliação de soluções mitigadoras para as distorções harmônicas das correntes primárias do reator envolvendo não apenas a utilização de filtros no sistema, mas a possibilidade de realizar um rearranjo dos enrolamentos de controle ou até mesmo propor a inclusão de enrolamentos adicionais.
2. Aprofundar as avaliações relacionadas ao cálculo da indutância equivalente do reator utilizando *softwares* específicos que permitam caracterizar o comportamento eletromagnético do núcleo do reator através, por exemplo, do método de elementos finitos.
3. Avaliação do desempenho do MCSR em sistemas dotados de compensação série com o intuito de verificar possíveis problemas associados a ressonâncias harmônicas.
4. Avaliação comparativa entre o desempenho do MCSR frente a outros tipos de reatores controlados como o TCR ou TSR abordando não apenas as características técnicas, mas também realizando um levantamento dos custos associados à implantação de ambos os tipos de reator.
5. Implementação do modelo desenvolvido em MATLAB/SIMULINK em outras plataformas de avaliação de fenômenos transitórios como o PSCAD e o ATP (*Alternative Transients Program*).

6. Aprofundar a avaliação das equações relacionadas ao desempenho do reator de saturação controlada de modo a possibilitar a obtenção de uma expressão analítica que relacione o tempo de resposta do reator com a magnitude da tensão de controle e com os parâmetros físicos do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] XU, X. "The Status and Development of Magnetically Controlled Reactor". In: *International Conference on Test and Measurement*, Nanchang, 2009.
- [2] ALEXANDROV, G. N.; DARDEER, M. M. "Long distance transmission line with controlled shunt reactors (CSRT)". In: *12th International Middle-East Power System Conference - MEPCON*, pp. 294-299, Aswan, 2008.
- [3] BALYAEV, A. N.; SMOLOVIK, S. V. "An improvement of AC Electrical energy transmission system with series compensation by implementation os Controllable Shunt Reactors". *IEEE Power Tech Conference Proceedings*, Bolonha, Junho 2003.
- [4] BRYANTSEV, A. M. **Magnetically Controlled Shunt Reactors - Collection of Articles**. 2ª. ed. Moscou: Znack, v. I, 2012.
- [5] SMIRNOV, A. A.; SMOLOVIK, S. V. "An improvement of Russian long-length AC electrical energy transmission systems by implementation of Controllable Shunt Reactors". In: *IEEE Russia Power Tech*, pp. 1-5, São Petesburgo, 2005.
- [6] SUNDAR, S. V. N. J.; VAISHNAVI, G. "Performance study of a continuous CSR for bus management in EHV systems". In: *International Conference on Power Systems Transients - IPST*, Lion, Junho 2007.
- [7] WILSON, T. G. "The Evolution of Power Electronics". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15, pp. 439-446, Maio 2000.
- [8] MALI, P. **Magnetic amplifiers principles and applications**. Nova Iorque: John F. Rider Publisher Inc., 1960.
- [9] BARBOSA JÚNIOR, J. A. F. *Modelagem e análise de desempenho transitório e dinâmico de compensadores estáticos de reativos utilizando reatores saturados*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- [10] BREWER, G. L. et al. "The application of static var compensators to the English terminal of the 2000MW HVDC Cross Chanel Link". In: *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, 27th Cigré Session, paper 14-07, Paris, 1986.
- [11] BRYANTSEV, A. M. Magnetically controlled ferromagnetic devices with extreme saturation parts of magnetic system. **Electricity**, n. 2, p. 23-30, 1986.

- [12] MOTTA, D. V. P. *Desempenho dinâmico de sistemas elétricos com compensadores estáticos de reativo*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [13] CARVALHO JÚNIOR, M. A.; FONTE, L. A. M. "Increasing the capacity of long EHV transmission lines by saturated reactors". In: *14th Power System Computation Conference*, pp. 1199-1204, Sevilha, 2002.
- [14] CARVALHO JÚNIOR, M. A.; DA FONTE, L. A. M. "Steady state and transient voltage control on long EHV transmission lines". In: *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 409-414, Atlanta, 2001.
- [15] ALEXANDROV, G. N. "Limitation of switching overvoltages on transmission lines by using fast-acting shunt reactors, controlled by means of power electronics". In: *Cigré Session, paper 14/33-01*, Paris, 2000.
- [16] BRYANTSEV, A. et al. "Magnetically controlled shunt reactor application for AC HV and EHV transmission lines". In: *Cigré 2006 Session*, paper B4-307, Paris, 2006.
- [17] SISHTLA, VENKATA NATARAJA JITHIN SUNDAR; M , RESHMI. "Utilization of controlled shunt reactor in a 400kV interconnected network". *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 2, Artigo 1038, 2005.
- [18] BRYANTSEV, A. et al. "Power Compensators based on MCSR in electric networks with a voltage between 110kV and 500kV". In: *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 239-244, São Paulo, 2010.
- [19] BRYANTSEV, A. M. et al. Magnetically controlled shunt reactors to the meet of Russia's power industry requirements. **Energoprogress**, Science and Technology Newspaper, Moscou, 2004.
- [20] ZTR - ZAPOROZHTRANSFORMATOR. Magnetically Controlled Shunt Reactors. **Sítio da ZTR - Zaporozhtransformator**. Disponível em: <<http://www.ztr.com.ua>>. Acesso em: 20 Outubro 2012.
- [21] YAO, Y.; CHEN, B.; TIAN, C. "Modeling and characteristics research on EHV magnetically controlled reactor". In: *The 8th International Power Engineering Conference - IPEC*, pp. 425-430, Singapura, 2007.

