

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ALCEBÍADES RANGEL BESSA

***ESTUDO DE APLICAÇÃO DE COMPENSADOR ESTÁTICO EM
DERIVAÇÃO DO TIPO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO
MESQUITA - VIANA II EM 500 kV***

VITÓRIA
2015

ALCEBÍADES RANGEL BESSA

***ESTUDO DE APLICAÇÃO DE COMPENSADOR ESTÁTICO EM
DERIVAÇÃO DO TIPO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO
MESQUITA -VIANA II EM 500KV***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo José Mello Menegaz.

VITÓRIA
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

B557e Bessa, Alcebíades Rangel, 1983-
Estudo de aplicação de compensador estático em derivação do
tipo SVC na linha de transmissão Mesquita-Viana II em 500 KV
/ Alcebíades Rangel Bessa. – 2015.
149f. : il.

Orientador: Lucas Frizera Encarnação.
Coorientador: Paulo José Melo Menegaz.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Subestações elétricas.
3. Energia elétrica – Distribuição. 4. Modelagem de dados. 5.
Linhas elétricas. 6. Reguladores de voltagem. 7. Compensador
estático de reativos (SVC). I. Encarnação, Lucas Frizera.
II. Menegaz, Paulo José Melo. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

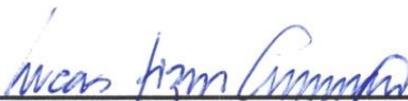
ALCEBÍADES RANGEL BESSA

***ESTUDO DE APLICAÇÃO DE COMPENSADOR ESTÁTICO EM
DERIVAÇÃO DO TIPO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO
MESQUITA - VIANA II EM 500kV***

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 22 de junho de 2015.

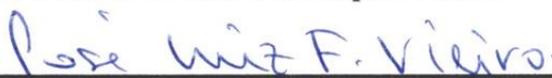
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Paulo José Mello Menegaz - Coorientador
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. José Luiz de Freitas Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Carlos Henrique Costa Guimarães
Universidade Federal Fluminense

À minha esposa Livia, que eu amo tanto.

Agradecimentos

A Deus em primeiro lugar e sempre que permitiu a realização desse trabalho e me proporcionou todos os meios de chegar até aqui.

Aos meus pais, Arídio Bessa e Genilça Rangel Bessa, que estão sempre ao meu lado e que no decorrer de uma vida, através de abdições e muita dedicação, me viabilizaram trilhar esse caminho.

À minha esposa, Livia Pereira Nunes Bessa, com quem compartilhei angústias e preocupações e cujo amor e companheirismo foram fundamentais para superar as adversidades que surgiram ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu orientador, professor Lucas, e coorientador professor Paulo pelo tempo e atenção dedicados a essa Dissertação.

Aos amigos do curso de Mestrado e do LEPAC pelo apoio e cuja amizade guardarei para o resto da vida.

Aos meus professores do curso de Mestrado pelos conhecimentos transmitidos.

Às equipes do ONS, CEMIG e EDP ESCELSA pelo apoio e informações disponibilizadas neste trabalho, em especial aos engenheiros Eduardo Calderano Brandão, Gilda Aparecida C. Almeida e Iúri Brandão.

Aos demais familiares e amigos que de alguma forma fazem parte dessa importante conquista.

Resumo

Este trabalho apresenta o estudo de modelagem do sistema elétrico em 500kV interligando as subestações de Mesquita e Viana II, avaliando a regulação de tensão na subestação de Viana II com a aplicação do dispositivo SVC.

Primeiramente são apresentadas as principais características dos compensadores de reativos em sistemas elétricos, destacando o dispositivo SVC. Em seguida, é mostrada a área de estudo que interliga as subestações de Mesquita e Viana II, com suas características elétricas de fluxo de potência no cenário para o ano de 2015. A partir destas informações este sistema é modelado no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC. A modelagem do sistema elétrico, bem como dos cenários de operação apresentados foram baseados em dados técnicos obtidos junto ao ONS.

A partir do sistema modelado no PSCAD/EMTDC é desenvolvido o dispositivo SVC para estabilização da tensão da subestação de Viana II em sua barra de 500kV no cenário de 2015 e também para a projeção de crescimento de carga até o ano de 2021.

A principal contribuição desta dissertação está na modelagem do sistema elétrico do SIN e do dispositivo SVC no software PSCAD/EMTDC, bem como na análise das vantagens obtidas com a implementação deste na subestação de Viana II.

Abstract

This paper presents the study of electrical system modeling connecting the Mesquita and Viana II of 500kV substation, evaluating the voltage regulation at Viana II substation with the application of SVC device.

First the main characteristics of reactive compensators in electrical systems are presented, highlighting the SVC device. Then will appear the study area that connects the substations Mesquita and Viana II, with its electrical characteristics in the power flow scenario for the year of 2015. From this information the system will be modeled on the electromagnetic transient program PSCAD/EMTDC . The modeling of the electrical system as well as the operating scenarios was based on technical data obtained from ONS.

From the system modeled in PSCAD/EMTDC is developed SVC device for stabilization of substation Viana II in his busbar at 500kV in 2015 scenario and also for load growth forecast by the year of 2021.

The main contribution of this work is the electric system modeling of the SIN and the SVC device in PSCAD/EMTDC software as well as the analysis of the advantages gained by implementing this in the Viana II substation.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Integração eletroenergética brasileira	20
Figura 1.2: Mapeamento organizacional do Setor Elétrico	22
Figura 1.3: Mapa energético do Estado do Espírito Santo	25
Figura 2.1: Fluxo de potencia em linhas de transmissão.....	29
Figura 2.2: Duas estações geradoras suprindo a carga	29
Figura 2.3: Sistema real interligado por linha de transmissão.....	30
Figura 2.4: Sistema equivalente	30
Figura 2.5: Capacidade de transferência de potência em função do comprimento da linha	32
Figura 2.6: Linha sem perdas com PST ideal.....	33
Figura 2.7: Aplicação de compensador de reativo em derivação no meio da linha	35
Figura 2.8: Sistema elétrico segmentado por n compensadores de reativos em paralelo.....	36
Figura 2.9: Variação da tensão na barra receptora em função da carga	37
Figura 2.10: Gráfico de potência transmitida X ângulo δ	38
Figura 2.11: Gráfico de potência transmitida, ângulo δ e potência do compensador em função do tempo.....	40
Figura 2.12: Gráfico de corrente de estator x corrente de campo do compensador síncrono ..	41
Figura 2.13: Configuração do TCR	43
Figura 2.14: Corrente e tensão no indutor em função de α	43
Figura 2.15: Característica de controle do TCR, $B_{TCR} \times \alpha$	46
Figura 2.16: Correntes harmônicas no TCR em função de α	47
Figura 2.17: Corrente fundamenta I_1 e harmônica total I_h em função de α	47
Figura 2.18: TCR trifásico e suas respectivas correntes de fase e de linha.....	48
Figura 2.19: Diagrama típico do TCR com filtro de harmônicos e banco de capacitor fixo ...	50
Figura 2.20: Faixa de operação do TCR V-I	50
Figura 2.21: Diagrama de TSC monofásico	51
Figura 2.22: Chaveamento do capacitor totalmente carregado	53
Figura 2.23: Chaveamento do capacitor totalmente descarregado e parcialmente descarregado	53
Figura 2.24: Condições para chaveamento do capacitor no TSC.....	54
Figura 2.25: Faixa de operação do TSC V-I.....	54
Figura 2.26: Configuração básica do SVC tipo TCR-TSC	55
Figura 2.27: SVC tipo TCR-TSC sem filtro e resposta Demanda X var de saída	56
Figura 2.28: Diagrama básico de controle do TCR-TSC	57
Figura 2.29: Faixa de operação do TCR-TSC V-I.....	58

Figura 3.1: Interligação do estado do Espírito Santo ao SIN	61
Figura 3.2: Equivalente externo da região de estudo.....	62
Figura 3.3: Visão geral do sistema equivalente modelado no PSCAD/EMTDC	64
Figura 3.4: Sistema A – Região de fronteira Subestação Viana - 345kV	66
Figura 3.5: Sistema B – Região de fronteira Subestação Neves I - 500kV.....	68
Figura 3.6:Sistema C – Região de fronteira Subestação Vespasiano II - 500kV	69
Figura 3.7:Sistema D – Região de fronteira Subestação Mesquita - 230kV	70
Figura 3.8: Bloco Subestação Viana II.....	71
Figura 3.9: Subestação de Mesquita – 500/230kV	72
Figura 3.10: Linha de transmissão Mesquita - Viana II – 500kV	73
Figura 3.11: Linha de transmissão Mesquita - Viana II – 345kV	75
Figura 3.12: Linha de transmissão Mesquita - Vespasiano II - 500kV	76
Figura 3.13: Linha de transmissão Neves I – Mesquita - 500kV	77
Figura 3.14: Linha de transmissão Neves I - Vespasiano II - 500kV.....	78
Figura 3.15: Simulação do fluxo de potência em carga leve.....	79
Figura 3.16: Simulação do fluxo de potência em carga média.....	80
Figura 3.17: Simulação do fluxo de potência em carga pesada.....	81
Figura 3.18: Curva de carga na região Sudeste/Centro-Oeste com e sem o horário de verão (HV)	84
Figura 3.19: Compensador Síncrono modelado	85
Figura 3.20: Banco de Capacitores modelado	85
Figura 3.21: Malha de controle do banco de capacitores e compensador síncrono	86
Figura 4.1: Layout básico do SVC do tipo TCR-TSC-FC	90
Figura 4.2: SVC aplicado na barra Viana II	91
Figura 4.3: Modelo do bloco TCR	92
Figura 4.4: Modelo do bloco TSC	93
Figura 4.5: Bloco Controle de Chaveamento do Capacitor para fase A.....	94
Figura 4.6: Controle do SVC.....	96
Figura 4.7: Bsvs/Btcr.....	96
Figura 4.8: Curva de disparo Btcr X α	97
Figura 4.9: Filtro de 5ª e 7ª harmônica	97
Figura 5.1: Potência Ativa Linha de Transmissão medida na Barra Viana II – 500kV	99
Figura 5.2: Potência Ativa Linha de Transmissão medida na Barra Mesquita – 500kV	99
Figura 5.3: Potência Reativa Linha de Transmissão medida na Barra Viana II – 500kV.....	100
Figura 5.4: Potência Reativa Linha de Transmissão medida na Barra Mesquita – 500kV	100

Figura 5.5: Banco de Capacitores.....	101
Figura 5.6: Compensador Síncrono	101
Figura 5.7: Tensão Barramento Viana II - 500kV	102
Figura 5.8: Tensão Barramento Mesquita - 500kV	102
Figura 5.9: Ângulo de Fase Barramento Viana II - 500kV	103
Figura 5.10: Ângulo de Fase Barramento Mesquita - 500kV	103
Figura 5.11: Abertura Angular Sem SVC - 2015	104
Figura 5.12: Potência Ativa Linha de Transmissão medida na Barra Viana II – 500kV	105
Figura 5.13: Potência Ativa Linha de Transmissão medida na Barra Mesquita – 500kV	105
Figura 5.14: Potência Reativa Linha de Transmissão medida na Barra Viana II – 500kV	106
Figura 5.15: Potência Reativa Linha de Transmissão medida na Barra Mesquita – 500kV	106
Figura 5.16: Tensão Barramento Viana II – 500kV	107
Figura 5.17: Tensão Barramento Mesquita – 500kV	107
Figura 5.18: Ângulo de Fase Barramento Viana II – 500kV.....	108
Figura 5.19: Ângulo de Fase Barramento Mesquita – 500kV.....	108
Figura 5.20: Abertura Angular Sem SVC - 2021	109
Figura 5.21: Banco de Capacitores.....	109
Figura 5.22: Compensador Síncrono	110
Figura 5.23: Potência Ativa na Linha de Transmissão Mesquita-Viana II medida na Barra Viana II – 500 kV com SVC - 2015	111
Figura 5.24: Potência Ativa na Linha de Transmissão Mesquita – Viana II medida na Barra Mesquita - 500 kV com SVC - 2015	111
Figura 5.25: Potência Reativa na Linha de Transmissão Mesquita – Viana II medida na Barra Viana II – 500 kV com SVC - 2015	112
Figura 5.26: Potência Reativa na Linha de Transmissão Mesquita - Viana II medida na Barra Mesquita – 500 kV com SVC - 2015.....	112
Figura 5.27: Tensão no barramento Viana II - 500kV com SVC - 2015	113
Figura 5.28: Tensão no barramento Mesquita - 500kV com SVC - 2015.....	113
Figura 5.29: Ângulo de Fase da tensão no barramento Viana II - 500kV com SVC - 2015..	114
Figura 5.30: Ângulo de Fase da tensão no barramento Viana II - 500kV com SVC - 2015..	114
Figura 5.31: Abertura Angular Com SVC - 2015	115
Figura 5.32: Potência Reativa SVC com SVC - 2015.....	116
Figura 5.33: Controle Bsvs.....	116
Figura 5.34: Potência Reativa TSC1	117
Figura 5.35: Potência Reativa TSC2	118
Figura 5.36: Potência Reativa TCR.....	118

Figura 5.37: Ângulo de disparo (alfa) dos tiristores do TCR	119
Figura 5.38: Potência Reativa Filtro	119
Figura 5.39: Tensão barramento Viana II - 500kV com SVC - 2021	120
Figura 5.40: Tensão barramento Mesquita - 500kV com SVC - 2021	121
Figura 5.41: Ângulo do barramento Viana II - 500kV com SVC - 2021	121
Figura 5.42: Ângulo do barramento Mesquita - 500kV com SVC - 2021	122
Figura 5.43: Abertura Angular Com SVC - 2021	122

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Consumo de eletricidade na rede (GWh).....	23
Tabela 1.2 Oferta e Demanda de Energia Elétrica no Espírito Santo.....	24
Tabela 2.1: Comparação entre compensadores de reativos	59
Tabela 3.1: Impedâncias em p.u. do sistema da área em estudo	63
Tabela 3.2: Configuração do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic” do PSCAD/EMTDC para o Sistema A	67
Tabela 3.3: Configuração do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic” do PSCAD/EMTDC para o Sistema B	68
Tabela 3.4: Configuração do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic Characteristic” do PSCAD/EMTDC para o Sistema C	69
Tabela 3.5: Configuração do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic Characteristic” do PSCAD/EMTDC para o Sistema D	70
Tabela 3.6: Intervalos Comparação da tensão e dos fluxos de potência obtidos para a Barra Viana II-500kV, no cenário de carga pesada.	82
Tabela 3.7: Erros percentuais entre valores simulados e valores fornecidos pelo ONS na Barra Viana II -500kV para cenário de carga pesada.	82
Tabela 3.8: Intervalos de horários de carga e demandada.....	84
Tabela 3.9: Intervalos horários dos patamares de carga de energia	84
Tabela 4.1: Faixa de operação SVC dimensionado.....	88
Tabela 4.2: SVC desenvolvidos pela ABB.....	89
Tabela 4.3: Parâmetros do SVC dimensionado.....	91

Lista de Abreviações ou Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASPE	Agencia de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FACTS	Sistema de Transmissão Flexível em Corrente Alternada
GTO	Gate Turn-Off
HV	Horário de Verão
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate-Commutated Thyristor
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR	Plano de Ampliações e Reformas da Rede Básica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PI	Proporcional e Integrativo
PST	Phase Shifting Transformer
SE/CO	Sudeste/Centroeste
SIN	Sistema Interligado Nacional
SVC	Compensador Estático de var
TCR	Reator Controlado por Tiristor
TSC	Capacitor Chaveado a Tiristor
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
RMS	Valor Eficaz

Lista de Símbolos

X_{LT}	Impedância Série da Linha de Transmissão
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
θ_1	Defasagem Angular da Tensão na Barra 1
θ_2	Defasagem Angular da Tensão na Barra 2
V_1	Módulo da Tensão da Barra 1
V_2	Módulo da Tensão da Barra 2
P_g	Potência Ativa do Gerador
P_L	Potência Ativa da Carga
P_1	Potência Ativa do Gerador 1
P_2	Potência Ativa do Gerador 2
G_1	Gerador 1
G_2	Gerador 2
E_1	Módulo da Tensão do Sistema Equivalente da Área 1
E_2	Módulo da Tensão do Sistema Equivalente da Área 2
δ_1	Defasagem Angular da Tensão do Sistema Equivalente da Área 1
δ_2	Defasagem Angular da Tensão do Sistema Equivalente da Área 2
Z_1	Impedância do Sistema Equivalente da Área 1
Z_2	Impedância do Sistema Equivalente da Área 2
P_{max}	Potência Ativa Máxima na Linha de Transmissão
δ	Abertura Angular
$\delta_{m\acute{a}x}$	Abertura Angular Máxima
X_c	Reatância Equivalente da Linha com Compensador de Reativo Série
K_{se}	Constante de Redução da Reatância da Linha
\emptyset	Defasagem angular do PST
V_m	Módulo da Tensão no Meio da Linha
V_s	Módulo da Tensão no Terminal Emissor
V_r	Módulo da Tensão no Terminal Receptor
I_{sm}	Corrente do Terminal Emissor para o Meio da Linha
I_{sr}	Corrente do Terminal Emissor para o Terminal Receptor
Z_L	Impedância da Carga
f.p.	Fator de Potência

P_m	Potência Mecânica do Gerador
Q_p	Compensação de Reativo Paralelo
α	Ângulo de Disparo do Tiristor
ω	Frequência Angular
t	Tempo
T	Período
f	Frequência
B_{TCR}	Susceptância Equivalente do TCR
$B_{m\acute{a}x}$	Admitância Máxima do TCR
X_L	Reatância do TCR
I	Corrente Elétrica
I_1	Corrente Elétrica na Frequência Fundamental
I_n	Corrente Harmônica de Ordem N
i_{AB}	Corrente de Fase entre os Nós AB
i_{BC}	Corrente de Fase entre os Nós BC
i_{CA}	Corrente de Fase entre os Nós CA
C	Capacitância
L	Indutância
R	Resistência
v_C	Tensão no Capacitor
v_{SW}	Tensão no Tiristor
v_L	Tensão no Indutor
B_C	Admitância do Capacitor
Q_L	Potência Reativa Indutiva
Q_C	Potência Reativa Capacitiva
LT	Linha de Transmissão
$R1$	Resistência de Sequência Positiva
$R0$	Resistência de Sequência Zero
$X1$	Reatância de Sequência Positiva
$X0$	Reatância de Sequência Zero
RL	Impedância de Sequência Positiva
RRL	Impedância de Sequência Zero
P_{Linha}	Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão
Q_{Linha}	Fluxo de Potência Reativa na Linha de Transmissão

S_{Linha}	Fluxo de Potência Aparente na Linha de Transmissão
H_m	Constante de Inércia do Compensador Síncrono
L_{TCR}	Indutância do Dispositivo TCR Dimensionado
C_{TSC}	Capacitância do Dispositivo TSC Dimensionado
L_{TSC}	Indutância do Dispositivo TSC Dimensionado
L_{FILTRO5^a}	Indutância do Filtro de 5ª Harmônica
C_{FILTRO5^a}	Capacitância do Filtro de 5ª Harmônica
L_{FILTRO7^a}	Indutância do Filtro de 7ª Harmônica
C_{FILTRO7^a}	Capacitância do Filtro de 7ª Harmônica
B_{svs}	Admitância Equivalente do Dispositivo SVC
X_{eqfiltro}	Reatância equivalente do filtro passivo de ordem i
X_{L1}	Reatância do indutor do filtro de ordem i
X_{C1}	Reatância do capacitor do filtro de ordem i
V_{1ef}	Tensão nominal do filtro passivo de ordem i
i	Ordem harmônica filtrada
Q_{comp}	Potência reativa equivalente do filtro passivo de ordem i

Sumário

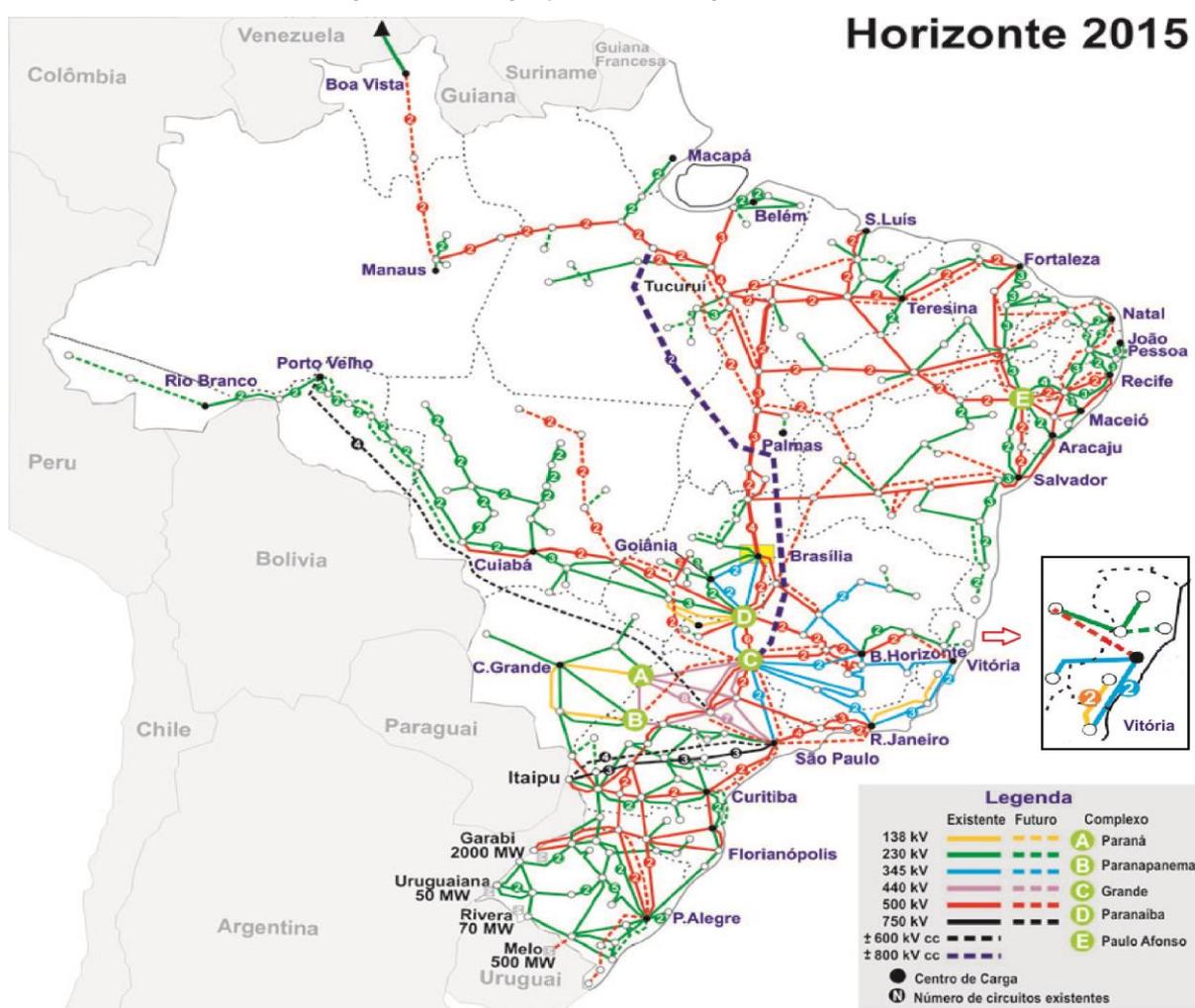
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO.....	i
Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Abreviações ou Siglas	xiv
Lista de Símbolos	xv
Sumário	xviii
Capítulo 1: Introdução	20
1.1 Cenário atual do Mercado Energético Brasileiro	22
1.2 Controle - FACTS	26
1.3 A proposta do Trabalho	26
Capítulo 2: Estado da Arte do SVC.....	28
2.1 Noções básicas de redes de transmissão de energia	28
2.2 Dispositivos de compensação de reativos em derivação.....	40
2.2.2 Conceitos básicos do compensador estático de potência reativa.....	42
2.4 Resumo	58
Capítulo 3: Área de Localização do Sistema Elétrico Analisado	60
3.1 Sistema de geração e transmissão no estado do Espírito Santo.....	60
3.2 Características elétricas da área de estudo.....	61
3.2.1 Caracterização dos blocos do Sistema Modelado no PSCAD/EMTDC	66
3.2.1.1 Sistema A.....	66
3.2.1.2 Sistema B.....	68
3.2.1.3 Sistema C.....	69
3.2.1.4 Sistema D.....	70
3.2.1.5 Subestação Viana II.....	71
3.2.1.6 Subestação Mesquita	71
3.2.1.7 Linha de Transmissão Mesquita - Viana II – 500kV	73
3.2.1.8 Linha de Transmissão Viana - Viana II – 345kV	74

3.2.1.9 Linha de Transmissão Mesquita - Vespasiano II – 500kV.....	75
3.2.1.10 Linha de Transmissão Neves I - Mesquita – 500kV	76
3.2.1.11 Linha de Transmissão Neves I - Vespasiano II – 500kV	77
3.3 Validação do sistema simulado	78
3.4 Modelagem da carga ao longo do dia.....	83
3.5 Modelagem do compensador síncrono e do banco de capacitores.....	85
3.6 Resumo	87
Capítulo 4: Modelagem do SVC	88
4.1 Metodologia de dimensionamento do SVC.....	88
4.2 Modelo do SVC.....	90
Capítulo 5: Simulações.....	98
5.1 Sistema sem regulação de tensão e cenário para o ano de 2015.....	98
5.2 Sistema sem regulação de tensão nos cenários de 2015 e 2021	104
5.3 Sistema com regulação de tensão no cenário de 2015	110
5.4 Sistema com regulação de tensão no cenário de 2021	120
Capítulo 6: Conclusão	123
Referências Bibliográficas	125
APÊNDICE A: Validação do Sistema Elétrico Simulado.....	129
APÊNDICE B: Características Elétricas das Linhas de Transmissão	136
ANEXO A: Silhueta das Linhas de Transmissão	145
ANEXO B: Tabela de Condutores CAA	148

Capítulo 1: Introdução

O Brasil, por ser um país de dimensões continentais e com um grande potencial energético natural presente em suas bacias hidrográficas, possui a particularidade de ter desenvolvido grandes sistemas de transmissão de energia elétrica para levar a energia gerada até os centros consumidores em corrente alternada utilizando elevados níveis de tensão (até 750kV em corrente alternada e ± 800 kV em corrente contínua), conforme mostra a Figura 1.1.

Figura 1.1: Integração eletroenergética brasileira



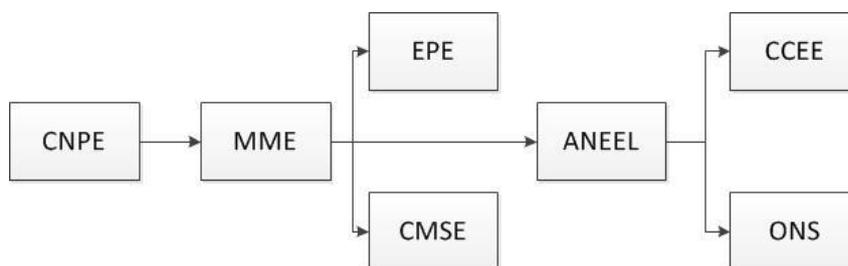
Fonte: ONS, (2014a).

A fim de viabilizar a operação deste sistema, as linhas de interligação são projetadas de forma a otimizá-lo e, ao mesmo tempo, garantir sua estabilidade. Neste cenário se destacam as empresas do setor elétrico nacional com as seguintes atribuições:

- O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia, é órgão de assessoramento do Presidente da República para formulação de políticas e diretrizes de energia. (CNPE, 1997)
- O Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) tem a função de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional. (CMSE,2004)
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético. (EPE, 2004)
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cuja função é regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica em conformidade com as Políticas e Diretrizes do Governo Federal. (ANEEL,1996)
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para o exercício de suas atribuições legais e o cumprimento de sua missão institucional, o ONS desenvolve uma série de estudos e ações a serem exercidas sobre o sistema e seus agentes para manejar o estoque de energia de forma a garantir a segurança do suprimento contínuo em todo o País. (ONS,1998)
- A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) atua como operadora do mercado brasileiro de energia elétrica, voltada à viabilização de um ambiente de negociação competitivo, sustentável e seguro com foco de atuação no segmento de comercialização, pautado pela neutralidade, liquidez e simetria de informações. (CCEE, 2004)

Estas instituições estão sob a supervisão do Ministério de Minas e Energia e estão estruturadas de acordo com organograma apresentado na Figura 1.2.

Figura 1.2: Mapeamento organizacional do Setor Elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, apesar da estrutura formada pelos órgãos que compõem o sistema elétrico nacional, o planejamento e operação deste ainda é uma atividade de extrema complexidade, principalmente em sua malha de transmissão de energia elétrica.

As linhas de transmissão, no seu planejamento de operação, estão sujeitas a limites térmicos ou de estabilidade, que restringem o nível de potência que pode ser transmitido levando o sistema à estreitamentos na geração. Esta situação ocasionará os seguintes problemas: pontos de operação não econômicos, baixa capacidade de carregamento, necessidade de redespacho da geração, de capacidade extra de geração ou ainda importação de energia elétrica, que mobilizará toda a estrutura do sistema elétrico na busca de novos pontos ótimos de operação (WATANABE et al., 1998).

1.1 Cenário atual do Mercado Energético Brasileiro

Com a desregulamentação do setor elétrico, a fim de garantir a competitividade entre os agentes do mercado de energia, o sistema de transmissão passa a ter a função de intermediar o consumidor que poderá comprar energia livremente de qualquer agente gerador. Com isto as redes de transmissão foram submetidas a novos padrões de carregamento, junto com novas exigências de controle e operação.

Este novo cenário faz com que as linhas de transmissão passem a ser planejadas com fatores de confiabilidade mais elevados, sendo necessários novos projetos para estes sistemas, tais como projetos de implantação de novas linhas ou duplicação dos circuitos elétricos de linhas já existentes. Um ponto de atenção destes tipos de projeto é que eles apresentam altos custos

de implantação e manutenção, além de ter como obstáculo a aprovação ambiental (MACHADO, 2003).

Mediante essa adaptação ao novo mercado do setor elétrico supracitada tem-se o fator de crescimento do consumo de energia nos últimos anos, que exige diretamente mais investimentos do sistema de transmissão. Segundo estimativas da EPE, a demanda de energia elétrica crescerá a uma taxa média de 4,3% ao ano, saindo de um patamar de consumo total de 472,2 mil GWh no ano de 2013 para 656,1 mil GWh até 2021 (EPE, 2011). A Tabela 1.1 mostra a projeção de consumo de energia no SIN e no subsistema sudeste/centro oeste a partir do ano de 2013.

Tabela 1.1 Consumo de eletricidade na rede (GWh)

Ano Região	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Perc. Médio
SIN	472.1	493.6	513.8	534.5	557.0	580.6	605.5	630.9	656.1	4.3%
SE/CO	287.1	299.7	311.1	323.4	336.5	350.4	365.0	379.9	394.7	4.2%

Fonte: EPE, (2011).

O estado do Espírito Santo no atual cenário nacional possui a característica de importador de energia elétrica do SIN, sendo a carga instalada na importação de 2.128 MW. Sua capacidade de geração própria corresponde a apenas cerca de 30% de sua demanda total, que atualmente é de 1.374,5 MW.

Atualmente o estado possui 3 UHE, 12 PCH, 4 CGH, 5 UTE e 8 Autoprodutores, a Tabela 1.2 apresenta o cenário energético do estado.

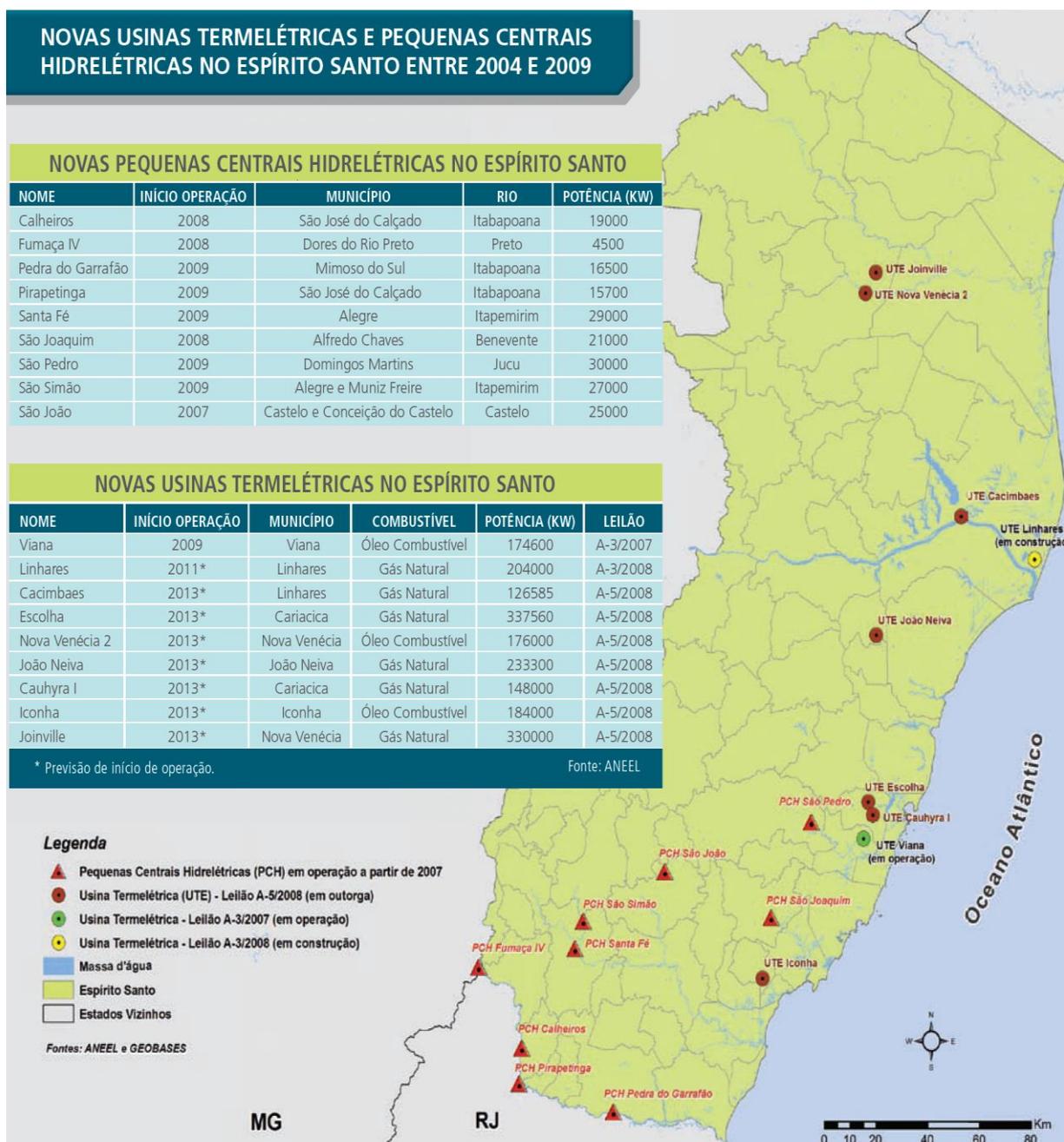
Tabela 1.2 Oferta e Demanda de Energia Elétrica no Espírito Santo

Unidades Geradoras	MW
3 UHE	267,1
12 PCH	191,9
4 CGH	2
4 UTE(bagaço da Cana) e 1 UTE (óleo Comb.)	197,7
8 Autoprodutores (Termo e Hidro)	715,8
Total	1.374,5
Importação do SIN	2.128,0
Oferta Total	3.502,5
Demanda Total	2.201,8
Folga na Oferta	1.300,7

ASPE, (2010a).

No cenário futuro do Espírito Santo, ressaltam-se os projetos de implantação de nove novas usinas termelétricas com capacidade de geração total de até 1.739 MW, fato este decorrente do crescimento da produção de gás natural do estado nos últimos anos motivada por grupos de investidores conforme mapa mostrado na Figura 1.3. Além disso, no período de 2007 à 2009, das 12 PCH apresentadas na Tabela 1.2, entraram em operação 09 PCH, numa capacidade de geração de 187,7 MW. Desta maneira, o perfil de fluxo de energia do estado poderá ser alterado para exportador de energia em certos períodos.

Figura 1.3: Mapa energético do Estado do Espírito Santo



Fonte: ASPE, (2010b).

Neste contexto de novas usinas geradoras percebeu-se também que para o atendimento do sistema elétrico capixaba seria necessário o investimento em novas linhas de transmissão interligadas ao SIN. Assim, a linha de Transmissão Mesquita-Viana II-500kV entrou para o planejamento de obras de infraestrutura do estado (ASPE, 2010).

1.2 Controle - FACTS

Para sistemas pequenos poucos complexos, o superdimensionamento em relação a capacidade de geração e transmissão pode resolver parcialmente o controle e a operação. Porém, em grandes e complexos sistemas de transmissão esta alternativa torna-se impraticável.

Para que ocorra o controle do fluxo de potência e perfil de tensão nas linhas de transmissão, conseqüentemente também de sua operação, desenvolveu-se ao longo dos tempos o conceito de sistema com fluxos de potência controláveis ou FACTS. Estes dispositivos são pesquisados com dois objetivos principais (WATANABE et al., 1998):

- Aumentar a capacidade de transmissão de potência das redes;
- Controlar diretamente o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão.

Baseado na tecnologia FACTS tem-se o compensador SVC, um dispositivo constituído por reatores controlados por tiristores e capacitores chaveados, que injeta ou absorve energia reativa na rede. O SVC é aplicado no controle de fator de potência, regulagem de tensão, aumento da capacidade e estabilidade de sistemas de transmissão.

Com o perfil do mercado energético brasileiro e baseado no cenário específico do estado do Espírito Santo, onde além de previsão de crescimento de suas cargas, está em estudo a implantação de novas usinas termelétricas, com a aplicação de dispositivo SVC na subestação de Viana II, avaliando a inserção deste para o controle do perfil de tensão.

1.3 A proposta do Trabalho

Este trabalho tem como proposta levantar dados, modelar e simular a linha de transmissão Mesquita – Viana II - 500kV, juntamente com suas subestações, geradores, compensadores e cargas. Além do estudo de topologias de SVC com sua implementação/modelagem, é proposto no decorrer deste trabalho a simulação da inserção deste dispositivo na subestação de Viana II, avaliando os resultados obtidos nesta subestação com os cenários de cargas do estado do Espírito Santo.

O capítulo 2 apresenta o dispositivo SVC com suas principais características.

O capítulo 3 apresenta o sistema de transmissão do estado do Espírito Santo e Minas Gerais com suas principais características e a modelagem desta região no PSCAD/EMTDC.

O capítulo 4 mostra a elaboração do SVC com a metodologia de seu desenvolvimento.

O capítulo 5 apresenta o resultado das simulações do sistema sem e com a inserção do SVC.

As conclusões dos resultados observados na simulação são apresentadas no capítulo 6.

Capítulo 2: Estado da Arte do SVC

Neste capítulo são apresentadas as principais características do SVC, sendo destacadas algumas topologias básicas deste dispositivo que são usadas ao longo deste trabalho. Inicialmente é apresentado o comportamento do sistema de transmissão de energia, avaliando os efeitos da aplicação de compensadores reativos nos mesmos. Na sequência é abordada uma das tecnologias de compensador de reativo, o compensador síncrono, com suas principais características elétricas. Por fim, são apresentadas algumas configurações do dispositivo SVC, sendo ilustradas as configurações TCR, TSC e TCR-TSC.

2.1 Noções básicas de redes de transmissão de energia

A maioria das linhas de transmissão de energia operam em corrente alternada com diferentes níveis de tensão que variam entre 230kV e 750kV. A interligação entre as linhas de diferentes tensões é feita através de transformadores que operam com alta eficiência no sistema. Geralmente não há controle do fluxo de potência nestas linhas e sua regulação é feita pela carga à qual estão ligadas.

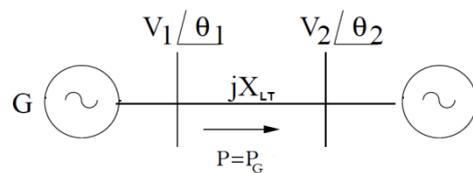
As equações 2.1 e 2.2 apresentam os fluxos de potência ativa e reativa em uma linha de transmissão sem perdas (PADIYAR, 2009). A diferença entre os ângulos θ_1 e θ_2 é chamado de abertura angular.

$$P = \frac{V_1 \times V_2}{X_{LT}} \times \text{sen}(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.1)$$

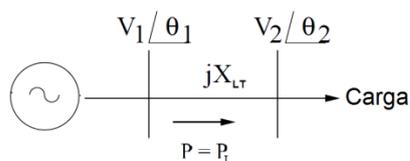
$$Q = \frac{V_2^2 - V_1 \times V_2 \times \cos(\theta_1 - \theta_2)}{X_{LT}} \quad (2.2)$$

Mantendo as tensões V_1 e V_2 constantes através do uso de reguladores, o fluxo de potência ativa pode ser determinado através da abertura angular $\theta_1 - \theta_2$ entre as barras. A Figura 2.1 mostra os diagramas típicos para a interligação de uma linha de transmissão entre geradores e entre gerador e carga, respectivamente.

Figura 2.1: Fluxo de potencia em linhas de transmissão



(a) Linha de transmissão entre geradores.



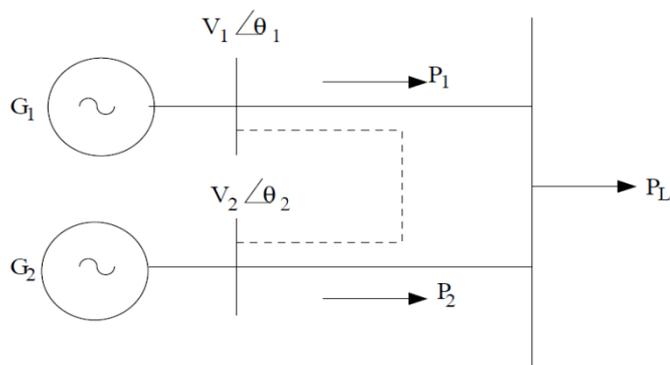
(b) Linha de transmissão entre gerador e carga.

Fonte: Padiyar, (2009, p. 2).

A diferença entre os dois diagramas apresentados está no modelamento do centro de carga. No primeiro caso, o centro de carga é modelado como um barramento infinito que absorve qualquer quantidade de energia fornecida pela fonte geradora, enquanto no segundo caso, ele apresenta-se como uma carga fixa.

Para aumentar a confiabilidade destes sistemas, pode-se implementar uma nova topologia com a inclusão de mais linhas, formando uma malha de transmissão, conforme mostra a Figura 2.2.

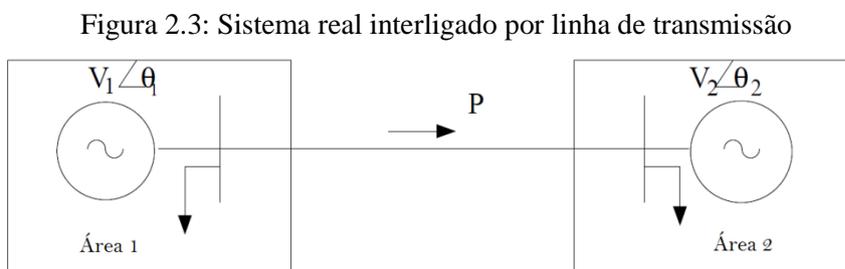
Figura 2.2: Duas estações geradoras suprindo a carga



Fonte: Padiyar, (2009, p. 4).

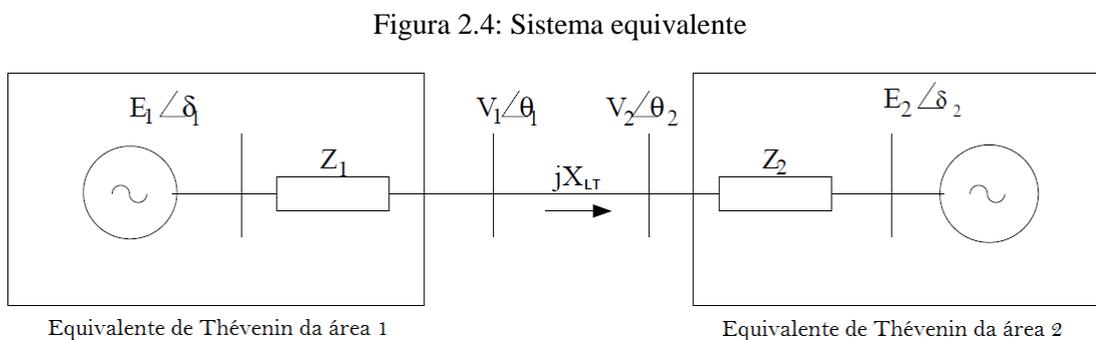
Desta maneira, a potência ativa fornecida pelos geradores G1 e G2 será P1 e P2, respectivamente. Para evitar que a perda de qualquer uma das linhas reduza a capacidade de suprir a carga, também é possível interligar as barras de G1 e G2. Assim, com a perda de uma das duas linhas, o fluxo de potência ativa poderá ser mantido através da linha remanescente. O fluxo de potência real na malha formada por estas duas linhas é determinado pela Lei de Kirchhoff, sendo o fluxo distribuído entre elas.

A Figura 2.3 ilustra a situação na qual dois sistemas de geração, interligados por uma linha de transmissão, possuem também cargas locais em suas barras.



Fonte: Padiyar, (2009, p. 4).

Na modelagem em regime permanente, ou seja, com variações lentas que desprezam os efeitos transitórios, poderá ser feita a modelagem equivalente do sistema gerador e carga conforme o modelo da Figura 2.4. Este modelo representa o equivalente externo do sistema a partir das barras V_1 e V_2 , ilustrados na Figura 2.3, na qual todo o sistema após estas barras é representado por uma fonte ideal com uma impedância em série.