- [22] DAI, J. et al. "Reactive power - voltage integrated control method based on MCR". In: *11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 727-731, Singapura, 2010.
- [23] KARIMOV, R. R.; EBADIAN, M. Comparison of magnetically controlled reactor (MCR) and thyristor controlled reactor (TCR) from harmonics point of view, v. 29, p. 191-198, 2007.
- [24] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Análise Técnica da Integração das Usinas Eólicas no Sul do Rio Grande do Sul*, EPE-DEE-RE-117/2011-rev0. Rio de Janeiro, 2012.
- [25] ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 20.1 - Glossário de termos técnicos Rev. Nº 1.0*. Rio de Janeiro, p. 36, 2009.
- [26] YAN-PING, L. et al. "Leakage Inductance Calculation and Simulation Research of Extra-high Voltage Magnetically Controlled Shunt Reactor". In: *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, Wuhan, 2010.
- [27] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 5ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1992. 1-25 p.
- [28] CHEN, X. et al. "Modeling and Harmonics Optimization of a Two-stage Saturable Magnetically Controlled reactor for an Arc Supression Coil". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59, n. 7, pp. 2824-2831, Outubro 2011.
- [29] FENG, G. et al. "Study on a Novel Controllable Reactor Using in Ultra-high Voltage System". In: *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, pp. 1-4, Nova Déli, 2008.
- [30] AK STEEL CORPORATION. Product Data Bulletin TRAN-COR H Grain Oriented Electrical Steels, 2010. Disponível em: <http://www.aksteel.com/markets_products/electrical.aspx#tran-cor>. Acesso em: 23 Abril 2012.
- [31] JFE STEEL CORPORATION. JFE Super Cores Magnetic Property Curves, 2008. Disponível em: <<http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/list.html#Electrical-Steels>>. Acesso em: 23 Abril 2012.
- [32] LEE, Y.-S.; CHOW, M. H. L. "Filtering Systems in Rectifier Circuits". In:

- HASHID, M. H. (eds), *Power Electronics Handbook*. 3ª. ed., Cap. 10, pp. 158-162 [S.l.]: Elsevier Inc., 2011.
- [33] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2021*. Brasília, p. 182-191, 2012.
- [34] CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Leilões. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: Março 2013.
- [35] ELETROBRAS ELETROSUL. *Relatório R2 - Detalhamento da Alternativa. Subestações 525kV Povo Novo, Marmeleiro, Santa Vitória do Palmar. Linhas de Transmissão 525kV Nova Santa Rita - Povo Novo - Marmeleiro - Santa Vitória do Palmar. Volume I*. Florianópolis, 2012.
- [36] ELETROBRAS ELETROSUL. *Relatório R2 - Detalhamento da Alternativa. Subestações 525kV Povo Novo, Marmeleiro, Santa Vitória do Palmar. Linhas de Transmissão 525kV Nova Santa Rita - Povo Novo - Marmeleiro - Santa Vitória do Palmar. Volume II*. Florianópolis, 2012.
- [37] EPE- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Base de dados para estudos de curto-circuito – PDE 2021, 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Transmissao>>. Acesso em: Janeiro 2013.
- [38] CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. *ANAFAS - Programa de Análise de Faltas Simultâneas - Manual do Usuário - versão 6.3.1*. CEPEL, Rio de Janeiro, 2011.
- [39] ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos Rev. Nº 2.0*. Rio de Janeiro, p. 33-51, 2010.
- [40] EPE- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Dados para estudos de Planejamento da Transmissão – PDE 2021, 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Transmissao>>. Acesso em: Janeiro 2013.
- [41] EPE- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Base de dados para estudos eletromecânicos – PDE 2021, 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Transmissao>>. Acesso em: Fevereiro 2013.
- [42] CCPE - COMITÊ COORDENADOR DO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS. *Critérios e Procedimentos para o Planejamento*

da Expansão do Sistemas de Transmissão. [S.l.], 2002.