Fonte: Padiyar, (2009, p. 4).

No sistema de potência, o fluxo de energia é determinado pela carga ligada aos barramentos. Desta maneira, em um sistema convencional que não utiliza tecnologias FACTS, fica a cargo dos sistemas de proteção a limitação do fluxo de potência que atuam durante as sobrecargas, distúrbios ou outras situações que podem comprometer a segurança do sistema.

2.1.1 Controle do fluxo de potência em linhas de transmissão em corrente alternada

A necessidade do controle do fluxo de potência em linhas de transmissão se deve à necessidade de aumentar a capacidade de transferência de energia ativa e/ou alterar o fluxo de energia em condições dinâmicas causadas pelo aumento repentino de cargas, falha de gerador, linhas ou outros distúrbios, de forma a garantir a estabilidade e segurança do sistema. Além disso, a estabilidade pode ser afetada por oscilações de baixa frequência da rede (devido a oscilações do rotor do gerador), perda de sincronismo ou grandes perturbações (PADIYAR, 2009).

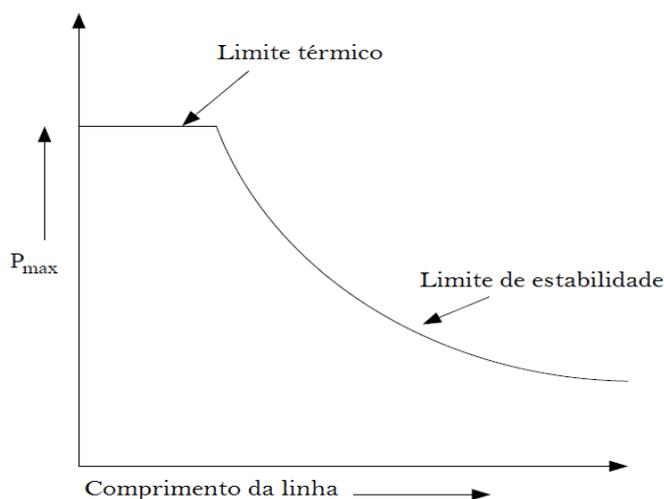
Através da equação 2.1 o valor máximo de potência transferida através de uma linha é apresentado na equação 2.3.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{V_1 \times V_2}{X_{LT}} \times \text{sen} \delta_{m\acute{a}x} \quad (2.3)$$

Em geral, o ângulo $\delta_{m\acute{a}x}$ assume valores entre 30° e 40°, variando de acordo com a estabilidade marginal do sistema e a rigidez dos barramentos ao qual a linha de transmissão está conectada.

Conforme a Figura 2.5, com o aumento do comprimento da linha tende-se a conduzir menos potência do que o valor definido pelo limite térmico dos condutores, limitando sua capacidade de transmissão ao critério de estabilidade apresentado na equação 2.3. De maneira geral, com este aumento ocorre o incremento da impedância X_{LT} e conforme (2.3), a capacidade de transmissão ($P_{m\acute{a}x}$) varia de forma inversa com o incremento de X_{LT} .

Figura 2.5: Capacidade de transferência de potência em função do comprimento da linha



Fonte: Padiyar, (2009, p.5).

2.1.2 Compensador de reativos em série

O uso de capacitores em série com as linhas de transmissão é uma técnica antiga e de resultados conhecidos para os planejadores de sistemas elétricos. Ao longo do tempo, a evolução de dispositivos eletrônicos de potência possibilitou o uso de compensadores em série que permitem o ajuste da compensação de acordo com a demanda do sistema.

Este tipo de compensação terá o efeito de diminuir a impedância total da linha, aumentando assim a potência máxima que pode ser transmitida. A equação que apresenta este efeito na impedância da linha é representada por (PADIYAR, 2009):

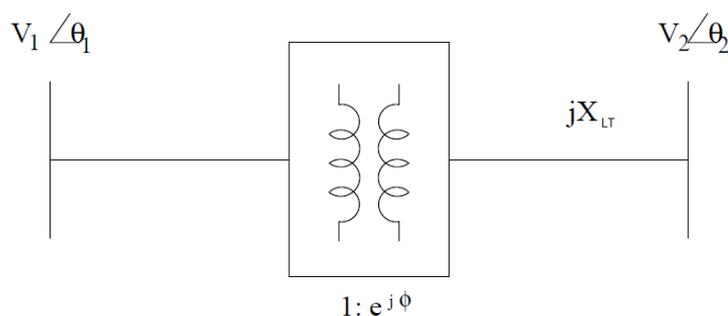
$$X_c = X_{LT}(1 - K_{se}) \quad (2.4)$$

Nesta, o fator K_{se} é o grau de compensação do sistema em série cujo valor máximo é função de diversos fatores, dentre eles a resistência do condutor. Geralmente o valor K_{se} não é superior a 0,7.

Baseado nestes fatos, uma das formas de se aumentar o fluxo de potência em linhas de transmissão longas sem comprometer a estabilidade do sistema é inserir um dispositivo em série com a linha que seja capaz de diminuir a impedância equivalente da linha.

Em linhas de transmissão de comprimentos curtos, o fluxo de energia pode ser controlado por Transformadores de Mudança de Fase (PST). Este transformador em série com a linha de transmissão permite o controle da defasagem angular entre as barras sem alterar o módulo de tensão.

Figura 2.6: Linha sem perdas com PST ideal



Fonte: Padiyar, (2009, p.6).

O fluxo de potência em uma linha ideal com o dispositivo PST é ilustrado na equação 2.5:

$$P = \frac{V_1 \times V_2}{X_{LT}} \times \text{sen}(\delta \pm \phi) \quad (2.5)$$

De acordo com esta equação, o compensador poderá aumentar a capacidade de transmissão da linha alterando o valor final da defasagem angular vista pelo sistema elétrico entre as barras 1 e 2.

2.1.3 Compensador de reativos em derivação

A aplicação de compensadores de reativos em derivação com a linha de transmissão melhora o desempenho do sistema, permitindo o controle dos níveis de tensão nos barramentos, o aumento da capacidade de transmissão de potência ativa nas linhas e a atenuação das oscilações de baixa frequência (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

As seções a seguir apresentam os resultados esperados com a aplicação desta topologia de compensador em diversos pontos ao longo da linha de transmissão e para variados controles de distúrbios do sistema elétrico.

2.1.3.1 Regulação de tensão no ponto médio da linha

Para um caso ideal, com a linha sem perdas, representado por dois geradores e uma linha de transmissão, é analisada a aplicação do compensador de reativos em derivação no meio desta, conforme Figura 2.7.a. O compensador é representado por uma fonte de tensão conectada no meio da linha com o mesmo ângulo de fase e módulo de tensão V_m do ponto médio da linha. Neste caso, o módulo da tensão no ponto médio da linha e nos terminais gerador e receptor do sistema é igual, ou seja: $V_m=V_s=V_r=V$ (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

A presença do compensador no meio da linha a divide em dois segmentos com impedância $X_{LT}/2$ entre os terminais emissor, receptor e compensador. A relação entre as correntes I_{sm} e I_{sr} e as tensões V_s , V_m e V_r estão representadas no diagrama fasorial da Figura 2.7.b.

Para o sistema considerado, o compensador de reativos irá trocar com o sistema apenas energia reativa e os valores de potência ativa no terminal emissor e receptor não serão alterados. Com isso:

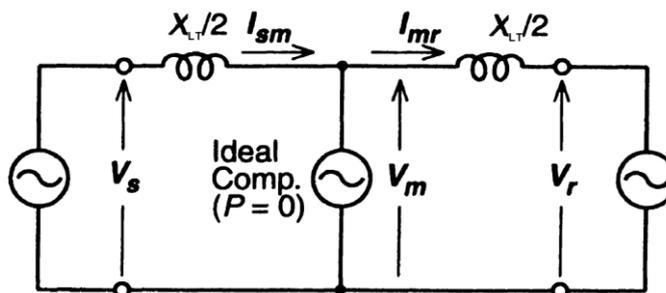
$$V_{sm} = V_{mr} = V \times \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad I_{sm} = I_{mr} = I = \frac{4 \times V}{X_{LT}} \times \text{sen}\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (2.6)$$

$$P = V_{sm} \times I_{sm} = V_{mr} \times I_{mr} = V_m \times I_{sm} \times \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) = V \times I \times \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (2.7)$$

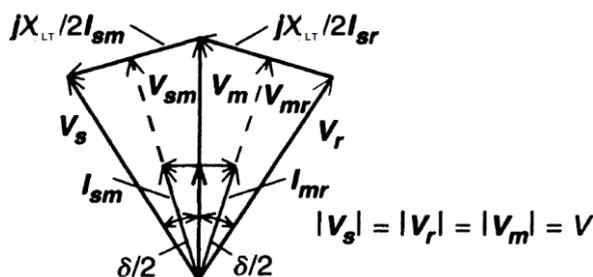
$$P = 2 \times \frac{V^2}{X_{LT}} \times \text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.8)$$

$$Q = V \times I \times \text{sen}\left(\frac{\delta}{4}\right) = \frac{4 \times V^2}{X_{LT}} \times \left(1 - \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)\right) \quad (2.9)$$

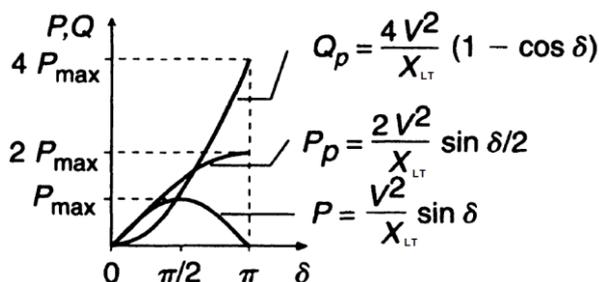
Figura 2.7: Aplicação de compensador de reativo em derivação no meio da linha



(a) Sistema de potência ideal



(b) Diagrama fasorial



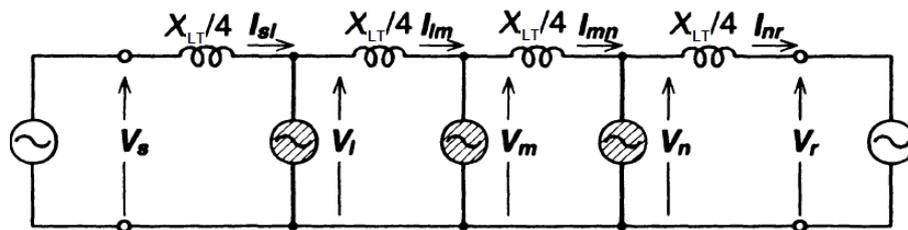
(c) Curva de potência x abertura angular δ

Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.136).

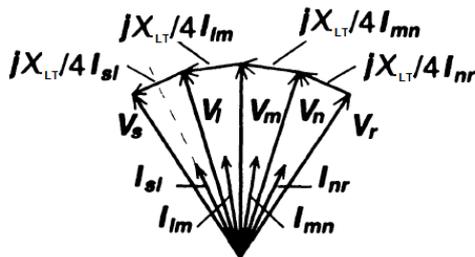
Segundo Hingorani e Gyugyi (2000, p. 137), a Figura 2.7.c junto com a equação 2.8 deixa claro que o ponto ideal para colocar o compensador reativo é o meio da linha, uma vez que sua capacidade de transmissão é dobrada. No caso de seguimentos desiguais, o caminho mais longo do seguimento irá determinar a máxima transmissão de potência.

O conceito de linha segmentada poderá ser estendido para múltiplos compensadores ao longo da linha igualmente separados no seu decorrer, conforme ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8: Sistema elétrico segmentado por n compensadores de reativos em paralelo



(a) Sistema de potência ideal



(b) Diagrama fasorial

Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.137).

Com esta divisão a potência transmitida pela linha dobrará para cada duplicação de segmento, além de diminuir a oscilação de tensão ao longo desta.

2.1.3.2 Regulação de tensão no final da linha

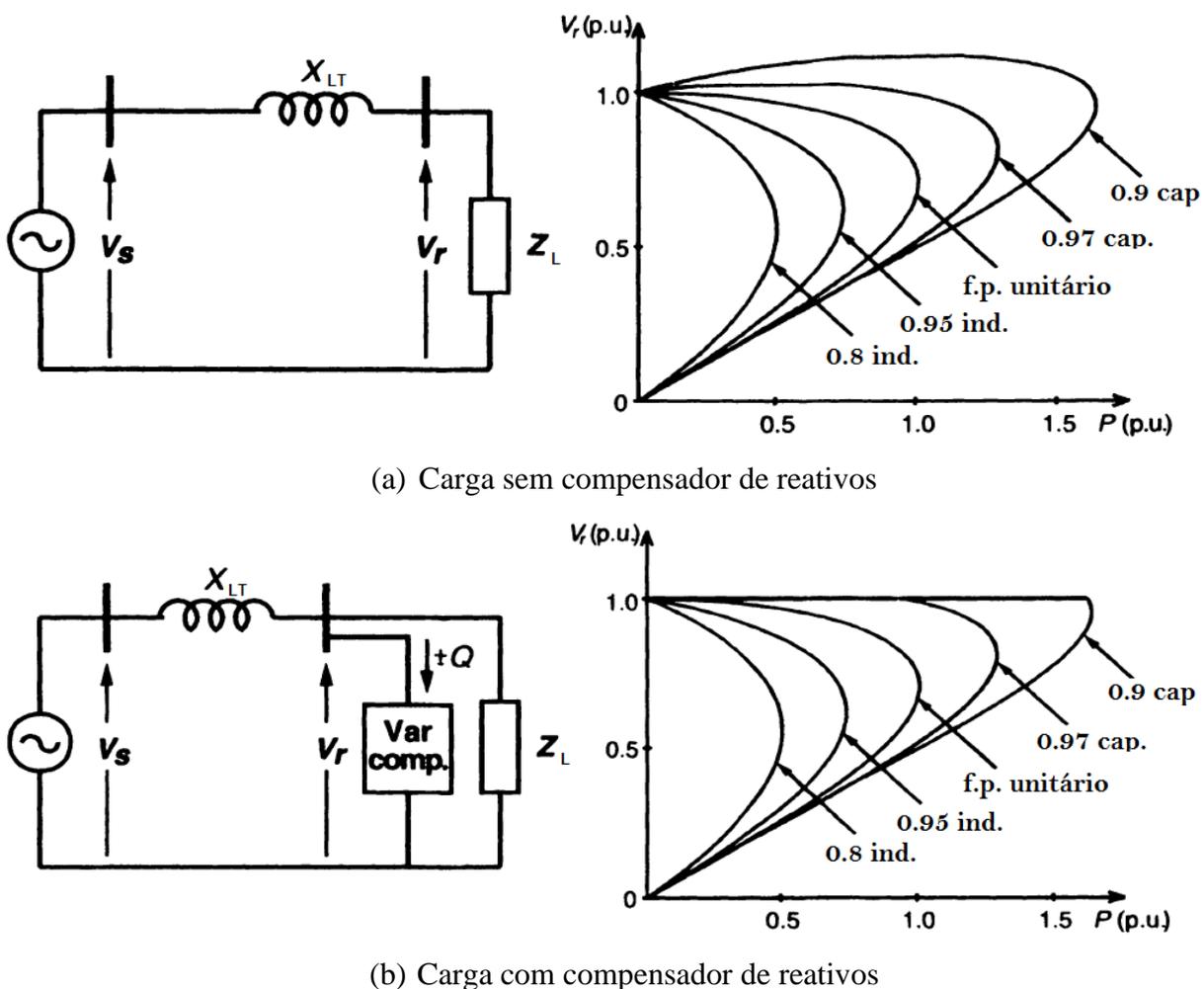
O sistema apresentado na seção anterior demonstrou o aumento de capacidade de transmissão da linha com a implantação de compensador de reativos em derivação no meio desta ou com divisão em segmentos iguais (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

A proposta da atual seção é aplicar o compensador de reativo no final de uma linha em sistema radial, com reatância X_{LT} e carga com impedância Z_L , tendo por objetivo manter o perfil de tensão neste ponto em um valor preestabelecido independentemente das características da carga. A Figura 2.9.a apresenta o perfil de tensão da carga com fatores de potência que variam de 0,8 indutivo a 0,8 capacitivo sem a correção de tensão com compensador de reativos.

Em aplicações em que a variação de tensão no terminal receptor é grande em função do perfil da carga, a aplicação de compensador de reativos em derivação é indicada para o controle.

Nesta topologia o compensador injetará energia reativa diretamente na carga, variando o fluxo que passa pela linha. Nesta condição, a tensão no barramento será controlada pelo aumento ou diminuição da queda de tensão da linha que liga o terminal de fonte à carga. A Figura 2.9.b apresenta o perfil de tensão na barra de carga com o compensador em derivação ajustado no valor de 1,0 pu.

Figura 2.9: Variação da tensão na barra receptora em função da carga



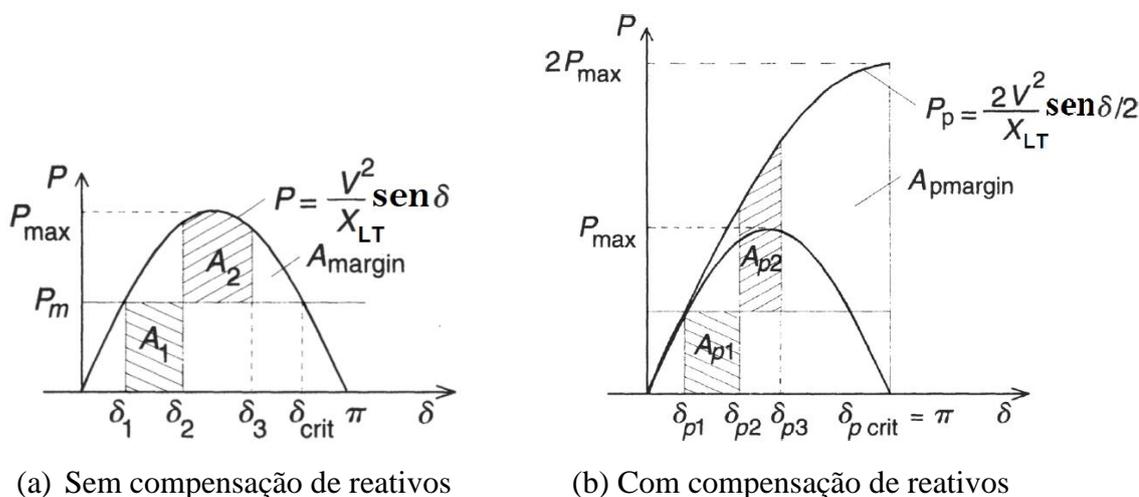
Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.139).

Este trabalho descreve a aplicação deste dispositivo em derivação no barramento de 500kV da subestação de Viana II. De maneira similar ao conceito ilustrado, é desenvolvido e dimensionado o dispositivo SVC para este barramento até a projeção de carga do ano 2021.

2.1.3.3 Melhoria da estabilidade transitória

Para compreensão da melhoria da estabilidade transitória utiliza-se a situação ideal formada por um sistema sem compensação, constituído por apenas uma linha de transmissão. Inicialmente o sistema está em equilíbrio no regime estacionário e a potência elétrica do sistema P sendo igual à potência mecânica do gerador P_m , conforme ilustrado na Figura 2.10.a (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Figura 2.10: Gráfico de potência transmitida X ângulo δ



Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.141).

Durante a falta elétrica, a potência transmitida ao sistema irá à zero, porém a potência mecânica nos geradores pela inércia mantém-se constante igual a P_m . Desta maneira as máquinas de geração tendem a acelerar com a perda do torque elétrico, contrário ao torque mecânico, elevando assim o ponto de operação do ângulo δ_1 para δ_2 . O ângulo δ_2 ocorrerá no momento em que a falta é interrompida e o sistema reestabelecido. Com o retorno do sistema, o torque elétrico é reestabelecido devido à carga, desacelerando as máquinas geradoras, porém, com a inércia do sistema mecânico, ainda levará um tempo para o ponto de equilíbrio do sistema elétrico voltar ao ângulo δ_1 , neste intervalo chegando ao ângulo δ_3 . A determinação do ângulo δ_3 ocorre quando há o equilíbrio entre as energias de aceleração e desaceleração das máquinas, ocorrendo isto no momento em que A_1 é igual a A_2 .

A área representada por A_{margin} é denominada de estabilidade transitória, pois, representa a reserva de energia que o sistema possui para desacelerar sem a perda do sincronismo do

sistema elétrico com a barra ao qual está conectado o gerador. A estabilidade transitória é definida pela área entre as curvas P e P_m e os ângulos δ_3 e δ_{crit} . A partir de δ_{crit} não é possível reestabelecer o sistema e as máquinas devem ser desligadas.

A Figura 2.10.b apresenta o sistema com o uso de compensador de reativos em derivação, sendo que no caso de uma falta, o raciocínio permanecerá o mesmo. Porém como a curva de transferência de potência é maior, o sistema terá uma maior área A_{margin} , aumentando assim a estabilidade transitória do sistema.

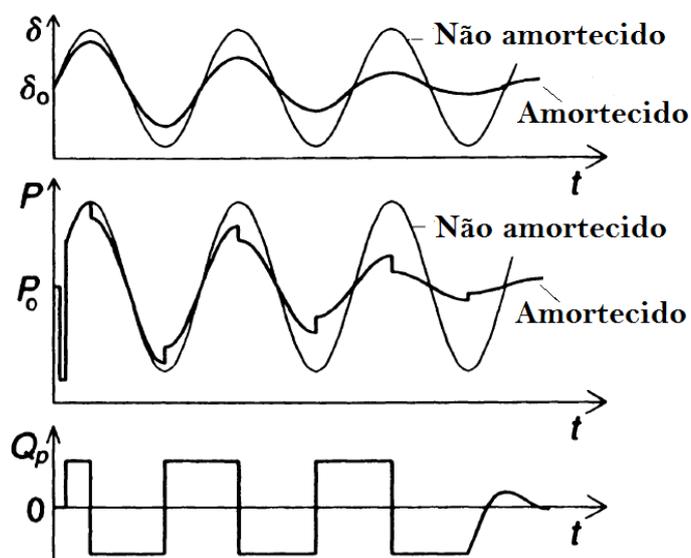
2.1.3.4 Amortecimento da oscilação de potência

Os sistemas subamortecidos poderão oscilar em torno do ângulo estacionário da máquina em virtude de pequenos distúrbios, variando em torno do estado estacionário da frequência natural eletromecânica. A oscilação em torno da abertura angular, para o sistema elétrico, reflete em uma oscilação de potência fornecida em torno da potência no estado estacionário. Mediante o nível desta oscilação e o tipo de sistema, esta situação poderá ser um fator limitante para a transmissão (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

No controle desta oscilação dinâmica de potência torna-se necessário variar a compensação de reativo em derivação aplicada Q_p , variando também a tensão no ponto médio da linha e balanceando a aceleração e desaceleração dos distúrbios da máquina. Desta forma, quando o gerador rotativo oscilante acelera juntamente com o aumento do ângulo δ ($d\delta/dt > 0$), a potência elétrica ativa deverá ser aumentada para compensar o aumento da potência de aceleração. Da mesma maneira quando ocorrer à desaceleração o ângulo δ diminuir ($d\delta/dt < 0$) e a potência elétrica deverá diminuir para compensar a redução da potência de aceleração.

Quando o compensador de reativos é capacitivo, este injeta potência no sistema, com isso a tensão no meio da linha é elevada. Desta maneira, aumenta-se a potência elétrica do sistema transmitido, sendo aplicado neste caso quando $d\delta/dt > 0$. De maneira análoga, quando a potência do compensador é indutiva, este absorve potência do sistema e a tensão no meio da linha diminuir. Esta situação ocorrerá quando $d\delta/dt < 0$, e conseqüentemente diminuirá a potência elétrica transmitida pelo sistema. A Figura 2.11 ilustra o comportamento do sistema amortecido e não amortecido.

Figura 2.11: Gráfico de potência transmitida, ângulo δ e potência do compensador em função do tempo



Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.143).

No exemplo ilustrado na Figura 2.11, a variação de reativos do compensador é discreta, variando do máximo para o mínimo, de acordo com a oscilação do sistema. Este tipo de controle é eficiente para sistema com grandes oscilações. Porém em sistemas onde a oscilação é pequena, o controle ideal variará a potência do compensador de forma contínua.

2.2 Dispositivos de compensação de reativos em derivação

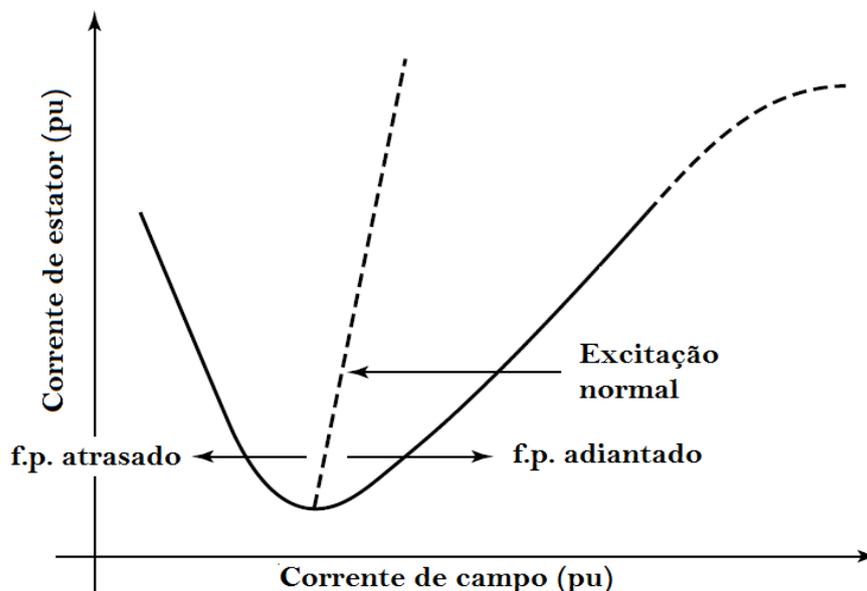
Nesta seção são vistos os dispositivos de compensação de reativos comumente usados no sistema elétrico, inicialmente é apresentado o compensador síncrono e na sequência, os compensadores estáticos.

2.2.1 Compensador síncrono

Até meados da década de 70, o compensador síncrono era o único dispositivo de reativos controlável aplicado a sistemas elétricos de potência. O seu funcionamento consiste na utilização de um motor síncrono ligado em vazio com a rede, onde a corrente de excitação é variada, fazendo com que este tenha o comportamento de injetar potência reativa indutiva ou

capacitiva na rede elétrica. A curva V apresentada na Figura 2.12 ilustra as características deste compensador em função da corrente de excitação (campo) da máquina (MOHAN; RAJIV, 2002).

Figura 2.12: Gráfico de corrente de estator x corrente de campo do compensador síncrono



Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.42).

Quando o compensador está subexcitado, passa a absorver potência reativa do sistema, ou seja, terá o comportamento de uma carga indutiva. De forma análoga, quando a máquina é sobre-excitada, irá injetar potência reativa no sistema, apresentando a característica de um capacitor. A faixa limite entre estes dois estados do compensador, excitação normal, não interfere na potência reativa do sistema, a tensão do compensador será a nominal da máquina.

O compensador síncrono é normalmente inserido em sistemas de Extra Alta Tensão, sendo para isto acoplado ao compensador um transformador abaixador de tensão que levará a tensão na máquina a valores menores dentro dos padrões construtivos. Os compensadores síncronos usualmente são refrigerados através de gás hidrogênio e estão em uma faixa de potência de até 345MVA. Os compensadores síncronos possuem a característica de uma lenta resposta de controle, em virtude da constante de tempo elevada, numa faixa típica de 100 a 500ms.

2.2.2 Conceitos básicos do compensador estático de potência reativa

Durante muito tempo, os disjuntores e chaves seccionadoras vêm sendo utilizados em operação de manobra e proteção dos Sistemas Elétricos de Potência. Esses dispositivos apresentam como principal limitação o número de manobras, no caso dos disjuntores, e a comutação sem carga, no caso das chaves seccionadoras. Neste contexto, foram desenvolvidas chaves eletrônicas do tipo GTO, IGBT, IGCT, Tiristor, entre outros, que aliam a capacidade de operar o sistema sob carga com um número ilimitado de manobras (WATANABE et al., 1998).

A evolução destas chaves diversificou as metodologias de compensação de reativos, como será visto nesta seção, a qual apresenta algumas topologias básicas de compensadores estáticos de reativos em derivação, destacando-se o TCR, o TSC e o TCR-TSC.

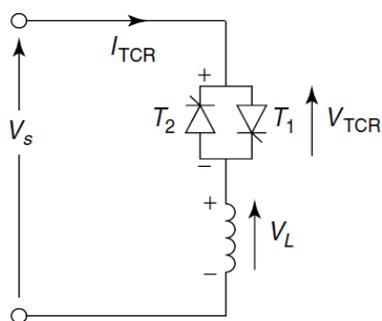
2.2.2.1 Reator Controlado por Tiristor - TCR

O TCR é um dos componentes do dispositivo SVC que também pode ser encontrado na compensação de reativos de maneira isolada. Na maioria dos projetos de compensador de reativos, o TCR é encontrado em paralelo com um banco de capacitores fixo ou com capacitores chavados por tiristor (MOHAN; RAJIV, 2002).

Sua composição é formada por um par de tiristores em antiparalelo, T1 e T2, ligado em série com um reator linear de núcleo a ar, conforme ilustrado na Figura 2.13. A referência do ângulo de disparo é o momento em que a tensão nos seus terminais (V_s) passa por zero.

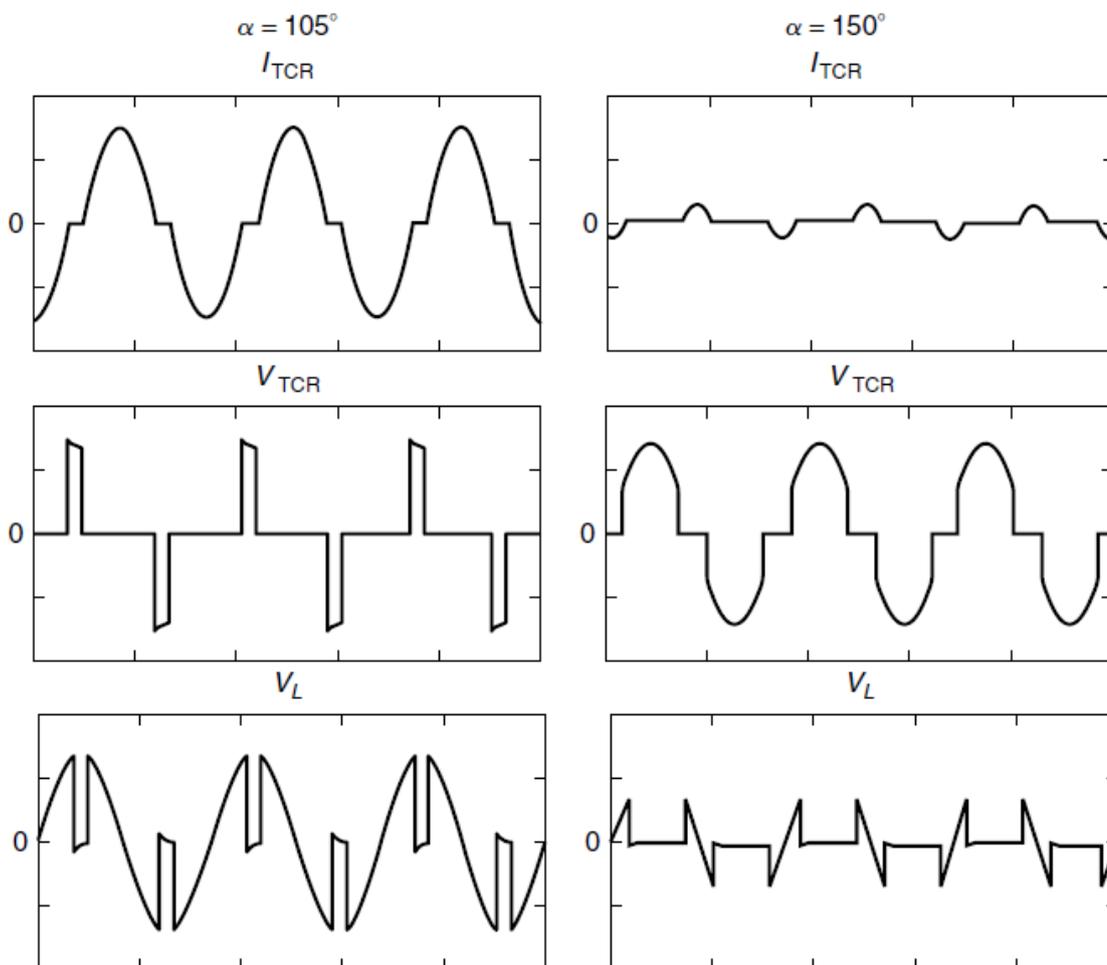
A faixa de controle do ângulo de disparo α dos tiristores está entre 90° e 180° . Para o ângulo $\alpha=90^\circ$ a corrente através do indutor será senoidal, enquanto que para o ângulo $\alpha=180^\circ$ a corrente no indutor é nula. Para ângulos α com valores intermediários a corrente no indutor será descontínua, variando com o valor de α , conforme ilustrado na Figura 2.14. A operação com ângulo de disparo α abaixo de 90° introduz componentes de corrente contínua no sistema, causando distúrbio na atuação simétrica dos dois tiristores em antiparalelo.

Figura 2.13: Configuração do TCR



Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.47).

Figura 2.14: Corrente e tensão no indutor em função de α



Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.48).

Outro fator importante do controle da indutância com tiristores é que a chave formada por eles apresenta como característica o seccionamento da condução de forma independente do ângulo de disparo. A interrupção ocorre no momento em que a corrente no ramo do tiristor passa por zero, evento conhecido como comutação de linha. Além disso, outra característica da

comutação de linha é que após iniciada, em determinado momento, qualquer alteração de disparo só poderá ocorrer no próximo meio ciclo de onda.

A equação 2.10 descreve o comportamento da forma de onda da tensão sobre o TCR.

$$v_s(t) = V \times \text{sen}(\omega \times t) \quad (2.10)$$

Na equação 2.10, V é o valor de pico da tensão sobre o TCR e ω a frequência angular da fonte. A corrente no TCR é obtida através da seguinte equação diferencial:

$$L \frac{di}{dt} - v_s(t) = 0 \quad (2.11)$$

onde L é a indutância do TCR.

Integrando a equação 2.11, obtém-se:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int v_s(t) dt + C \quad (2.12)$$

Onde C é um valor real constante.

Resolvendo a equação anterior, chega-se a:

$$i(t) = -\frac{V}{\omega \times L} \times \cos(\omega \times t) + C \quad (2.13)$$

O valor da constante C é obtido a partir da condição limite, $i(\omega t = \alpha) = 0$. Desta forma, pode-se escrever:

$$i(t) = -\frac{V}{\omega \times L} \times (\cos(\alpha) - \cos(\omega \times t)) \quad (2.14)$$

onde α é o ângulo de disparo medido a partir do momento que a tensão passa por zero.

Através da análise de Fourier é possível obter a corrente fundamental $I_1(\alpha)$ do TCR, que na forma geral é expressa como:

$$I_1(\alpha) = a_1 \times \cos(\omega \times t) + b_1 \times \text{sen}(\omega \times t) \quad (2.15)$$

Devido à simetria de meia-onda, ou seja: $i(x+T/2)=-i(x)$, não haverá componentes harmônicas de ordem par. Já devido à simetria ímpar da corrente, ou seja: $i(x)=i(-x)$, o elemento b_1 é nulo.

O coeficiente a_1 da equação (2.15) é dado por:

$$a_1 = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(x) \times \cos\left(\frac{2\pi x}{T}\right) dx \quad (2.16)$$

Logo:

$$I_1(\alpha) = \frac{V}{\omega \cdot L} \cdot \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \text{sen}(2\alpha)\right) \quad (2.17)$$

A equação 2.17 pode ser reescrita como:

$$I_1(\alpha) = V \cdot B_{TCR}(\alpha) \quad (2.18)$$

onde:

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{m\acute{a}x} \cdot \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \text{sen}(2\alpha)\right) \quad (2.19)$$

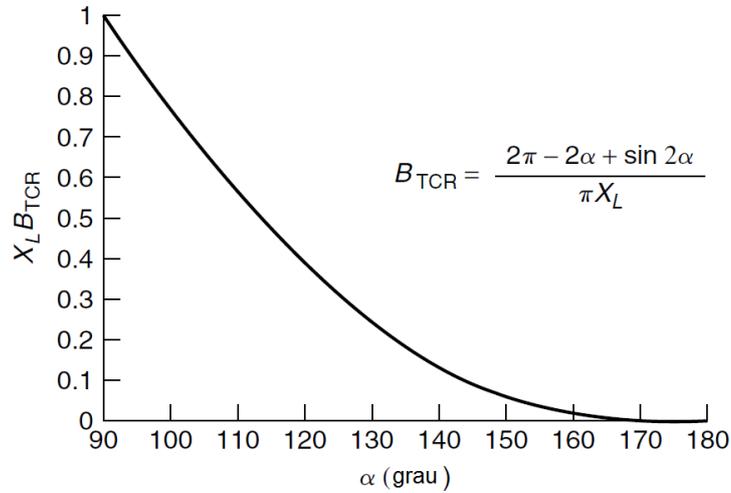
$$B_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\omega \cdot L} \quad (2.20)$$

O ângulo α está relacionado com o ângulo de condução através da seguinte equação:

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (2.21)$$

A variação de B_{TCR} , em p.u., em função de α é apresentada no gráfico da Figura 2.15.

Figura 2.15: Característica de controle do TCR, $B_{TCR} \times \alpha$



Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.50).

O comportamento apresentado na Figura 2.15 é a de uma indutância variável. Entretanto a medida que o ângulo α varia de 90° à 180° , a corrente torna-se não-senoidal e parcelas de harmônicos irão aparecer no sistema, conforme Figura 2.14. Através do método de análise de Fourier é possível obter a equação da corrente rms harmônica no sistema, expressa em função de α , conforme equação 2.22.

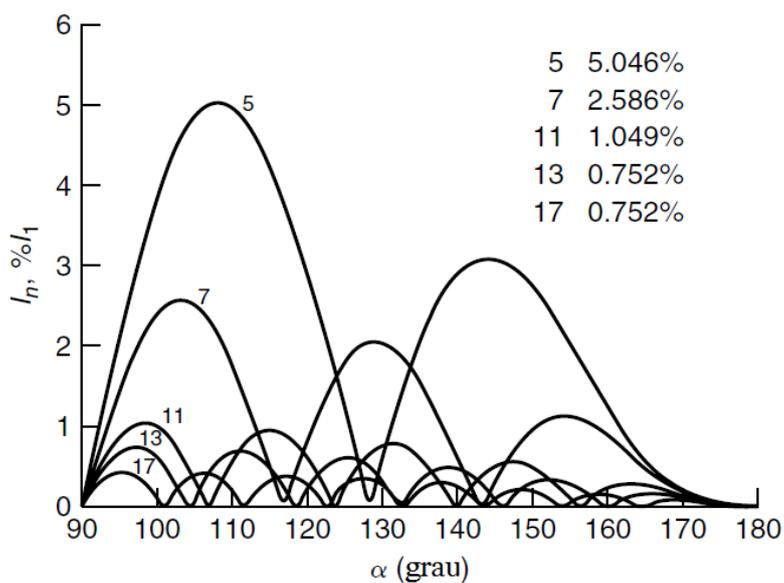
$$I_n(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left[-2 \cdot \frac{\cos(\alpha)}{n} \cdot \text{sen}(n\alpha) + \frac{\text{sen}(n-1)\alpha}{n-1} + \frac{\text{sen}(n+1)\alpha}{n+1} \right]$$

$$= \frac{V}{\omega L} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left[\frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \cos(n\alpha) - n \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(n\alpha)}{n \cdot (n^2 - 1)} \right] \quad (2.22)$$

Onde $n=2k+1$ e $k=1,2,3,4,5\dots$

A Figura 2.16 apresenta os valores das correntes harmônicas em percentual da corrente fundamental observando-se que as correntes harmônicas não apresentam valor de pico coincidente para o mesmo ângulo α .

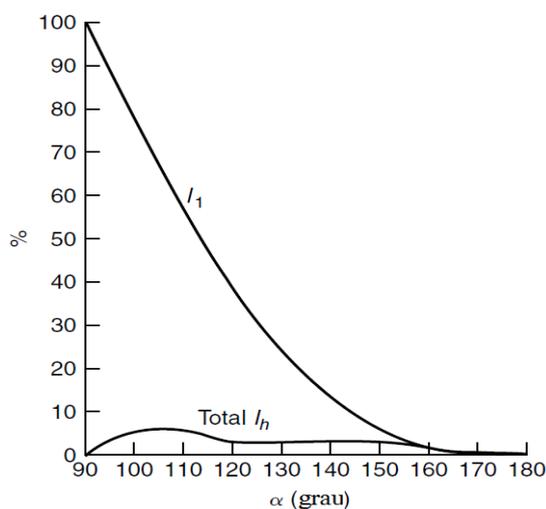
Figura 2.16: Correntes harmônicas no TCR em função de α



Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.51).

O comportamento da corrente fundamental, juntamente com o conteúdo harmônico total, em função do ângulo α é apresentado na Figura 2.17.

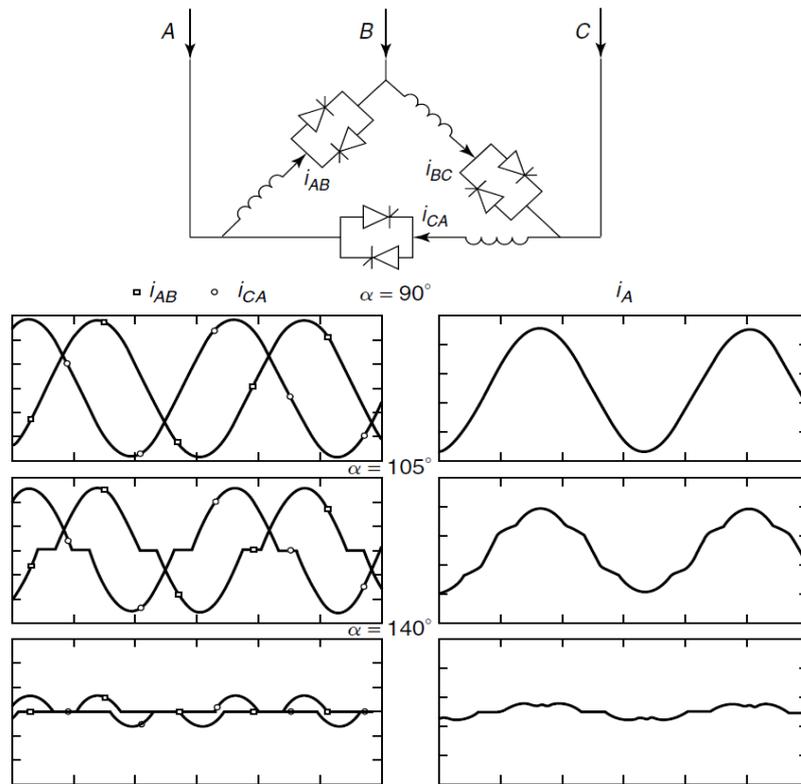
Figura 2.17: Corrente fundamenta I_1 e harmônica total I_h em função de α



Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.51).

Na configuração do TCR trifásico, o indutor é dividido em duas partes colocando-se o TCR entre estes, conforme mostra a Figura 2.18. Desta forma, evita-se o aparecimento de sobretensões sobre os tiristores e de curtos-circuitos entre os nós e ramos do conjunto tiristor e indutor.

Figura 2.18: TCR trifásico e suas respectivas correntes de fase e de linha



Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.53).

A configuração do TCR trifásico em delta contribui também para eliminar correntes harmônicas de terceira ordem e seus múltiplos nas linhas de transmissão. As correntes nos ramos do TCR para harmônicos de terceira ordem são expressas como:

$$\begin{aligned}
 i_{AB3} &= a_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi_3) \\
 i_{BC3} &= a_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi_3 - 2\pi) \\
 i_{CA3} &= a_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi_3 - 4\pi)
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Ou seja:

$$i_{AB3} = i_{BC3} = i_{CA3}
 \tag{2.24}$$

Verifica-se pela equação (2.24) que as correntes de 3º harmônico estão em fase e circularão apenas no ramo delta do TCR, formando a corrente de sequência zero no sistema.

Isto também resulta em uma corrente de linha de 3º harmônico nula:

$$i_{A3} = i_{AB3} - i_{CA3} = 0 \quad (2.25)$$

De maneira equivalente:

$$i_{B3} = i_{C3} = 0 \quad (2.26)$$

A análise apresentada para a corrente de 3º harmônico no TCR em delta poderá ser estendida para seus múltiplos $3p+3$, onde $p=0,1,2,3,\dots$. Nestes casos, também não haverá corrente de linha do sistema.

De maneira análoga, a análise do comportamento das correntes de 5º harmônico será expressa como:

$$\begin{aligned} i_{AB5} &= a_5 \cdot \cos(5 \cdot \omega \cdot t + \varphi_5) \\ i_{BC5} &= a_5 \cdot \cos\left(5 \cdot \omega \cdot t + \varphi_5 - \frac{4\pi}{3}\right) \\ i_{CA5} &= a_5 \cdot \cos\left(5 \cdot \omega \cdot t + \varphi_5 - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

A corrente de 5º harmônico representa a corrente de sequência negativa do sistema. Através da equação (2.27), pode-se perceber que, contrário ao caso da 3º harmônica, no caso da 5ª harmônica e seus múltiplos $6p+5$ ($p=0,1,2,3,\dots$), a corrente de linha no sistema será não-nula.