APÊNDICE A

DIMENSIONAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DOS FILTROS

A utilização de filtros em circuitos retificadores tem por objetivo atenuar o *ripple* ou ondulação da forma de onda da tensão retificada entregue à carga. O *ripple* corresponde à componente alternada de tensão que se sobrepõe ao valor médio da tensão contínua do retificador. No caso específico do circuito de controle do MCSR, a utilização de um filtro capacitivo-indutivo (LC) teve por objetivo evitar grandes oscilações na tensão de controle dos enrolamentos secundários quando da alteração do sinal de controle V_{CC} .

Para realizar o dimensionamento dos parâmetros físicos dos componentes utilizados no filtro LC das configurações monofásica e trifásica do MCSR foram adotadas as considerações descritas na referência [32] de onde se destacam os seguintes critérios:

1. Para que se possa manter o valor da corrente de saída do retificador o mais próximo possível do seu valor de regime, a indutância do filtro deve ser de tal magnitude que a relação $\omega L_f \gg R_{carga}$ seja verdadeira. É importante destacar que a ação deste tipo de filtro é mais eficiente para condições de altos carregamentos.
2. A redução no valor do *ripple* da tensão pode ser estimado a partir da equação (A-1) a seguir desde que a relação $R_{carga} \gg 1/2\pi f_r C_f$ seja válida.

$$\frac{v_{CC}}{v_{da}} = \left| \frac{1}{1 - (2\pi f_r)^2 L_f C_f} \right| \quad (\text{A-1})$$

onde f_r é a frequência do *ripple* de tensão.

Baseado nessas considerações o cálculo dos parâmetros do filtro pode ser realizado adotando-se algumas premissas para sua determinação. Primeiramente, adotou-se que o valor da resistência equivalente dos enrolamentos secundários do MCSR deveria ser pelo menos cinco vezes maior do que o valor da reatância capacitiva do filtro, garantindo assim a validade da estimativa realizada pela equação (A-1). Determinado o valor da capacitância C_f do filtro, adotou-se como meta a redução do valor de *ripple* de

tensão para cerca de 5% do valor original, obtendo-se, finalmente, o valor da componente L_f do filtro.

Para a configuração monofásica os valores calculados para as componentes do filtro foram: $L_f = 0.66mH$ e $C_f = 6mF$. Adicionalmente a essas componentes foi incluída uma resistência $R_f = 0.1\Omega$ para permitir a atenuação da resposta do filtro na frequência de ressonância definida por $f_{ress} = 1/2\pi\sqrt{L_f C_f}$. Conforme pode ser observado Figura A-1, que apresenta a curva característica da resposta em frequência do filtro, há uma sobre-elevação específica nas frequências próximas à frequência de ressonância do circuito.

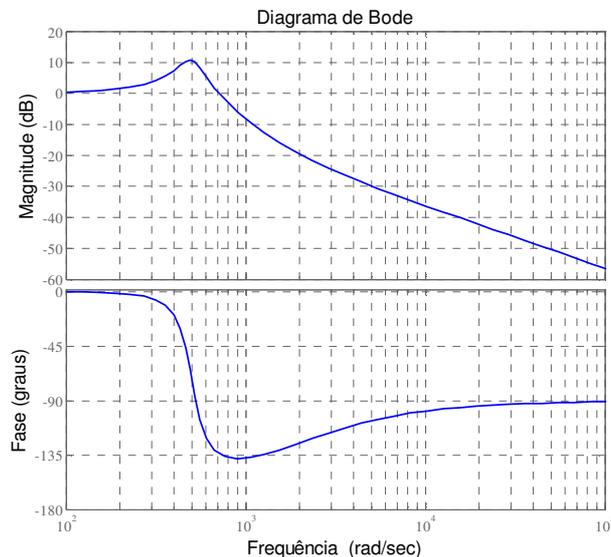


Figura A-1 Curva da resposta em frequência para o filtro adotado na configuração monofásica do MCSR.

A Figura A-2 a seguir apresenta uma comparação entre as formas de onda do retificador antes e após a inclusão do filtro “passa-baixa” para um valor médio de tensão retificada de 260V. Pela análise dessa figura, pode-se constatar que houve uma redução significativa do *ripple* para cerca de 5% de seu valor original conforme indicado pela equação (A-1).