Da mesma forma as correntes de 7º harmônica não serão canceladas nas correntes de linha, sendo apresentadas a seguir:

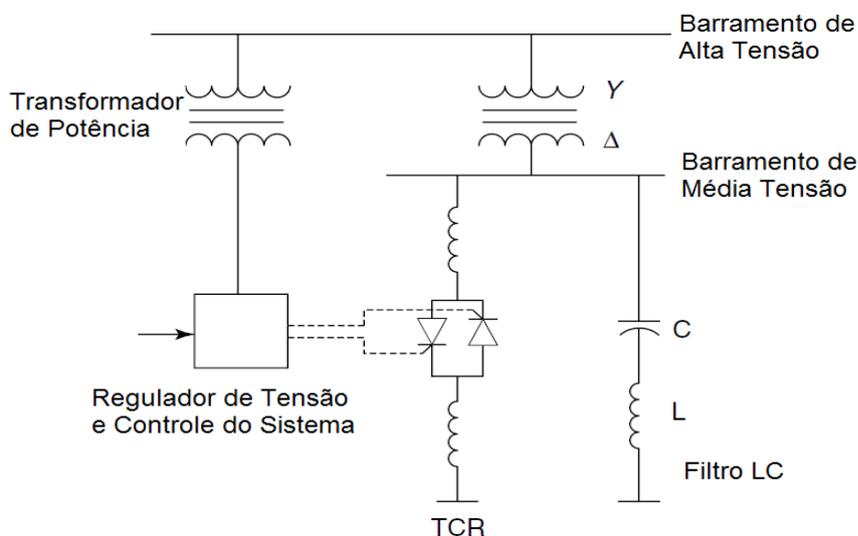
$$\begin{aligned} i_{AB7} &= a_7 \cdot \cos(7 \cdot \omega \cdot t + \varphi_7) \\ i_{BC7} &= a_7 \cdot \cos\left(7 \cdot \omega \cdot t + \varphi_7 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{CA7} &= a_7 \cdot \cos\left(7 \cdot \omega \cdot t + \varphi_7 - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

De maneira similar as correntes de 7º harmônico, as correntes de ordem múltipla $6p+1$ ($p=1,2,3,\dots$) não serão anuladas nas correntes de linha. No sistema estas representam as correntes de sequência positiva.

Para amortecer o efeito das correntes de 5º e 7º harmônico, geradas pelo TCR, na corrente de linha do sistema, deve-se empregar filtros. Outra forma de eliminar tais correntes é a utilização de TCR de 12 pulsos, com a ligação de transformadores ΔY e $\Delta\Delta$.

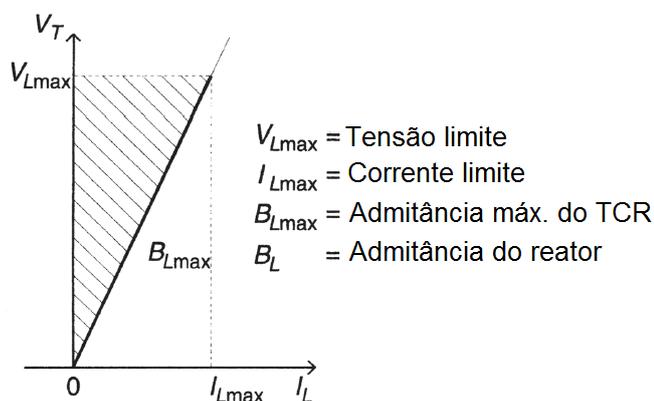
A configuração típica do TCR e sua faixa de operação são apresentadas nas Figuras 2.19 e 2.20, respectivamente.

Figura 2.19: Diagrama típico do TCR com filtro de harmônicos e banco de capacitor fixo



Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.55).

Figura 2.20: Faixa de operação do TCR V-I



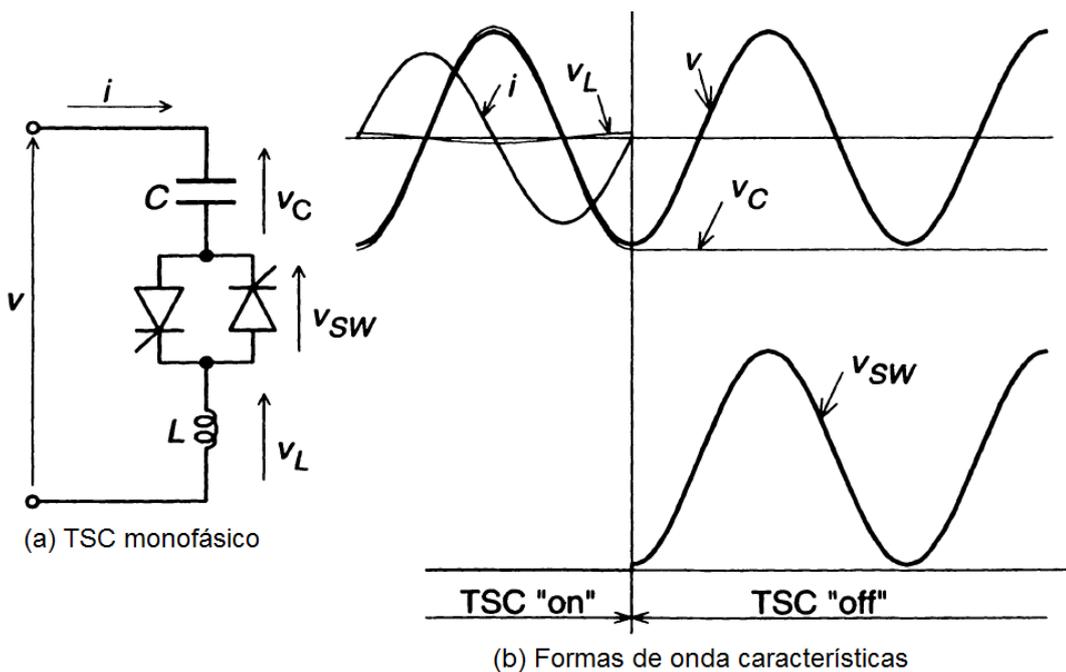
Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.148).

A área hachurada na Figura 2.20 representa a faixa de valores obtidos para admitância do TCR de acordo com o ângulo de disparo α .

2.2.2.2 Capacitor Chaveado a Tiristor – TSC

O TSC monofásico é apresentado na Figura 2.21.a, sendo composto por um capacitor, uma chave bidirecional formada por dois tiristores em antiparalelo e um pequeno indutor limitador de corrente. Este limitador de corrente tem a função de limitar a corrente de pico sobre o tiristor em correntes anormais ocasionadas, por exemplo, pelo mau funcionamento dos tiristores e chaveamento em momento errado. Além disso, ele evita a ressonância entre o TSC e os dispositivos da rede para frequências múltiplas do sistema (MOHAN; RAJIV, 2002).

Figura 2.21: Diagrama de TSC monofásico



Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.151).

Em condições normais, o TSC ao ser chaveado em uma tensão do tipo $v(t) = V \times \text{sen}(\omega \times t)$ apresenta a corrente no ramo do TSC representada pela equação seguinte.

$$i(\omega t) = V \times \frac{n^2}{n^2-1} \times \omega \times C \times \cos(\omega t) \tag{2.29}$$

onde,

$$n = \frac{1}{\omega^2 \times L \times C} \quad (2.30)$$

A amplitude de tensão sobre os terminais do TSC é:

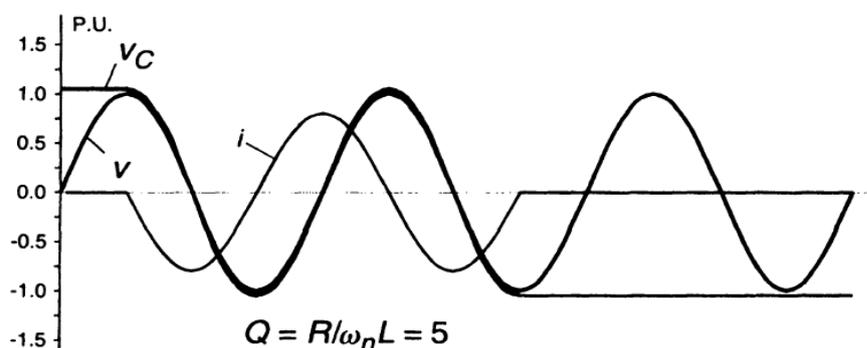
$$V_c = \frac{n^2}{n^2 - 1} \times V \quad (2.31)$$

O TSC só poderá desconectar o capacitor da rede no instante em que a corrente neste passar por zero. A tensão armazenada no capacitor, apresenta o valor de $V_{C,i=0} = \frac{V \times n^2}{n^2 - 1}$. No instante em que o capacitor está carregado com a tensão máxima e a tensão da fonte sobre o TSC varia, os tiristores ficam submetidos a uma tensão que variam entre zero e picos da fonte de tensão V, conforme ilustrado na Figura 2.21.b.

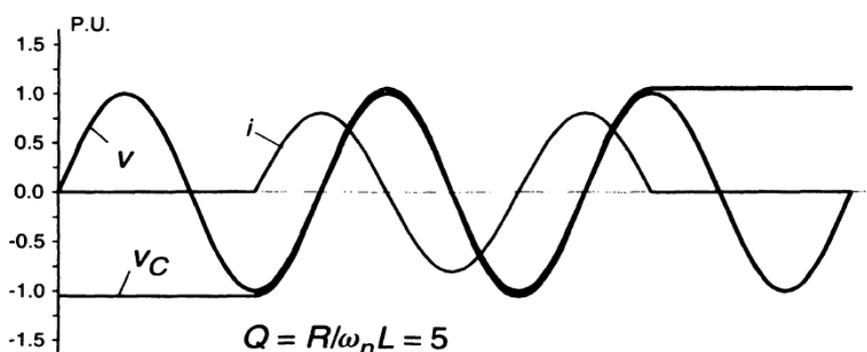
Quando o capacitor for desconectado da rede e sua tensão for igual à tensão de pico do sistema, este só poderá ser novamente conectado, sem que haja distúrbios na corrente, se a conexão ocorrer no instante em que a tensão da rede seja igual ao seu valor de pico. As Figuras 2.22.a e 2.22.b ilustram respectivamente, o momento em que a tensão da fonte é chaveada com valor de pico do capacitor para os dois semiciclos.

A interação da corrente entre o capacitor e o indutor de amortecimento (di/dt), com um resistor de amortecimento, produzirá oscilação durante o período transitório conforme ilustram as Figuras 2.23.a e 2.23.b. Para a condição de chaveamento com o capacitor descarregado é observada a maior oscilação de corrente, fato causado pela máxima dv/dt sobre o capacitor neste instante de tensão.

Figura 2.22: Chaveamento do capacitor totalmente carregado



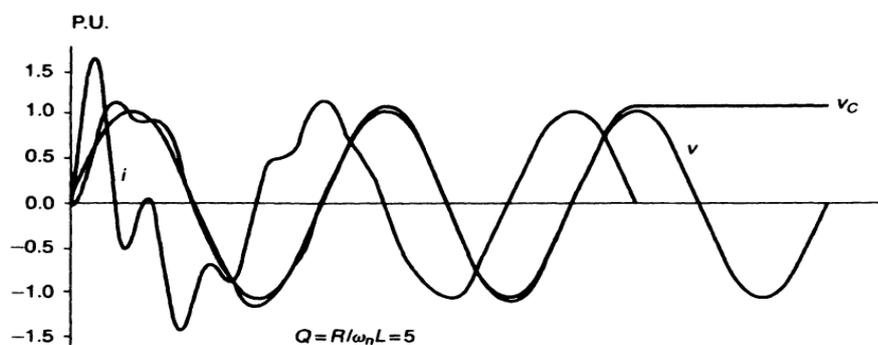
(a) Máxima tensão de pico



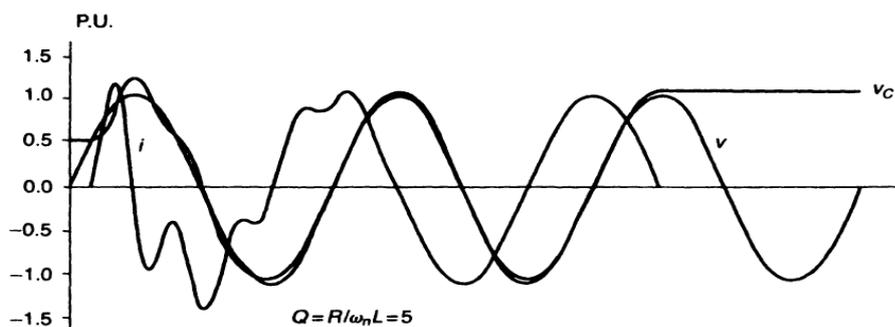
(b) Mínima tensão de pico

Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.152).

Figura 2.23: Chaveamento do capacitor totalmente descarregado e parcialmente descarregado



(a) Capacitor totalmente descarregado



(b) Capacitor parcialmente descarregado, carga igual a 0,5 p.u.

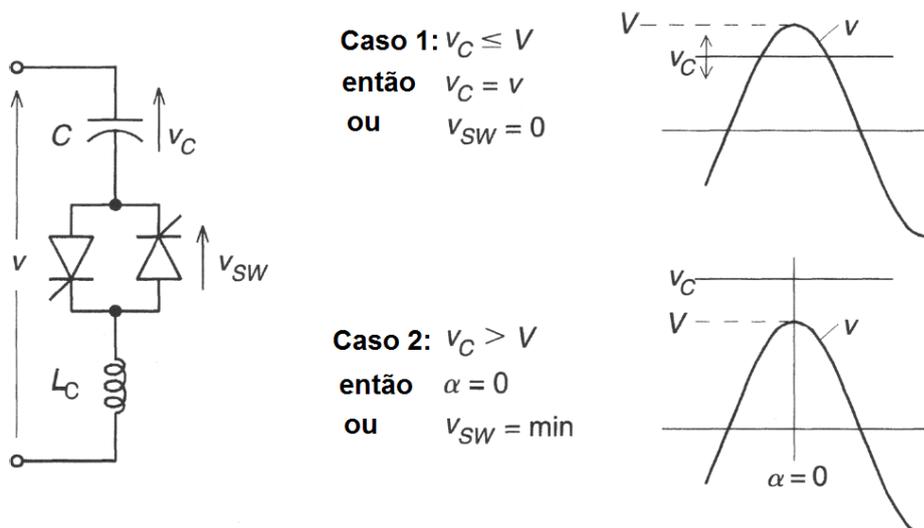
Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.153).

Em resumo, o correto chaveamento do capacitor poderá ocorrer nas seguintes condições:

- Se a tensão no capacitor V_c é menor do que o valor de pico da fonte V , o ponto exato será no instante em que $V_c = V$;
- Caso o módulo da tensão no capacitor V_c seja maior do que o módulo do valor de pico da fonte V , o melhor ponto para chaveamento será o momento em que a diferença $(V_c - V)$ seja mínima.

As condições de chaveamento do capacitor expostas acima estão ilustradas na Figura 2.24.

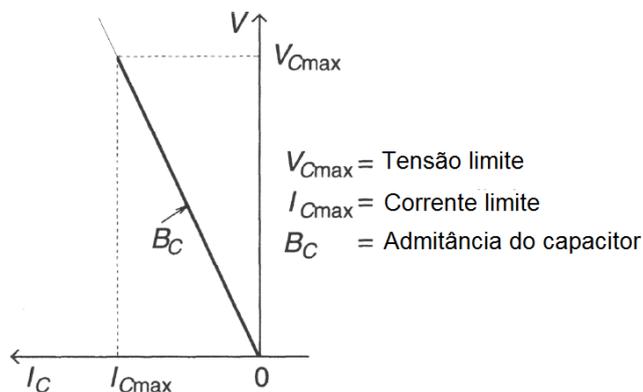
Figura 2.24: Condições para chaveamento do capacitor no TSC



Fonte: Hingorani e Gyugyi, 2000, p.154.

A faixa de operação do TSC é ilustrada na Figura 2.25.

Figura 2.25: Faixa de operação do TSC V-I



Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.154).

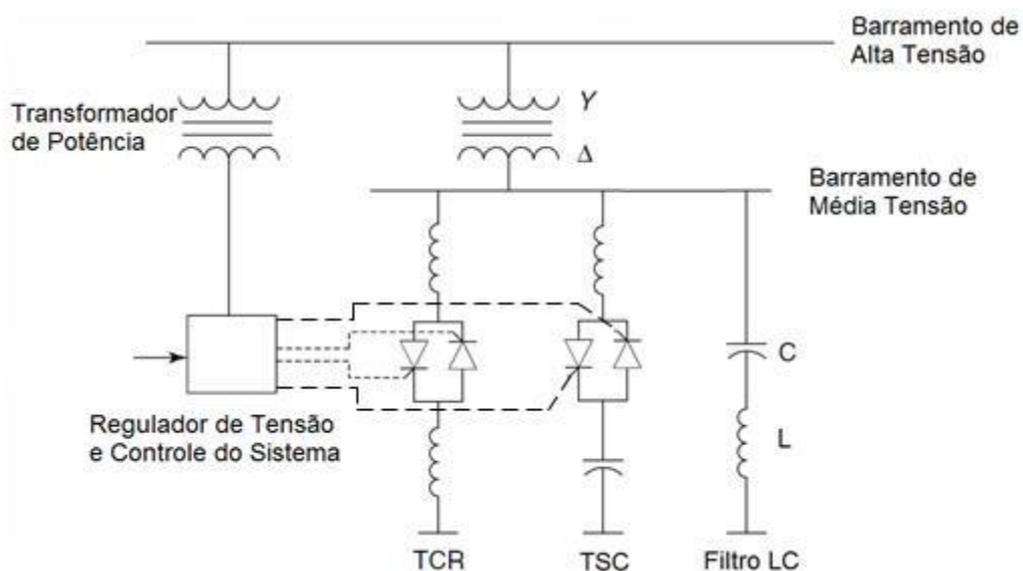
De acordo com a Figura 2.25, a faixa de atuação do capacitor não será contínua, como no caso do TCR, e sim os pontos do segmento de reta B_C . Esta condição ocorre, pois, o capacitor no TSC apenas é inserido ou não no sistema com o valor total de sua admitância.

2.2.2.3 Reator Controlado por Tiristor e Capacitor Chaveado por Tiristor – TCR-TSC

O compensador do tipo TCR-TSC foi desenvolvido inicialmente para oferecer uma compensação dinâmica para sistemas de transmissão, diminuindo suas perdas em regime permanente e aumentando sua flexibilidade de operação. Desta maneira, o compensador será capaz tanto de injetar potência reativa no sistema (Q_C), como absorver potência reativa (Q_L). (MOHAN; RAJIV, 2002).

A configuração básica do SVC do tipo TCR-TSC é apresentada na Figura 2.26, sendo composto o sistema por um TCR, um TSC e um filtro de correntes harmônicas. Nesta associação é usual que o TSC seja dividido em um número n , cujo valor varia de acordo com necessidades específicas de projeto relacionadas a custos, faixa de operação desajada, tensão de barramento e entre outros fatores.

Figura 2.26: Configuração básica do SVC tipo TCR-TSC

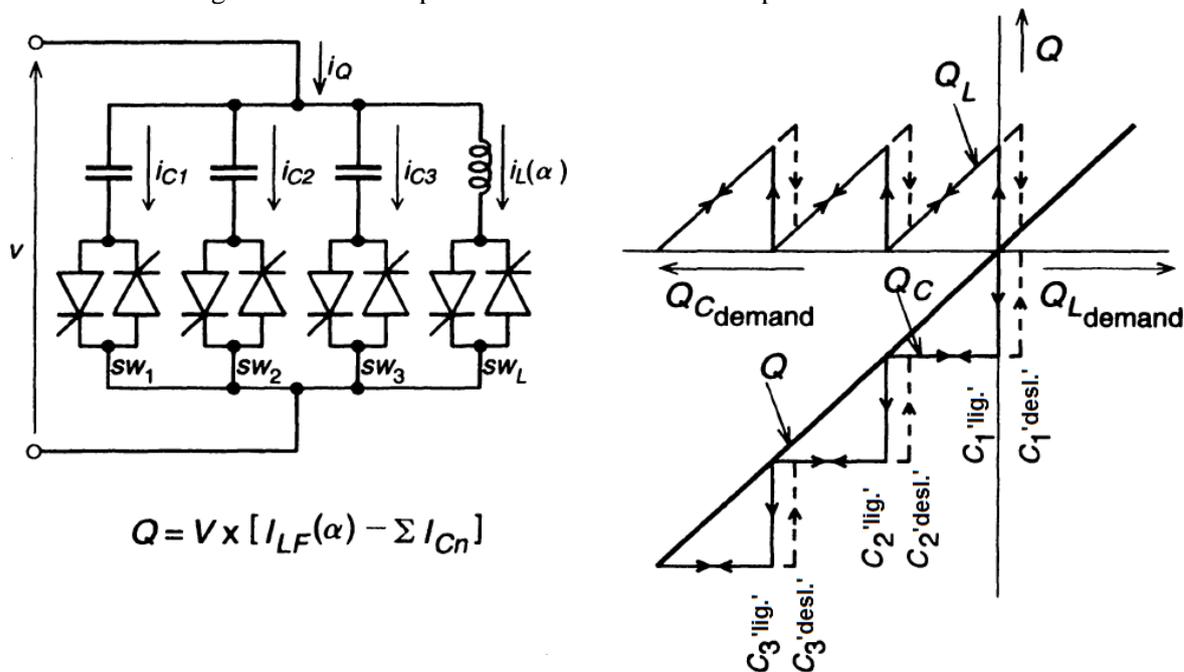


Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.55).

A resposta do sistema quando há divisão no número de TSC, apresenta a característica da variação mais próxima de uma faixa contínua. Isto ocorre, pois, a inserção ou retirada do TSC acontece em degraus, e à medida que o número de ramos TSC's aumenta, menor será a diferença entre estes.

A potência reativa total fornecida pelo SVC será a soma da potência total dos TSC inseridos, com o TCR em sua faixa de operação determinada e o filtro. A Figura 2.27 apresenta um diagrama de TCR-TSC, sem filtro de correntes harmônicas, que ilustra a potência Q fornecida pelo SVC em função do ajuste da potência Q_L do TCR e Q_C do TSC.

Figura 2.27: SVC tipo TCR-TSC sem filtro e resposta Demanda X var de saída



Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.160).

O esquema de controle do TCR-TSC deverá determinar a injeção de reativos na linha avaliando as seguintes condições:

- Caso a demanda de reativos seja capacitiva, deve-se avaliar o número de ramos de TSC que deverão ser acionados para suprir a demanda de potência capacitiva desejada. Como a inserção de potência capacitiva é feita na forma de faixas discretas, caso não seja atendido o valor determinado, deve-se ajustar o ponto de

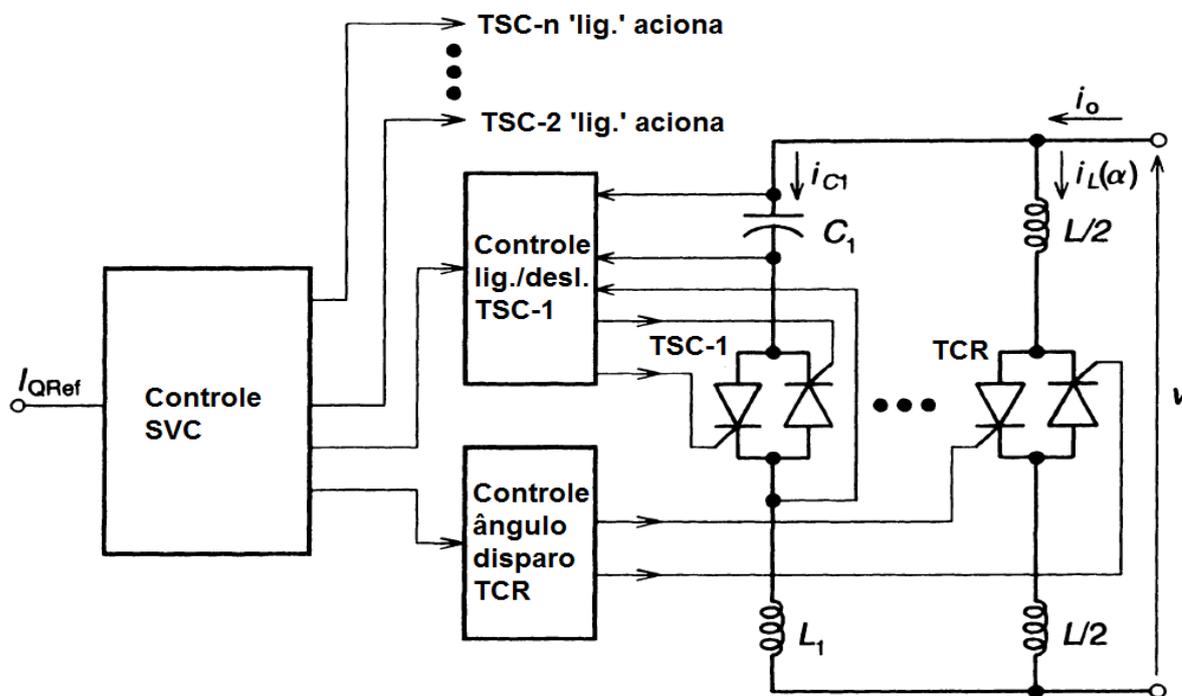
operação do TCR (ângulo α) para que seja feita a regulação do ponto de operação do conjunto TCR + TSC;

- Caso a demanda de reativo seja puramente indutiva, deve-se ajustar o ângulo α do TCR para atender o ponto de operação desejado;
- Deve-se controlar o momento de disparo dos tiristores do TSC em função da tensão armazenada neste, conforme descrito anteriormente.

O diagrama de controle básico do TCR-TSC é apresentado na Figura 2.28. A corrente I_0 representa a corrente requerida pelo sistema para fornecimento da potência reativa do compensador. A corrente I_{QRef} é dividida em I_C e I_L sendo que a primeira representa a parcela de corrente do ramo do TSC necessária para atender potência capacitiva do sistema. A diferença entre a corrente I_0 e I_C representa a parcela de corrente I_L .

As ações do sistema de controle atuam no sentido de ajustar o ângulo de disparo do TCR e TSC para que se obtenha I_0 igual a I_{QRef} , na aplicação do controlador do tipo PI.

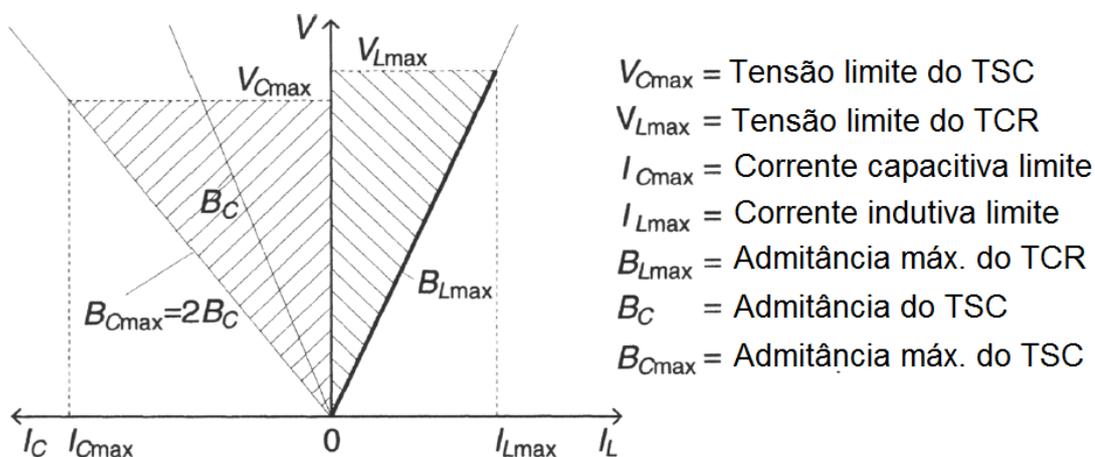
Figura 2.28: Diagrama básico de controle do TCR-TSC



Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.161).

O TCR-TSC pode ser considerado como uma unidade (ou módulo), na qual na qual será fornecida potência reativa para o sistema elétrico, conforme solicitado pelo circuito de controle. O valor da potência reativa fornecida é limitado pelos valores máximos das admitâncias indutiva e capacitiva do SVC. Nesta configuração, a faixa de operação do SVC é dada pela área hachurada da curva V-I apresentada na Figura 2.29.

Figura 2.29: Faixa de operação do TCR-TSC V-I



Fonte: Hingorani e Gyugyi, (2000, p.163).

Como mostra a Figura 2.29, a faixa de atuação do TCR com o TSC é a área hachurada entre o B_{Lmax} e o B_{Cmax} . Este dispositivo consegue percorrer toda a área entre o B_{Cmax} e o eixo V devido ao ajuste final que o TCR adiciona ao conjunto, tornando-o mais flexível do que o TSC de maneira isolada apresentado na Figura 2.25.

2.4 Resumo

Neste capítulo mostrou-se o comportamento dos sistemas de transmissão com a variação do fluxo de potência, sendo ilustrada a metodologia de compensação de reativos em derivação com a carga no final e em diversos pontos da linha. Além disso, algumas das técnicas e dispositivos usualmente aplicados, tais como dispositivos SVC e o compensador síncrono, foram apresentados na sequência. A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre os compensadores de reativos paralelos estudados neste capítulo.

Tabela 2.1: Comparação entre compensadores de reativos

Item	Característica	Compensador Síncrono	FC-TCR	TSC	TSC-TCR
1	Faixa de controle	Indutivo e capacitivo	Indutivo e capacitivo	Capacitivo	Indutivo e capacitivo
2	Natureza do controle	Contínuo, ativo	Contínuo, ativo	Discreto, ativo	Contínuo, ativo
3	Tempo de resposta	Lento	Rápido, dependendo do sistema de controle	Rápido, dependendo do sistema de controle	Rápido, dependendo do sistema de controle
4	Capacidade de controle: - Controle de tensão; - Sinal auxiliar de estabilização; - Controle de fase individual.	Bom Limitado Limitado	Bom Bom Bom	Limitado Não Limitado	Bom Bom Bom
5	Geração de harmônicos	Nenhuma	Baixa, necessário filtros	Nenhuma	Baixa, necessário filtros
6	Limitação de sobretensão; Capacidade de sobrecarga.	Muito boa	Moderada	Nenhuma	Limitada
7	Inércia de rotação	Sim	Não	Não	Não
8	Sensibilidade a variação de frequência	Sim	Não	Não	Não
9	Perdas	Moderada, perdas rotativas	Média, aumenta com incremento de corrente indutiva	Média, aumenta com incremento de corrente capacitiva	Pequena, dependendo da configuração
10	Conexão direta em Extra Alta Tensão	Não	TCR não e FC sim.	Não	Não
11	Energização	Lenta	Rápida com atuação do controle, mínimo transitório	Rápida com atuação do controle, alguns transitórios	Rápida com atuação do controle, alguns transitórios

Fonte: Mohan e Rajiv, (2002, p.90).

Capítulo 3: Área de Localização do Sistema Elétrico Analisado

Neste capítulo são apresentadas as características do sistema de geração e transmissão no estado do Espírito Santo, além das características elétricas da área de estudo disponibilizados pelo ONS (ONS, 2013a). A partir desses dados, é feita a modelagem e a validação do sistema, comparando as simulações no software PSCAD/EMTDC com os dados disponibilizados pelo ONS. Como os dados apresentados pelo ONS são de forma pontual para o regime de carga leve, médio e pesado, foi feita a variação da carga ao longo do dia com bases nestes dados e no perfil de carga da região sudeste/centro-oeste do Brasil. Para modelagem do compensador síncrono e do banco de capacitores da subestação Mesquita, foi elaborado um sistema de controle independente, simulando a variação destes ao longo do dia conforme a tensão na barra da subestação.

3.1 Sistema de geração e transmissão no estado do Espírito Santo

O estado do Espírito Santo é atendido em sua totalidade por duas companhias de distribuição de energia, EDP ESCELSA e a Santa Maria Luz e Força, na qual além de distribuir a energia aos consumidores também administra a geração de pequenas geradoras, sendo as hídricas de maiores potências no estado na faixa de classificação de PCH. Além destas geradoras hídricas, ao longo dos últimos anos, o estado recebeu o investimento de geração de energia através de termelétricas para o atendimento da demanda em condições específicas de baixo nível dos reservatórios ou de pico no sistema. As linhas sob a responsabilidade destas concessionárias estão limitadas a tensões de 138kV, sendo entregue aos consumidores em diversos níveis que irão variar desde o limite de 138kV a 220/127V, de acordo com a demanda destes (ASPE, 2010).

A geração de energia no estado é responsável por menos de 30% da energia consumida, sendo necessário então o suprimento a partir de outras regiões do Brasil. Para isso, o estado está conectado atualmente ao Sistema Interligado Nacional (SIN) através das seguintes linhas de transmissão:

- Campos - Pitanga - 345kV e Ouro Preto - Vitória - 345kV, pertencentes a Furnas;
- Aimorés - Mascarenhas - 230kV, sob a responsabilidade da EVRECY.

A Figura 3.1 apresenta a interligação do Espírito Santo ao SIN, através das linhas de transmissão mencionadas anteriormente (SINDAT, 2014).

Figura 3.1: Interligação do estado do Espírito Santo ao SIN



Fonte: ONS, (2014b modificado pelo autor).

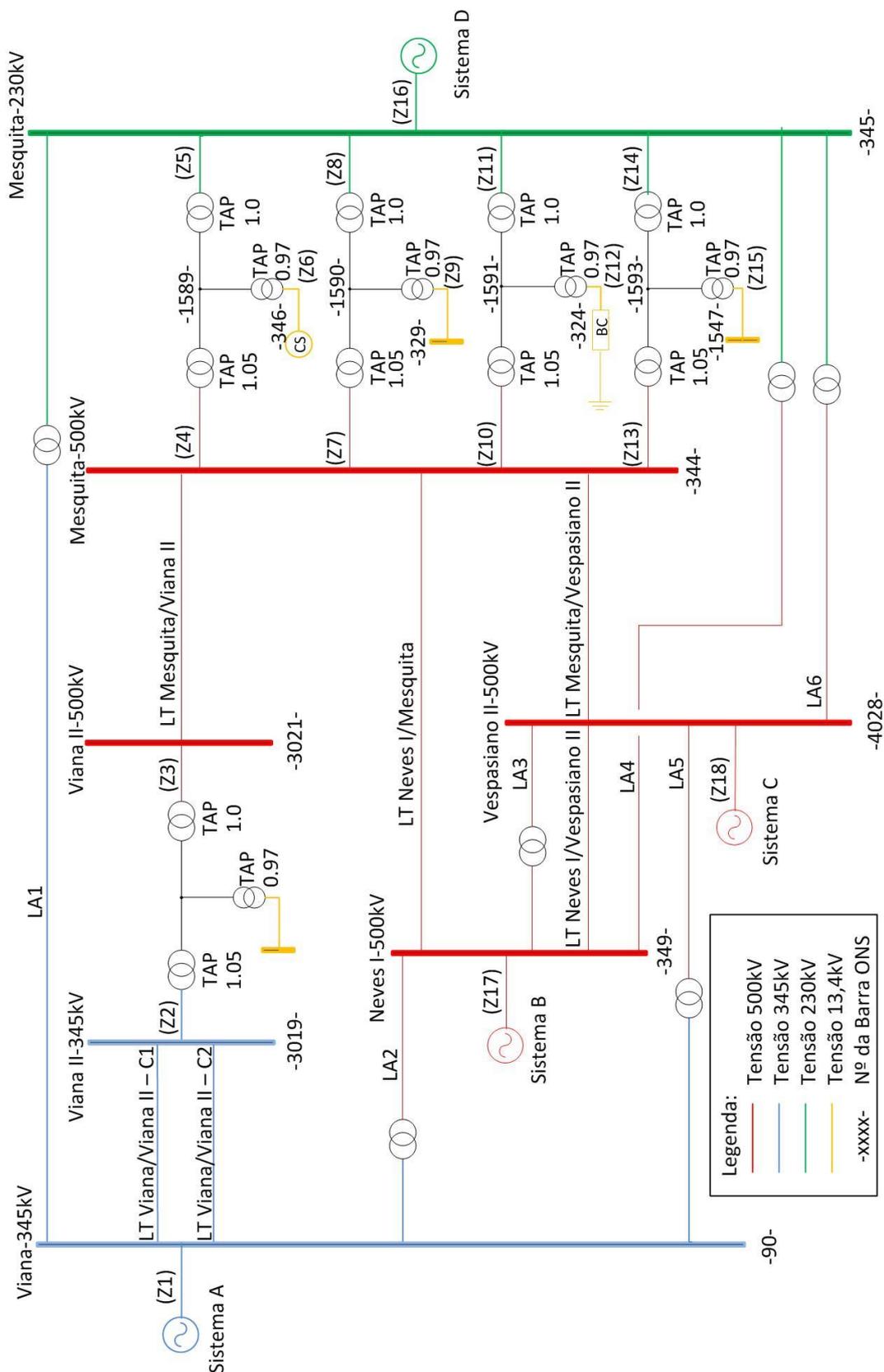
Atualmente, está em construção a linha de transmissão Mesquita - Viana II 500kV, sob responsabilidade de Furnas, que terá por objetivo aumentar a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico do Espírito Santo, além de aumentar a flexibilidade no despacho de energia.

Sua importância está ligada não somente ao fato de ser a linha de maior tensão já construída no estado, mas também pela expectativa de crescimento nos investimentos em geração térmica que se pretende interligar ao SIN através desta.

3.2 Características elétricas da área de estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram obtidos os parâmetros elétricos da área de estudo junto ao ONS. Entretanto, os dados disponibilizados referiam-se à toda a malha do Sistema Elétrico Nacional. Desta forma, foi necessário obter os dados do equivalente externo do sistema nas fronteiras de interesse do programa ANAREDE, conforme apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2: Equivalente externo da região de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o Submódulo 23.3 do ONS é necessário que existam, pelo menos, duas barras entre a barra de fronteira e a barra foco de estudo. Como a barra a ser estudada é Viana II – 500kV, limitou-se a área de estudo do projeto de acordo com o diagrama mostrado na Figura 3.2.

As impedâncias dos elementos descritos na Figura 3.2 são apresentadas na Tabela 3.1, em p.u., na base de 100MVA. Neste sistema, as linhas LA 1, LA 2, LA 3, LA 4, LA 5 e LA 6, são linhas auxiliares criadas na análise dos equivalentes externos que representam a contribuição da interligação do sistema avaliado ao SIN através de outras linhas de transmissão. Vale enfatizar que estas linhas não são elementos reais, mas apenas uma modelagem matemática da interligação externa do sistema de estudo com o SIN.

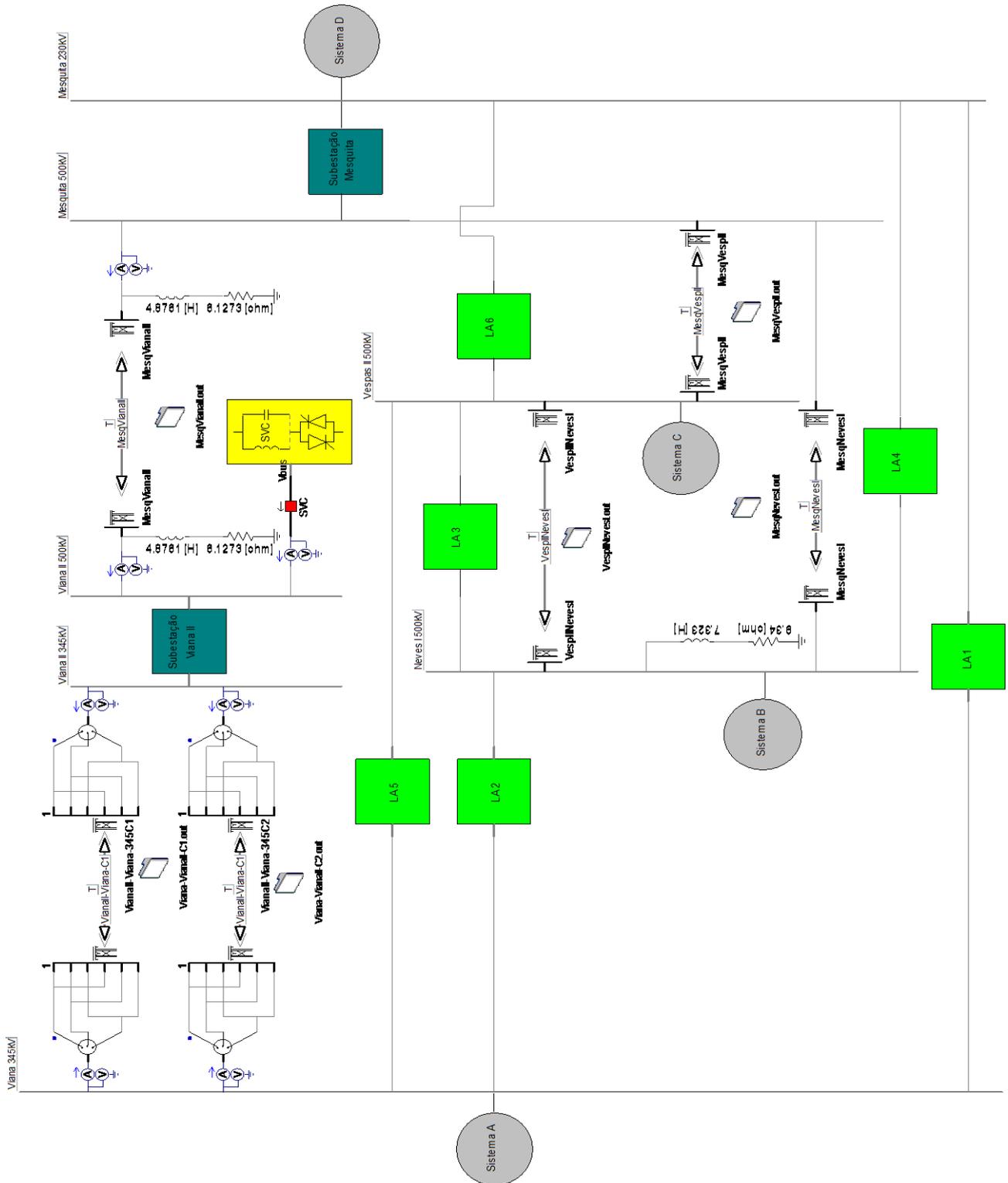
Tabela 3.1: Impedâncias em p.u. do sistema da área em estudo

Imped.	R1	X1	R0	X0
Z1	0,16	1,99	0,07	1,62
Z2	0	0,46	0	0,46
Z3	0	1,1	0	1,1
Z4	0	2,69	0	2,69
Z5	0	-0,22	0	-0,22
Z6	0	23,63	0	7,63
Z7	0	2,69	0	2,69
Z8	0	-0,22	0	-0,22
Z9	0	7,37	0	0
Z10	0	2,69	0	2,69
Z11	0	-0,28	0	-0,28
Z12	0	7,6	0	0
Z13	0	2,69	0	2,69
Z14	0	-0,28	0	-0,28
Z15	0	7,6	0	7,6
Z16	0,43	3,03	0,18	1,64
Z17	0,05	1,18	0,13	1,28
Z18	5,38	24,57	0,03	5,77
LT Viana/Viana II – C1	0,02	0,3	0,24	0,91
LT Viana/Viana II – C2	0,02	0,3	0,24	0,91
LT Mesquita/Viana II	0,21	3,37	2,77	10,16
LT Neves I/Mesquita	1,15	2,41	2,49	9,55
LT Neves I/Vespasiano II	0,02	0,34	0,33	1,27
LT Mesquita/Vespasiano II	0,14	2,1	2,01	7,8
LA 1	37,57	108,27	65657	54298
LA 2	3,02	37	4980,2	5141,9
LA 3	1,46	8,58	11,62	44,55
LA 4	3,78	19,68	233,73	329,91
LA 5	894,73	1780,9	409000	722000
LA 6	418,88	719,93	9503,2	22136

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados da Tabela 3.1 e do diagrama da Figura 3.2, o sistema estudado foi modelado, através do programa PSCAD/EMTDC, como mostrado pela Figura 3.3.

Figura 3.3: Visão geral do sistema equivalente modelado no PSCAD/EMTDC



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo desenvolvido, mostrado na Figura 3.3, apresenta-se dividido em dezessete subsistemas que representam os elementos a seguir:

- Sistema A – Equivalente Elétrico da subestação Viana. Esta é uma região de fronteira com equivalentes externos modelando a interligação desta às subestações de Campos - 345kV e Vitória - 345kV, além da UTE Viana e circuitos ligados ao barramento de 138kV;
- Sistema B – Equivalente Elétrico da subestação Neves I. Esta é uma região de fronteira com equivalentes externos modelando a interligação desta às subestações de Bom Despacho III - 500kV, Barreiro I - 345kV e Sete Lagoas IV - 345kV, além de diversas Usinas Hidrelétricas e Termelétricas, dentre elas, UHE Três Marias, UHE Igarapé, UTE Aureliano Chaves e a outros circuitos de carga ligados ao barramento de 138kV;
- Sistema C – Equivalente Elétrico da subestação Vespasiano II. Esta é uma região de fronteira com equivalentes externos modelando a interligação desta à subestação e circuitos de carga no barramento de 138kV;
- Sistema D – Equivalente Elétrico da interligação da subestação Mesquita - 230kV as linhas Mesquita – Usiminas - 230kV, Mesquita – Ipatinga - 230kV, Mesquita – Timoteo - II, Mesquita - Governador Valadares - 230kV e Mesquita – Baguari - 230kV, bem como a outros circuitos de carga;
- Subestação Mesquita – Bloco que apresenta os equipamentos da subestação de Mesquita, dentre eles, transformadores, banco de capacitores e compensador síncrono;
- Subestação Viana II – Bloco que apresenta os equipamentos da subestação de Viana II, composta basicamente pelo transformador de 900MVA - 500/345kV;
- LT Mesquita-Viana II – Bloco que representa a linha de transmissão Mesquita - Viana II - 500kV - simples;
- LT Viana - Viana II C1 – Bloco que representa o circuito 1 da linha de transmissão Viana - Viana II – 345kV - duplo;
- LT Viana - Viana II C2 – Bloco que representa o circuito 2 da linha de transmissão Viana - Viana II – 345kV - duplo;
- LT Vespasiano II - Neves I – Bloco que representa a linha de transmissão Vespasiano II - Neves I – 500kV - simples;

- LT Vespasiano II - Mesquita – Bloco que representa a linha de transmissão Vespasiano II - Mesquita – 500kV - simples;
- LT Neves I - Mesquita – Bloco que representa a linha de transmissão Neves I - Mesquita – 500kV - simples;
- LA 1, LA 2, LA 3, LA 4, LA 5 e LA 6 – Blocos que representam as linhas auxiliares de interligação da área de estudo ao SIN através de outras linhas de transmissão que não são representáveis no sistema equivalente estudado.

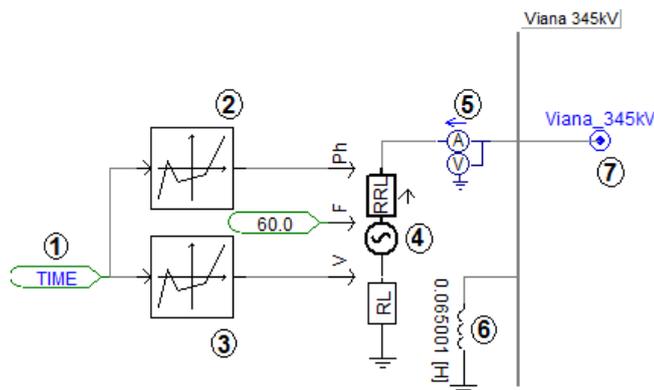
3.2.1 Caracterização dos blocos do Sistema Modelado no PSCAD/EMTDC

Nesta seção é apresentada a modelagem de cada um dos blocos ilustrados na Figura 3.3 e descritos anteriormente.

3.2.1.1 Sistema A

A Figura 3.4 apresenta os componentes utilizados na modelagem do Sistema A, sendo o principal componente a fonte do tipo tensão, ângulo de fase e frequência variável por sinal externo, permitindo ajuste dos sistemas para o carregamento leve, médio e pesado.

Figura 3.4: Sistema A – Região de fronteira Subestação Viana - 345kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3.4 os itens indicados do programa PSCAD/EMTDC representam respectivamente:

Item 1 – “Time Signal Variable” a saída deste bloco é a referência de tempo para a simulação do sistema;

Item 2 – “Non-Linear Transfer Characteristic” este bloco simula funções não lineares. No sistema simulado, este bloco tem respectivamente como sinal de entrada e saída o tempo e o ângulo de fase da fonte;

Item 3 – Idêntico ao Item 2;

Item 4 – “Three-Phase Voltage Source Model 1” fonte com tensão, ângulo e frequência variável e regulados por sinal externo. As impedâncias série de sequência zero e positiva são representadas respectivamente pelos componentes RL e RRL;

Item 5 – “Multimeter” multimedidor virtual. Nesse trabalho monitorando a tensão e corrente RMS, além do fluxo de potência ativa e reativa;

Item 6 – “Inductor” indutor que representa a impedância equivalente do sistema após a região de fronteira.

Item 7 – “External Electrical Node (XNode)” componente que interliga o sinal elétrico dentro do bloco Sistema A ao circuito externo.

A configuração dos itens 2 e 3, mostrados na Figura 3.4, são descritos na Tabela 3.2. Nesta tabela, o eixo x é comum aos dois blocos e representa a variável tempo, enquanto a configuração da variável de saída, de cada bloco, é indicada de forma distinta para o ângulo e módulo de tensão.

Tabela 3.2: Configuração do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic” do PSCAD/EMTDC para o Sistema A

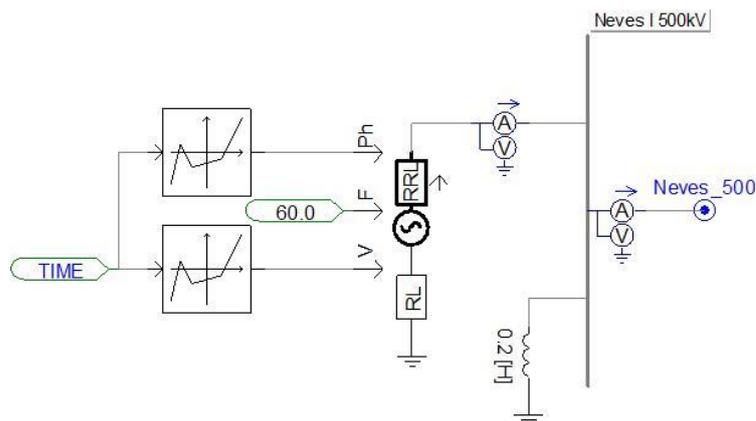
Eixo x	Eixo y – Ângulo (Ph)	Eixo y – Tensão (V)
-2	-48	693
4	-36.7	656.8
4,5	-36.7	656.8
11	-48	693
17	-48	693
19	-99.25	687.8
19,5	-99.25	687.8
22	-48	693
28	-36.7	656.8

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.2 Sistema B

De forma similar ao Sistema A, o Sistema B é mostrado pela Figura 3.5 e a configuração dos blocos dos itens 2 e 3 é mostrada na Tabela 3.3.

Figura 3.5: Sistema B – Região de fronteira Subestação Neves I - 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.3: Configuração do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic” do PSCAD/EMTDC para o Sistema B

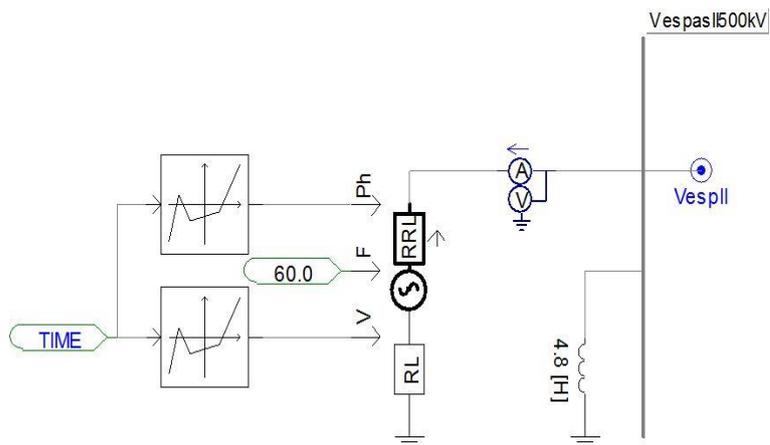
Eixo x	Eixo y – Ângulo (Ph)	Eixo y – Tensão (V)
-2	-17.8	745
4	-18.6	726
4,5	-18.6	726
11	-17.8	745
17	-17.8	745
19	-69.2	751
19,5	-69.2	751
22	-17.8	745
28	-18.6	726

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.3 Sistema C

De forma similar ao Sistema A, o Sistema C é mostrado pela Figura 3.6 e a configuração dos blocos dos itens 2 e 3 é mostrada na Tabela 3.4.

Figura 3.6: Sistema C – Região de fronteira Subestação Vespasiano II - 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.4: Configuração do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic Characteristic” do PSCAD/EMTDC para o Sistema C

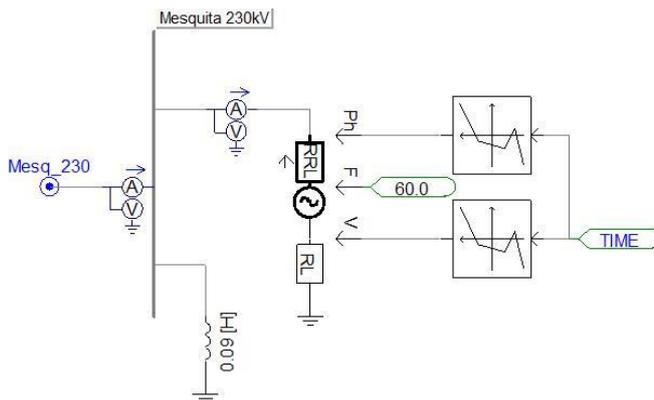
Eixo x	Eixo y – Ângulo (Ph)	Eixo y – Tensão (V)
-2	-57.8	690
4	-42.5	736
4,5	-42.5	736
11	-57.8	690
17	-57.8	690
19	-108	740.9
19,5	-108	740.9
22	-57.8	690
28	-42.5	736

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.4 Sistema D

De forma similar ao Sistema A, o Sistema D é mostrado pela Figura 3.7 e a configuração dos blocos dos itens 2 e 3 é mostrada na Tabela 3.5.

Figura 3.7: Sistema D – Região de fronteira Subestação Mesquita - 230kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.5: Configuração do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic Characteristic” do PSCAD/EMTDC para o Sistema D

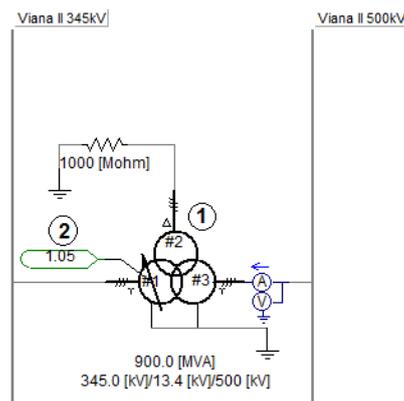
Eixo x	Eixo y – Ângulo (Ph)	Eixo y – Tensão (V)
-2	-43.55	338.1
4	-38.87	325.65
4,5	-38.87	325.65
11	-43.55	338.1
17	-43.55	338.1
19	-99	344.6
19,5	-99	344.6
22	-43.55	338.1
28	-38.87	325.65

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.5 Subestação Viana II

A Figura 3.8 ilustra os componentes do bloco da Subestação Viana II – 500kV, tendo 01 transformador de 03 enrolamentos 900 MVA 500/345kV.

Figura 3.8: Bloco Subestação Viana II



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3.8 os itens indicados do programa PSCAD/EMTDC representam respectivamente:

Item 1 – “3-Phase 3-Winding Transformer” transformador de trifásico de três enrolamentos. Na simulação do sistema para representar uma das fases abertas será utilizado uma resistência elevada;

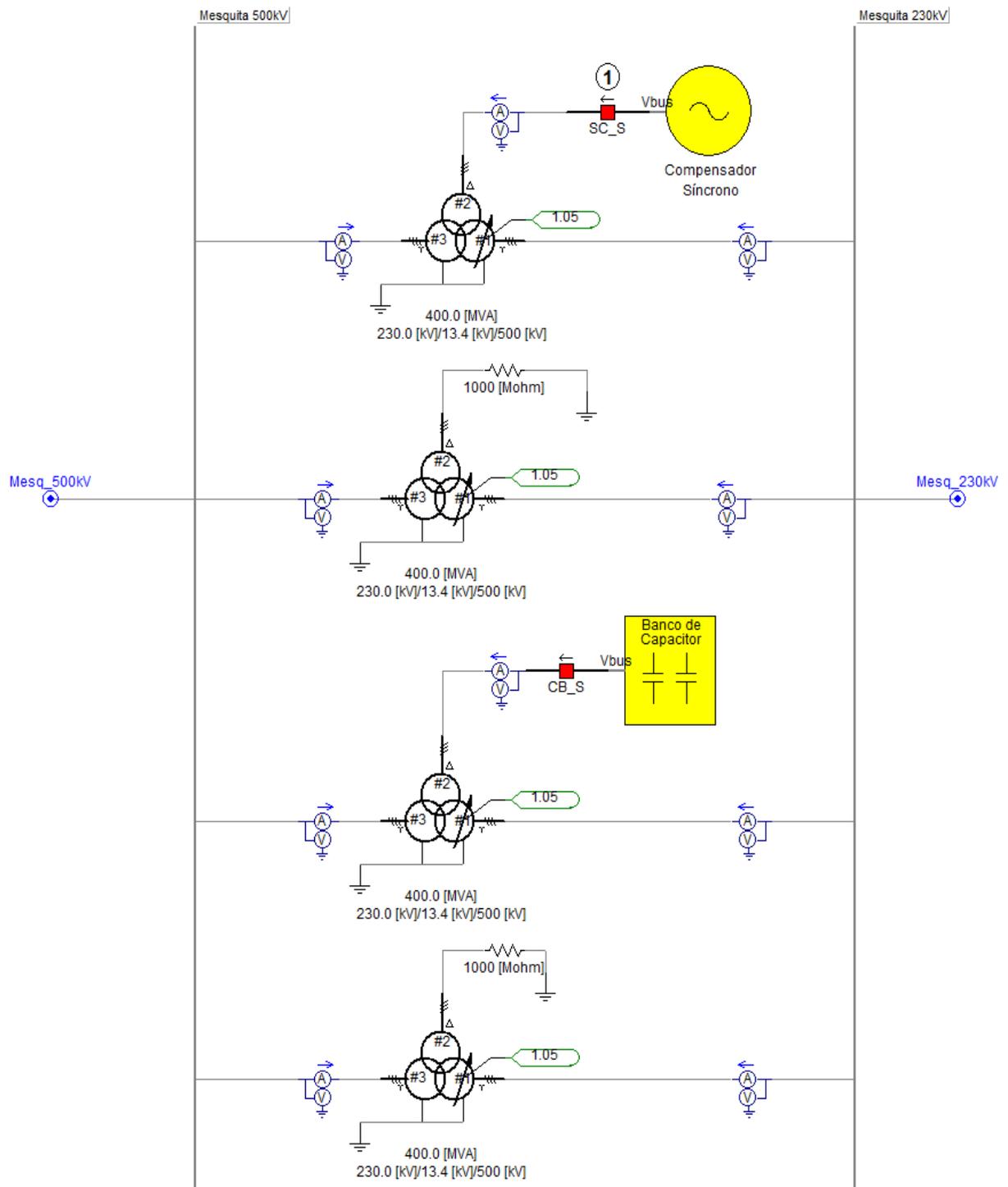
Item 2 – “Tap” de ajuste de tensão do transformador.

3.2.1.6 Subestação Mesquita

A Figura 3.9 ilustra o bloco Subestação Mesquita, o qual conta com os seguintes componentes:

- 04 bancos de capacitores de 28,8 Mvar - 13,8kV;
- 01 compensador síncrono 100/-60 Mvar - 13,4kV;
- 04 transformadores de 03 enrolamentos 400 MVA - 500/230kV;

Figura 3.9: Subestação de Mesquita – 500/230kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3.9 os itens indicados do programa PSCAD/EMTDC representam respectivamente:

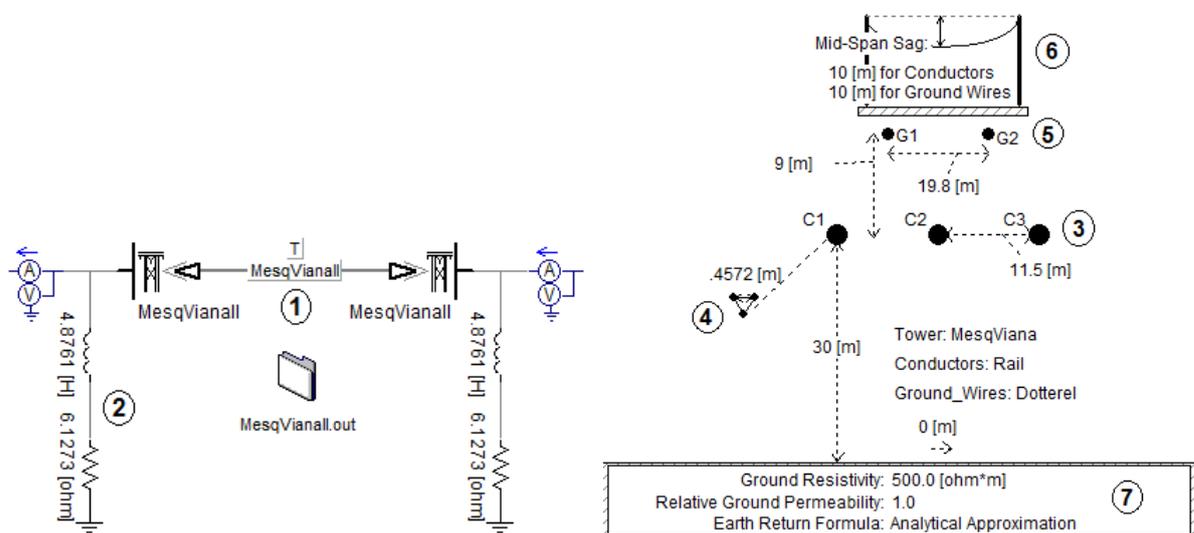
Item 1 – “Three-Phase Breaker” disjuntor trifásico.

3.2.1.7 Linha de Transmissão Mesquita - Viana II – 500kV

A Figura 3.10 ilustra a modelagem da linha de transmissão Mesquita - Viana II 500kV no modelo de parâmetros distribuídos, a qual foi obtida a partir dos dados construtivos da linha, que estão apresentados no Anexo A.1, e descritos a seguir:

- Comprimento 248 km;
- Circuito simples;
- Cabos condutores do tipo “Rail” (CAA 954 kCM) dispostos em feixes de três condutores por fase;
- Cabo para-raios do tipo “Dotterel”;
- Potência da linha 900MVA;
- Capacidade de operação de longa duração (CPST) 2400A;
- Capacidade de operação de curta duração (CPST) 3050A;
- 01 reator de linha de linha em derivação de 136 Mvar - 500kV em seus extremos.

Figura 3.10: Linha de transmissão Mesquita - Viana II – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3.10 os itens indicados do programa PSCAD/EMTDC representam respectivamente:

Item 1 – “T-Line” linha de transmissão com parâmetros distribuídos;

Item 2 – “Inductor” e “Resistor” são blocos que representam respectivamente um indutor e resistor de valores fixos. Na simulação, representam o reator de linha desta subestação;

Item 3 – Parâmetros dos condutores de fase na linha de transmissão, as cotas representam o espaçamento entre as fases e entre fase e o solo;

Item 4 – Espaçamento entre os condutores da mesma fase na linha de transmissão;

Item 5 – Parâmetros dos condutores para-raios na linha de transmissão, as cotas representam o espaçamento entre os condutores para-raios e entre para-raios e fase;

Item 6 – Parâmetro de flecha dos condutores fase e para-raios;

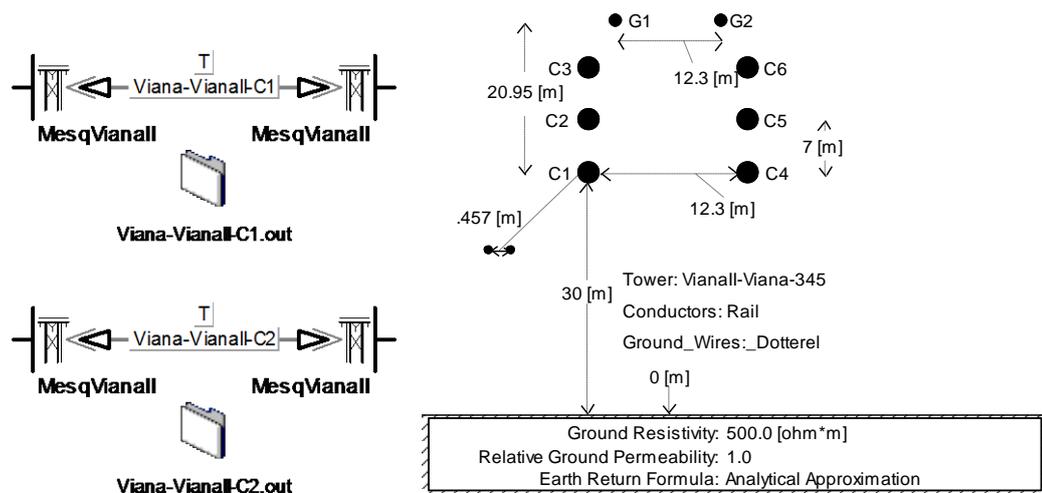
Item 7 – Parâmetros de resistividade e permeabilidade do solo sob a linha de transmissão.

3.2.1.8 Linha de Transmissão Viana - Viana II – 345kV

A Figura 3.11 ilustra a modelagem da linha de transmissão Viana - Viana II - 345kV C1 e C2 no modelo de parâmetros distribuídos, a qual foi obtida a partir dos dados construtivos da linha, que estão apresentados no Anexo A.3, e descritos a seguir:

- Comprimento 10 km;
- Circuito duplo;
- Cabos condutores do tipo “Rail” (CAA 954 kCM) dispostos em feixes de dois condutores por fase;
- Cabo para-raios do tipo “Dotterel”;
- Capacidade de operação de longa duração (CPST) 1600A;
- Capacidade de operação de curta duração (CPST) 2020A.

Figura 3.11: Linha de transmissão Mesquita - Viana II – 345kV



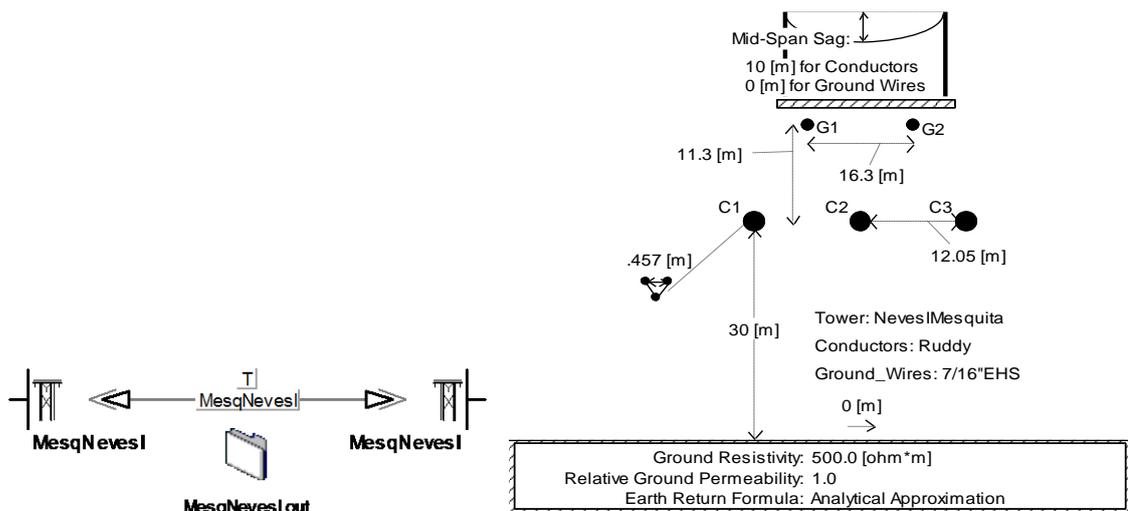
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.9 Linha de Transmissão Mesquita - Vespasiano II – 500kV

A Figura 3.12 ilustra a modelagem da linha de transmissão Mesquita/Vespasiano II 500kV no modelo de parâmetros distribuídos, a qual foi obtida a partir dos dados construtivos da linha, que estão apresentados no Anexo A.2, e descritos a seguir:

- Comprimento 150,15 km;
- Circuito simples;
- Cabos condutores do tipo “Ruddy” dispostos em feixes de três condutores por fase;
- Cabo para-raios do tipo 7/16” EHS;
- Capacidade de operação de longa duração (CPST) 2820A;
- Capacidade de operação de curta duração (CPST) 3000A.

Figura 3.13: Linha de transmissão Neves I – Mesquita - 500kV



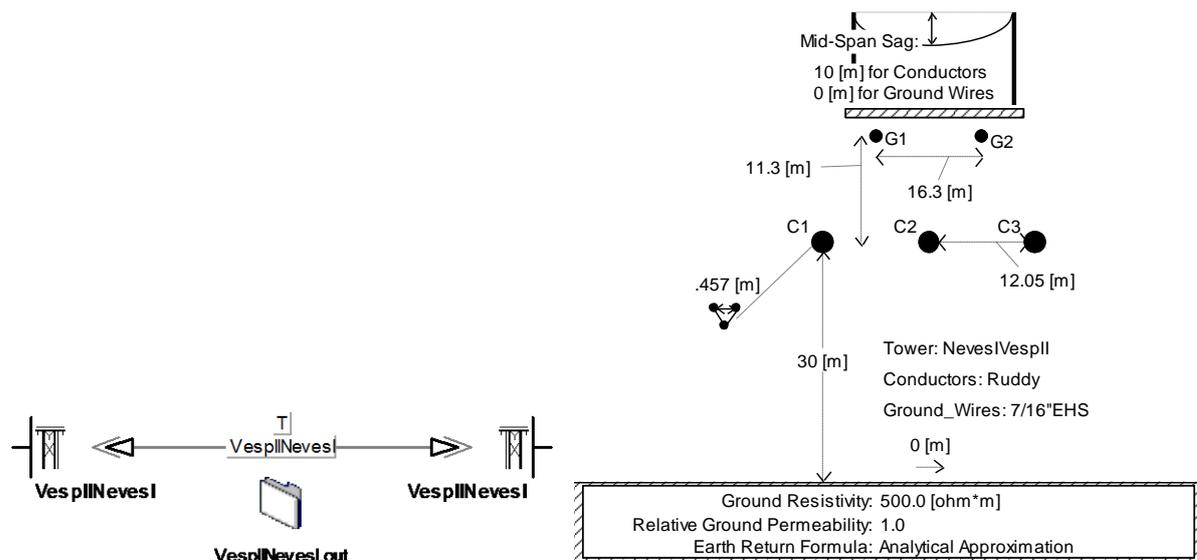
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.11 Linha de Transmissão Neves I - Vespasiano II – 500kV

A Figura 3.14 ilustra a modelagem da linha de transmissão Neves I - Vespasiano II - 500kV no modelo de parâmetros distribuídos, a qual foi obtida a partir dos dados construtivos da linha, que estão apresentados no Anexo A.2, e descritos a seguir:

- Comprimento 25,4 km;
- Circuito simples;
- Cabos condutores do tipo “Ruddy” dispostos em feixes de três condutores por fase;
- Cabo para-raios do tipo 7/16”EHS;
- Capacidade de operação de longa duração (CPST) 2820A;
- Capacidade de operação de curta duração (CPST) 3000A.

Figura 3.14: Linha de transmissão Neves I - Vespasiano II - 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Validação do sistema simulado

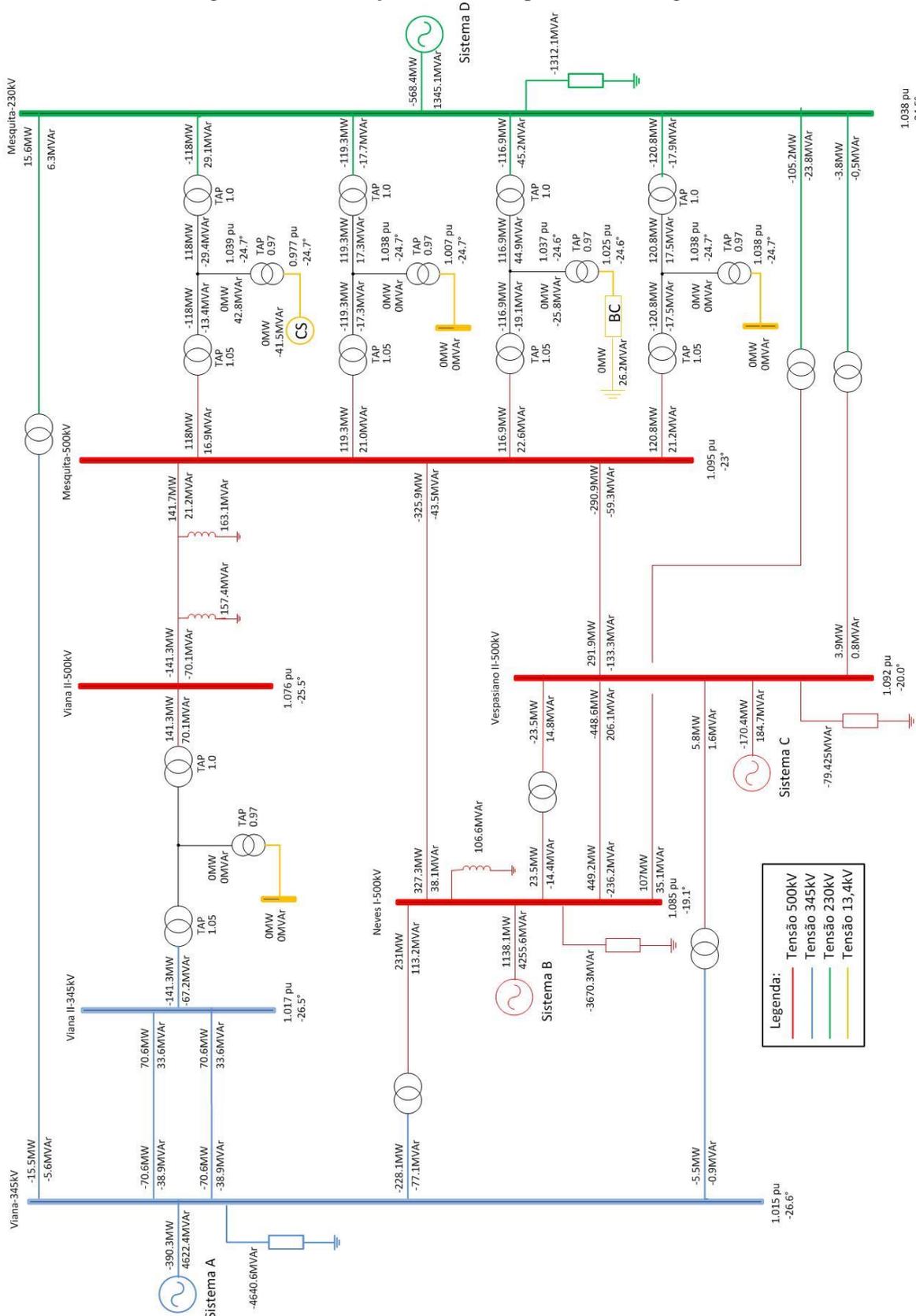
Através do ONS, foram obtidos os casos de referência utilizados para o estudo de fluxo de potência, dentro do horizonte do Plano de Ampliações e Reforços da rede básica (PAR), para os anos de 2014 a 2016 (ONS, 2013a).

A partir destes dados foi simulado o comportamento do sistema considerando o cenário apresentado pelo ONS para os regimes de carga leve, média e pesada do mês de junho de 2015.

As Figuras 3.15 à 3.17 apresentam os resultados de simulação obtidos a partir do programa ANAREDE. Nas figuras é possível identificar os valores de amplitude e de ângulo de fase das tensões nas barras, bem como o fluxo de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão e demais elementos do sistema estudado.

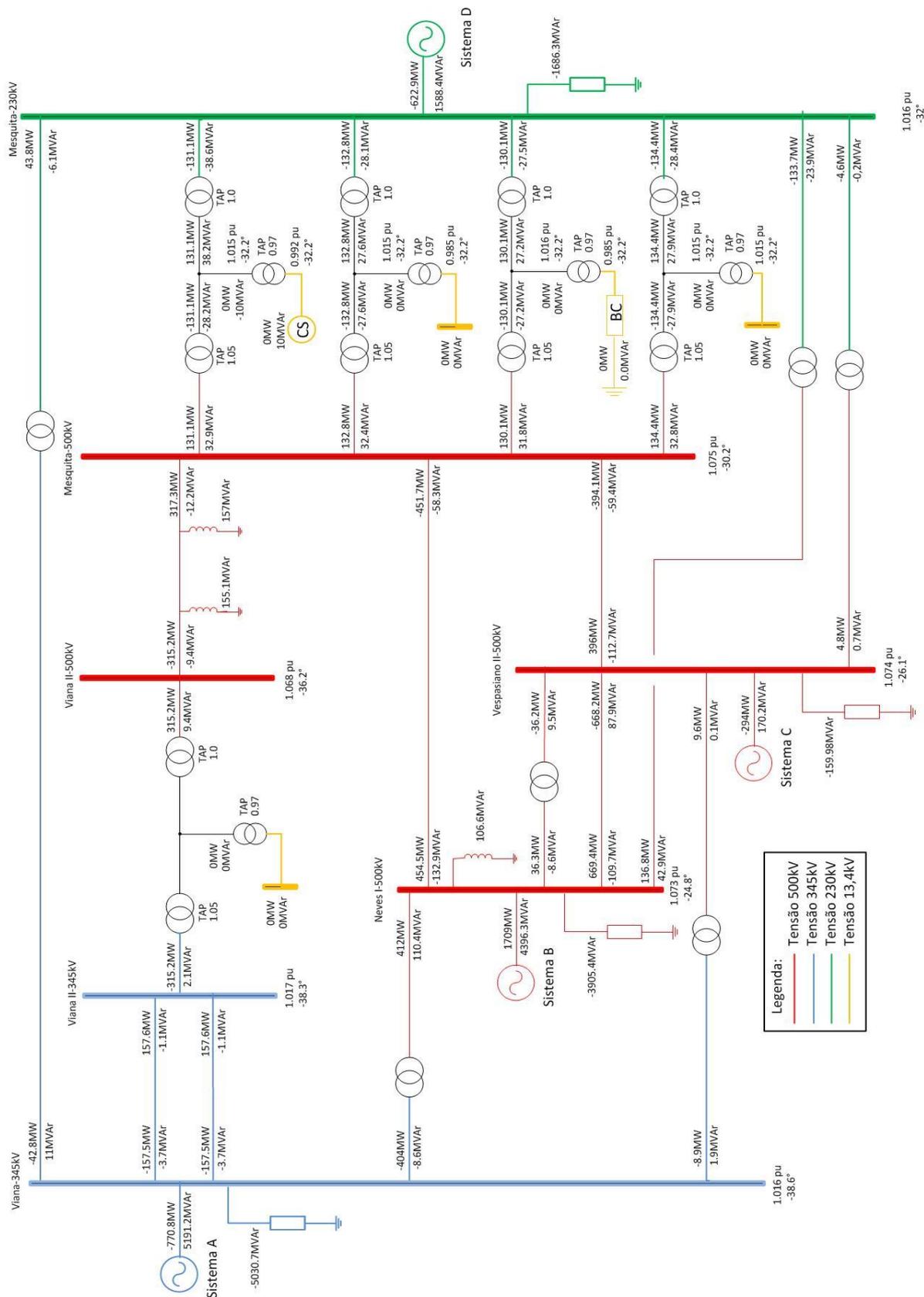
Todos os valores encontram-se em p.u., sendo que, a barra da SE Mesquita – 500kV foi usada como referência; e a potência base de todo o sistema é de 100MVA. Com relação ao fluxo de potência, o mesmo é considerado positivo quando sai dos geradores ou das barras. Caso contrário, o mesmo é considerado negativo.

Figura 3.15: Simulação do fluxo de potência em carga leve



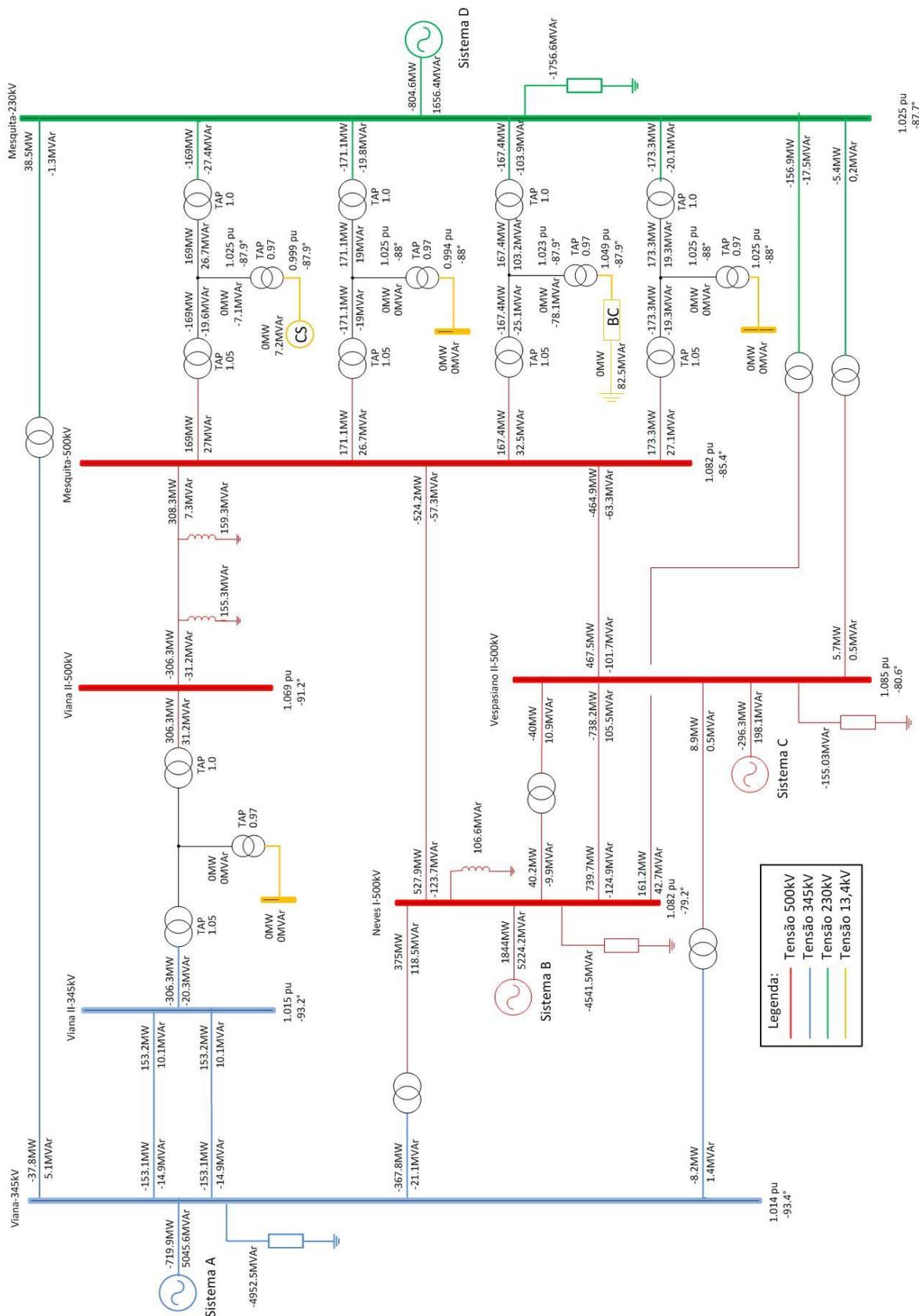
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.16: Simulação do fluxo de potência em carga média



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.17: Simulação do fluxo de potência em carga pesada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de validar o sistema modelado no programa PSCAD/EMTDC foram simulados os cenários disponibilizados pelo ONS e reduzidos no ANAREDE. Para ajustar os valores de fluxo de potência e tensão nos barramentos adequou-se os valores de tensão nos terminais do gerador “Three-Phase Voltage Source Model 1”, de forma a se ter valores próximos aos obtidos no ANAREDE. As Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam alguns dos valores obtidos na simulação com a equação (3.1), com seus respectivos erros percentuais em relação aos dados do ONS, no barramento Viana II – 500kV.

Tabela 3.6: Intervalos Comparação da tensão e dos fluxos de potência obtidos para a Barra Viana II-500kV, no cenário de carga pesada.

Componente	Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa (Mvar)	Tensão Mód./Âng. (pu / °)
Valores fornecidos pelo NOS			
LT Mesquita/Viana II	306,4	31,2	-
Shunt Equivalente	0	155,3	-
Barra Viana II	-	-	1,069/ -91,2°
Valores simulados utilizando o modelo proposto			
LT Mesquita/Viana II	316,4	22,4	-
Shunt Equivalente	0	155	-
Barra Viana II	-	-	1,069/ -88,2°

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$erro_{SIMULAÇÃO} = \frac{Parâmetro_{ONS} - Parâmetro_{SIMULADO}}{Parâmetro_{ONS}} \times 100 (\%) \quad (3.1)$$

Tabela 3.7: Erros percentuais entre valores simulados e valores fornecidos pelo ONS na Barra Viana II -500kV para cenário de carga pesada.

Componente	Pot. Ativa	Pot. Reativa	Tensão Mód./Âng.
LT Mesquita/Viana II	-3%	28%	-
Shunt Equivalente	0%	0%	-
Barra Viana II	-	-	-5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Apêndice A apresenta a tabela de comparação completa do sistema para todas as barras e linhas de transmissão, e conforme apresentado nestas tabelas os valores de tensão e ângulo nas barras e dos principais fluxos de potência ativa e reativa nas principais linhas apresentaram percentuais e valores absolutos razoáveis para validação do modelo utilizado.

Na comparação dos itens avaliados, dos 381 parâmetros 118 ficaram com diferença percentual acima de 10%. A maioria destas diferenças foram observadas nas linhas auxiliares LA 1 à LA 6, as quais foram geradas a partir das matrizes de redução para os equivalentes externos do sistema, não representando linhas físicas reais. Dentre os dispositivos físicos reais do sistema (linhas, barras, transformadores, reatores, compensador síncrono e banco de capacitores) apenas 61 parâmetros apresentaram diferença percentual acima de 10% do valor simulado pelo ANAREDE.

A análise do erro do fluxo de potência ativa e reativa com base no valor absoluto do fluxo de potência aparente através do sistema, de acordo com as equações (3.2) e (3.3) reduzirá o número de parâmetros com erro acima de 10%, dos parâmetros totais de 118 para 96, e nos dispositivos físicos reais de 61 para 45.

$$erro_{PLinha} = \frac{PLinha_{ONS} - PLinha_{SIMULADO}}{|SLinha_{ONS}|} \times 100 (\%) \quad (3.2)$$

$$erro_{QLinha} = \frac{QLinha_{ONS} - QLinha_{SIMULADO}}{|SLinha_{ONS}|} \times 100 (\%) \quad (3.2)$$

Desta forma, conclui-se que o modelo proposto pode ser considerado válido para as análises e comparações desenvolvidas neste trabalho.

3.4 Modelagem da carga ao longo do dia

Os dados disponibilizados pelo ONS para avaliação do fluxo de potência são classificados em períodos leve, médio e pesado, além da condição de carga na ponta e fora de ponta. Estas classificações estão relacionadas respectivamente com as características de carregamento do sistema e o período ao longo do dia. As Tabelas 3.8 e 3.9 apresentam o intervalo de horário e as condições da carga demandada.

Tabela 3.8: Intervalos de horários de carga e demandada

Condição de Carga	Sem horário de verão		Com horário de verão	
	2ª feira à sábado	Dom/feriado	2ª feira à sábado	Dom/feriado
Ponta	17:00 às 22:00h	-	18:00 às 23:00h	-
Fora de Ponta	00:00 às 17:00h 22:00 às 24:00h	00:00 às 24h	00:00 às 18:00h 23:00 às 24:00h	00:00 às 24h

Fonte: ONS, (2009).

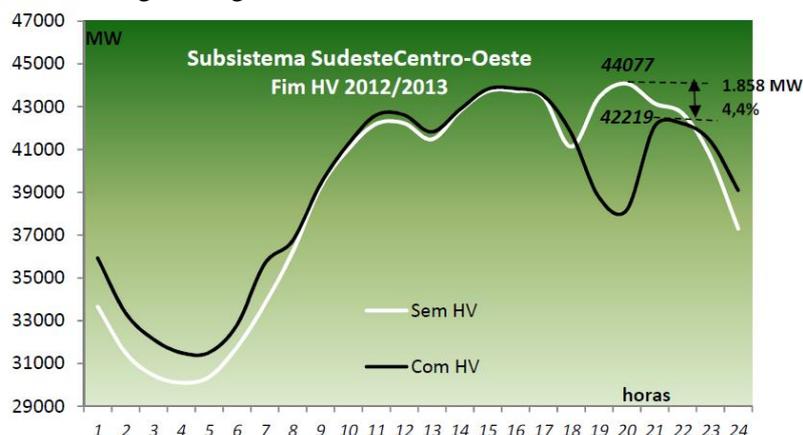
Tabela 3.9: Intervalos horários dos patamares de carga de energia

Patamar de carga	Sem horário de verão		Com horário de verão	
	2ª feira à sábado	Dom/feriado	2ª feira à sábado	Dom/feriado
Pesada	18:00 às 21:00h	-	19:00 às 22:00h	-
Média	07:00 às 18:00h 21:00 às 24:00h	17:00 às 22:00h	07:00 às 19:00h 22:00 às 24:00h	18:00 às 23:00h
Leve	00:00 às 07:00h	00:00 às 17:00h 22:00 às 24:00h	00:00 às 07:00h	00:00 às 18:00h 23:00 às 24:00h

Fonte: ONS, (2009).

A fim de modelar a carga do sistema como uma carga variável ao longo do dia de acordo com os três patamares de carga definidos pelo ONS, observou-se o comportamento da carga na região sudeste e centro-oeste no período 2012/13, também obtido do próprio ONS. Desta maneira o sistema modelado, nas seções anteriores, para as três condições pontuais foi adequado a uma modelagem com variação contínua ao longo do dia nas demais seções do trabalho. A Figura 3.18 apresenta o comportamento da carga real obtido através do ONS com e sem horário de verão (HV).

Figura 3.18: Curva de carga na região Sudeste/Centro-Oeste com e sem o horário de verão (HV)

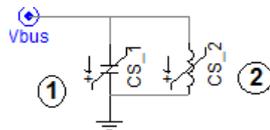


Fonte: ONS, (2013b).

3.5 Modelagem do compensador síncrono e do banco de capacitores

As potências reativas geradas pelo banco de capacitores e pelo compensador síncrono da subestação de Mesquita também foram disponibilizadas em momentos pontuais de carga leve, média e pesada. Desta forma, para tornar a potência destes dispositivos dinâmica ao longo do dia, estes foram modelados com sistemas de controle do tipo PI que foram ajustados para tentar manter a tensão no barramento da subestação em parâmetros pré-determinados como referência. Além disso, a malha de controle do compensador síncrono foi ajustada para apresentar o tempo de resposta com as mesmas características do compensador síncrono, ou seja, com tempo de resposta para uma constante de inércia $H_m=1s$ (SOUZA, 2003). As Figuras 3.19, 3.20 e 3.21 ilustram respectivamente os sistemas do bloco compensador síncrono, banco de capacitores e o controle elaborado.