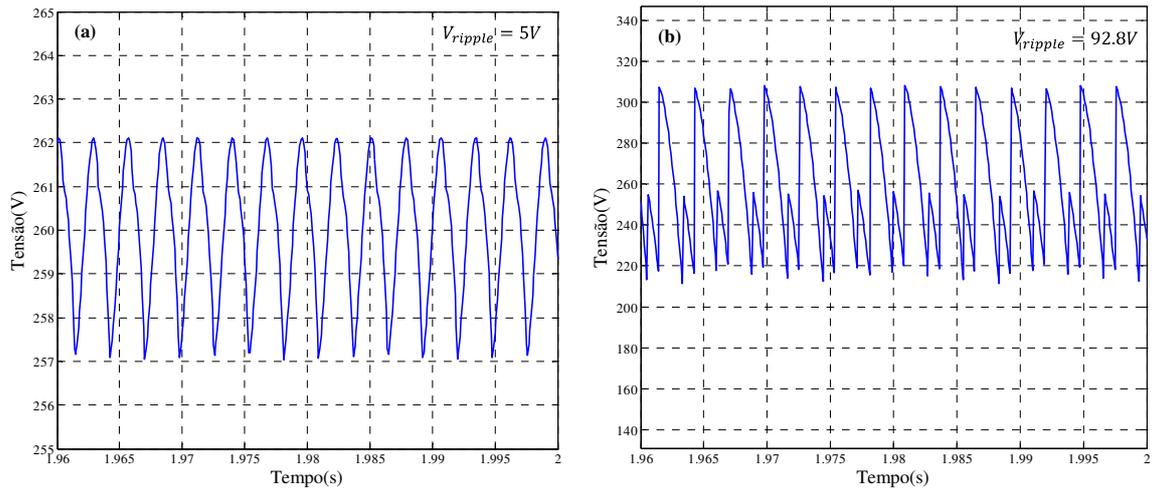


Figura A-2 Forma de onda da tensão retificada com o filtro (a) e sem o filtro (b) para a configuração monofásica.

Para a configuração trifásica do MCSR foram adotados os mesmos critérios e premissas para a determinação das componentes do filtro, que foram estabelecidas com os seguintes valores: $L_f = 0.5mH$, $C_f = 8mF$ e $R_f = 0.4\Omega$. A curva característica da resposta em frequência desse filtro pode ser observada na Figura A-3.

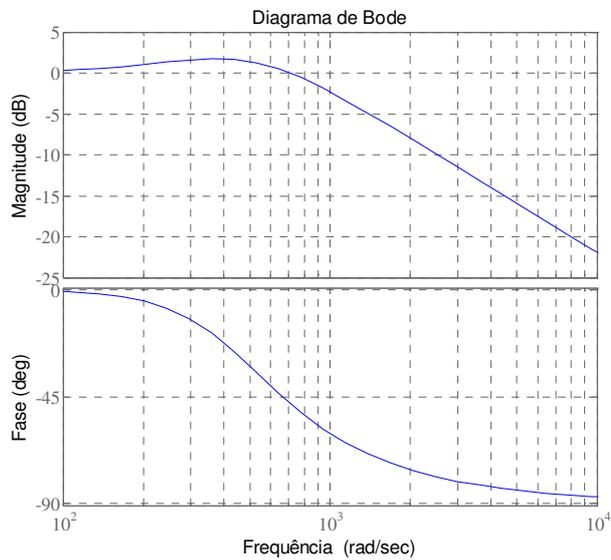


Figura A-3 Curva da resposta em frequência para o filtro adotado na configuração trifásica do MCSR.

APÊNDICE B

INFORMAÇÕES PARA REPRESENTAÇÃO DA REDE NAS SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

As tabelas a seguir apresentam as informações detalhadas acerca dos parâmetros dos transformadores e suas conexões bem como os parâmetros unitários de todas as linhas de transmissão que compõem o sistema equivalente utilizado nas simulações de transitórios eletromagnéticos do CAPÍTULO IV.

Para simplificar a representação das informações utilizadas nas tabelas, as seguintes notações serão adotadas:

- R_p → Resistência do enrolamento primário;
- R_s → Resistência do enrolamento secundário;
- R_t → Resistência do enrolamento terciário;
- X_p → Reatância do enrolamento primários;
- X_s → Reatância do enrolamento secundário;
- X_t → Reatância do enrolamento terciário;
- Y → ligação dos enrolamentos em estrela;
- D → ligação dos enrolamentos em delta;
- TR → Transformador;
- R_0 → Resistência de sequência zero;
- R_1 → Resistência de sequência positiva;
- L_0 → Indutância de sequência zero;
- L_1 → Indutância de sequência positiva;
- C_0 → Capacitância de sequência zero;
- C_1 → Capacitância de sequência positiva;

Tabela B-1 Parâmetros elétricos utilizados para os transformadores da subestação Nova Santa Rita.

Elemento	Tensão de transformação (kV)	Ligação	$R_p(\Omega)$	$X_p(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$X_s(\Omega)$	$R_t(\Omega)$	$X_t(\Omega)$
TR1	525/230/13,8	Y-Y-D	0,4410	39,139	0,1480	10^{-6}	0,0132	1,3199
TR2	525/230/13,8	Y-Y-D	0,2205	45,9190	0,0635	10^{-6}	0,0113	1,4054
TR3	525/230/13,8	Y-Y-D	0,4410	39,139	0,1480	10^{-6}	0,0132	1,3199
TR4	525/230/13,8	Y-Y-D	0,2205	45,9190	0,0635	10^{-6}	0,0113	1,4054

Tabela B-2 Curva de saturação dos transformadores da subestação Nova Santa Rita.