Figura 3.19: Compensador Síncrono modelado



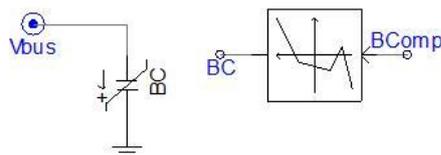
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura acima os itens indicados do programa PSCAD/EMTDC representam respectivamente:

Item 1 – “Variable C” capacitor variável;

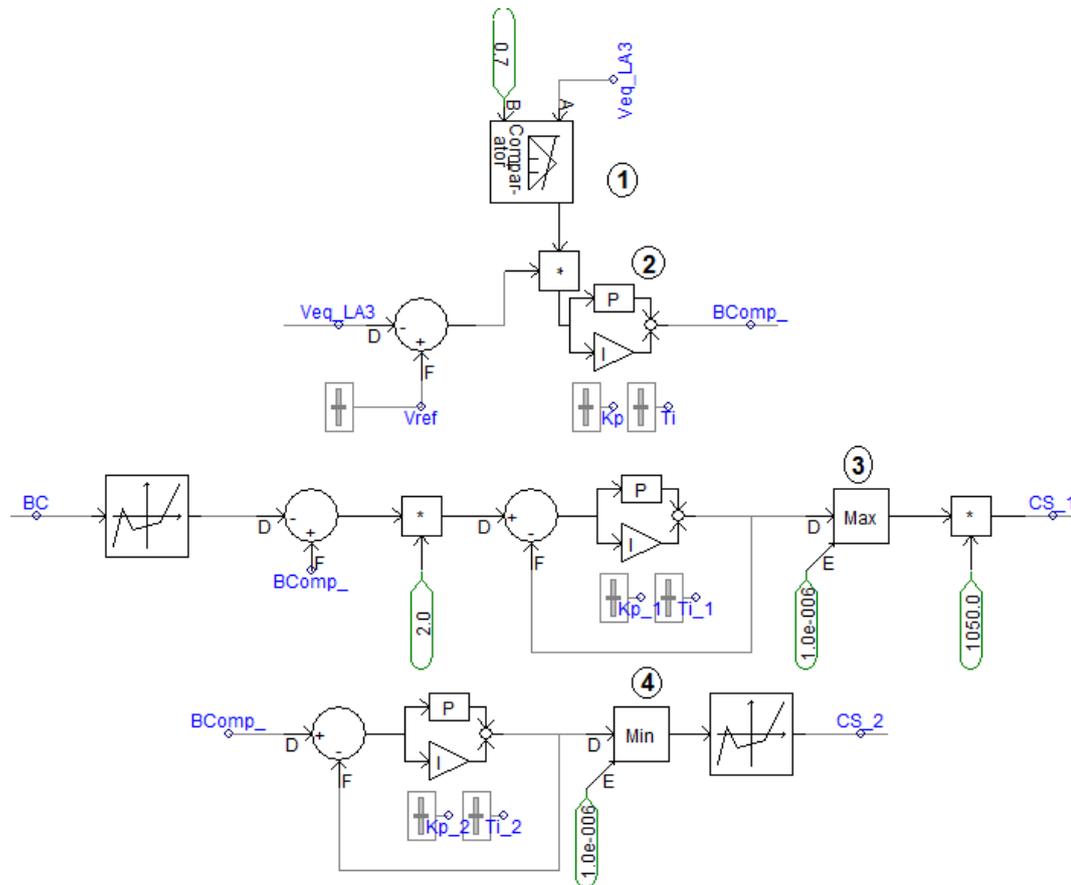
Item 2 – “Variable L” indutor variável.

Figura 3.20: Banco de Capacitores modelado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.21: Malha de controle do banco de capacitores e compensador síncrono



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3.21 os itens indicados do programa PSCAD/EMTDC representam respectivamente:

Item 1 – “Two Input Comparator” compara o sinal na porta A com a B, caso A seja maior ou menor do que B, resulta em diferentes sinais de saída pré-determinados. Neste trabalho se A for menor do que 0,7 a saída tem valor 0 e se for maior será 1;

Item 2 – “PI Controller” bloco de controle proporcional e integrador;

Item 3 – “Maximum Function” bloco que permite apenas a saída de sinais acima do valor de referência na entrada E;

Item 4 – “Minimum Function” bloco que permite apenas a saída de sinais abaixo do valor de referência na entrada E.

No sistema de controle desenvolvido a tensão do barramento de Mesquita - 500kV (V_{eq_LA3}) é comparada com a tensão de referência, e a partir disto é gerado o sinal de controle $BComp_$, que comanda o banco de capacitores da subestação. A partir do valor de referência do banco de capacitores (V_{eq_LA3}), e do real valor de saída do banco de capacitores (BC), é definido o valor de reativos injetado pelo compensador síncrono, através dos sinais (CS_1) e (CS_2), os quais, respectivamente, determinam a injeção de reativos capacitivos e indutivos do compensador síncrono.

3.6 Resumo

Neste capítulo foi apresentada a área de localização do sistema elétrico analisado no Estado do Espírito Santo com suas interligações eletroenergéticas. Com base nestas características e nos parâmetros do sistema fornecidos pelo ONS foi elaborado e validado o modelo do sistema proposto através do programa PSCAD/EMTDC. Desta forma, obteve-se uma planta de simulação a partir da qual foi possível realizar o estudo dos efeitos originados pela inserção do dispositivo SVC no sistema, conforme mostrado nos próximos capítulos do trabalho.

Capítulo 4: Modelagem do SVC

Este capítulo descreve a metodologia de dimensionamento do SVC e os modelos dos dispositivos (TSC, TCR e Filtro) desenvolvidos no software PSCAD/EMTDC, conforme base teórica apresentada no Capítulo 2. Além disso, apresenta-se alguns casos reais desenvolvidos pelas empresas ABB e Alstom para comparação dos valores aplicados neste trabalho.

4.1 Metodologia de dimensionamento do SVC

Antes do dimensionamento do SVC, foi simulado o comportamento do sistema estudado sem a sua utilização, atendendo os perfis de carga leve, média e pesada apresentados no capítulo anterior. Desta forma, pôde-se verificar que a tensão na barra Viana II – 500kV varia, ao longo do dia, entre os limites de 1,032 e 1,092pu.

Com isso, avaliou-se a inserção do SVC com valores variados para manter o perfil de tensão do barramento da subestação de Viana II fixo, ao longo do dia, com a possibilidade de ajuste entre os valores máximo e mínimo citados. Desta maneira, o SVC foi dimensionado para a faixa de operação de tensão regulada entre 1,02 e 1,06pu conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Faixa de operação SVC dimensionado

Característica	Q_{SVC} [MVA]	Q_{TCR} [MVA]	Q_{TSC} [MVA]	Q_{Filtro} [MVA]
Capacitiva	150	0	120	30
Indutiva	- 350	- 380	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 4.2 apresenta alguns valores comerciais de projetos de SVC desenvolvidos pela empresa ABB em diversos países, para sistemas com tensão na faixa de 500kV. Comparando-se os valores utilizados neste trabalho (Tabela 4.1) com os valores comerciais praticados pela ABB (Tabela 4.2) para sistemas na mesma classe de tensão que o sistema estudado, pode-se observar que os valores propostos neste trabalho estão dentro da faixa praticada comercialmente.

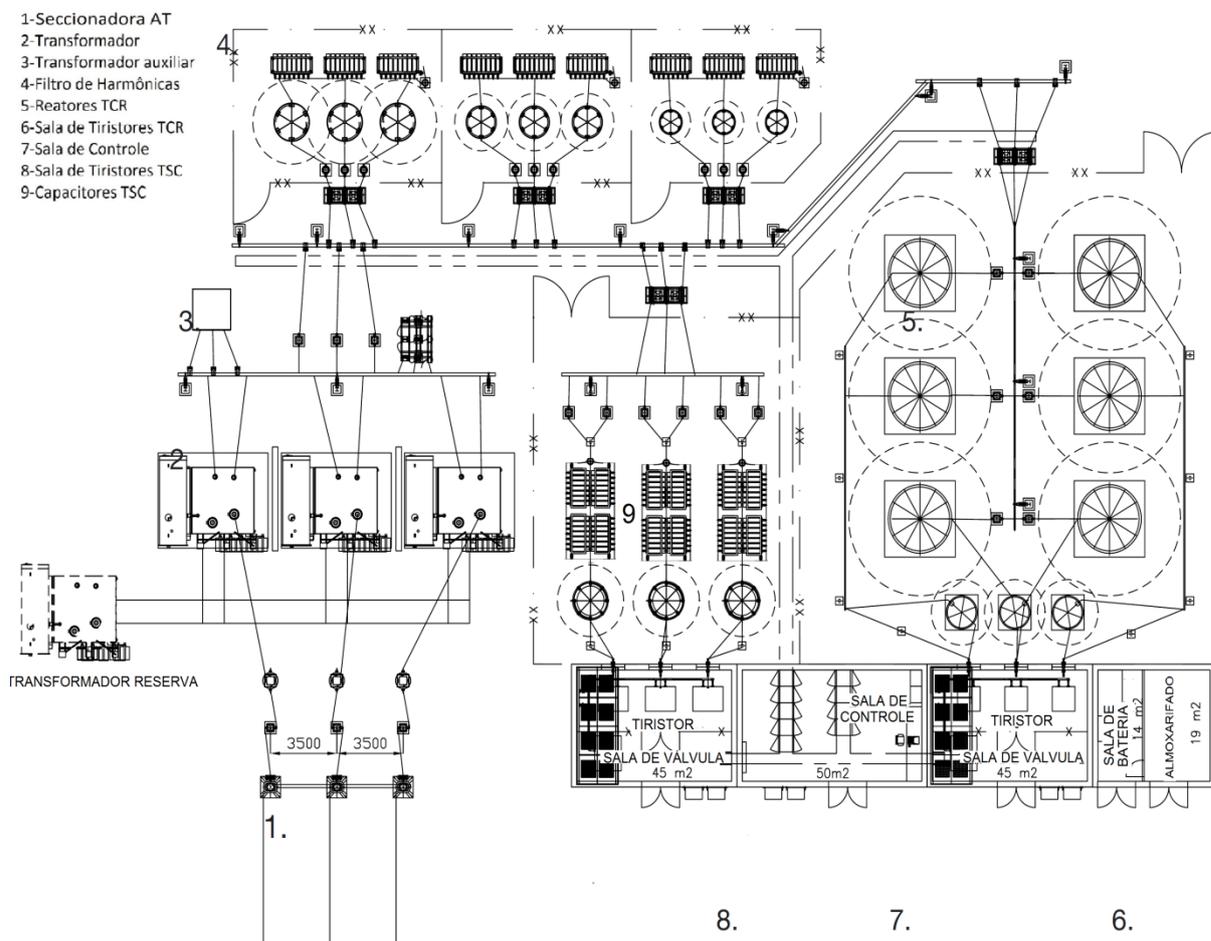
Tabela 4.2: SVC desenvolvidos pela ABB

Ano	Tipo	Cliente	Projeto, País	Potência [Mvar]	Configuração	Esquema
2009	SVC	Abengoa	Tucuruí- Manaus (Lote C), Brasil	400	500kV SVC faixa de -200/200 Mvar	TCR/ TSC/ FC
2006	SVC	Allegheny Power	Black Oak, USA	720	500kV SVC, faixa de -145/575 Mvar	TCR/ TSC/ FC
1992	SVC	Northern States Power	Forbes, USA	850	500kV SVC, faixa de -450/400 Mvar	TCR/ TSC
1986	SVC	CNTIC	Dalian, China	285	500kV SVC, faixa de -90/195 Mvar	TCR/ FC
1981	SVC	Servicios Eléctricos del Gran Buenos Aires (SEGBA)	Rodriguez 2, Argentina	426	500kV SVC, faixa de -266/160 Mvar	TCR/ TSC
1981	SVC	Servicios Eléctricos del Gran Buenos Aires (SEGBA)	Rodriguez 1, Argentina	426	500kV SVC, faixa de -266/160 Mvar	TCR/ TSC
1980	SVC	CNTIC	Wu Han 2, China	140	500kV SVC, faixa de -20/120 Mvar	TCR/ TSC
1980	SVC	CNTIC	Wu Han 1, China	140	500kV SVC, faixa de -20/120 Mvar	TCR/ TSC

Fonte: ABB, (2012).

A Figura 4.1 ilustra o layout básico de um SVC desenvolvido pela empresa Alstom, ilustrando a área das salas de equipamentos de uma planta de SVC típica.

Figura 4.1: Layout básico do SVC do tipo TCR-TSC-FC



Fonte: ALSTOM, (2007).

4.2 Modelo do SVC

O modelo do SVC usado neste trabalho é um conjunto formado por 1 TCR, 2 TSC's e 1 filtro de harmônicas, cuja configuração é ilustrada na Figura 4.2.

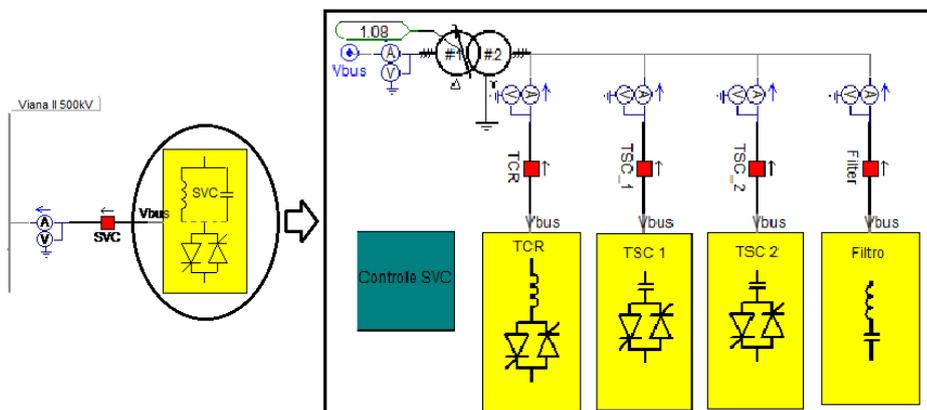
Para o dimensionamento do TSC e TCR deste trabalho foram realizadas seguidas simulações do sistema com o objetivo de ajustar o fluxo de reativos necessários para o controle do perfil de tensão na barra de Viana – II - 500kV. Além disso, para o dimensionamento dos filtros de harmônicas foram utilizadas as equações a seguir (DOMINGOS, 2011):

$$x_{eqfiltro} = x_{L1} - x_{C1} \quad (4.1)$$

$$x_{C1} = \frac{V_{1ef}^2}{Q_{comp}} \quad (4.2)$$

$$i^2 = \frac{X_{c1}}{x_{L1}} \tag{4.3}$$

Figura 4.2: SVC aplicado na barra Viana II



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da metodologia descrita anteriormente, os parâmetros elétricos deste SVC foram dimensionados e estão descritos na Tabela 4.3.

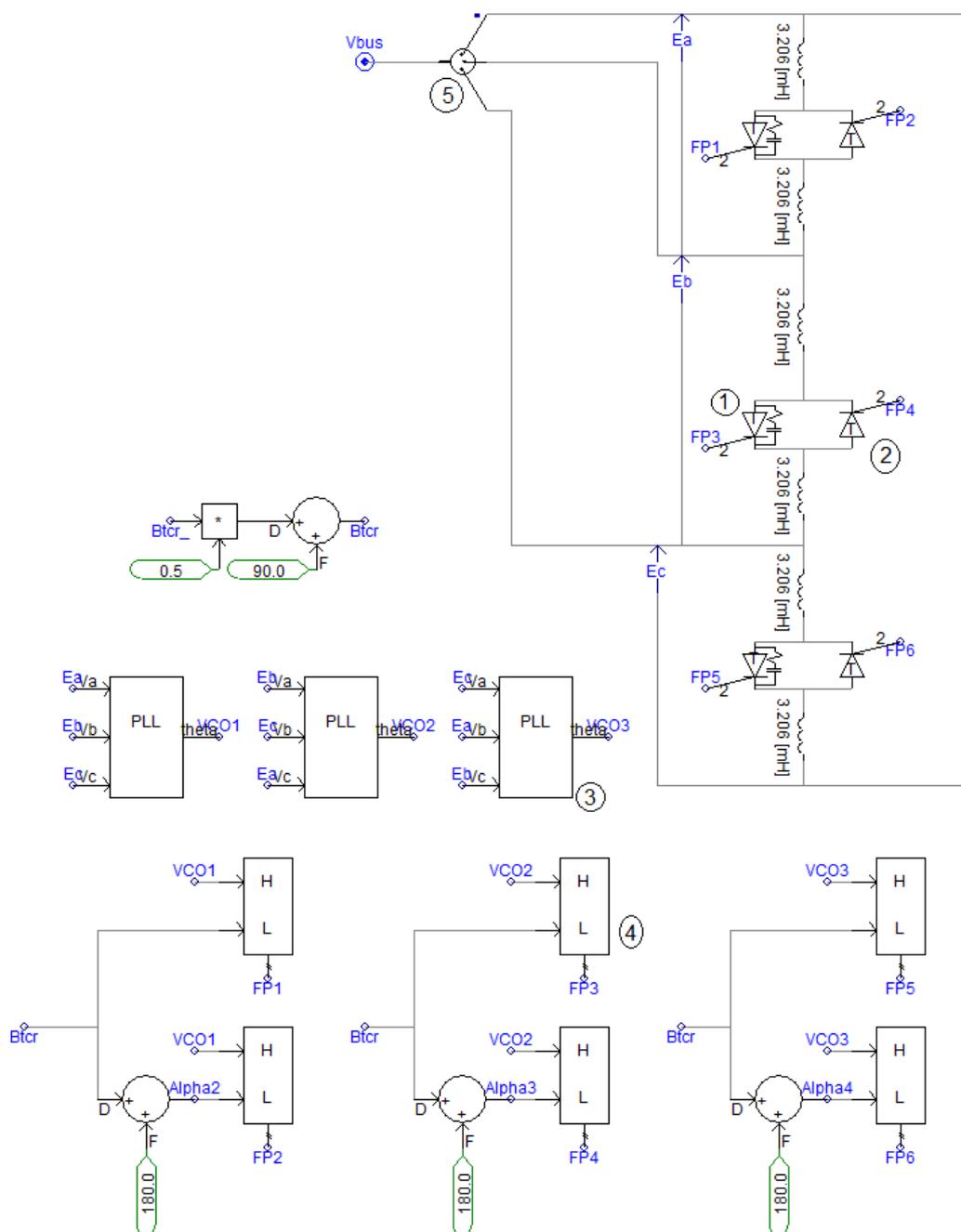
Tabela 4.3: Parâmetros do SVC dimensionado

Dispositivo	Indutância ou capacitância	Tensão nominal (kV)
L_{TCR}	6,41m H	17,5
C_{TSC}	173,23μ F	17,5
L_{TSC}	0,50m H	17,5
$L_{Filtro5^a}$	2,26m H	17,5
$C_{Filtro5^a}$	120μ F	17,5
$L_{Filtro7^a}$	1,13m H	17,5
$C_{Filtro7^a}$	130μ F	17,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloco de TCR apresenta um banco de indutores trifásicos, ligados em delta com a chave tiristorizada, dividindo em dois cada ramo de indutor, sua configuração está representada na Figura 4.3.

Figura 4.3: Modelo do bloco TCR



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.3 os itens indicados do programa PSCAD/EMTDC representam respectivamente:

Item 1 – “Power Electronic Switch” chave eletrônica de potência do tipo tiristor com circuito “snubber”;

Item 2 – “Power Electronic Switch” chave eletrônica de potência do tipo tiristor;

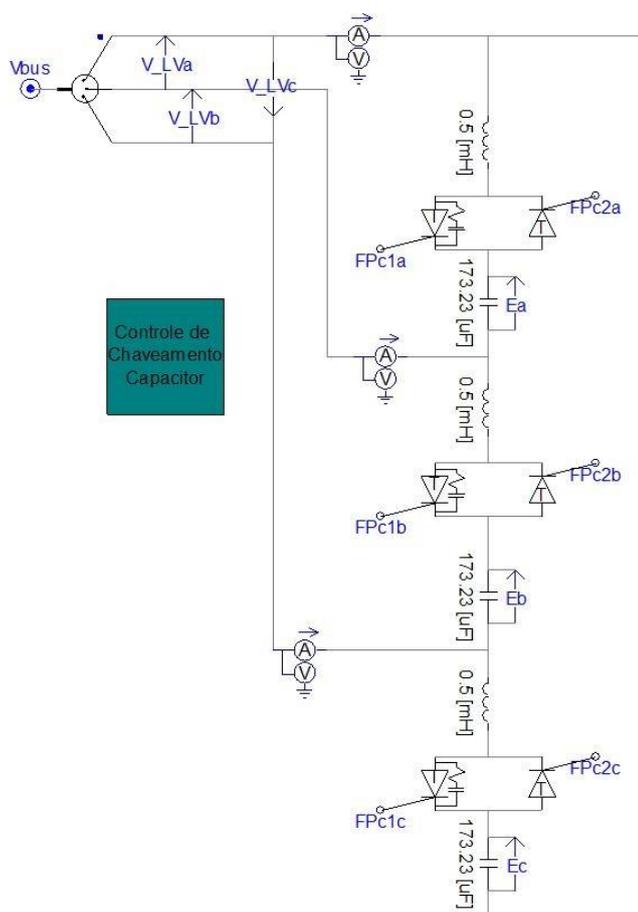
Item 3 – “Three-Phase PI-Controlled Phase Locked Loop” bloco PLL com a função de detectar a fase do sinal fundamental de sequência positiva da rede trifásica e gera na saída um sinal que varia 0 à 360° de acordo o ângulo da tensão de entrada;

Item 4 – “Interpolated Firing Pulses” bloco que gera pulsos de tensão para acionamento das chaves eletrônicas de potência, a partir da comparação do ângulo de referência e do sinal do bloco PLL;

Item 5 – “3-Phase to SLD Electrical Wire Converter (Breakout)” bloco que converte a representação elétrica do modo unifilar em trifilar no programa PSCAD/EMTDC.

O bloco TSC é apresentado na Figura 4.4, sendo composto por um banco de capacitores trifásico chaveado por tiristotres e uma indutância em série para amortecimento de pequenas oscilações.

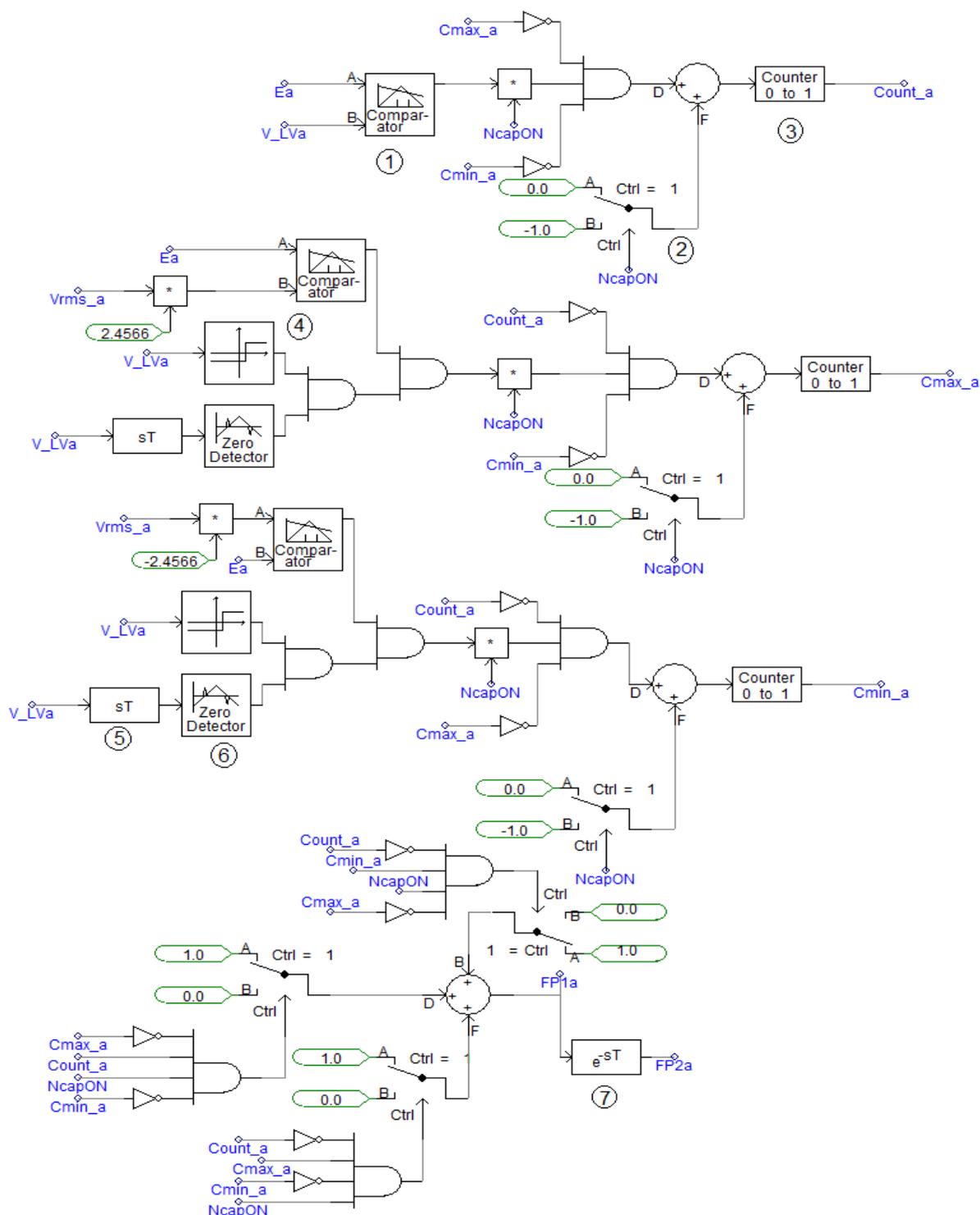
Figura 4.4: Modelo do bloco TSC



Fonte: Elaborado pelo autor.

O controle de disparo dos tiristores, que realizam o chaveamento do banco de capacitores do TSC, foi elaborado através de lógica de controle com portas lógicas (VINTURINI, 2013), como mostrado na Figura 4.5. Esta lógica foi implementada a fim de satisfazer as condições ideais de chaveamento discutidas na seção 2.2.2.2.

Figura 4.5: Bloco Controle de Chaveamento do Capacitor para fase A



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.5, os itens indicados do programa PSCAD/EMTDC representam respectivamente:

Item 1 – “Two Input Comparator” este bloco compara os sinais nas entradas A e B, gerando um pulso quando os sinais se cruzam (ou um dos sinais ultrapassa o valor do outro), ou quando um dos sinais apresenta um valor superior ao do outro;

Item 2 – “Two Input Selector” este bloco atua como chave seletora entre os sinais A e B de acordo com o sinal de controle Ctrl;

Item 3 – “Counter” O componente contador altera seu estado para o "superior" quando ele recebe um valor positivo na sua entrada. Quando ele recebe um valor negativo, ele altera o seu estado para o "inferior";

Item 4 – “Single Input Comparator” este bloco apresenta em sua saída um valor, entre dois valores, definidos a partir do valor de limiar preestabelecido;

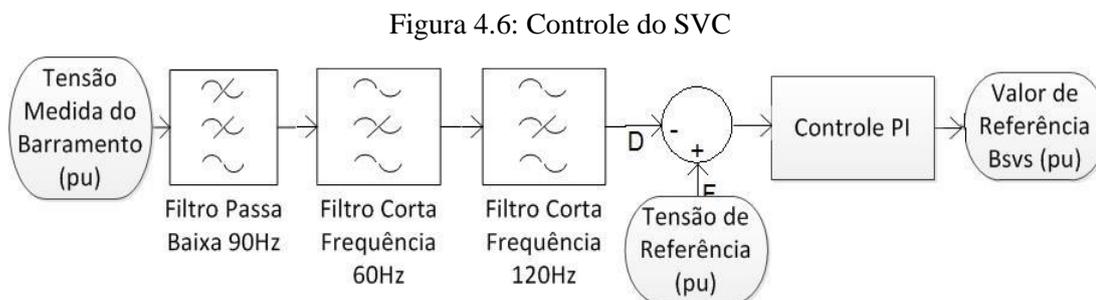
Item 5 – “Derivative with a Time Constant” este bloco calcula a derivada do sinal de entrada, determinando a velocidade com que o sinal varia;

Item 6 – “Zero Crossing Detector” Este componente detecta quando a entrada cruza o ponto zero, e diferencia entre cruzamentos positivos e negativos. Um cruzamento de zero na entrada com uma primeira derivada positiva irá produzir uma única saída de valor 1. Um cruzamento de zero na entrada com uma primeira derivada negativa vai produzir uma saída de valor -1. Em todas as outras vezes a saída é 0;

Item 7 – “Delay Function” este bloco modela a expressão de Laplace e^{-sT} .

Para o controle do acionamento do SVC foi implementada uma malha de controle PI que compara a tensão do barramento na qual o SVC estará conectado com a tensão de referência, conforme Figura 4.6. A resposta desta malha de controle é o valor B_{SVs} que aciona tanto o TCR quanto o TSC. O sistema de controle de disparo dos capacitores descritos na figura acima tem os sinais “Count_a”, “Cmax_a” e “Cmin_a” acionados respectivamente no momento em que a tensão da fonte for igual a do capacitor, a diferença entre a tensão do

capacitor e da fonte for mínima no semiciclo positivo e no negativo. A partir de um destes sinais são acionados os sinais “FP1a” e “FP2a” que representam o pulso de disparo dos tiristores em antiparalelo dos capacitores do TSC na fase A. A lógica para as fases B e C serão análogas a representada na fase A.

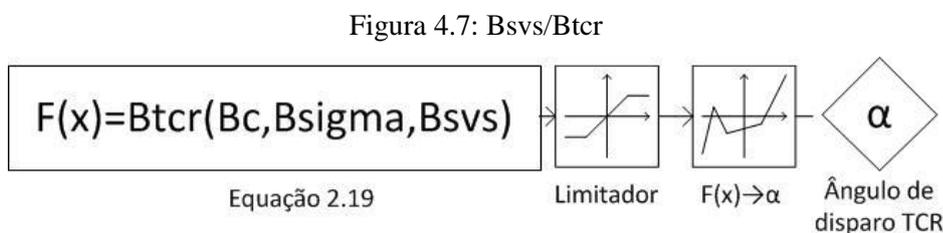


Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do valor de Bsvs é avaliada a necessidade de inserção do TSC e calculado o ângulo de disparo α do TCR. Tal decisão é avaliada da seguinte forma:

- Bsvs indutivo – o TSC é retirado e varia-se apenas o TCR, o valor do Bsvs é o somatório da admitância do TCR e do filtro de harmônicas;
- Bsvs capacitivo – mantém-se o TSC ativo e varia-se o ângulo α do TCR. O valor do Bsvs é o somatório da admitância do TCR, do TSC e do filtro de harmônicas.

A malha de cálculo do ângulo α desenvolvida é apresentada na Figura 4.7.

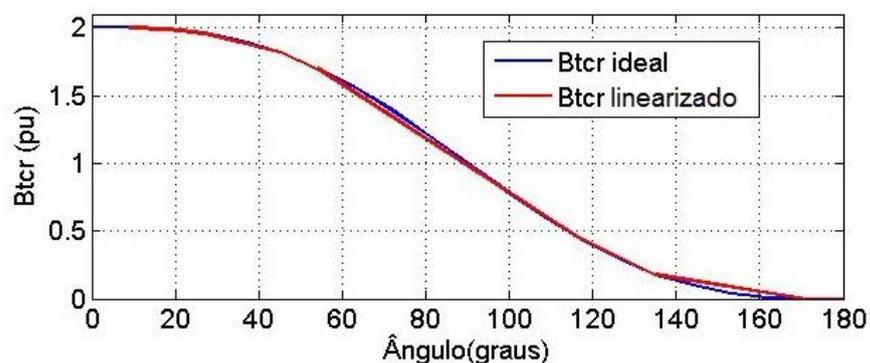


Fonte: Elaborado pelo autor.

A linearização da equação 2.19 na Figura 4.7 é feita através do bloco “Non-Linear Transfer Characteristic” do PSCAD/EMTDC, representado por “F(x)→ α ”. Este bloco terá a função de indicar o ângulo α a partir do valor do Btcr desejado. A Figura 4.8 apresenta o gráfico

comparativo entre a resposta do ângulo α obtido através da equação exata e da linearização proposta. Analisando a Figura 4.8, pode-se notar a eficácia da linearização proposta dada a pequena diferença entre as duas respostas.

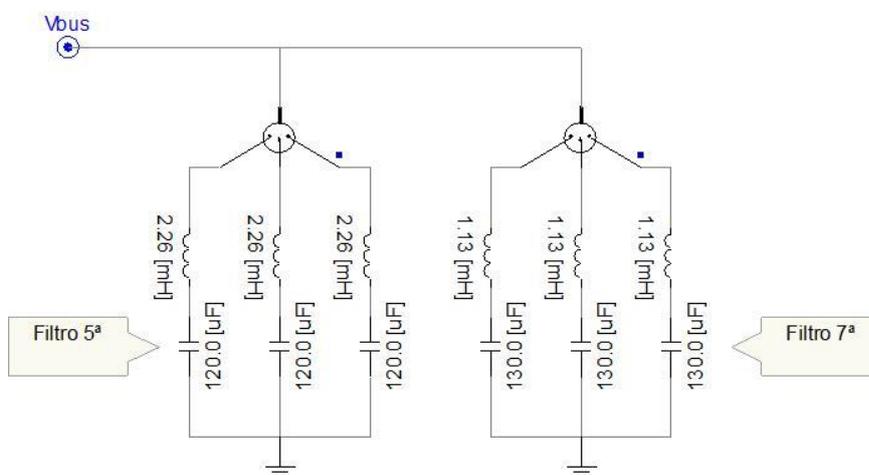
Figura 4.8: Curva de disparo Btcr X α



Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloco de Filtro desenvolvido para correção de harmônicos de 5ª e 7ª ordem é mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Filtro de 5ª e 7ª harmônica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Capítulo 5: Simulações

Neste capítulo são avaliados os resultados da simulação do sistema proposto sem o SVC e posteriormente com a sua aplicação. É apresentado o comportamento do sistema validado com a variação da tensão de referência no controle do Banco de Capacitores e Compensador Síncrono da subestação de Mesquita. Posteriormente, será avaliada a projeção de carga para o crescimento do consumo de energia até o ano de 2021. A partir dos dados simulados, é avaliada a aplicação do SVC projetado, observando a estabilização de tensão na barra Viana II - 500kV no cenário do ano 2015 e em 2021, verificando se o sistema projetado atenderá a este crescimento do consumo.

Em todas as simulações, foi considerado um intervalo de tempo de 0 a 24 segundos de maneira equivalente a variação de carga de 0 a 24 horas ao longo do dia. Desta maneira, é possível visualizar a variação de carga em regime permanente nos modos leve (00:00 às 07:00h), média (07:00 às 18:00h e 21:00 às 24:00h) e pesada (18:00 às 21:00h).

As simulações foram feitas em pu com a potência base de 100MVA e a tensão base de 500kV.

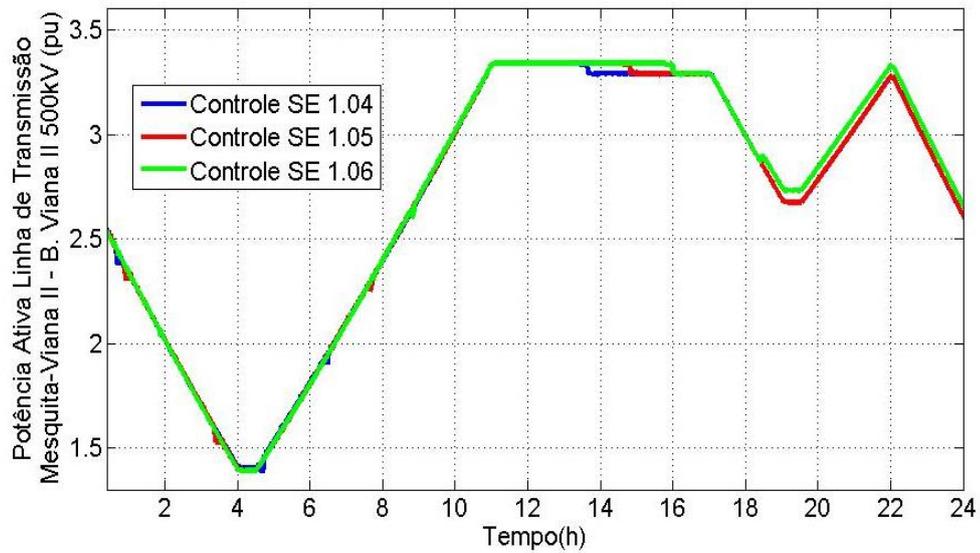
5.1 Sistema sem regulação de tensão e cenário para o ano de 2015

Neste cenário, foram realizadas 03 simulações do sistema, sendo a primeira com o compensador síncrono e banco de capacitores da subestação de Mesquita com valor de referência para ajustar a tensão do barramento de 500kV em 1,04 pu; a segunda para um ajuste de 1,05 pu e a terceira, de 1,06 pu.

As Figuras de 5.1 a 5.4 ilustram, respectivamente, o fluxo de potência ativa e reativa de entrada e saída na linha de transmissão Mesquita/Viana II, com a variação do controle dos compensadores de reativos da subestação de Mesquita. A curva ao longo do dia foi ajustada para ter o mesmo formato da curva de carga do sistema Sudeste/Centro-Oeste apresentada na Figura 3.18.

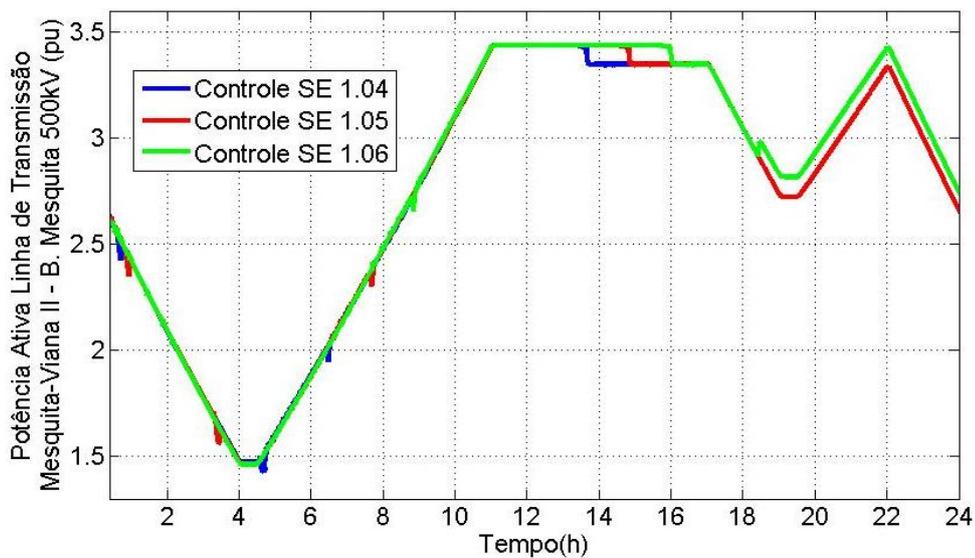
Ao longo do dia, a barra de Viana II absorve potência ativa fornecida pela linha de transmissão e, dependendo do período, fornece ou recebe reativos. Por isso, na Figura 5.3 e 5.4, o fluxo de potência reativa aparece ora com valor positivo (barra Viana II - 500kV absorvendo) ora com valor negativo negativo (barra Viana II - 500kV fornecendo).

Figura 5.1: Potência Ativa Linha de Transmissão medida na Barra Viana II – 500kV



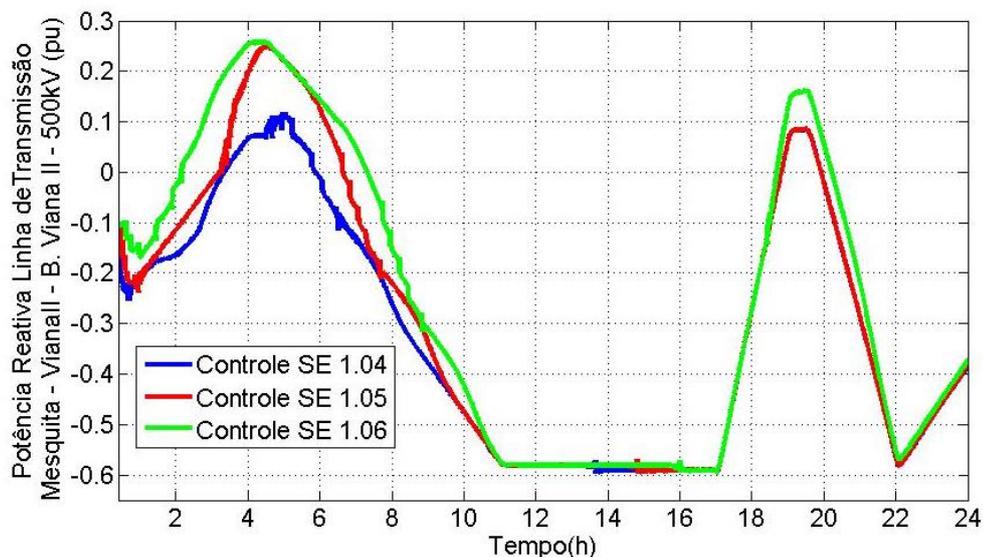
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.2: Potência Ativa Linha de Transmissão medida na Barra Mesquita – 500kV



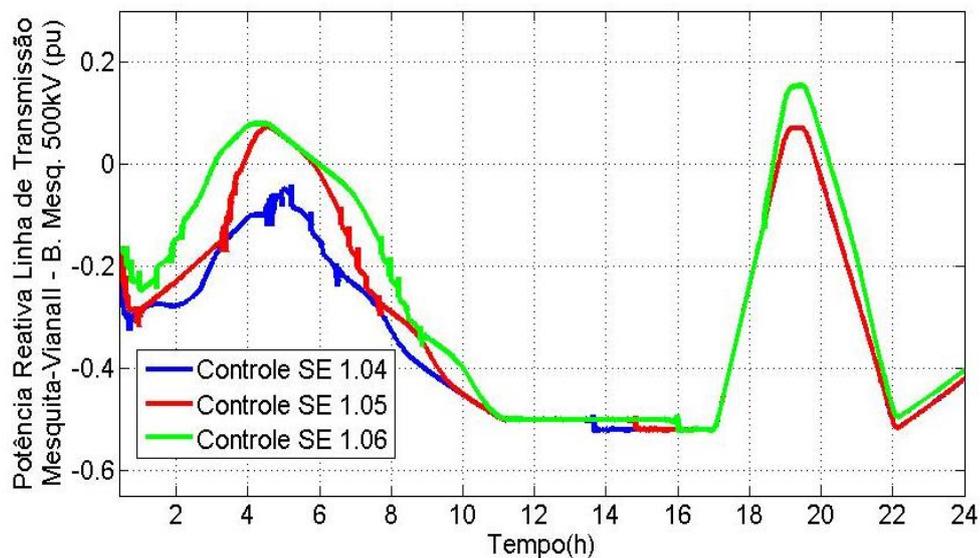
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.3: Potência Reativa Linha de Transmissão medida na Barra Viana II – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.4: Potência Reativa Linha de Transmissão medida na Barra Mesquita – 500kV

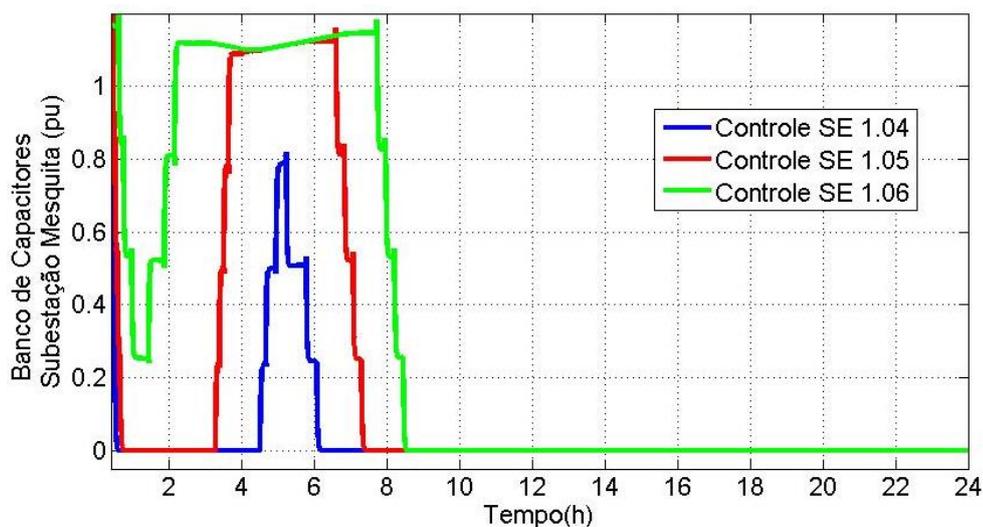


Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência ativa fornecida pela linha à barra Viana II - 500kV não varia para os três cenários de controle. Já a potência reativa, sofre alteração de acordo com a mudança na tensão de referência solicitada dos compensadores. Com a diminuição do valor da tensão ocorre uma queda no valor da potência reativa fornecida pela linha. Esta variação é reflexo da influência direta da tensão no fluxo de potência reativa da linha, conforme estabelece a equação 2.2.