Corrente de magnetização(A)	Fluxo Concatenado (V.s)
0,63	1137
1,23	1193
2,54	1250
4,07	1307
100,00	1390

Tabela B-3 Parâmetros elétricos utilizados para os transformadores da subestação Gravataí.

Elemento	Tensão de transformação (kV)	Ligação	$R_p(\Omega)$	$X_p(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$X_s(\Omega)$	$R_t(\Omega)$	$X_t(\Omega)$
TR1	525/230/13,8	Y-Y-D	0,2205	40,462	0,1163	10^{-6}	0,0026	0,4364
TR2	525/230/13,8	Y-Y-D	0,3307	3,390	0,1428	5,988	0,0036	0,2515
TR3	525/230/13,8	Y-Y-D	0,41344	46,774	0,11109	10^{-6}	0,0024	0,2496

Tabela B-4 Curva de saturação dos transformadores da subestação Gravataí.

Corrente de magnetização(A)	Fluxo Concatenado (V.s)
2,72	1191
7,94	1245
13,14	1300
22,26	1327
30,67	1354
47,44	1381
70,85	1408
403,56	1478

Tabela B-5 Parâmetros elétricos utilizados para o transformador da subestação Povo Novo.

Elemento	Tensão de transformação (kV)	Ligação	$R_p(\Omega)$	$X_p(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$X_s(\Omega)$	$R_t(\Omega)$	$X_t(\Omega)$
TR1	525/230/13,8	Y-Y-D	0,441	39,139	0,14812	10^{-6}	0,0132	1,320

Tabela B-6 Curva de saturação dos transformador da subestação Povo Novo.

Corrente de magnetização(A)	Fluxo Concatenado (V.s)
0,63	1137
1,23	1193
2,54	1250
4,07	1307
100,00	1390

Tabela B-7 Parâmetros elétricos utilizados para o transformador da subestação Quinta.

Elemento	Tensão de transformação (kV)	Ligação	$R_p(\Omega)$	$X_p(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$X_s(\Omega)$	$R_t(\Omega)$	$X_t(\Omega)$
TR1	230/138/13,8	Y-Y-D	0	59,407	0	10^{-6}	0	1,128

Tabela B-8 Curva de saturação do transformador da subestação Quinta.

Corrente de magnetização(A)	Fluxo Concatenado (V.s)
1,59	523
6,15	572,9
30,00	589,2

Tabela B-9 Parâmetros elétricos utilizados para o transformador da subestação Marmeleiro.

Elemento	Tensão de transformação (kV)	Ligação	$R_p(\Omega)$	$X_p(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$X_s(\Omega)$	$R_t(\Omega)$	$X_t(\Omega)$
TR1	525/13,8	Y-D	0,001	98	0,001	10^{-6}	0	0

Tabela B-10 Curva de saturação do transformador da subestação Marmeleiro.

Corrente (A)	Fluxo Concatenado (V.s)
0,65	1193
1,23	1250
1,87	1279
2,49	1307
100	1337

Tabela B-11 Parâmetros unitários das linhas de transmissão em 525kV representadas no sistema equivalente do RS.

Linha de Transmissão	Circuito	$R_0(\Omega/km)$	$L_0(H/km)$	$C_0(nF/km)$	$R_1(\Omega/km)$	$L_1(H/km)$	$C_1(nF/km)$	Extensão (km)
S. Vit. do Palmar - Marmeleiro	1	0,2531	2,652E-03	8,60	0,01800	8,414E-04	13,80	52
Marmeleiro - Povo Novo	1	0,2531	2,652E-03	8,60	0,01800	8,414E-04	13,80	154
Povo Novo - Nova Santa Rita	1	0,2531	2,652E-03	8,60	0,01800	8,414E-04	13,80	281
Itá - Nova Santa Rita	1	0,2493	2,758E-03	8,50	0,02666	8,496E-04	13,68	314
Itá - Nova Santa Rita	2	0,3399	3,436E-03	8,32	0,02756	8,310E-04	13,43	30
Nova Santa Rita - Gravataí	1	0,3512	3,608E-03	7,90	0,01748	8,008E-04	14,74	257
Campos Novos – N. Santa Rita	1	0,2567	2,669E-03	8,24	0,02540	8,404E-04	13,55	51
Campos Novos - Machadinho	1	0,2587	2,691E-03	8,30	0,02560	8,470E-04	13,70	51
Campos Novos - Machadinho	2	0,3295	3,310E-03	9,61	0,01723	8,654E-04	13,34	256
Caxias - Itá	1	0,3349	3,202E-03	8,32	0,02442	8,514E-04	13,66	79
Caxias - Gravataí	1	0,3339	3,208E-03	8,34	0,02561	8,495E-04	13,68	202
Caxias - Campos Novos	1	0,2958	2,980E-03	8,30	0,02442	8,514E-04	13,67	79
Itá - Machadinho	1	0,2531	2,652E-03	8,60	0,01800	8,414E-04	13,80	52

Tabela B-12 Parâmetros unitários das linhas de transmissão em 230kV representadas no sistema equivalente do RS.