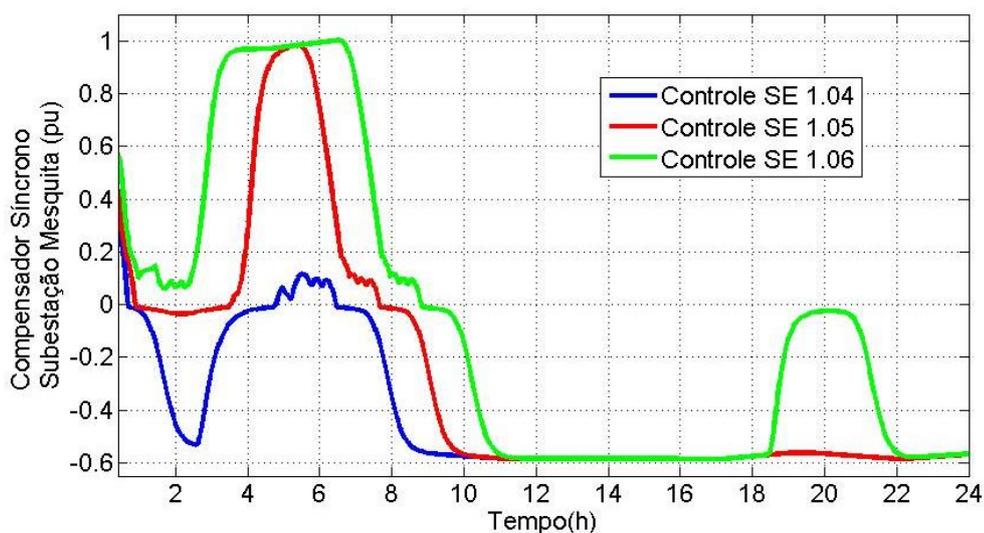
As Figuras 5.5 e 5.6 ilustram a resposta do banco de capacitores e do compensador síncrono, ao longo do dia, e de acordo com a tensão de referência ajustada. A variação da potência reativa do banco de capacitores ocorre em degraus, com a inserção ou retirada de capacitores. Já o compensador síncrono varia de forma contínua, complementando a injeção de reativos do banco de capacitores.

Figura 5.5: Banco de Capacitores



Fonte: Elaborado pelo autor.

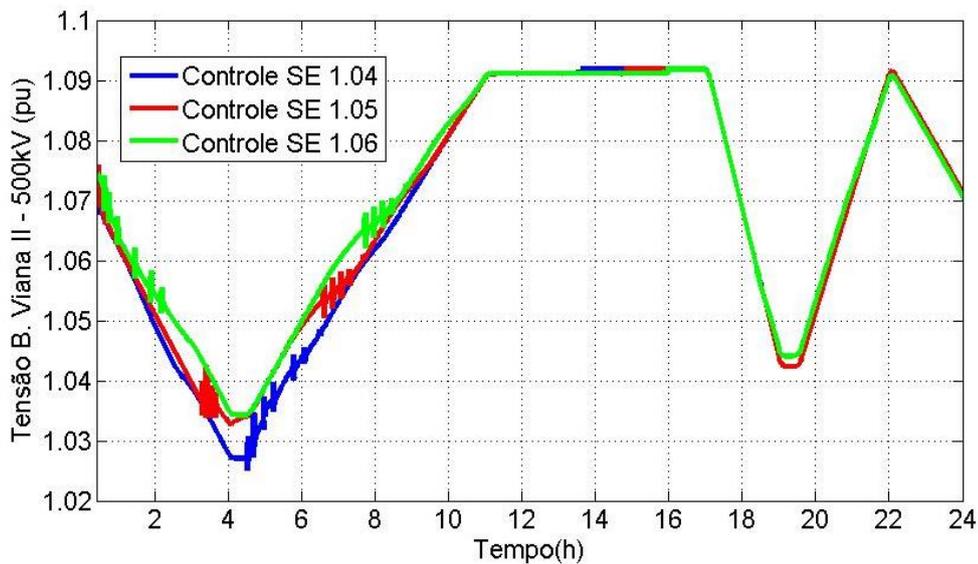
Figura 5.6: Compensador Síncrono



Fonte: Elaborado pelo autor.

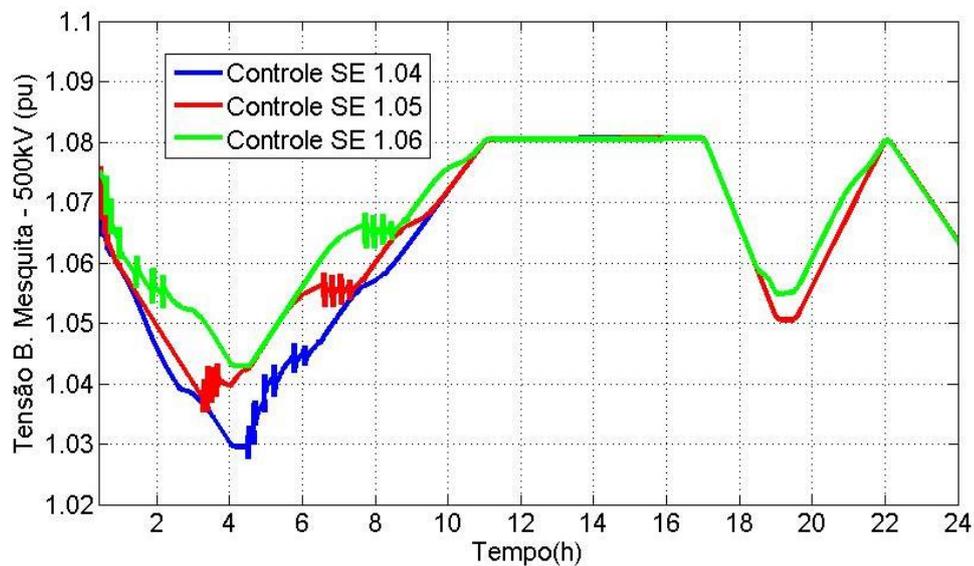
As Figuras de 5.7 a 5.10 apresentam a variação do módulo e do ângulo de fase da tensão, respectivamente, nos barramentos Viana II - 500kV e Mesquita - 500kV.

Figura 5.7: Tensão Barramento Viana II - 500kV



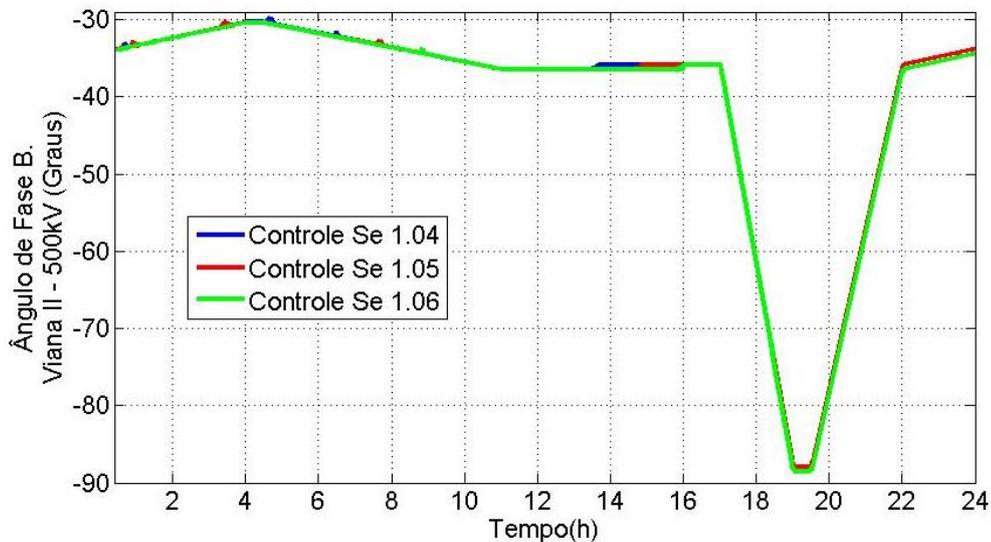
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.8: Tensão Barramento Mesquita - 500kV



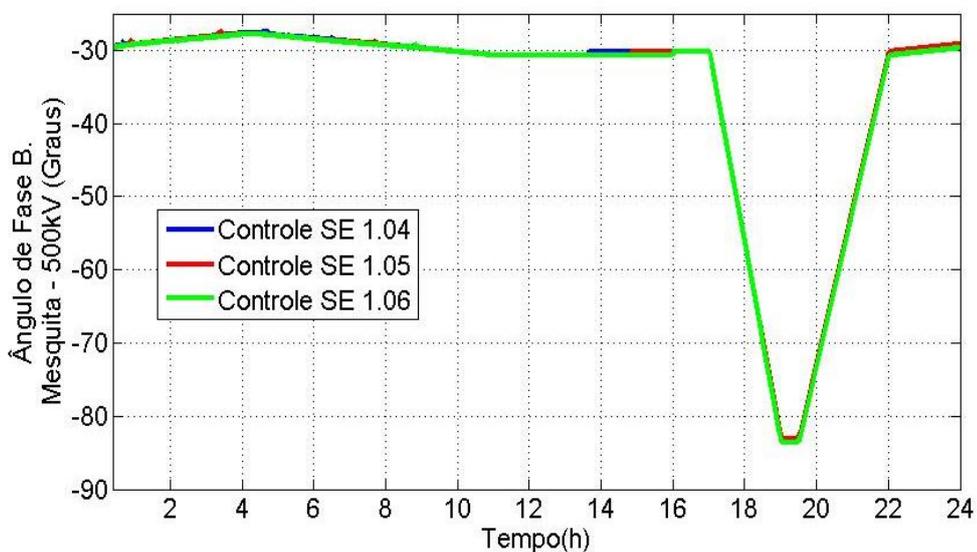
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.9: Ângulo de Fase Barramento Viana II - 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

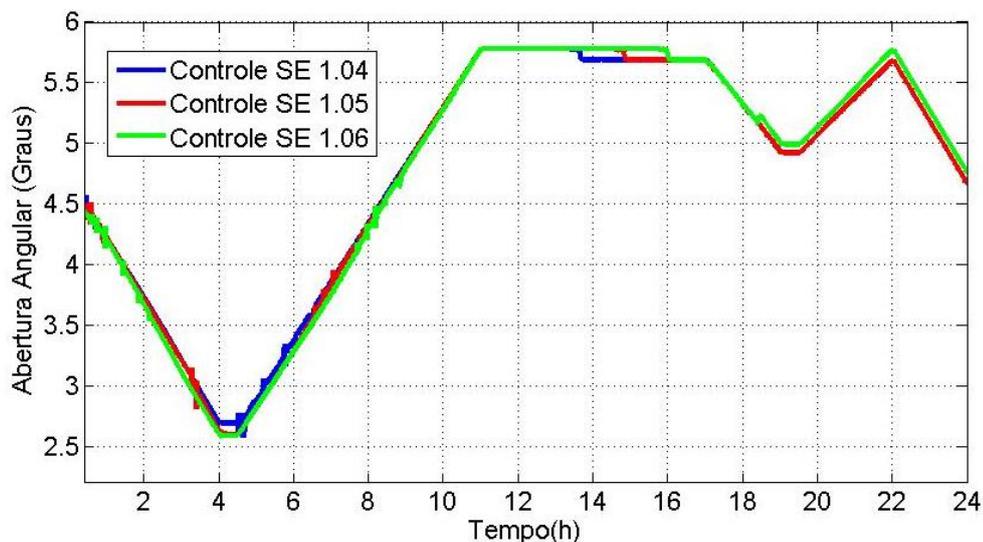
Figura 5.10: Ângulo de Fase Barramento Mesquita - 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.11 apresenta a abertura angular obtida pela diferença entre os ângulos de fase nas barras de Mesquita – 500kV e Viana II – 500kV, apresentando o mesmo formato que o gráfico de fluxo de potência ativa na linha de transmissão. Esta condição é a esperada, pois, a o fluxo de potência ativa na linha está relacionada com a abertura angular.

Figura 5.11: Abertura Angular Sem SVC - 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira geral, a variação da tensão no barramento de Mesquita - 500kV influencia diretamente a tensão dos demais barramentos. Esta interferência está diretamente relacionada ao fato desta barra ser de geração e as demais, de carga. Porém, pode ser observado que a variação no módulo da tensão não influencia o ângulo de fase de tais barras. Tal fato é esperado, pois, não houve variação da carga. Ressalta-se também que a tensão observada na barra Viana II - 500kV encontra-se perto dos limites operacionais para sua classe de tensão que estão na faixa de 1,0 à 1,10 pu (ONS, 2010).

Pode-se concluir que não é possível atingir as tensões de referência solicitadas ao controle do compensador de reativos em derivação da subestação de Mesquita. Além disso, o chaveamento do banco de capacitores dá origem a picos de tensão instantâneos.

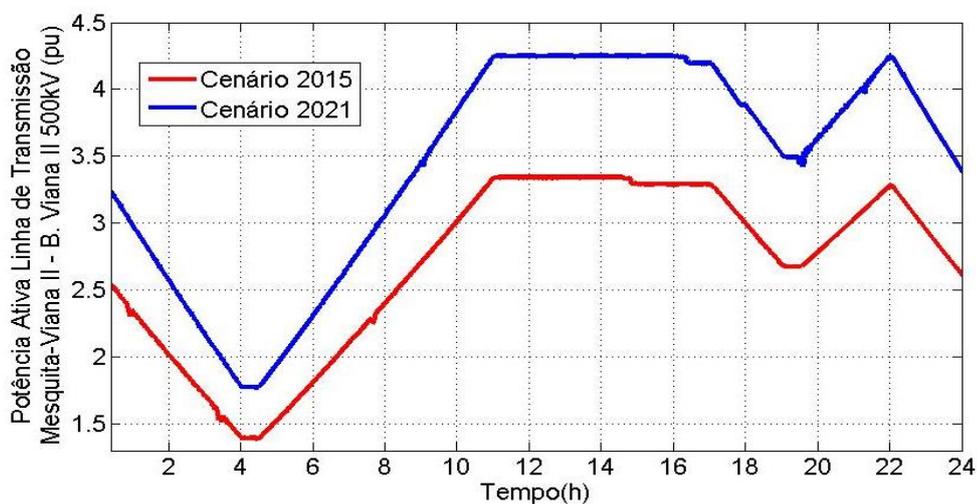
5.2 Sistema sem regulação de tensão nos cenários de 2015 e 2021

Nesta seção, de acordo com a Tabela 1,1, o sistema modelado prevê um crescimento médio da carga de 26,9%, conforme cenário previsto pela EPE para o intervalo de 2015 a 2021. Neste contexto, os resultados de simulação permitem observar o comportamento do fluxo de potência ativa e reativa na linha de Transmissão Mesquita - Viana II - 500kV que mantém a

média de crescimento ao longo do dia. Na simulação do sistema, o valor de referência para controle da tensão na subestação de Mesquita foi mantido em 1,05 pu.

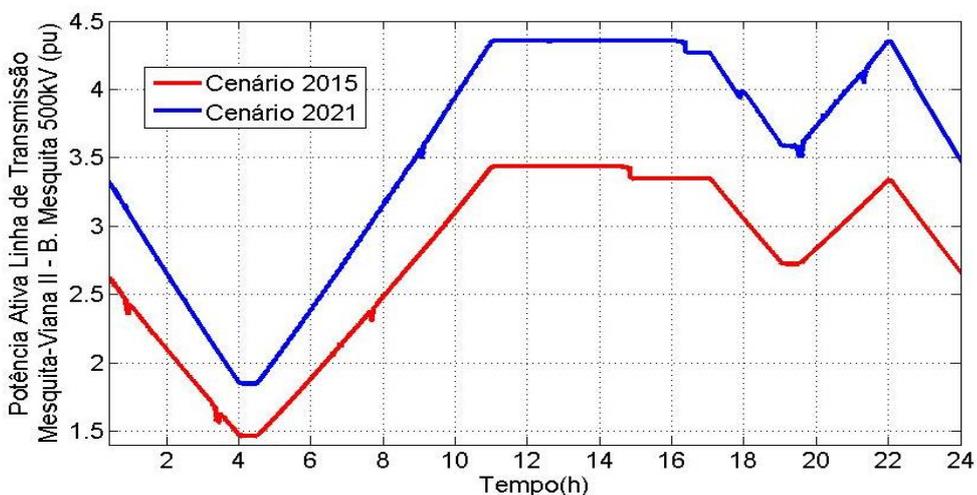
As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam o fluxo de potência ativa na linha de transmissão Mesquita – Viana II - 500kV, observando-se que os valores no cenário de 2021 ficam acima dos valores no cenário de 2015 ao longo de toda simulação. Este comportamento é o esperado visto que o fluxo de potência ativa está relacionado a carga simulada nos barramentos do sistema.

Figura 5.12: Potência Ativa Linha de Transmissão medida na Barra Viana II – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

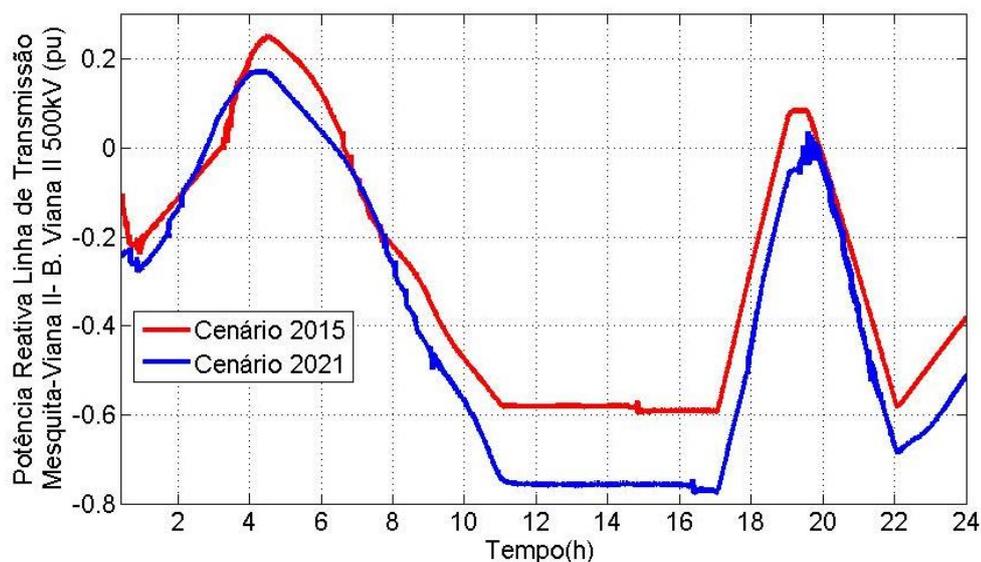
Figura 5.13: Potência Ativa Linha de Transmissão medida na Barra Mesquita – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

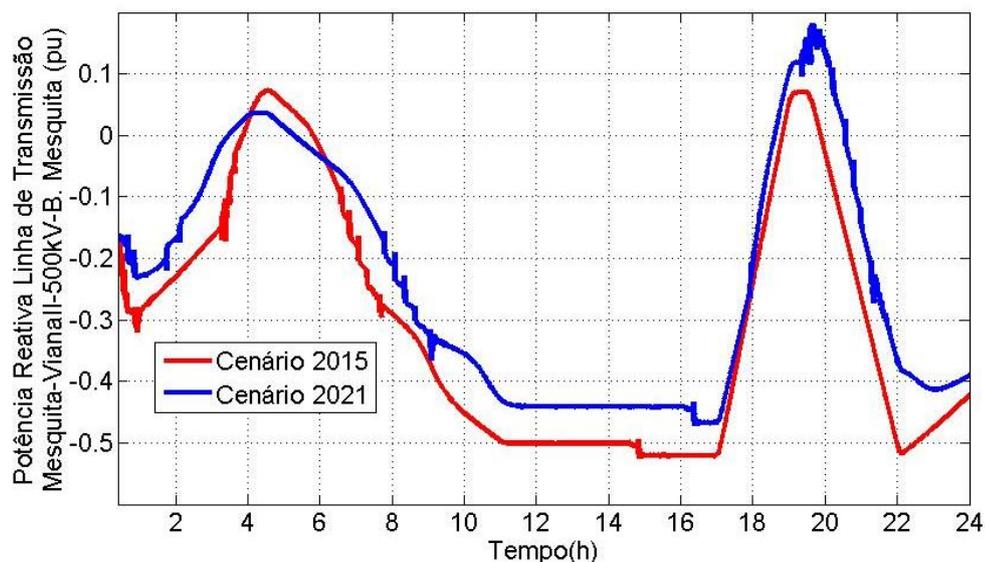
As Figuras 5.14 e 5.15 mostram o fluxo de potência reativa na linha de transmissão Mesquita – Viana II – 500kV. As curvas de fluxo de potência reativa em ambos os cenários se cruzam ao longo da simulação. Este efeito está relacionado com a influência do fluxo de potência reativo na linha com os compensadores instalados na subestação de Mesquita.

Figura 5.14: Potência Reativa Linha de Transmissão medida na Barra Viana II – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

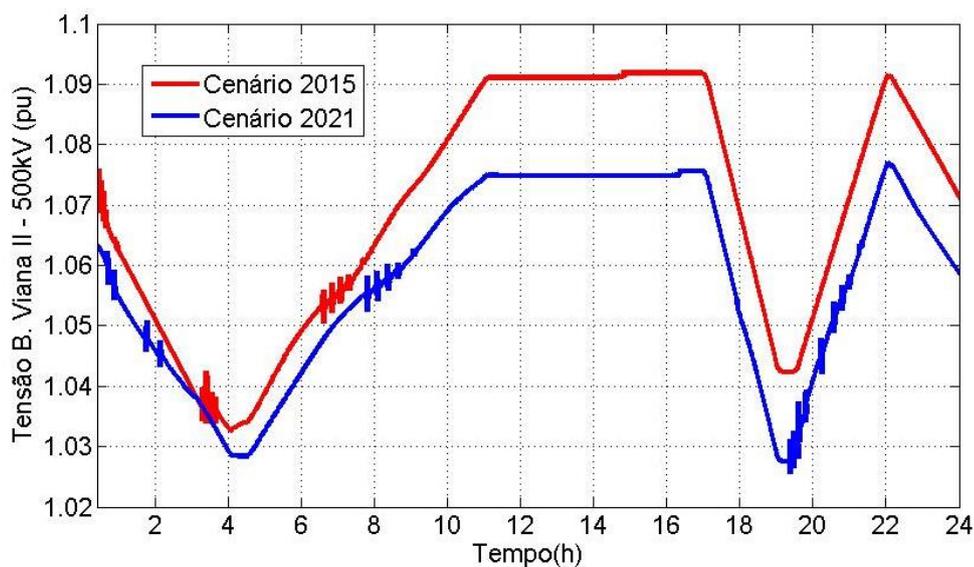
Figura 5.15: Potência Reativa Linha de Transmissão medida na Barra Mesquita – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

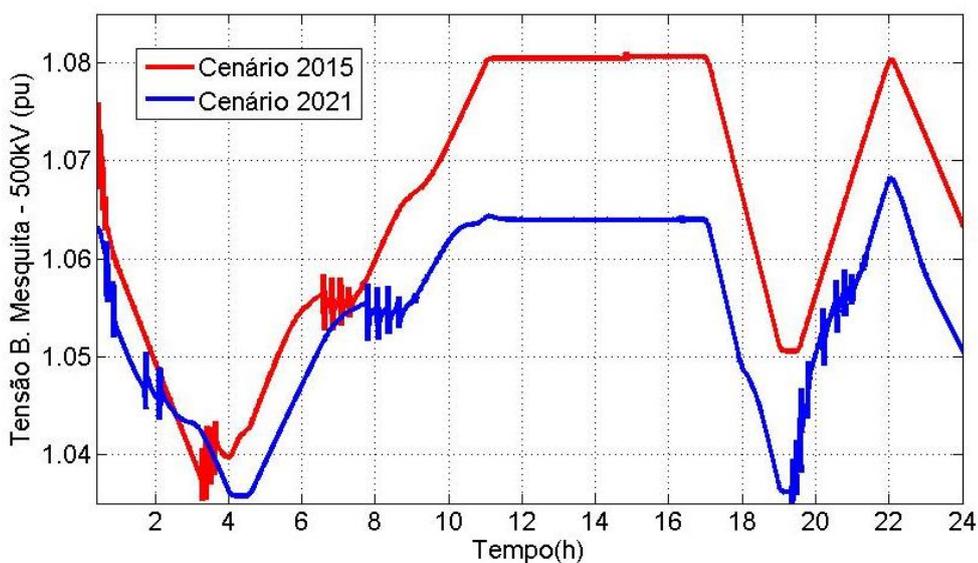
Para a projeção do sistema no cenário de 2021 foi ajustada apenas o ângulo de fase nas barras, simulando de maneira direta o aumento da carga ativa dos sistemas A, C e D. Desta maneira, de acordo com as Figuras 5.16 e 5.17, é observada uma queda de tensão dos barramentos Viana II - 500kV e Mesquita - 500kV.

Figura 5.16: Tensão Barramento Viana II – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

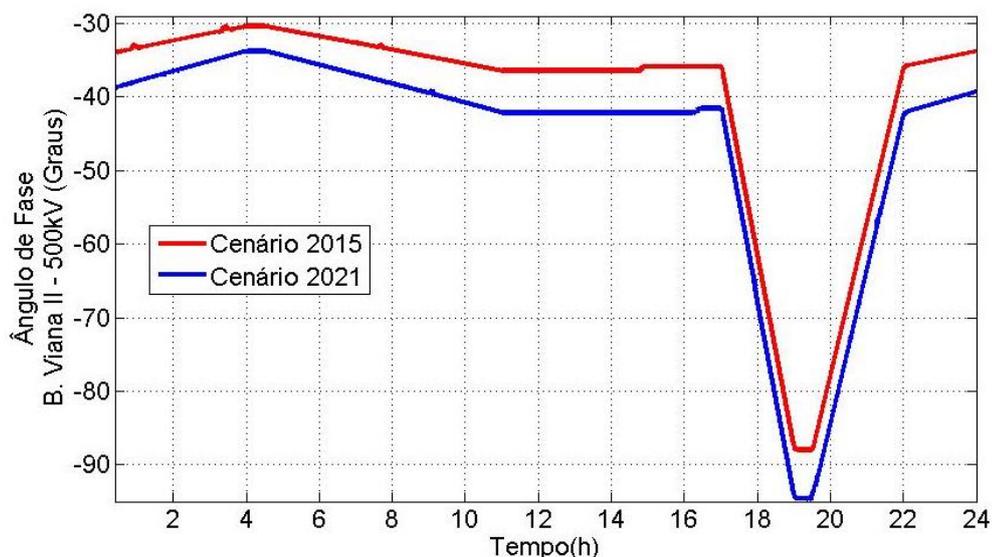
Figura 5.17: Tensão Barramento Mesquita – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

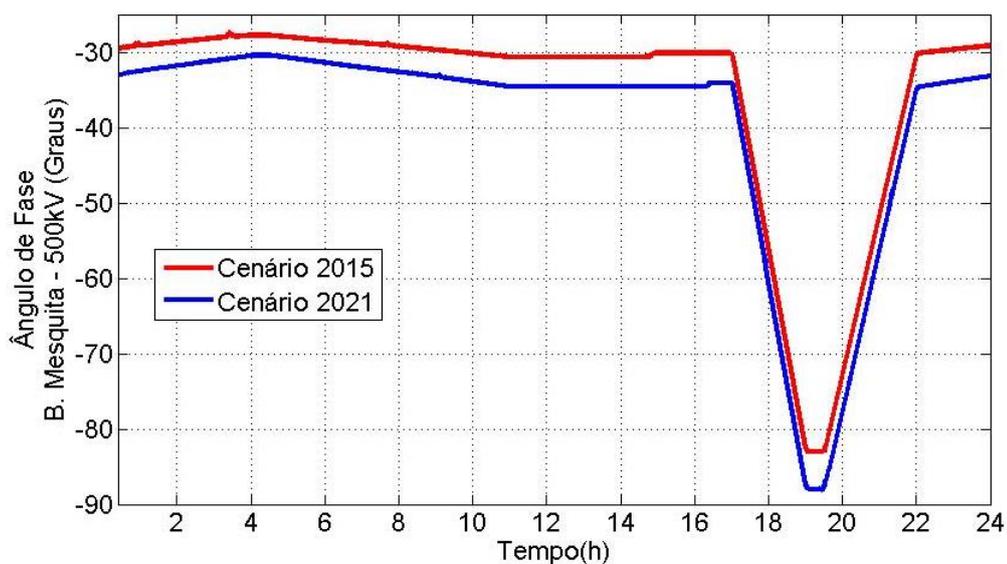
Nas Figuras 5.18 e 5.19 é observado a variação do ângulo de tensão nas barras Viana II - 500kV e Mesquita – 500kV, necessários para o aumento do fluxo de potência ativa da linha de transmissão Mesquita – Viana II – 500kV.

Figura 5.18: Ângulo de Fase Barramento Viana II – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

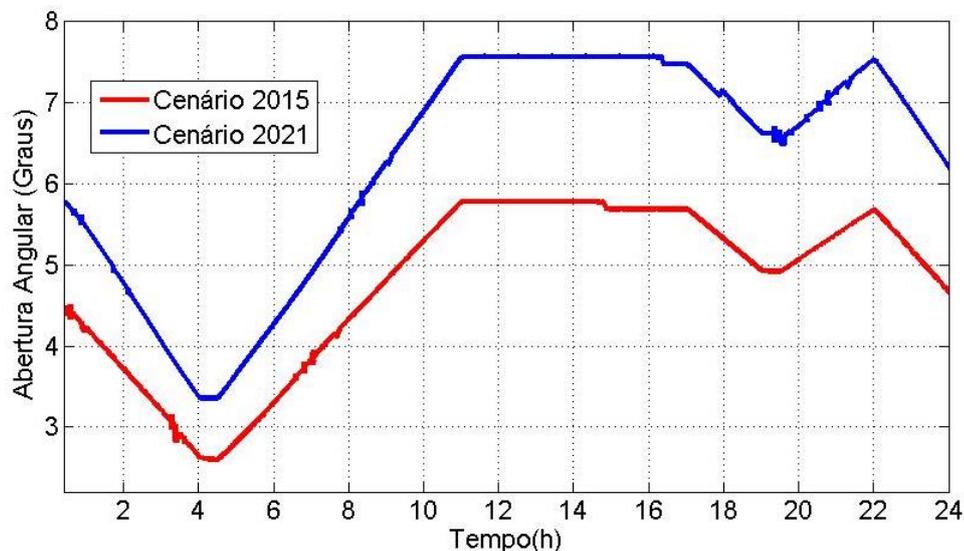
Figura 5.19: Ângulo de Fase Barramento Mesquita – 500kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.20 apresenta a abertura angular obtida pela diferença entre os ângulos de fase nas barras de Mesquita – 500kV e Viana II – 500kV.

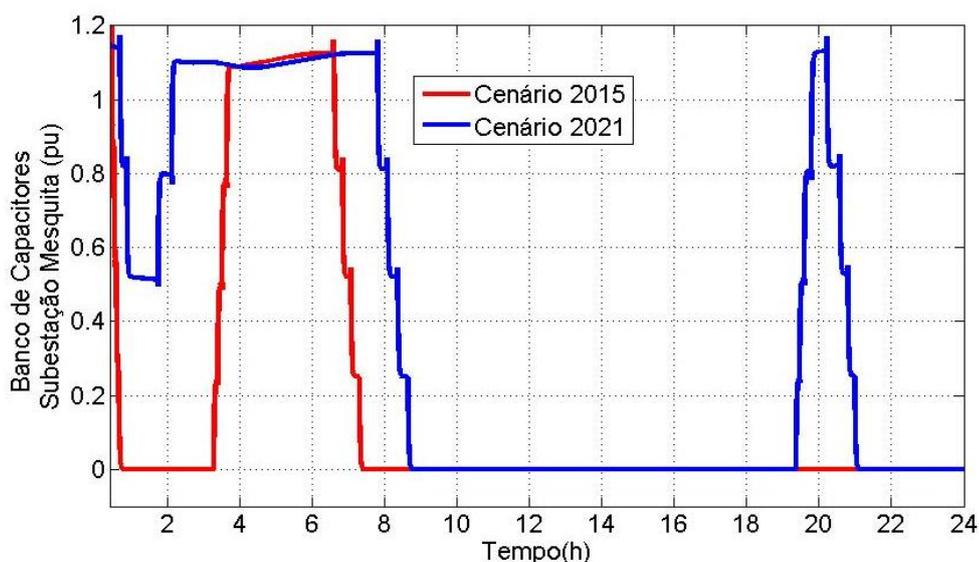
Figura 5.20: Abertura Angular Sem SVC - 2021



Fonte: Elaborado pelo autor.

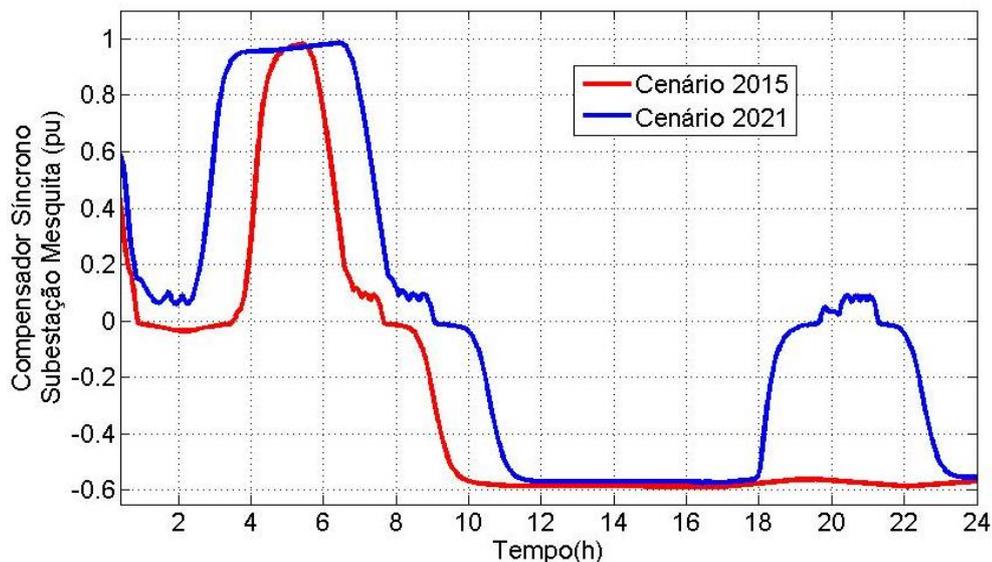
As Figuras 5.21 e 5.22 ilustram o comportamento dos compensadores de reativos paralelos da subestação de Mesquita. Pode ser observado que nos cenários de 2015 e 2021 o sistema varia a injeção de reativos do banco de capacitores e do compensador síncrono para tentar manter a tensão do barramento Mesquita - 500kV em 1,05 pu. Porém, de acordo com a Figura 5.16 esta injeção de reativos não é suficiente para tal controle.

Figura 5.21: Banco de Capacitores



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.22: Compensador Síncrono



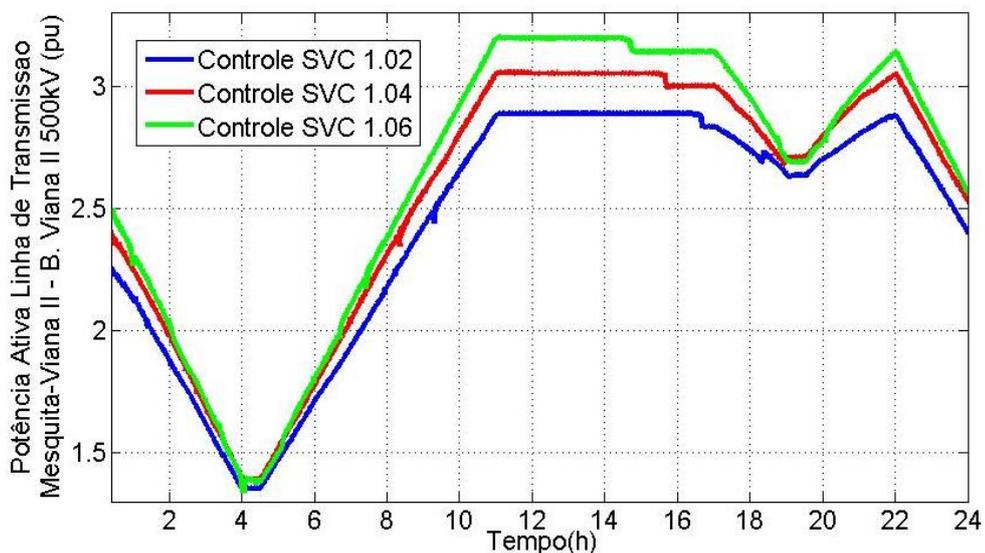
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Sistema com regulação de tensão no cenário de 2015

Nesta seção é apresentada a simulação do sistema para o cenário 2015 com a aplicação do dispositivo SVC dimensionado. Neste cenário, novamente será mantido o valor de referência da malha de controle de tensão na barra Mesquita - 500kV fixo em 1,05 pu.

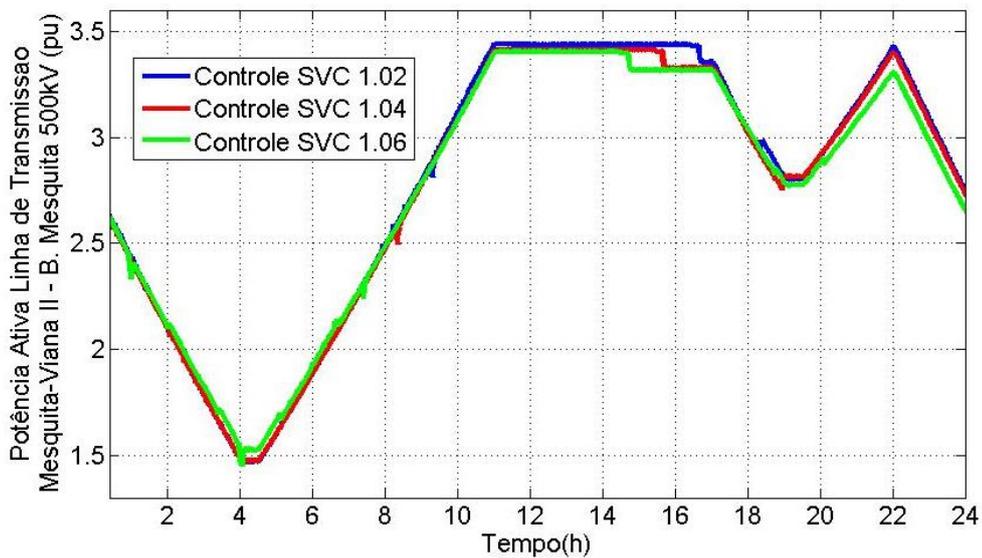
As Figuras de 5.23 à 5.26 ilustram, respectivamente, a resposta da carga ativa e reativa da linha de transmissão Mesquita - Viana II - 500kV com a injeção de potência reativa do SVC. De forma análoga ao sistema sem SVC, ao longo do dia a barra de Viana II - 500kV absorve potência ativa fornecida pela linha de transmissão e, dependendo do período, fornece ou recebe reativos.

Figura 5.23: Potência Ativa na Linha de Transmissão Mesquita-Viana II medida na Barra Viana II – 500 kV com SVC - 2015



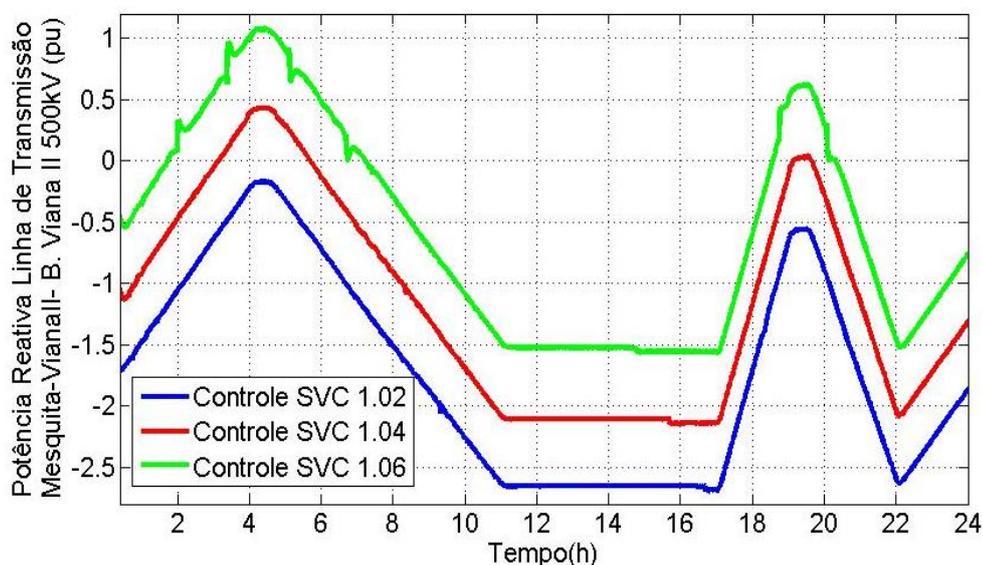
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.24: Potência Ativa na Linha de Transmissão Mesquita – Viana II medida na Barra Mesquita - 500 kV com SVC - 2015



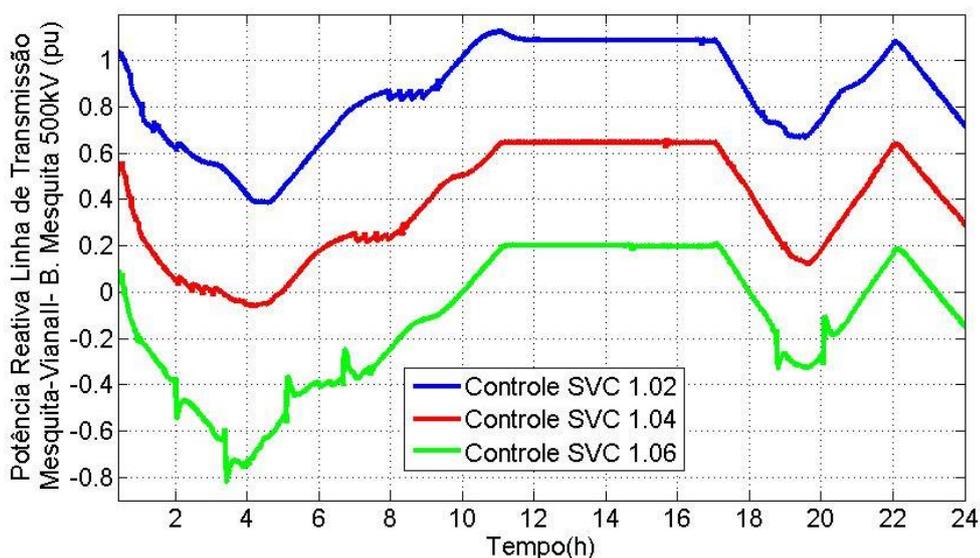
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.25: Potência Reativa na Linha de Transmissão Mesquita – Viana II medida na Barra Viana II – 500 kV com SVC - 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.26: Potência Reativa na Linha de Transmissão Mesquita - Viana II medida na Barra Mesquita – 500 kV com SVC - 2015

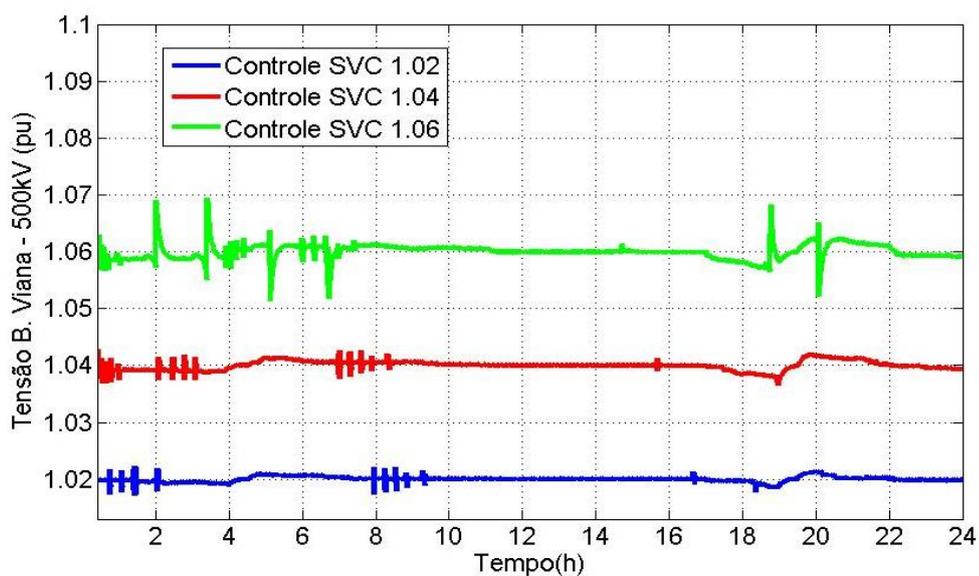


Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras de 5.27 a 5.30 apresentam, respectivamente, as alterações dos valores do módulo e ângulo de fase da tensão do barramento de Viana II - 500kV e Mesquita - 500kV ao longo do dia. Pode-se observar que a tensão no barramento de Viana II com o controle de tensão do SVC consegue manter a tensão fixa no valor determinado, saindo da faixa natural de oscilação que era de 1,032 à 1,092 pu. Para o dispositivo dimensionado, os limites de controle estão

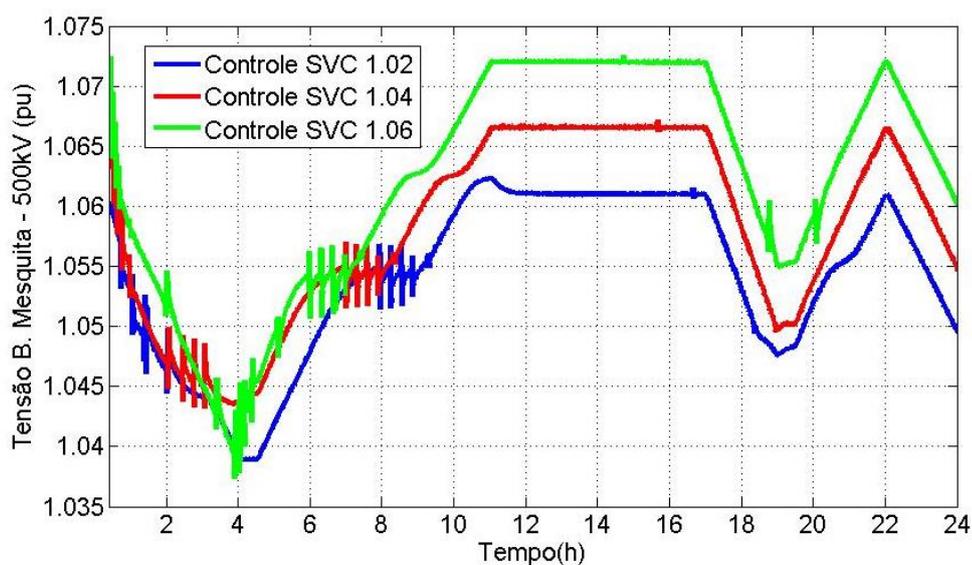
entre 1,02 a 1,06 pu. Destaca-se na Figura 5.28 que a variação no perfil de tensão no barramento Mesquita – 500kV, passa a variar mais próximo dos limites de tensão estabelecidos pelo ONS, entre 1,0 e 1,1 pu.

Figura 5.27: Tensão no barramento Viana II - 500kV com SVC - 2015



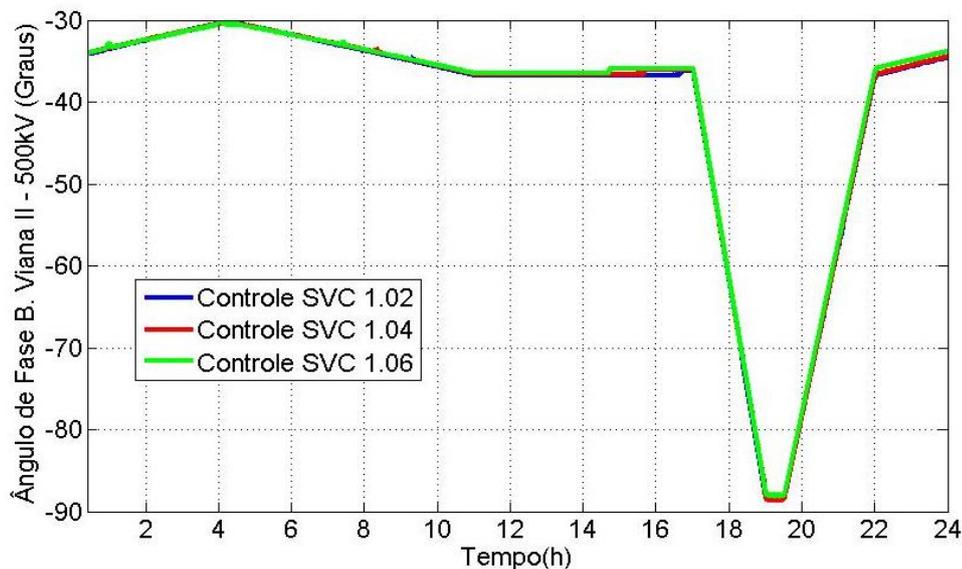
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.28: Tensão no barramento Mesquita - 500kV com SVC - 2015



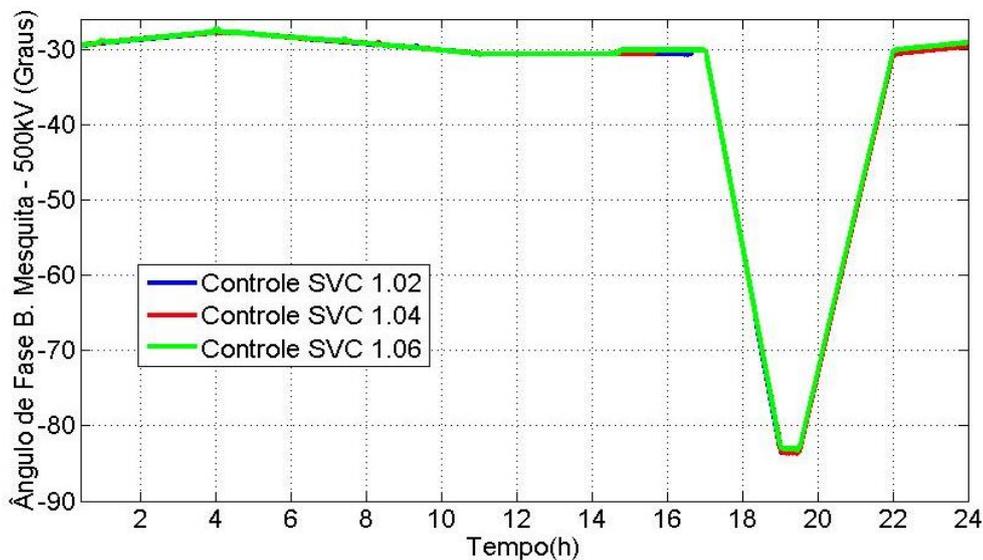
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.29: Ângulo de Fase da tensão no barramento Viana II - 500kV com SVC - 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

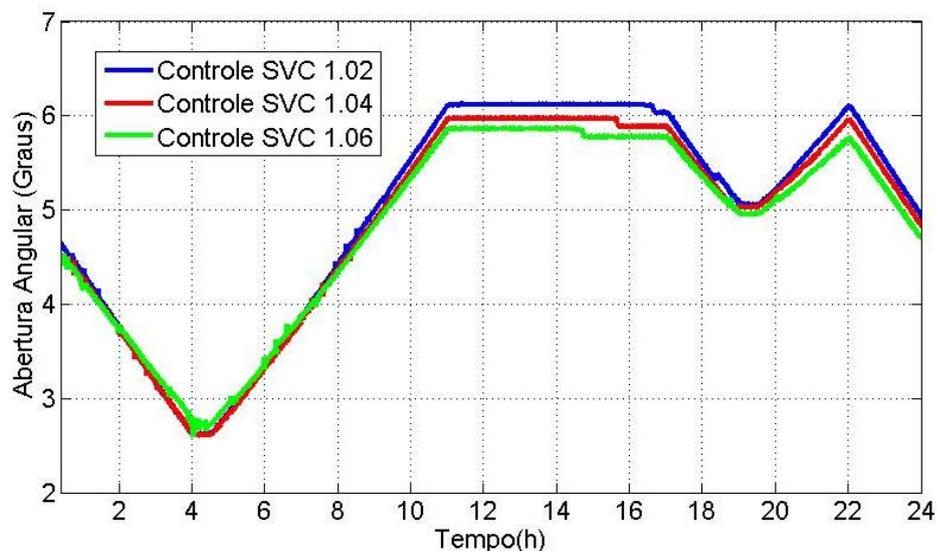
Figura 5.30: Ângulo de Fase da tensão no barramento Viana II - 500kV com SVC - 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.31 apresenta a abertura angular obtida pela diferença entre os ângulos de fase nas barras de Mesquita – 500kV e Viana II – 500kV. De maneira análoga ao cenário sem SVC, o gráfico de abertura angular apresenta a mesma forma que o gráfico de fluxo de potência na linha de transmissão.

Figura 5.31: Abertura Angular Com SVC - 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

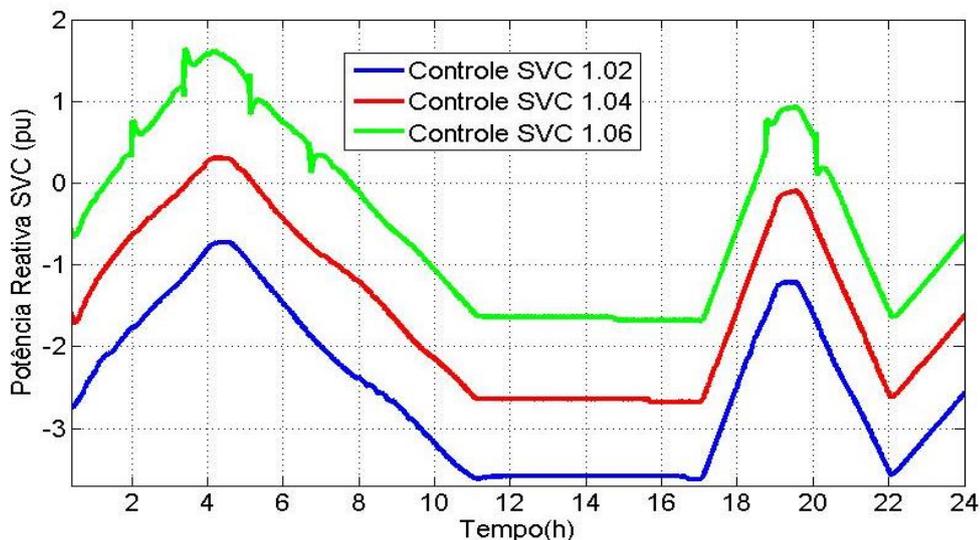
A potência ativa na linha não sofre variação com a mudança de perfil de tensão na barra de Viana II. Tal fato está associado à não alteração da abertura angular na barra para os três perfis de tensão. Entretanto, a mudança de perfil de tensão altera o fluxo de potência reativa na linha, o qual é influenciado diretamente pela injeção de reativos do SVC no sistema, como mostrado na Figura 5.28.

Para o aumento da tensão na barra Viana II, com perfil de tensão fixo em 1,06 pu, ocorre a diminuição de injeção de potência reativa através da linha para o barramento Viana II - 500kV. Nesta condição a injeção de energia reativa através do SVC apresenta características predominantes capacitivas, como mostra a Figura 5.32 que apresenta a variação da potência reativa do SVC. De forma contrária, para o ajuste de tensão em 1,02 pu, a tensão na barra deve ser mantida abaixo de sua condição natural sem SVC, desta forma é demandado maior potência reativa através da linha e o SVC tende a manter características indutivas. O ajuste em 1,04 pu também apresenta características predominantes indutivas, entretanto em certos períodos do dia atinge características capacitivas.

Com o controle do SVC pode ser observado na Figura 5.27 que a tensão do barramento é estabilizada nos valores pré-determinados na malha de controle. No ajuste de tensão em alguns instantes são observados no perfil de tensão alguns picos na ordem de 0,01 pu devido a

retirada e inserção dos capacitores do TSC 1 e TSC 2 conforme ilustrado nas Figuras 5.34 e 5.35.

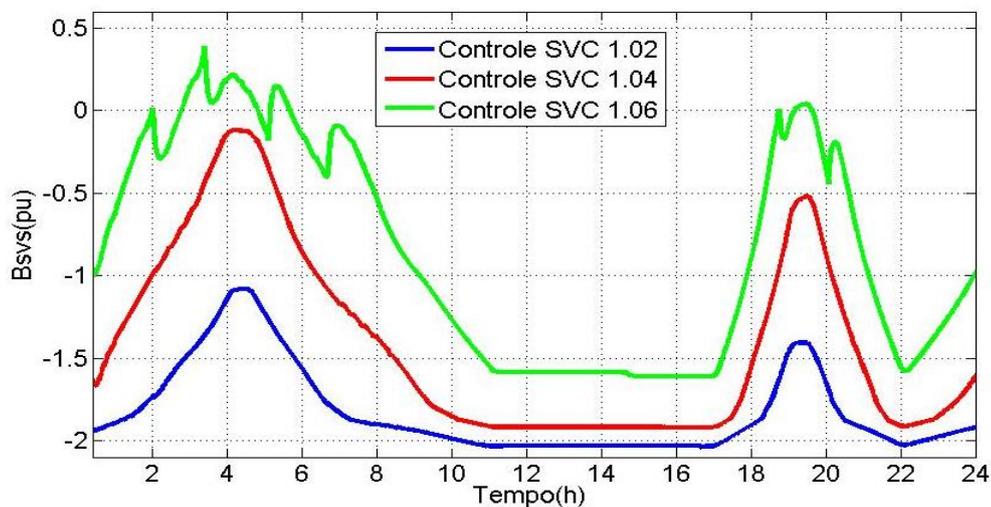
Figura 5.32: Potência Reativa SVC com SVC - 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

A resposta do controle do sistema SVC (Bsvs) pode ser observada na Figura 5.33. Esta curva possui o formato similar ao apresentado pela injeção de reativos do SVC, Figura 5.32. Dessa forma, comprova-se que o dispositivo SVC desenvolvido está trabalhando da forma esperada, ou seja, injetando reativos de acordo com a demanda solicitada pela malha de controle.

Figura 5.33: Controle Bsvs



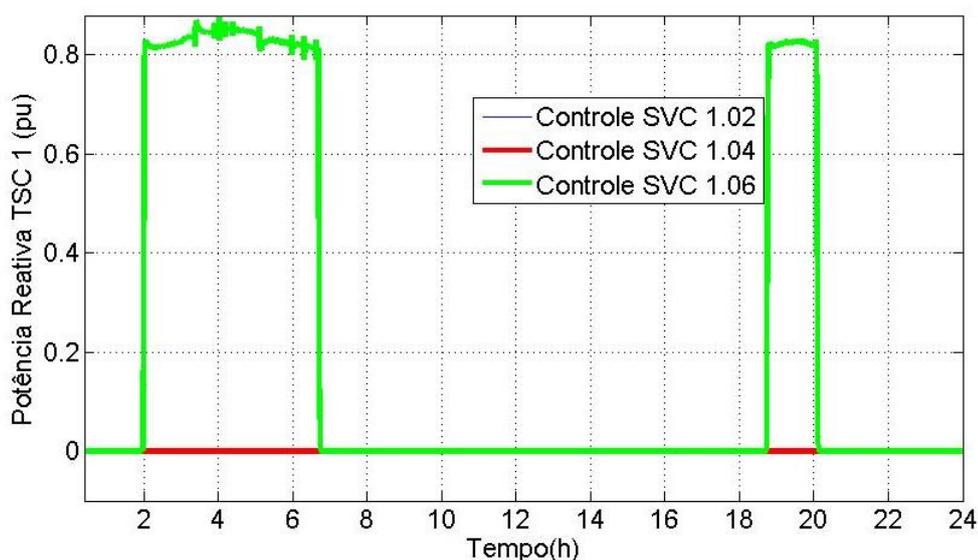
Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência reativa disponibilizada pelo SVC é a soma do reativo de todos seus componentes, TCR, TSC 1, TSC 2 e Filtros. Desta forma, na situação de controle da tensão em 1,02 e 1,04 pu, pode-se observar nas Figuras 5.34 e 5.35 que os TSC's 1 e 2 não são ativados, havendo apenas a injeção de reativos do filtro de harmônicas, Figura 5.38, com a variação do TCR conforme ilustrado na Figura 5.36. Esta situação ocorre, pois, a malha de controle Bsvs tenta manter o SVC com características indutivas ao longo do dia, não necessitando dos TSC's.

A situação de controle de tensão em 1,06 pu exige a atuação dos TSC's 1 e 2 na maior parte do dia, pois, apenas no intervalo de carga leve e pesada a tensão natural do sistema tende a ser superior a este valor de referência. Neste momento, ocorre o desligamento dos dois TSC's conforme pode ser observado nas Figuras 5.34 e 5.35.

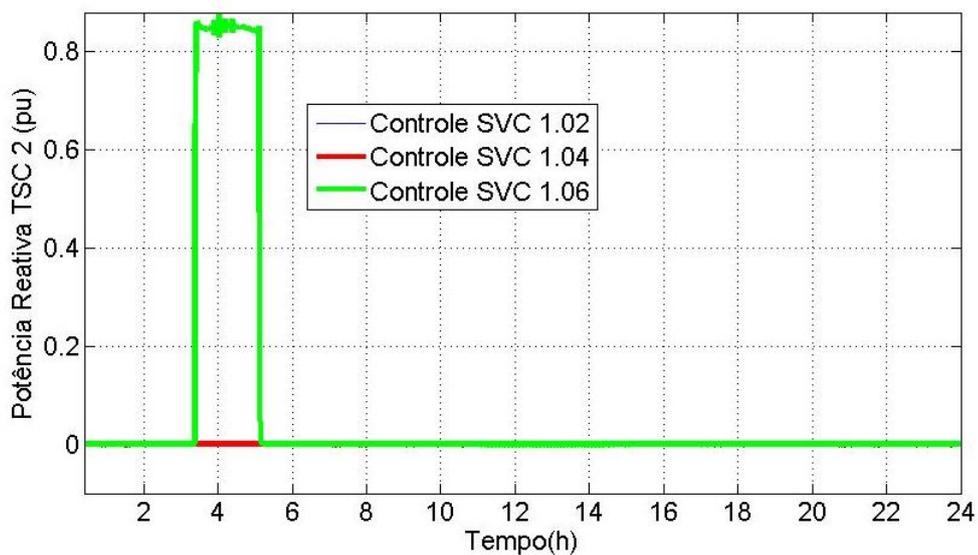
Entretanto, mesmo o SVC injetando potência no sistema, a fim de manter o valor de referência da tensão em 1,06 pu, o TCR continua a injetar reativos. Isto se deve ao ajuste do fluxo de reativos ser composto pela soma de todos os componentes do SVC. Com a entrada de reativos capacitivos neste dispositivo em degraus, o ajuste final do sistema fica por conta do TCR, uma vez que este pode variar linearmente em função do ângulo de disparo de seus tiristores.

Figura 5.34: Potência Reativa TSC1



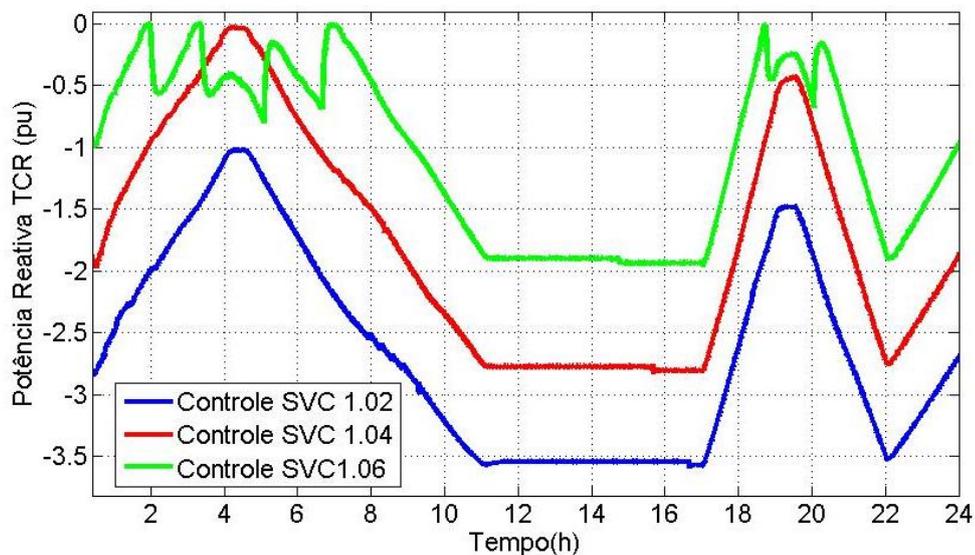
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.35: Potência Reativa TSC2



Fonte: Elaborado pelo autor.

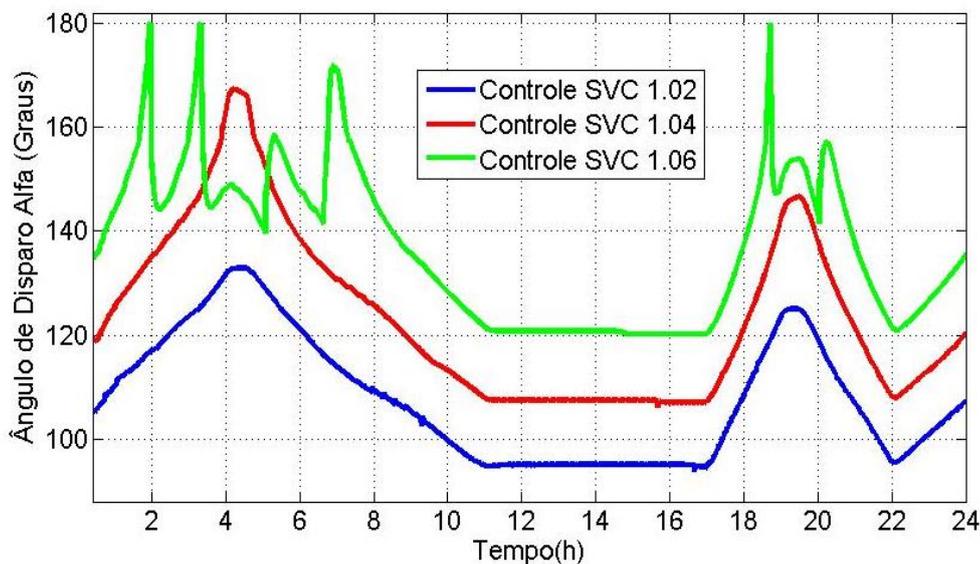
Figura 5.36: Potência Reativa TCR



Fonte: Elaborado pelo autor.

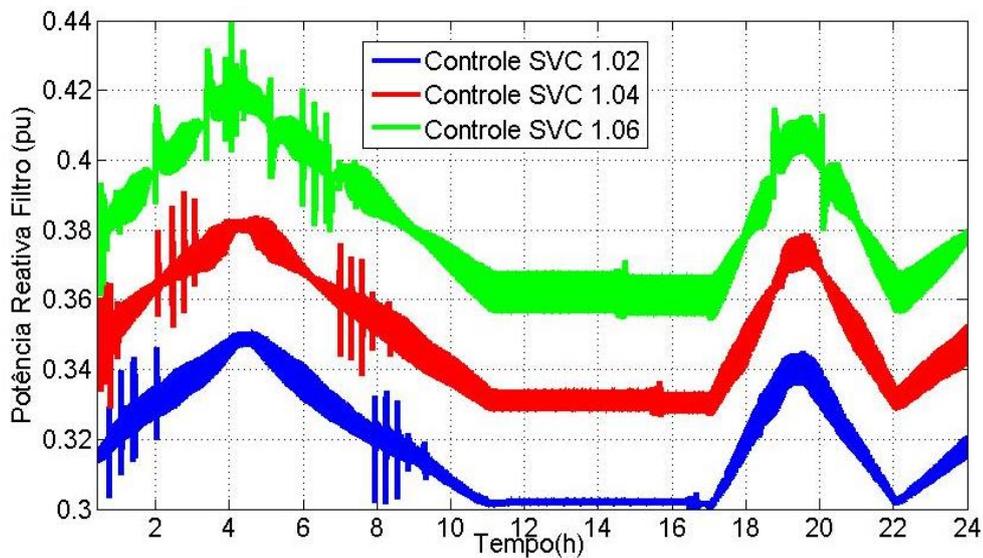
A Figura 5.37 ilustra o comportamento do ângulo de disparo dos tiristores do TCR, observando-se que estes operam dentro da faixa operacional de 90° à 180° .

Figura 5.37: Ângulo de disparo (alfa) dos tiristores do TCR



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.38: Potência Reativa Filtro



Fonte: Elaborado pelo autor.

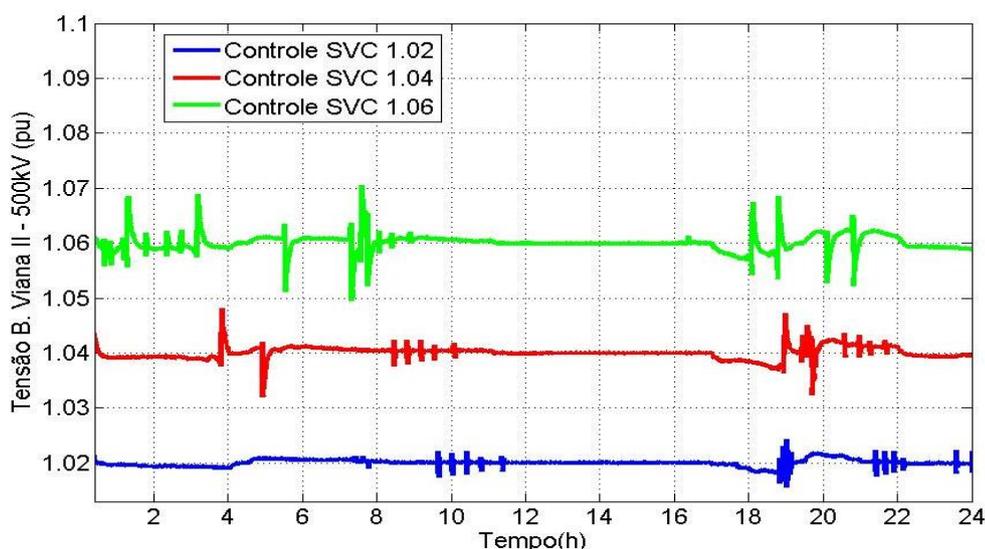
O fluxo de reativos do filtro, apresentado na Figura 5.38, se mantém praticamente fixo ao longo de toda a simulação, com variação do fluxo de potência em função da variação de tensão e corrente na 5ª e 7ª harmônica do SVC. Esta situação é esperada, tendo em vista que o filtro é um elemento passivo conectado em paralelo ao barramento e qualquer oscilação de tensão apresenta influência direta na potência injetada.

5.4 Sistema com regulação de tensão no cenário de 2021

Nesta seção é apresentada a simulação do sistema para o cenário 2021 com a aplicação do dispositivo SVC dimensionado. Mantém-se novamente fixa a referência da malha de controle de tensão na barra Mesquita - 500kV em 1,05 pu, através do banco de capacitores e compensador síncrono.

Como pode ser observado na 5.39 a tensão do barramento Viana II - 500kV ainda é estabilizada com o SVC dimensionado, mesmo havendo a expansão da carga no cenário do ano de 2021.

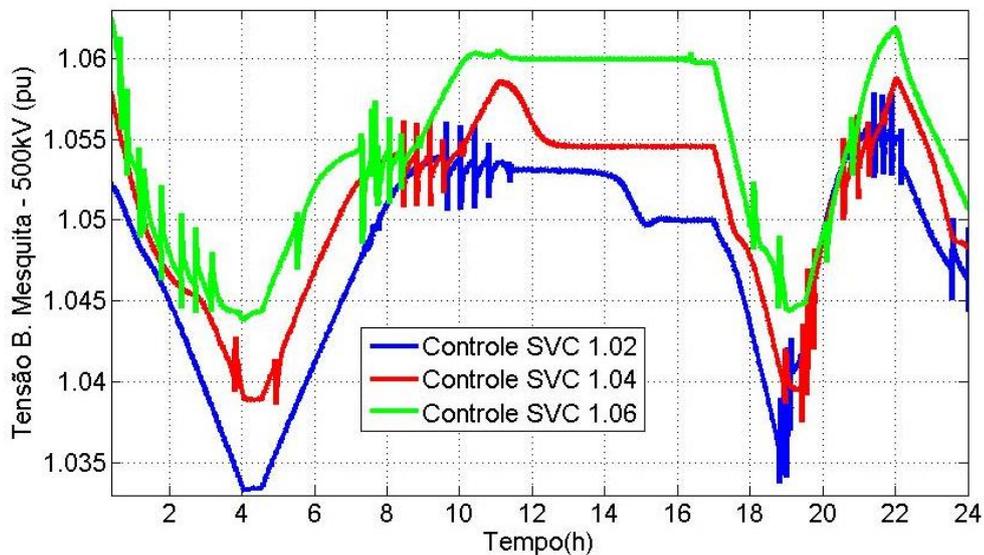
Figura 5.39: Tensão barramento Viana II - 500kV com SVC - 2021



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.40 observa-se que a queda de tensão do sistema, devido o aumento de carga no cenário do ano de 2021, favoreceu o perfil de tensão no barramento Mesquita – 500kV. O limite superior de tensão, apresentado na Figura 5.16 que era de 1,075 pu passa a ser de 1,06 pu.

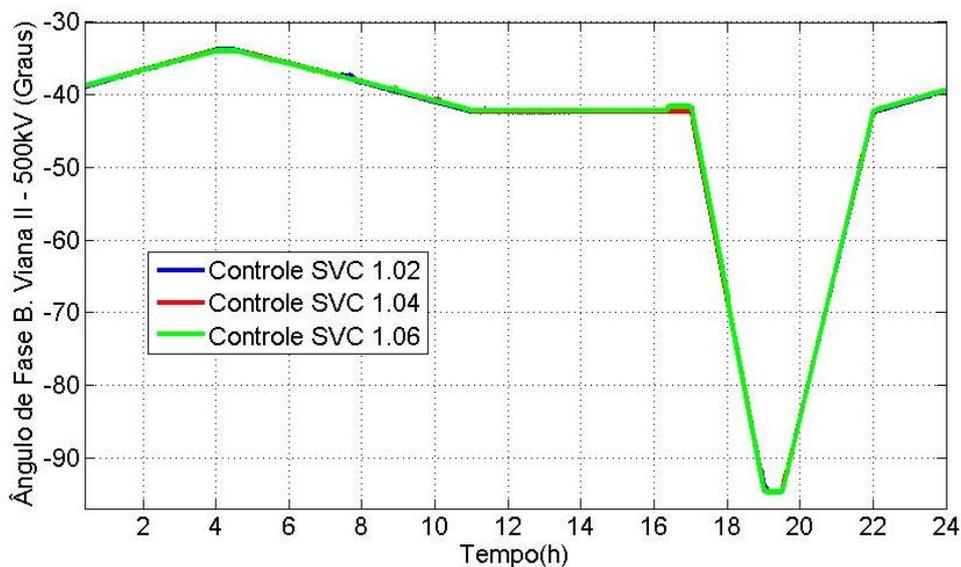
Figura 5.40: Tensão barramento Mesquita - 500kV com SVC - 2021



Fonte: Elaborado pelo autor.

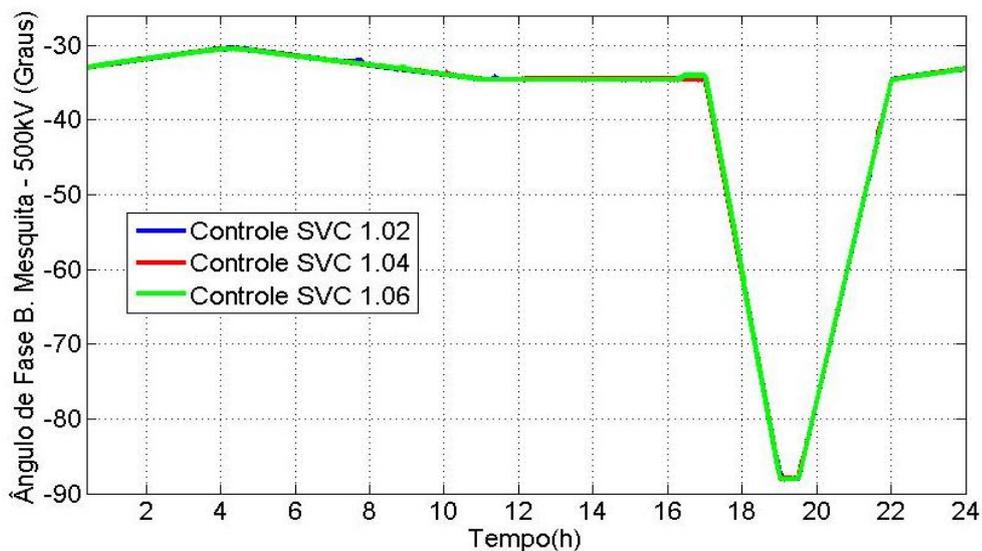
As Figuras 5.41 e 5.42 ilustram o ângulo de fase da tensão nas barras Viana II – 500kV e Mesquita – 500kV, novamente observa-se que não há alteração destas com a regulação de tensão.

Figura 5.41: Ângulo do barramento Viana II - 500kV com SVC - 2021



Fonte: Elaborado pelo autor.

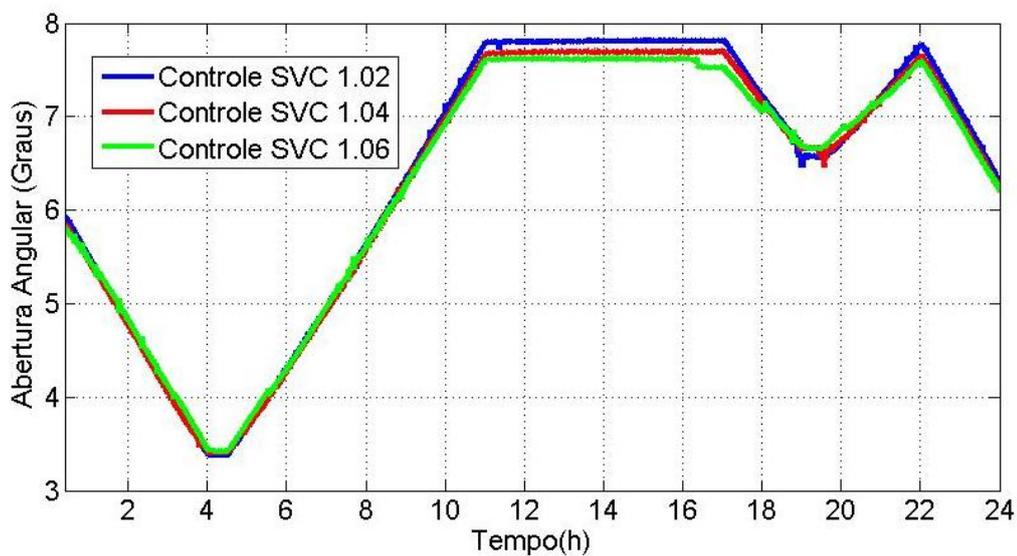
Figura 5.42: Ângulo do barramento Mesquita - 500kV com SVC - 2021



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.43 apresenta a abertura angular obtida pela diferença entre os ângulos de fase nas barras de Mesquita – 500kV e Viana II – 500kV.

Figura 5.43: Abertura Angular Com SVC - 2021



Fonte: Elaborado pelo autor.

Capítulo 6: Conclusão

Este trabalho apresentou o estudo de modelagem de um sistema elétrico em 500 kV interligando as subestações de Mesquita e Viana II, no cenário do ano de 2015, utilizando o programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC. Avaliou-se também, o comportamento do sistema na barra Viana II – 500kV com a inserção do dispositivo SVC para a regulação de tensão.

Na modelagem da subestação de Mesquita, considerou-se o compensador síncrono desta subestação apenas como elementos de injeção reativos, compostos por capacitor e indutor. O seu sistema de banco de capacitores foi modelado como grupo de capacitores, conforme a sua configuração atual. No comando destes dois compensadores de reativos, utilizou-se uma malha de controle do tipo PI. O tempo de resposta para o compensador síncrono foi baseado na constante de inércia típica deste dispositivo. Já para o banco de capacitores o tempo de resposta é instantâneo.

Os dados que foram utilizados nessa modelagem, que representam os equipamentos do sistema elétrico, foram disponibilizados pelo NOS, e representam todo sistema de transmissão do SIN. Para simplificação da área de interesse do sistema, foi necessário obter o equivalente externo estático do sistema através do “software” ANAREDE.

Com relação ao fluxo de potência, o ONS disponibilizou os dados do sistema para a carga em três modos: leve, médio e pesado. Para modelar o sistema de forma mais próxima do real, foi ajustada a modelagem ao longo do dia, de acordo com a curva de carga típica da região Sudeste - Centro Oeste. Com os dados de carga disponibilizados pela EPE, realizou-se a projeção do sistema modelado para o cenário do ano de 2021.

Além disso, foi elaborado o modelo do compensador estático SVC, com o dimensionamento de seus reativos indutivo, capacitivo e filtro de harmônicos. Para a autonomia do sistema, foi elaborada uma malha de controle do tipo PI, responsável por comparar o nível de tensão desejado com o medido no barramento do sistema. Com isso, determinando a entrada ou saída

dos bancos de capacitores do TSC, ajustando de forma otimizada a absorção de reativos do TCR.

Finalizando, foram apresentados os resultados a partir do uso do SVC, modelado no controle do perfil de tensão do barramento Viana II - 500kV, nos cenários dos anos de 2015 e 2021. Observou-se que o sistema, na sua condição natural, apresentava uma variação da tensão ao longo do dia; e que era possível alcançar a estabilização da tensão com a aplicação do SVC proposto neste projeto, tanto no cenário do ano 2015 quanto no de 2021.

Desta forma o trabalho desenvolvido comprova que a aplicação do dispositivo SVC na linha de transmissão Mesquita – Viana II – 500kV é tecnicamente viável e torna a tensão nesta linha de transmissão estabilizada.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se o estudo, com a modelagem do compensador síncrono, instalado na Subestação de Mesquita, a partir dos seus parâmetros reais. Na sequência, pode-se realizar os estudos de resposta transitória do sistema. Além disso, poderia ser realizar um estudo de viabilidade técnica de implantação do compensador de energia reativa proposto neste trabalho e comparar com a solução do um sistema de 12 (doze) pulsos isolados por transformador Δ/Y correspondendo a um defasamento de 30° para anulação da 5ª e 7ª harmônicas.

Referências Bibliográficas

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Mapas do SIN, Sistema de Transmissão: Horizonte 2015**. 2014a. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>. Acesso em: 20 nov. 2014.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA. **Atribuições do CNPE**. Lei nº 9.478 de 1997, art 2º. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/conselhos_comite/cnpe.html>. Acesso em: 22 nov. 2014.

COMITÊ DE MONITORAMENTO DO SETOR ELÉTRICO. **Atribuições do CMSE**. Lei nº 10.848 de 2004, art 14º. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm>. Acesso em: 22 nov. 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atribuições da EPE**. Lei nº 10.847 de 2004, art 2º. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Downloads/Lei_10.847_15.03.04.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atribuições da ANEEL**. Lei nº 9.247 de 1996, art 2º. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427compilada.htm>. Acesso em: 22 nov. 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Atribuições do ONS**. Lei nº 9.648 de 1998, art 13º. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19648cons.htm>. Acesso em: 22 nov. 2014.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atribuições do CCEE**. Lei nº 10.848 de 2004, art 4º. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm>. Acesso em: 22 nov. 2014.

WATANABE, EDSON H.; BARBOSA, PEDRO G.; ALMEIDA, KATIA C.; TARANTO, GLAUCO N. **Tecnologia FACTS: Tutorial**. SBA Controle & Automação, Revista da Sociedade Brasileira de Automática, Vol. 9, No. 1, 1998, p. 39-55.

MACHADO, R.L. **Aplicação de dispositivos FACTS no sistema de transmissão da Eletrosul**. 2003. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós

Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 16/11: Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2012-2021)**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20120104_1.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2014.

AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Relatório de Gestão: Cinco anos de realizações no segmento energético do Espírito Santo**. 2010a. Página 40. Disponível em: <http://www.aspe.es.gov.br/download/Relatorio_de_Gestao_5anos.pdf>. Acesso em 20 abril 2014.

AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. 2010b. **Relatório de Gestão: Cinco anos de realizações no segmento energético do Espírito Santo**. 2010b. Página 45. Disponível em: <http://www.aspe.es.gov.br/download/Relatorio_de_Gestao_5anos.pdf>. Acesso em: 20 abril 2014.

PADIYAR, K. R. **FACTS: Controllers in Power Transmission and Distribution**, Publisher Anshan Publishers, 1 Edition, August, 2009.

HINGORANI, N.G.; GYUGYIL, L. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. 2000. IEEE Press, USA.

MOHAN, M.; RAJIV, V. **Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems**. 2002. IEEE Press, USA.

PADIYAR, K. **Facts Controllers in Power Transmission and Distribution**. New Age International. 2007. New Delhi.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN**. 2014b. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/dados_tecnicos.aspx>. Acesso em: 14 jan. 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 5.5: Consolidação da previsão de carga para o planejamento anual da operação energética**. 2009. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_5/Subm%C3%B3dulo%205.5_Rev_1.0.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Casos de Referências utilizadas para estudos elétricos de fluxo de potência dentro do horizonte do Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica PAR 2014-2016.** 2013a. Disponível em: <http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/casos_refer_regime_permanente.aspx>. Acesso em: 23 nov. 2013.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **NT ONS 022/2013: Término do Horário de Verão 2012/2013.** 2013b. Disponível em: <http://www.ons.org.br/analise_carga_demanda/horario_verao.aspx>. Acesso em: 15 março. 2014.

SOUZA, L.M. **Compensador Síncrono de Velocidade Variável.** 2003. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

ASEA BROWN BOVERI. **Reference List, Dynamic Shunt Compensation.** 2012. Disponível em: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/8c430506608f7d9cc1257cba002308ed/\\$file/ABB%20Reference%20List%209%20April.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/8c430506608f7d9cc1257cba002308ed/$file/ABB%20Reference%20List%209%20April.pdf)>. Acesso em: 20 mar.2014.

ALSTOM. **Utility Static Var Compensators (SVC).** 2007. Disponível em: <http://www.nokiancapacitors.ru/documents/products/systems/EN-CS3-03_2007-utility_SVC.pdf>. Acesso em: 18 fev.2014.

SIMONETTI, D. S. L. **Apostila do curso de Qualidade de Energia - PPGEE.** 2011. Universidade Federal do Espírito Santo.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 23.3 Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos.** 2010. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_23/Subm%C3%B3dulo%2023.3_Rev_1.1.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2014.

ALUBAR. **Tabela de condutores CAA.** 2014. Disponível em: <http://www.alubar.net.br/downloads/produtos/cabos_caa_condutores_de_aluminio_com_alma_de_aco.pdf>. Acesso em 12 mar.2014.

VINTURINI, R.L. Sistema de Controle de Disparo do TSC. In: **Desenvolvimento dos Circuitos de Acionamento e Controle de um SVC para Regulação de Tensão**. 83f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013. Seção 6.3.1.6.