Linha de Transmissão	Circuito	$R_0(\Omega/km)$	$L_0(H/km)$	$C_0(nF/km)$	$R_1(\Omega/km)$	$L_1(H/km)$	$C_1(nF/km)$	Extensão (km)
Povo Novo - Quinta	1	0,4841	3,874E-03	7,60	0,0994	1,306E-03	9,20	12
Povo Novo - Camaquã 3	1	0,4841	3,874E-03	7,60	0,0994	1,306E-03	9,20	156
Nova Santa Rita - Camaquã 3	1	0,4761	3,368E-03	7,60	0,1058	1,403E-03	9,20	126
Quinta - P. Médici	1	0,4703	3,423E-03	5,20	0,1011	1,340E-03	8,60	153
Quinta - Pelotas 3	1	0,3865	3,849E-03	5,20	0,1015	1,347E-03	8,60	44
Camaquã 3 - Pelotas 3	1	0,4841	3,874E-03	5,30	0,0994	1,306E-03	8,80	125
P. Médici - Pelotas 3	1	0,4109	4,161E-03	5,40	0,0568	1,275E-03	9,00	128
Cidade Industrial – N.S.Rita	1	0,3294	3,322E-03	6,31	0,0810	1,273E-03	8,73	26
Cidade Industrial - N.S.Rita	2	0,3449	3,207E-03	6,32	0,0808	1,278E-03	8,70	26
Cidade Industrial - N.S.Rita	3	0,4228	3,107E-03	6,32	0,0851	1,263E-03	8,80	26
Cidade Industrial - Canoas 2	4	0,4061	3,522E-03	4,80	0,1017	1,249E-03	8,90	8
Canoas 2 - Gravataí 2	1	0,4061	3,522E-03	4,80	0,1017	1,249E-03	8,90	11
Cidade Industrial - Gravataí 2	2	0,4224	3,663E-03	5,00	0,1058	1,299E-03	9,30	13
Cidade Industrial - Gravataí 2	3	0,4224	3,663E-03	5,00	0,1058	1,299E-03	9,30	13
Cidade Industrial - Gravataí 2	4	0,4224	3,663E-03	5,00	0,1058	1,299E-03	9,30	13

Tabela B-13 Impedâncias de transferência representadas no sistema equivalente do RS.

Linha de Transmissão	Circuito	$R_0(\Omega/km)$	$L_0(H/km)$	$C_0(nF/km)$	$R_1(\Omega/km)$	$L_1(H/km)$	$C_1(nF/km)$	Extensão (km)
Cidade Industrial - Gravataí 2	5	0,6764	6,032E-03	5,00	0,0956	1,321E-03	9,30	8
Cidade Industrial – N.S.Rita	4	0,5189	5,434E-03	6,31	0,1016	1,375E-03	8,60	11
Nova Santa Rita - Gravataí	1	1,1384	9,690E-03	5,00	0,0982	1,259E-03	9,30	30

Tabela B-14 Dados nominais de cada transformador que compõe o modelo do reator saturado da subestação Quinta no nível de tensão de 230kV.

Dados Nominais	
Potência	8.33Mvar
Frequência	60Hz
Tensão primária	$230/\sqrt{3} kV$
Tensão secundária	20kV
Indutância de dispersão primária	5.4H
Indutância de dispersão secundária	10mH
Resistência dos enrolamentos primários	38.24 Ω
Resistência dos enrolamentos secundários	0.2 Ω
Tensão de controle nominal	390V
Corrente de controle nominal	1300A

Tabela B-15 Dados nominais de cada transformador que compõe o modelo do reator saturado das subestações Povo Novo e Marmeleiro no nível de tensão de 525kV.

Dados Nominais	
Potência	30Mvar
Frequência	60Hz
Tensão primária	$525/\sqrt{3}$ kV
Tensão secundária	34.5kV
Indutância de dispersão primária	8.0H
Indutância de dispersão secundária	10mH
Resistência dos enrolamentos primários	56.9Ω
Resistência dos enrolamentos secundários	0.2Ω
Tensão de controle nominal	900V
Corrente de controle nominal	3000A

Tabela B-16 Cargas representadas nos barramentos de 230kV das subestações Pelotas 3 e Camaquã 3.

Patamar de Carga	Subestação	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
Leve	Pelotas 3	66,0	16,0
	Camaquã 3	16,0	6,0
Média	Pelotas 3	134,0	48,0
	Camaquã 3	38,2	18,0

APÊNDICE C

CONTROLADOR DEFINIDO PELO USUÁRIO – CDU – ADOTADO PARA REPRESENTAÇÃO DO MCSR NO PROGRAMA ANATEM

O código desenvolvido para o CDU dos MCSRs no nível de tensão de 230kV, para a subestação de Quinta, e de 525kV para os terminais das linhas Povo Novo – Nova Santa Rita e Povo Novo – Marmeleiro serão apresentados a seguir.

Código do CDU do MCSR de Quinta 230kV.

```
DCDU
(
(
(ncdu) ( nome cdu )
  90002 MCSR_QUI
(-----
-
(-----
-
(EFPAR (npar) (      valpar      )
(-----
-
(
DEFPAR #K1          10.0
DEFPAR #K2          20.0
DEFPAR #K3           1.0
DEFPAR #Vmin        0.0
DEFPAR #Vmax        1.0
DEFPAR #Rdc         0.3
DEFPAR #Ldc         0.015
DEFPAR #K4           390
DEFPAR #K5           0.0016970
DEFPAR #K6           0.00153846
DEFPAR #Tf          0.020
DEFPAR #POWER       50
(
(
(
```

```

(
(-----
-
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)
(vmax)
(-----
-
0001 IMPORT VCES          Vces
0002 LEDLAG          Vces  Vmed  1.0  0.0  1.0  #Tf
0003 ENTRAD          Vref
0004 SOMA            -Vref  Err
                        Vmed  Err
0005 PROINT          Err   X0    #K1  #K2  #K3          Vmin  Vmax
0006 LIMITA          X0    Vdef          Vmin  Vmax
0007 GANHO           Vdef  X1    #K4
0008 LEDLAG          X1    X2    1.0  0.0    #Rdc  #Ldc
0009 GANHO           X2    X3    0.5
0010 GANHO           X3    X4    #K5
0011 GANHO           X3    X13   #K6
0012 FUNCAO PONTOS X13   TAU   0.0  2.1013
                        0.1  2.0578
                        0.2  1.8842
                        0.3  1.8679
                        0.4  1.8063
                        0.5  1.3284
                        0.6  1.3206
                        0.7  1.2564
                        0.8  1.2254
                        0.9  1.1587
                        1.0  1.1206
0013 SOMA            X4    X5
                        -X7   X5
0014 DIVSAO          X5    X6
                        TAU   X6
0015 PROINT          X6    X7    1.0          1.0
0016 FUNCAO PONTOS X7    phiDC 0.00000.0000
                        0.04240.3303
                        0.08490.5489
                        0.12730.7245
                        0.16970.8785
                        0.21211.0187

```

```

0.25461.1485
0.29701.2703
0.33941.3857
0.38181.4957
0.42431.6010
0.46671.7022
0.50911.7971
0.55151.8632
0.59401.8978
0.63641.9191
0.67881.9351
0.72121.9481
0.76371.9584
0.80611.9656
0.84851.9725
0.89101.9784
0.93341.9840
0.97581.9894
1.01821.9944
1.06071.9991
1.10312.0000
0017 SOMA      -phiDC  X8
                Bsat  X8
0018 LIMITA    X8      X9                Linf   Lsup
0019 FUNCAO ACOS  X9      X10
0020 GANHO      X10     BETA   2.0
0021 FUNCAO SIN  BETA   X11
0022 SOMA      BETA   X12
                -X11   X12
0023 DIVSAO    X12     Imag
                PI      Imag
                DOIS   Imag
(
(CONVERTE PARA BASE DO SISTEMA
(
0024 GANHO      Imag   B3      -0.01
0025 GANHO      B3     Bces    #POWER
0026 EXPORT BCES Bces
0027 ENTRAD                    Bsat
0028 ENTRAD                    PI
0029 ENTRAD                    DOIS

```

```
(-----  
-  
(DEFVAL (stip) (vdef) ( dl )  
(-----  
-  
DEFVAL      Bsat    1.0  
DEFVAL      Vmin    #Vmin  
DEFVAL      Vmax    #Vmax  
DEFVAL      Linf    -1.0  
DEFVAL      Lsup    1.0  
DEFVAL      PI      3.1415  
DEFVAL      DOIS    2.0  
DEFVAL      BETA    6.2832  
FIMCDU  
999999  
FIM
```

Código do CDU dos MCSRs de Marmeleiro e Povo Novo 525kV.

```

DCDU
(
(
(ncdu) ( nome cdu )
  90000 MCSR_MML
(-----
-
(-----
-
( EFPAR (npar) (   valpar   )
(-----
-
(
DEFPAR #K1           10.0
DEFPAR #K2           20.0
DEFPAR #K3            1.0
DEFPAR #Vmin         0.0
DEFPAR #Vmax         1.0
DEFPAR #Rdc          0.3
DEFPAR #Ldc          0.015
DEFPAR #K4            900
DEFPAR #K5           0.00081317
DEFPAR #K6           0.00066666
DEFPAR #Tf           0.020
DEFPAR #POWER        180
(
(-----
-
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)
(vmax)
(-----
-
0001 IMPORT VCES           Vces
0002 LEDLAG           Vces  Vmed  1.0  0.0  1.0  #Tf
0003 ENTRAD           Vref
0004 SOMA             -Vref  Err
                        Vmed  Err
0005 PROINT           Err   X0    #K1  #K2  #K3           Vmin  Vmax
0006 LIMITA           X0    Vdef           Vmin  Vmax

```

0007	GANHO	Vdef	X1	#K4			
0008	LEDLAG	X1	X2	1.0	0.0	#Rdc	#Ldc
0009	GANHO	X2	X3	0.5			
0010	GANHO	X3	X4	#K5			
0011	GANHO	X3	X13	#K6			
0012	FUNCAO PONTOS	X13	TAU	0.0	2.1013		
				0.1	2.0578		
				0.2	1.8842		
				0.3	1.8679		
				0.4	1.8063		
				0.5	1.2852		
				0.6	1.1904		
				0.7	1.1262		
				0.8	1.0952		
				0.9	1.0718		
				1.0	0.9904		
0013	SOMA	X4	X5				
		-X7	X5				
0014	DIVSAO	X5	X6				
		TAU	X6				
0015	PROINT	X6	X7	1.0		1.0	
0016	FUNCAO PONTOS	X7	phiDC	0.00000	0.0000		
				0.06100	0.4029		
				0.12200	0.6494		
				0.18300	0.8513		
				0.24401	0.0294		
				0.30491	0.1914		
				0.36591	0.3416		
				0.42691	0.4825		
				0.48791	0.6158		
				0.54891	0.7416		
				0.60991	0.8357		
				0.67091	0.8826		
				0.73191	0.9119		
				0.79281	0.9338		
				0.85381	0.9515		
				0.91481	0.9634		
				0.97581	0.9729		
				1.03681	0.9810		
				1.09781	0.9887		
				1.15881	0.9959		

1.21982.0000

```
0017 SOMA      -phiDC  X8
                Bsat   X8
0018 LIMITA    X8      X9                Linf   Lsup
0019 FUNCAO ACOS  X9      X10
0020 GANHO      X10     BETA   2.0
0021 FUNCAO SIN  BETA   X11
0022 SOMA      BETA   X12
                -X11   X12
0023 DIVSAO    X12     Imag
                PI     Imag
                DOIS   Imag
(
(CONVERTE PARA BASE DO SISTEMA
(
0024 GANHO      Imag    B3      -0.01
0025 GANHO      B3      Bces    #POWER
0026 EXPORT BCES Bces
0027 ENTRAD                    Bsat
0028 ENTRAD                    PI
0029 ENTRAD                    DOIS
(
(-----
-
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
(-----
-
DEFVAL      Bsat   1.0
DEFVAL      Vmin   #Vmin
DEFVAL      Vmax   #Vmax
DEFVAL      Linf   -1.0
DEFVAL      Lsup   1.0
DEFVAL      PI     3.1415
DEFVAL      DOIS   2.0
DEFVAL      BETA   6.2832
FIMCDU
999999
FIM
```

É importante destacar que o CDU proposto para representação dos MCSRs apresenta dificuldades no processo de inicialização bloco a bloco do programa ANATEM. Essa dificuldade se deve à conexão dos blocos de números 20, 21 e 22, apresentados na Figura C-1, que impossibilitam a inicialização no sentido da saída para a entrada dos blocos.

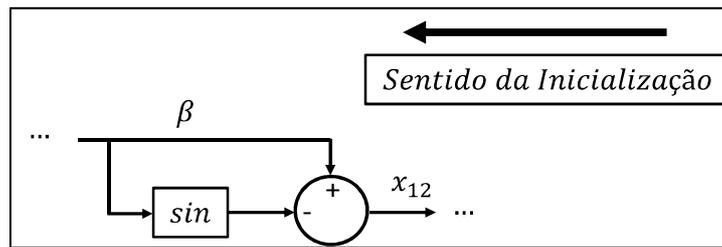


Figura C-1 Sentido da inicialização dos blocos 20, 21 e 22.

Para solucionar essa questão é necessário definir o valor inicial da variável BETA por meio do código DEFVAL, que determina o valor inicial de variáveis do CDU. Para encontrar o valor inicial da variável BETA pode-se recorrer ao método de Newton, que além de apresentar uma convergência rápida pode ser facilmente programado em qualquer plataforma.

O método de Newton consiste na realização das aproximações sucessivas apresentadas na Equação (C-1).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{C-1}$$

onde $f(x_n) = \beta - \sin \beta - x_{12}$, $f'(x_n) = 1 - \cos \beta$ e $x_{12} = B_{CES} \times \frac{-2\pi \times 100}{\#POWER}$