APÊNDICE A: Validação do Sistema Elétrico Simulado

VALIDAÇÃO FLUXO DE POTÊNCIA CARGA LEVE							
Barra (origem)	Linha (destino)	Valor ONS P. Ativa	Valor Simulado P. Ativa	Erro Perc Fluxo Ativo	Valor ONS P. Reativa	Valor Simulado P. Reativa	Erro Perc. Fluxo Reat.
90	LA1	-15,5	-15,54	0%	-5,6	-1,5	73%
	LA2	-228,1	-219,3	4%	-77,1	-54,66	29%
	LA3	-5,5	-5,03	9%	-0,9	0,86	196%
	Total LA's	-249,1	-239,87	4%	-83,6	-55,3	34%
	LT Viana/ Viana2 C1	-70,6	-75,68	-7%	-38,9	-97,65	-151%
	LT Viana/ Viana2 C2	-70,6	-75,68	-7%	-38,9	-97,65	-151%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-4640,6	-4646	0%
	Equiv. Externo	-390,3	-391,2	0%	4622,4	4396	5%
3019	LT Viana/ Viana II C1	70,6	73,04	-3%	33,6	20,51	39%
	LT Viana/ Viana II C2	70,6	73,04	-3%	33,6	20,51	39%
	3021	-141,3	-146,1	-3%	-67,2	-44,54	34%
3021	3019	141,3	146,1	-3%	70,1	24,68	65%
	344	-141,3	-146,1	-3%	-70,1	-44,5	37%
	Shunt de Linha	0	0	0%	-157,4	-158,7	-1%
344	LT Mesquita/ Viana II	141,7	150	-6%	21,2	24,7	-17%
	LT Mesquita/ Vesp II	-290,9	-244,3	16%	-59,3	-69,8	-18%
	LT Neves I/ Mesquita	-325,9	-382,7	-17%	-43,5	-32,9	24%
	Shunt de Linha	0	0	0%	-163,1	-162,7	0%
	1589	118	118,2	0%	16,9	15,7	7%
	1590	119,3	121	-1%	21	20,3	3%
	1591	116,9	117,1	0%	22,6	21,72	4%
	1593	120,8	121	0%	21,2	20,3	4%

VALIDAÇÃO FLUXO DE POTÊNCIA CARGA LEVE							
Barra (origem)	Linha (destino)	Valor ONS P. Ativa	Valor Simulado P. Ativa	Erro Perc Fluxo Ativo	Valor ONS P. Reativa	Valor Simulado P. Reativa	Erro Perc. Fluxo Reat.
345	LA1	15,6	15,81	-1%	6,3	3,3	48%
	LA4	-105,2	-104,8	0%	-23,8	-14,31	40%
	LA6	-3,8	-3,2	16%	-0,5	-0,2	60%
	Total LA's	-93,4	-92,19	1%	-18	-11,21	38%
	1589	-118	-118,2	0%	29,1	33,72	-16%
	1590	-119,3	-121	-1%	-17,7	-16,97	4%
	1591	-116,9	-117,1	0%	-45,2	-44,12	2%
	1593	-120,8	-121	0%	-17,9	-16,97	5%
	Shunt Equiv.	0		0%	-1312,1	-1312	0%
	Equiv. Externo	-568,4	-569,4	0%	1345,1	1257	7%
346		0	0	0%	-41,5	-41,5	0%
329		0	0	0%	0	0	0%
324		0	0	0%	26,2	26,1	0%
1547		0	0	0%	0	0	0%
4028	LA3	5,8	5,32	8%	1,6	0,8	50%
	LA5	-23,5	-22,1	6%	14,8	8,7	41%
	LA6	3,9	3,4	13%	0,8	0,4	50%
	Total LA's	-13,8	-13,38	3%	17,2	9,9	42%
	LT Mesquita/ Vepa II	291,9	245,6	16%	-133,3	-125,3	6%
	LT Neves I/ Vespa II	-448,6	-402	10%	206,1	51	75%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-79,425	-79,44	0%
	Equiv. Externo	-170,4	-170	0%	184,7	15,1	92%
349	LA2	231	222,5	4%	113,2	94,61	16%
	LA4	107	107	0%	35,1	27,7	21%
	LA5	23,5	22,24	5%	-14,4	-7,8	46%
	Total LA's	361,5	351,74	3%	133,9	114,51	14%
	LT Neves I/ Vepa II	449,2	400,8	11%	-236,2	-136,3	42%
	LT Neves I/ Mesquita	327,3	386,5	-18%	38,1	-170,9	549%
	Shunt de Barra	0	0	0%	-106,6	-106,5	0%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-3670,3	-3668	0%
	Equiv. Ext.	1138,1	1139	0%	4255,6	3582	16%

VALIDAÇÃO FLUXO DE POTÊNCIA CARGA MÉDIA							
Barra (origem)	Linha (destino)	Valor ONS P. Ativa	Valor Simulado P. Ativa	Erro Perc. Fluxo Ativo	Valor ONS P. Reativa	Valor Simulado P. Reativa	Erro Perc. Fluxo Reat.
90	LA1	-42,8	-37,8	12%	11	16	-45%
	LA2	-404	-369	9%	-8,6	7	181%
	LA3	-8,9	-8,5	4%	1,9	4	-111%
	Total LA's	-455,7	-415,3	9%	4,3	27	-528%
	LT Viana/ Viana2 C1	-157,5	-177,5	-13%	-3,7	-3,8	-3%
	LT Viana/ Viana2 C2	-157,5	-177,5	-13%	-3,7	-3,8	-3%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-5030,7	-5316	-6%
	Equiv. Externo	-770,8	-770,2	0%	5191,2	5336	-3%
3019	LT Viana/ Viana II C1	157,6	177,3	-13%	-1,1	-11,17	-915%
	LT Viana/ Viana II C2	157,6	177,3	-13%	-1,1	-11,17	-915%
	3021	-315,2	-354,7	-13%	2,1	22,33	-963%
3021	3019	315,2	354,7	-13%	9,4	-2,76	129%
	344	-315,2	354	212%	-9,4	2,76	129%
	Shunt de Linha	0	0	0%	-155,1	-154,2	1%
344	LT Mesquita/ Viana II	317,3	359	-13%	-12,2	10,6	187%
	LT Mesquita/ Vesp II	-394,1	-418,1	-6%	-59,4	-62,85	-6%
	LT Neves I/ Mesquita	-451,7	-469,3	-4%	-58,3	-60,6	-4%
	Shunt de Linha	0	0	0%	-157	-157	0%
	1589	131,1	130,7	0%	32,9	28,7	13%
	1590	132,8	134	-1%	32,4	28,4	12%
	1591	130,1	130	0%	31,8	28	12%
	1593	134,4	134	0%	32,8	28	15%

VALIDAÇÃO FLUXO DE POTÊNCIA CARGA MÉDIA							
Barra (origem)	Linha (destino)	Valor ONS P. Ativa	Valor Simulado P. Ativa	Erro Perc Fluxo Ativo	Valor ONS P. Reativa	Valor Simulado P. Reativa	Erro Perc. Fluxo Reat.
345	LA1	43,8	39,65	9%	-6,1	-9,8	-61%
	LA4	-133,7	-124,4	7%	-23,9	-16,5	31%
	LA6	-4,6	-4,31	6%	-0,2	0,48	340%
	Total LA's	-94,5	-89,06	6%	-30,2	-25,82	15%
	1589	-131,1	-130,7	0%	-38,6	-34,92	10%
	1590	-132,8	-134	-1%	-28,1	-24,1	14%
	1591	-130,1	-129,7	0%	-27,5	-23,3	15%
	1593	-134,4	-134	0%	-28,4	-24,1	15%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-1686,3	-1703	-1%
	Equiv. Externo	-622,9	-617,6	1%	1588,4	1570	1%
346		0	0	0%	10	10,2	-2%
329		0	0	0%	0	0	0%
324		0	0	0%	0	0	0%
1547		0	0	0%	0	0	0%
4028	LA3	9,6	9,5	1%	0,1	-1,15	1250%
	LA5	-36,2	-13,9	62%	9,5	3,3	65%
	LA6	4,8	4,6	4%	0,7	0,01	99%
	Total LA's	-21,8	0,2	101%	10,3	2,16	79%
	LT Mesquita/ Vepa II	396	420,6	-6%	-112,7	-103	9%
	LT Neves I/ Vespa II	-668,2	-716	-7%	87,9	75,1	15%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-159,98	-153,4	4%
	Equiv. Externo	-294	-295,2	0%	170,2	128	25%
349	LA2	412	377,5	8%	110,4	97,3	12%
	LA4	136,8	127,9	7%	42,9	35,6	17%
	LA5	36,3	13,9	62%	-8,6	-2,97	65%
	Total LA's	585,1	519,3	11%	144,7	129,93	10%
	LT Neves I/ Vepa II	669,4	717,2	-7%	-109,7	-92,2	16%
	LT Neves I/ Mesquita	454,5	472,9	-4%	-132,9	-120	10%
	Shunt de Barra	0	0	0%	-106,6	-104,2	2%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-3905,4	-4197	-7%
	Equiv. Ext.	1709	1710	0%	4396,3	4219	4%

VALIDAÇÃO FLUXO DE POTÊNCIA CARGA PESADA							
Barra (origem)	Linha (destino)	Valor ONS P. Ativa	Valor Simulado P. Ativa	Erro Perc Fluxo Ativo	Valor ONS P. Reativa	Valor Simulado P. Reativa	Erro Perc. Fluxo Reat.
90	LA1	-37,8	-31,5	17%	5,1	9,1	-78%
	LA2	-367,8	-362,4	1%	-21,1	-11	48%
	LA3	-8,2	-8,4	-2%	1,4	3,7	-164%
	Total LA's	-413,8	-402,3	3%	-14,6	1,8	112%
	LT Viana/ Viana2 C1	-153,1	-158,3	-3%	-18,33	-17,7	3%
	LT Viana/ Viana2 C2	-153,1	-158,3	-3%	-18,33	-17,7	3%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-4952,5	-4634	6%
	Equiv. Externo	-719,9	-718,9	0%	5045,6	4602	9%
3019	LT Viana/ Viana II C1	153,2	158,2	-3%	10,1	3,28	68%
	LT Viana/ Viana II C2	153,2	158,2	-3%	10,1	3,28	68%
	3021	-306,2	-316,4	-3%	-20,3	-6,6	67%
3021	3019	306,3	316,4	-3%	31,2	22,4	28%
	344	-306,3	-316,4	-3%	-31,2	-22,4	28%
	Shunt de Linha	0	0	0%	-155,3	-155	0%
344	LT Mesquita/ Viana II	308,3	320,2	-4%	7,3	27,1	-271%
	LT Mesquita/ Vesp II	-464,9	-480,5	-3%	-63,3	-66,41	-5%
	LT Neves I/ Mesquita	-524,2	-532,2	-2%	-57,3	-56,6	1%
	Shunt de Linha	0	0	0%	-159,3	-159	0%
	1589	169	171,4	-1%	27	23	15%
	1590	171,1	175,6	-3%	26,7	23	14%
	1591	167,4	169,8	-1%	32,5	27,9	14%
	1593	173,3	175,6	-1%	27,1	22,7	16%

VALIDAÇÃO FLUXO DE POTÊNCIA CARGA PESADA							
Barra	Linha	Valor ONS P. Ativa	Valor Simulado P. Ativa	Erro Perc Fluxo Ativo	Valor ONS P. Reativa	Valor Simulado P. Reativa	Erro Perc. Fluxo Reat.
345	LA1	38,5	32,7	15%	-1,3	-4,7	-262%
	LA4	-156,9	-144,5	8%	-17,5	-10,1	42%
	LA6	-5,4	-4,97	8%	0,2	0,88	-340%
	Total LA's	-123,8	-116,77	6%	-18,6	-13,92	25%
	1589	-169	-171,3	-1%	-27,4	-22,8	17%
	1590	-171,1	-175,6	-3%	-19,8	-15,6	21%
	1591	-167,4	-169,8	-1%	-103,9	-91	12%
	1593	-173,3	-175,6	-1%	-20,1	-15,6	22%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-1756,6	-1736	1%
	Equiv. Externo	-804,6	-809,3	-1%	1656,4	1578	5%
346		0	0	0%	7,2	7,01	3%
329		0	0	0%	0	0	0%
324		0	0	0%	82,5	75	9%
1547		0	0	0%	0	0	0%
4028	LA3	8,9	9,4	-6%	0,5	-0,66	232%
	LA5	-40	-15	63%	10,9	4,2	61%
	LA6	5,7	5,3	7%	0,5	0,27	46%
	Total LA's	-25,4	-0,3	99%	11,9	3,81	68%
	LT Mesquita/ Vepa II	467,5	483,1	-3%	-101,7	-93,4	8%
	LT Neves I/ Vespa II	-738,2	-779,3	-6%	105,5	114,5	-9%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-155,03	-151,4	2%
	Equiv. Externo	-296,3	-296,4	0%	198,1	177,4	10%
349	LA2	375	370,3	1%	118,5	112	5%
	LA4	161,2	149,1	8%	42,7	34,6	19%
	LA5	40,2	15,1	62%	-9,9	-3,8	62%
	Total LA's	576,4	534,5	7%	151,3	142,8	6%
	LT Neves I/ Vepa II	739,7	781,1	-6%	-124,9	-128,9	-3%
	LT Neves I/ Mesquita	527,9	536,5	-2%	-123,7	-115,3	7%
	Shunt de Barra	0	0	0%	-106,6	-106,1	0%
	Shunt Equiv.	0	0	0%	-4541,5	-3656	19%
	Equiv. Externo	1844	1852	0%	5224,2	3661	30%

VALIDAÇÃO TENSÃO CARGA LEVE					
Barra	Modulo Tensão ONS	Argumento Tensão ONS	Modulo Tensão Sim.	Argumento Tensão Sim.	Erro Perc. Tensão
90	1,015	-26,6	1,015	-31,68	9%
3019	1,017	-26,5	1,023	-31,68	9%
3021	1,076	-25,5	1,081	-29,97	8%
344	1,095	-23	1,095	-27,34	8%
345	1,038	-24,5	1,038	-28,88	8%
4028	1,092	-20	1,092	-24,82	8%
349	1,085	-19,1	1,085	-22,75	6%
VALIDAÇÃO TENSÃO CARGA MÉDIA					
Barra	Modulo Tensão ONS	Argumento Tensão ONS	Modulo Tensão Sim.	Argumento Tensão Sim.	Erro Perc. Tensão
90	1,016	-38,6	1,016	-39,41	1%
3019	1,017	-38,6	1,016	-39,2	1%
3021	1,068	-36,2	1,065	-36,01	0%
344	1,075	-30,2	1,073	-29,8	1%
345	1,016	-32	1,016	-31,6	1%
4028	1,074	-26,1	1,074	-25,3	1%
349	1,073	-24,8	1,073	-24	1%
VALIDAÇÃO TENSÃO CARGA PESADA					
Barra	Modulo Tensão ONS	Argumento Tensão ONS	Modulo Tensão Sim.	Argumento Tensão Sim.	Erro Perc. Tensão
90	1,014	-93,4	1,014	-91,2	4%
3019	1,015	-93,2	1,015	-91	4%
3021	1,069	-91,2	1,067	-88,2	5%
344	1,082	-85,4	1,081	-82,72	5%
345	1,025	-87,7	1,025	-85	5%
4028	1,085	-80,6	1,085	-77,7	5%
349	1,082	-79,2	1,082	-76,3	5%

APÊNDICE B: Características Elétricas das Linhas de Transmissão

A partir da montagem do arranjo das linhas de transmissão no software PSCAD/EMTC foi possível obter as características elétricas do sistema, conforme tópicos a seguir.

B.1 - LT Mesquita – VianaII - 500kV

Display Format: M,N denotes a complex number $M + jN$

PHASE DOMAIN DATA @ 60.00 Hz:

SERIES IMPEDANCE MATRIX (Z) [ohms/m]:

```
0.782433107E-04,0.543546896E-03 0.571614826E-04,0.191724641E-03 0.571614826E-04,0.191724641E-03
0.571614826E-04,0.191724641E-03 0.782433107E-04,0.543546896E-03 0.571614826E-04,0.191724641E-03
0.571614826E-04,0.191724641E-03 0.571614826E-04,0.191724641E-03 0.782433107E-04,0.543546896E-03
```

SHUNT ADMITTANCE MATRIX (Y) [mhos/m]:

```
0.100000000E-10,0.402615442E-08 0.000000000E+00,-.604739890E-09 0.000000000E+00,-.604739890E-09
0.000000000E+00,-.604739890E-09 0.100000000E-10,0.402615442E-08 0.000000000E+00,-.604739890E-09
0.000000000E+00,-.604739890E-09 0.000000000E+00,-.604739890E-09 0.100000000E-10,0.402615442E-08
```

LONG-LINE CORRECTED SERIES IMPEDANCE MATRIX [ohms]:

```
0.187036074E+02,0.133923251E+03 0.135760489E+02,0.467791981E+02 0.135760489E+02,0.467791981E+02
0.135760489E+02,0.467791981E+02 0.187036074E+02,0.133923251E+03 0.135760489E+02,0.467791981E+02
0.135760489E+02,0.467791981E+02 0.135760489E+02,0.467791981E+02 0.187036074E+02,0.133923251E+03
```

LONG-LINE CORRECTED SHUNT ADMITTANCE MATRIX [mhos]:

```
0.368580776E-05,0.102468363E-02 0.506081751E-06,-.152465570E-03 0.506081751E-06,-.152465570E-03
0.506081751E-06,-.152465570E-03 0.368580776E-05,0.102468363E-02 0.506081751E-06,-.152465570E-03
0.506081751E-06,-.152465570E-03 0.506081751E-06,-.152465570E-03 0.368580776E-05,0.102468363E-02
```

SEQUENCE COMPONENT DATA @ 60.00 Hz:

SEQUENCE TRANSFORM MATRIX:

0.577350269E+00,0.000000000E+00 0.577350269E+00,0.000000000E+00 0.577350269E+00,0.000000000E+00
0.577350269E+00,0.000000000E+00 -.288675135E+00,-.500000000E+00 -.288675135E+00,0.500000000E+00
0.577350269E+00,0.000000000E+00 -.288675135E+00,0.500000000E+00 -.288675135E+00,-.500000000E+00

SEQUENCE IMPEDANCE MATRIX (Zsq) [ohms/m]:

0.192566276E-03,0.926996178E-03 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00
0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.210818281E-04,0.351822256E-03 0.000000000E+00,0.000000000E+00
0.108420217E-18,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.210818281E-04,0.351822256E-03

SEQUENCE ADMITTANCE MATRIX (Ysq) [mhos/m]:

0.100000000E-10,0.281667464E-08 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00
0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.100000000E-10,0.463089431E-08 0.000000000E+00,0.000000000E+00
0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.100000000E-10,0.463089431E-08

LOAD FLOW RXB FORMATTED DATA @ 60.00 Hz:

Per-Unit Quantities Based On: Base Voltage: 500.00 kV,L-L,RMS
Base MVA: 100.00 MVA

NOTE: Base values are set using Output File Data
Display Options component in Editor view.

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE RESISTANCE RLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.205102342E-02
0 Seq. Self: 0.183422821E-01

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE REACTANCE XLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.348576211E-01
0 Seq. Self: 0.909926589E-01

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE SUSCEPTANCE BLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 2.94287299
0 Seq. Self: 1.79938122

SEQUENCE RESISTANCE Rsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.212504827E-02
0 Seq. Self: 0.194106806E-01

SEQUENCE REACTANCE Xsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.354636834E-01

0 Seq. Self: 0.934412147E-01

SEQUENCE SUSCEPTANCE Bsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 2.91746341

0 Seq. Self: 1.77450502

B.2 - LT Mesquita – Vespasiano II - 500kV

 PHASE DOMAIN DATA @ 60.00 Hz:

SERIES IMPEDANCE MATRIX (Z) [ohms/m]:

0.885171668E-04,0.559507881E-03	0.663974500E-04,0.202867131E-03	0.663974500E-04,0.202867131E-03
0.663974500E-04,0.202867131E-03	0.885171668E-04,0.559507881E-03	0.663974500E-04,0.202867131E-03
0.663974500E-04,0.202867131E-03	0.663974500E-04,0.202867131E-03	0.885171668E-04,0.559507881E-03

SHUNT ADMITTANCE MATRIX (Y) [mhos/m]:

0.100000000E-10,0.398369694E-08	0.000000000E+00,-.588360736E-09	0.000000000E+00,-.588360736E-09
0.000000000E+00,-.588360736E-09	0.100000000E-10,0.398369694E-08	0.000000000E+00,-.588360736E-09
0.000000000E+00,-.588360736E-09	0.000000000E+00,-.588360736E-09	0.100000000E-10,0.398369694E-08

LONG-LINE CORRECTED SERIES IMPEDANCE MATRIX [ohms]:

0.130371476E+02,0.833287623E+02	0.975717075E+01,0.301053016E+02	0.975717075E+01,0.301053016E+02
0.975717075E+01,0.301053016E+02	0.130371476E+02,0.833287623E+02	0.975717075E+01,0.301053016E+02
0.975717075E+01,0.301053016E+02	0.975717075E+01,0.301053016E+02	0.130371476E+02,0.833287623E+02

LONG-LINE CORRECTED SHUNT ADMITTANCE MATRIX [mhos]:

0.176639288E-05,0.600276985E-03	0.124242715E-06,-.883276657E-04	0.124242715E-06,-.883276657E-04
0.124242715E-06,-.883276657E-04	0.176639288E-05,0.600276985E-03	0.124242715E-06,-.883276657E-04
0.124242715E-06,-.883276657E-04	0.124242715E-06,-.883276657E-04	0.176639288E-05,0.600276985E-03

 SEQUENCE COMPONENT DATA @ 60.00 Hz:

SEQUENCE TRANSFORM MATRIX:

0.577350269E+00,0.000000000E+00	0.577350269E+00,0.000000000E+00	0.577350269E+00,0.000000000E+00
0.577350269E+00,0.000000000E+00	-.288675135E+00,-.500000000E+00	-.288675135E+00,0.500000000E+00
0.577350269E+00,0.000000000E+00	-.288675135E+00,0.500000000E+00	-.288675135E+00,-.500000000E+00

SEQUENCE IMPEDANCE MATRIX (Zsq) [ohms/m]:

0.221312067E-03,0.965242144E-03	0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.000000000E+00,0.000000000E+00
---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.221197168E-04,0.356640750E-03 0.000000000E+00,0.000000000E+00
 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.221197168E-04,0.356640750E-03

SEQUENCE ADMITTANCE MATRIX (Ysq) [mhos/m]:

0.100000000E-10,0.280697547E-08 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00
 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.100000000E-10,0.457205768E-08 0.000000000E+00,0.000000000E+00
 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.100000000E-10,0.457205768E-08

 LOAD FLOW RXB FORMATTED DATA @ 60.00 Hz:

Per-Unit Quantities Based On: Base Voltage: 500.00 kV,L-L,RMS
 Base MVA: 100.00 MVA

NOTE: Base values are set using Output File Data
 Display Options component in Editor view.

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE RESISTANCE RLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.131199072E-02
 0 Seq. Self: 0.130205956E-01

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE REACTANCE XLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.212893843E-01
 0 Seq. Self: 0.574157462E-01

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE SUSCEPTANCE BLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 1.72151163
 0 Seq. Self: 1.05905413

SEQUENCE RESISTANCE Rsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.132851019E-02
 0 Seq. Self: 0.132920027E-01

SEQUENCE REACTANCE Xsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.214198434E-01
 0 Seq. Self: 0.579724432E-01

SEQUENCE SUSCEPTANCE Bsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 1.71623615
 0 Seq. Self: 1.05366842

B.3 - LT NevesI – Mesquita - 500kV

 PHASE DOMAIN DATA @ 60.00 Hz:

SERIES IMPEDANCE MATRIX (Z) [ohms/m]:

0.885171668E-04,0.559507881E-03	0.663974500E-04,0.202867131E-03	0.663974500E-04,0.202867131E-03
0.663974500E-04,0.202867131E-03	0.885171668E-04,0.559507881E-03	0.663974500E-04,0.202867131E-03
0.663974500E-04,0.202867131E-03	0.663974500E-04,0.202867131E-03	0.885171668E-04,0.559507881E-03

SHUNT ADMITTANCE MATRIX (Y) [mhos/m]:

0.100000000E-10,0.398369694E-08	0.000000000E+00,-.588360736E-09	0.000000000E+00,-.588360736E-09
0.000000000E+00,-.588360736E-09	0.100000000E-10,0.398369694E-08	0.000000000E+00,-.588360736E-09
0.000000000E+00,-.588360736E-09	0.000000000E+00,-.588360736E-09	0.100000000E-10,0.398369694E-08

LONG-LINE CORRECTED SERIES IMPEDANCE MATRIX [ohms]:

0.148850444E+02,0.954827705E+02	0.111319599E+02,0.344564979E+02	0.111319599E+02,0.344564979E+02
0.111319599E+02,0.344564979E+02	0.148850444E+02,0.954827705E+02	0.111319599E+02,0.344564979E+02
0.111319599E+02,0.344564979E+02	0.111319599E+02,0.344564979E+02	0.148850444E+02,0.954827705E+02

LONG-LINE CORRECTED SHUNT ADMITTANCE MATRIX [mhos]:

0.212800756E-05,0.690414270E-03	0.189240716E-06,-.101469171E-03	0.189240716E-06,-.101469171E-03
0.189240716E-06,-.101469171E-03	0.212800756E-05,0.690414270E-03	0.189240716E-06,-.101469171E-03
0.189240716E-06,-.101469171E-03	0.189240716E-06,-.101469171E-03	0.212800756E-05,0.690414270E-03

 SEQUENCE COMPONENT DATA @ 60.00 Hz:

SEQUENCE TRANSFORM MATRIX:

0.577350269E+00,0.000000000E+00	0.577350269E+00,0.000000000E+00	0.577350269E+00,0.000000000E+00
0.577350269E+00,0.000000000E+00	-.288675135E+00,-.500000000E+00	-.288675135E+00,0.500000000E+00
0.577350269E+00,0.000000000E+00	-.288675135E+00,0.500000000E+00	-.288675135E+00,-.500000000E+00

SEQUENCE IMPEDANCE MATRIX (Zsq) [ohms/m]:

0.221312067E-03,0.965242144E-03	0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.000000000E+00,0.000000000E+00
0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.221197168E-04,0.356640750E-03	0.000000000E+00,0.000000000E+00
0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.221197168E-04,0.356640750E-03

SEQUENCE ADMITTANCE MATRIX (Ysq) [mhos/m]:

0.100000000E-10,0.280697547E-08	0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.000000000E+00,0.000000000E+00
0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.100000000E-10,0.457205768E-08	0.000000000E+00,0.000000000E+00
0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.000000000E+00,0.000000000E+00	0.100000000E-10,0.457205768E-08

 LOAD FLOW RXB FORMATTED DATA @ 60.00 Hz:

Per-Unit Quantities Based On: Base Voltage: 500.00 kV,L-L,RMS
 Base MVA: 100.00 MVA

NOTE: Base values are set using Output File Data
 Display Options component in Editor view.

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE RESISTANCE RLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.150123382E-02

0 Seq. Self: 0.148595857E-01

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE REACTANCE XLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.244105090E-01

0 Seq. Self: 0.657583065E-01

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE SUSCEPTANCE BLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 1.97970860

0 Seq. Self: 1.21868982

SEQUENCE RESISTANCE Rsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.152626046E-02

0 Seq. Self: 0.152705326E-01

SEQUENCE REACTANCE Xsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.246082117E-01

0 Seq. Self: 0.666017079E-01

SEQUENCE SUSCEPTANCE Bsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 1.97169987

0 Seq. Self: 1.21050817

B.4 - LT NevesI – VespasianoII - 500kV

 PHASE DOMAIN DATA @ 60.00 Hz:

SERIES IMPEDANCE MATRIX (Z) [ohms/m]:

0.885171668E-04,0.559507881E-03 0.663974500E-04,0.202867131E-03 0.663974500E-04,0.202867131E-03
 0.663974500E-04,0.202867131E-03 0.885171668E-04,0.559507881E-03 0.663974500E-04,0.202867131E-03
 0.663974500E-04,0.202867131E-03 0.663974500E-04,0.202867131E-03 0.885171668E-04,0.559507881E-03

SHUNT ADMITTANCE MATRIX (Y) [mhos/m]:

0.100000000E-10,0.398369694E-08 0.000000000E+00,-.588360736E-09 0.000000000E+00,-.588360736E-09
 0.000000000E+00,-.588360736E-09 0.100000000E-10,0.398369694E-08 0.000000000E+00,-.588360736E-09
 0.000000000E+00,-.588360736E-09 0.000000000E+00,-.588360736E-09 0.100000000E-10,0.398369694E-08

LONG-LINE CORRECTED SERIES IMPEDANCE MATRIX [ohms]:

0.224710271E+01,0.142081941E+02 0.168546237E+01,0.515110069E+01 0.168546237E+01,0.515110069E+01
 0.168546237E+01,0.515110069E+01 0.224710271E+01,0.142081941E+02 0.168546237E+01,0.515110069E+01
 0.168546237E+01,0.515110069E+01 0.168546237E+01,0.515110069E+01 0.224710271E+01,0.142081941E+02

LONG-LINE CORRECTED SHUNT ADMITTANCE MATRIX [mhos]:

0.255269417E-06,0.101196145E-03 0.593318995E-09,-.149442989E-04 0.593318995E-09,-.149442989E-04
 0.593318995E-09,-.149442989E-04 0.255269417E-06,0.101196145E-03 0.593318995E-09,-.149442989E-04
 0.593318995E-09,-.149442989E-04 0.593318995E-09,-.149442989E-04 0.255269417E-06,0.101196145E-03

 SEQUENCE COMPONENT DATA @ 60.00 Hz:

SEQUENCE TRANSFORM MATRIX:

0.577350269E+00,0.000000000E+00 0.577350269E+00,0.000000000E+00 0.577350269E+00,0.000000000E+00
 0.577350269E+00,0.000000000E+00 -.288675135E+00,-.500000000E+00 -.288675135E+00,0.500000000E+00
 0.577350269E+00,0.000000000E+00 -.288675135E+00,0.500000000E+00 -.288675135E+00,-.500000000E+00

SEQUENCE IMPEDANCE MATRIX (Zsq) [ohms/m]:

0.221312067E-03,0.965242144E-03 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00
 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.221197168E-04,0.356640750E-03 0.000000000E+00,0.000000000E+00
 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.221197168E-04,0.356640750E-03

SEQUENCE ADMITTANCE MATRIX (Ysq) [mhos/m]:

0.100000000E-10,0.280697547E-08 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00
 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.100000000E-10,0.457205768E-08 0.000000000E+00,0.000000000E+00
 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.100000000E-10,0.457205768E-08

 LOAD FLOW RXB FORMATTED DATA @ 60.00 Hz:

Per-Unit Quantities Based On: Base Voltage: 500.00 kV,L-L,RMS
 Base MVA: 100.00 MVA

NOTE: Base values are set using Output File Data
 Display Options component in Editor view.

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE RESISTANCE RLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.224656138E-03
 0 Seq. Self: 0.224721098E-02

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE REACTANCE XLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.362283736E-02
 0 Seq. Self: 0.980415819E-02

LONG-LINE CORRECTED SEQUENCE SUSCEPTANCE BLLsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.290351110
 0 Seq. Self: 0.178268868

SEQUENCE RESISTANCE Rsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.224736323E-03
 0 Seq. Self: 0.224853060E-02

SEQUENCE REACTANCE Xsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.362347002E-02

0 Seq. Self: 0.980686018E-02

SEQUENCE SUSCEPTANCE Bsq [p.u.]:

+ Seq. Self: 0.290325663

0 Seq. Self: 0.178242942

B.5 - LT Viana – VianaII - 345kV

 PHASE DOMAIN DATA @ 60.00 Hz:

SERIES IMPEDANCE MATRIX (Z) [ohms/m]:

0.904557344E-04,0.573708991E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.904557344E-04,0.573708991E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.904557344E-04,0.573708991E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03

0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.904557344E-04,0.573708991E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.904557344E-04,0.573708991E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03
0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.587700103E-04,0.192041536E-03	0.904557344E-04,0.573708991E-03

SHUNT ADMITTANCE MATRIX (Y) [mhos/m]:

0.100000000E-10,0.386114249E-08	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.100000000E-10,0.386114249E-08	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.100000000E-10,0.386114249E-08
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09

0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.100000000E-10,0.386114249E-08	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.100000000E-10,0.386114249E-08	0.000000000E+00,-.426313383E-09
0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.000000000E+00,-.426313383E-09	0.100000000E-10,0.386114249E-08

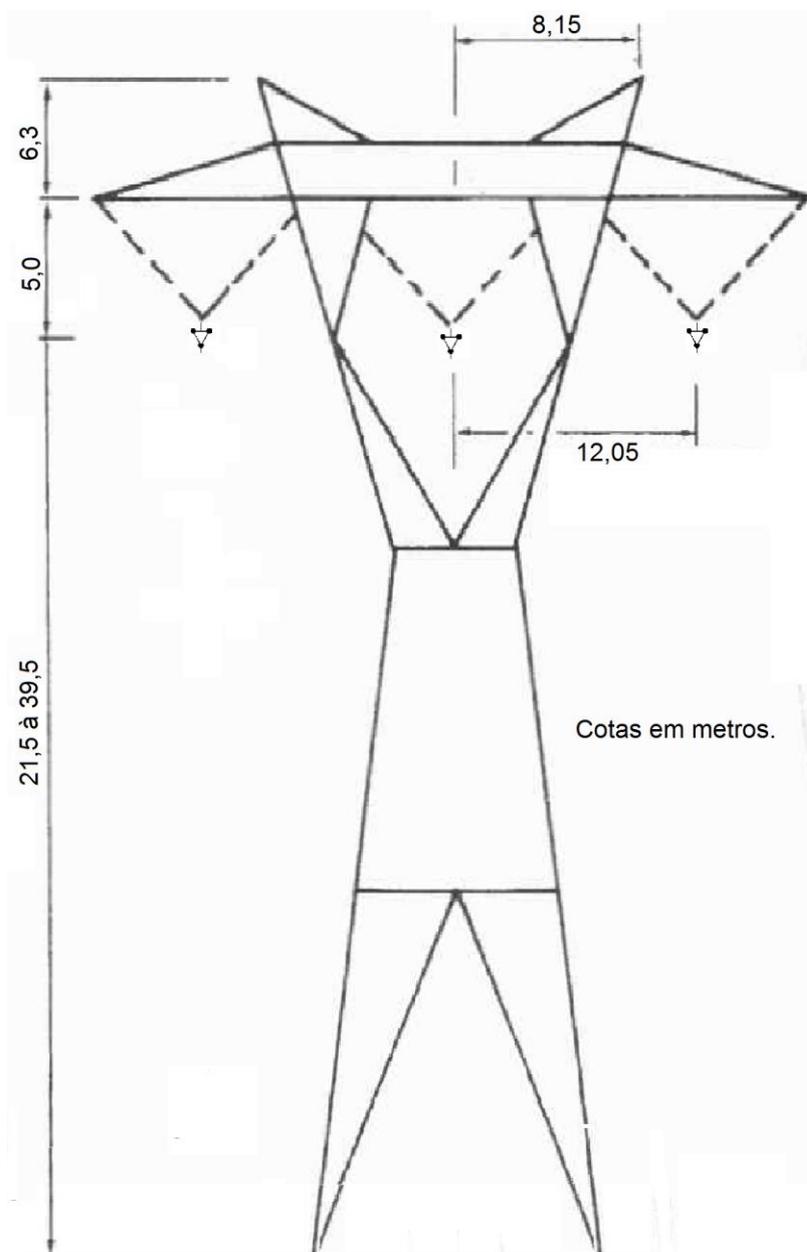
LONG-LINE CORRECTED SERIES IMPEDANCE MATRIX [ohms]:

0.904485487E+00,0.573689818E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01
 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.904485487E+00,0.573689818E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01
 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.904485487E+00,0.573689818E+01
 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01
 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01
 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01
 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01
 0.904485487E+00,0.573689818E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01
 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.904485487E+00,0.573689818E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01
 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.587645769E+00,0.192032696E+01 0.904485487E+00,0.573689818E+01

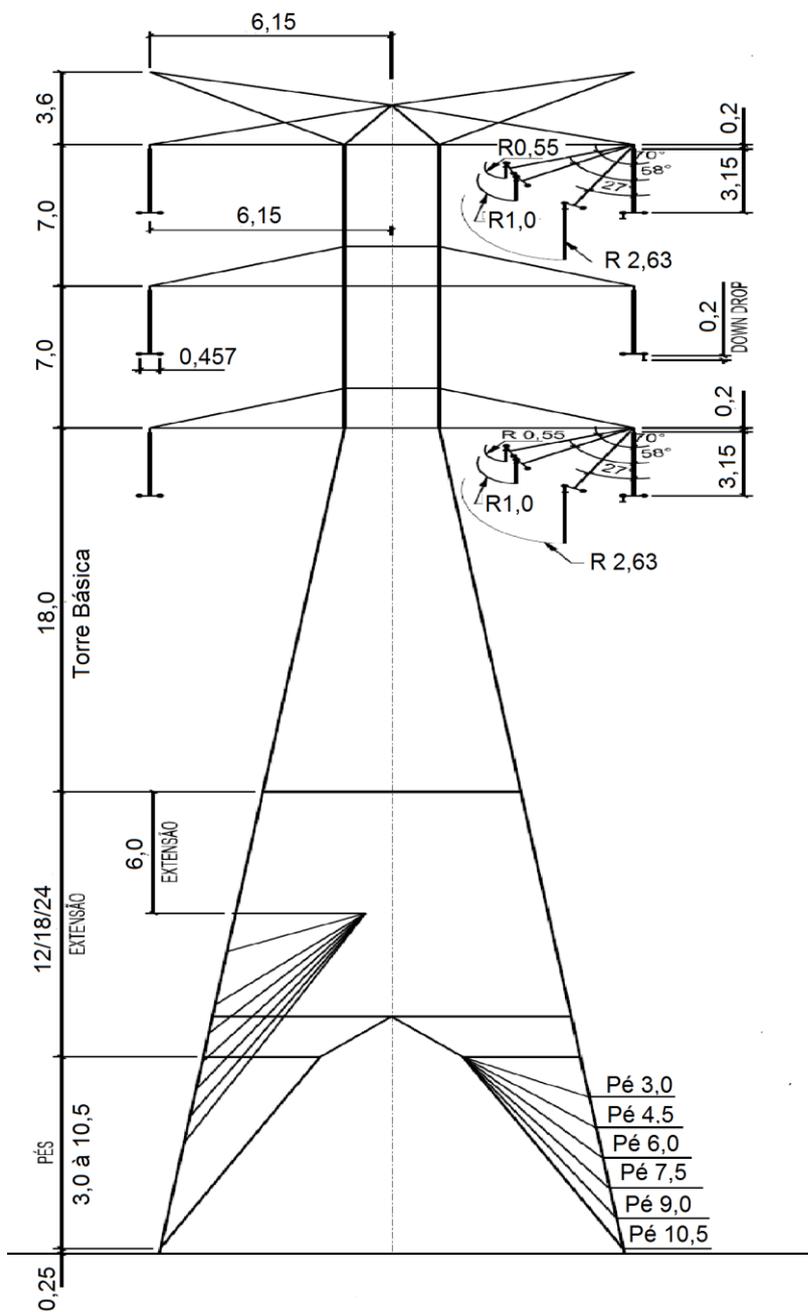
LONG-LINE CORRECTED SHUNT ADMITTANCE MATRIX [mhos]:

0.100059427E-06,0.386119755E-04 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.100059427E-06,0.386119755E-04 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.100059427E-06,0.386119755E-04
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985299E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985299E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.100059427E-06,0.386119755E-04 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.100059427E-06,0.386119755E-04 0.815985298E-11,-.426316769E-05
 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.815985298E-11,-.426316769E-05 0.100059427E-06,0.386119755E-04

A.2 - Perfil predominante para as Linhas de Transmissão Mesquita – VespasianoII - 500kV, Neves I – Mesquita - 500kV e NevesI – VespasianoII - 500kV



A.3 - Perfil predominante para Linha de Transmissão Viana – Viana II - 345kV



ANEXO B: Tabela de Condutores CAA

condutores de alumínio com alma de aço
CAA



Cabo	AWG/ MCM	Área			Formação, Número e Diâmetro dos Fios		Diâmetro Nominal do Cabo	Massa Linear	RMC	Resistência Elétrica CC a 20°C	Capaci- dade de Corrente
		Al	Aço	Total	Al	Aço					
		mm ²	mm ²	mm ²	N° x mm	N° x mm					
Turkey	6	13,30	2,22	15,52	6 x 1,68	1 x 1,68	5,04	53,7	5,30	2,1569	95
Thrush	5	16,83	2,81	19,64	6 x 1,89	1 x 1,89	5,67	68,1	6,65	1,7046	110
Swan	4	21,18	3,53	24,71	6 x 2,12	1 x 2,12	6,36	85,6	8,30	1,3545	130
Swallow	3	26,69	4,45	31,14	6 x 2,38	1 x 2,38	7,14	107,8	10,23	1,0749	150
Sparrow	2	33,59	5,60	39,19	6 x 2,67	1 x 2,67	8,01	135,7	12,65	0,8540	175
Robin	1	42,41	7,07	49,48	6 x 3,00	1 x 3,00	9,00	171,4	15,85	0,6764	200
Raven	1/0	53,52	8,92	62,44	6 x 3,37	1 x 3,37	10,11	216,2	19,45	0,5360	230
Quail	2/0	67,33	11,22	78,55	6 x 3,78	1 x 3,78	11,34	272,0	23,53	0,4261	265
Pigeon	3/0	85,12	14,19	99,31	6 x 4,25	1 x 4,25	12,75	343,9	29,42	0,3370	310
Penguin	4/0	107,22	17,87	125,09	6 x 4,77	1 x 4,77	14,31	433,2	37,06	0,2676	350
Waxwing	266,8	135,00	7,50	142,50	18 x 3,09	1 x 3,09	15,47	430,5	31,22	0,2136	430
Partridge	266,8	134,87	21,99	156,86	26 x 2,57	7 x 2,00	16,28	545,5	50,11	0,2148	440
Ostrich	300,0	152,19	24,71	176,90	26 x 2,73	7 x 2,12	17,28	614,7	56,41	0,1904	470
Merlin	336,4	170,22	9,46	179,68	18 x 3,47	1 x 3,47	17,35	542,9	39,36	0,1694	500
Linnet	336,4	170,55	27,83	198,38	26 x 2,89	7 x 2,25	18,31	689,9	62,92	0,1699	510
Oriole	336,4	170,50	39,78	210,28	30 x 2,69	7 x 2,69	18,83	784,3	77,27	0,1703	515
Chickadee	397,5	200,90	11,20	212,10	18 x 3,77	1 x 3,77	18,87	640,8	45,14	0,1435	555
Brant	397,5	201,60	26,10	227,70	24 x 3,27	7 x 2,18	19,61	762,5	65,10	0,1437	584
Ibis	397,5	201,34	32,73	234,07	26 x 3,14	7 x 2,44	19,88	813,5	72,43	0,1439	570
Lark	397,5	200,90	46,88	247,78	30 x 2,92	7 x 2,92	20,44	924,1	90,48	0,1446	575
Pelican	477,0	242,30	13,50	255,80	18 x 4,14	1 x 4,14	20,68	772,8	53,50	0,1190	615
Flicker	477,0	241,60	31,40	273,00	24 x 3,58	7 x 2,39	21,49	914,6	76,56	0,1199	655
Hawk	477,0	241,65	39,49	281,14	26 x 3,44	7 x 2,68	21,80	977,9	87,18	0,1199	640
Hen	477,0	241,27	56,30	297,57	30 x 3,20	7 x 3,20	22,40	1109,8	105,61	0,1204	645
Osprey	556,5	282,50	15,70	298,20	18 x 4,47	1 x 4,47	22,33	900,9	62,37	0,1021	690
Parakeet	557,1	282,31	36,60	318,91	24 x 3,87	7 x 2,58	23,22	1068,1	88,29	0,1026	700
Dove	556,5	282,59	45,92	328,51	26 x 3,72	7 x 2,89	23,55	1141,6	100,84	0,1025	710
Eagle	556,5	282,10	65,80	347,90	30 x 3,46	7 x 3,46	24,21	1297,5	123,47	0,1030	710
Squab	605,0	305,80	49,80	355,60	26 x 3,87	7 x 3,01	24,54	1236,4	108,14	0,0947	745
Wood Duck	605,0	306,55	71,55	378,10	30 x 3,61	7 x 3,61	25,25	1412,5	128,74	0,0946	774
Teal	605,0	306,55	69,60	376,15	30 x 3,61	19 x 2,16	25,25	1397,7	133,08	0,0946	750
Duck	605,7	306,89	39,78	346,67	54 x 2,69	7 x 2,69	24,21	1161,0	98,87	0,0944	745
Kingbird	636,0	323,00	17,90	340,90	18 x 4,78	1 x 4,78	23,88	1030,2	71,32	0,0893	750
Rook	636,0	323,10	41,90	365,00	24 x 4,14	7 x 2,76	24,82	1222,2	101,04	0,0897	784
Grosbeak	636,0	321,84	52,49	374,33	26 x 3,97	7 x 3,09	25,15	1301,7	111,87	0,0900	775
Scoter	636,0	322,22	75,26	397,48	30 x 3,70	7 x 3,70	25,88	1483,8	135,23	0,0900	798
Egret	636,0	322,22	73,55	395,77	30 x 3,70	19 x 2,22	25,88	1461,1	138,69	0,0900	775
Flamingo	666,6	337,74	43,81	381,55	24 x 4,23	7 x 2,82	25,40	1275,9	105,48	0,0859	807
Gannet	666,6	337,74	55,03	392,77	26 x 4,07	7 x 3,16	25,76	1366,0	117,26	0,0856	795
Stilt	715,5	362,58	46,97	409,55	24 x 4,39	7 x 2,92	26,31	1372,6	113,35	0,0797	844
Starling	715,5	361,93	59,15	421,08	26 x 4,21	7 x 3,28	26,68	1464,8	125,95	0,0800	835

Cabo	AWG/ MCM	Área			Formação, Número e Diâmetro dos Fios		Diâmetro Nominal do Cabo	Massa Linear	RMC	Resistência Elétrica CC a 20°C	Capaci- dade de Corrente
		Al	Aço	Total	Al	Aço					
		mm ²	mm ²	mm ²	Nº x mm	Nº x mm					
Redwing	715,5	362,06	82,41	444,47	30 x 3,92	19 x 2,35	27,43	1650,6	153,66	0,0802	840
Tern	795,0	403,77	27,83	431,60	45 x 3,38	7 x 2,25	27,03	1338,8	98,20	0,0719	875
Condor	795,0	402,84	52,19	455,03	54 x 3,08	7 x 3,08	27,74	1527,5	125,06	0,0724	885
Cuckoo	795,0	402,30	52,20	454,50	24 x 4,62	7 x 3,08	27,74	1522,1	123,82	0,0720	900
Drake	795,0	402,84	65,51	468,35	26 x 4,44	7 x 3,45	28,14	1626,5	139,67	0,0720	890
Mallard	795,0	402,84	91,87	494,71	30 x 4,14	19 x 2,48	28,96	1839,9	171,22	0,0719	918
Ruddy	900,0	455,50	31,67	487,17	45 x 3,59	7 x 2,40	28,74	1512,4	108,96	0,0638	945
Cannary	900,5	456,28	59,15	515,43	54 x 3,28	7 x 3,28	29,52	1726,2	141,80	0,0635	945
Rail	954,0	483,84	33,54	517,38	45 x 3,70	7 x 2,47	29,61	1605,8	115,63	0,0600	980
Cardinal	954,0	484,53	62,81	547,34	54 x 3,38	7 x 3,38	30,42	1839,6	150,61	0,0601	995
Ortolan	1033,5	523,90	36,31	560,21	45 x 3,85	7 x 2,57	30,78	1738,6	123,28	0,0554	1025
Curlew	1033,5	522,51	67,73	590,24	54 x 3,51	7 x 3,51	31,59	1983,8	162,41	0,0557	1025
Bluejay	1113,0	565,49	38,90	604,39	45 x 4,00	7 x 2,66	31,98	1874,4	132,71	0,0514	1060
Finch	1113,0	563,93	71,55	635,48	54 x 3,65	19 x 2,19	32,84	2133,2	174,09	0,0515	1080
Bunting	1192,5	604,26	41,55	645,81	45 x 4,14	7 x 2,76	33,07	2009,5	142,42	0,0479	1110
Grackle	1192,5	604,26	76,58	680,84	54 x 3,77	19 x 2,27	33,99	2280,1	186,38	0,0483	1125
Bittern	1272,0	644,40	44,66	689,06	45 x 4,27	7 x 2,85	34,17	2138,5	151,63	0,0451	1155
Pheasant	1272,0	644,75	81,65	726,40	54 x 3,90	19 x 2,34	35,10	2435,5	194,13	0,0451	1175
Martin	1351,5	684,71	87,40	772,11	54 x 4,02	19 x 2,41	36,17	2586,5	206,08	0,0425	1225
Bobolink	1431,0	725,27	50,14	775,41	45 x 4,53	7 x 3,02	36,24	2406,0	170,51	0,0400	1250
Plover	1431,0	725,10	91,87	816,97	54 x 4,14	19 x 2,48	37,21	2742,1	218,40	0,0400	1270
Nuthatch	1510,5	765,35	52,90	818,25	45 x 4,65	7 x 3,10	37,24	2535,1	177,64	0,0380	1295
Parrot	1510,5	765,35	96,84	862,19	54 x 4,25	19 x 2,55	38,23	2892,2	230,53	0,0380	1315
Lapwing	1590,0	807,53	55,60	863,13	45 x 4,78	7 x 3,18	38,22	2677,0	187,43	0,0360	1335
Falcon	1590,0	806,23	102,43	908,66	54 x 4,36	19 x 2,62	39,26	3046,3	242,99	0,0361	1360
Chukar	1780,0	902,70	73,50	976,20	84 x 3,70	19 x 2,22	40,69	3090,1	226,97	0,0322	1453
Bluebird	2156,0	1092,31	88,90	1181,21	84 x 4,07	19 x 2,44	44,75	3737,9	268,05	0,0266	1623
Kiwi	2167,0	1098,27	47,53	1145,80	72 x 4,41	7 x 2,94	44,07	3433,0	223,52	0,0265	1607
Thrasher	2312,0	1171,42	63,78	1235,20	76 x 4,43	19 x 2,07	45,77	3761,8	251,86	0,0249	1675
Grouse	80,0	40,54	14,13	54,67	8 x 2,54	1 x 4,24	9,32	221,6	23,10	0,7112	205
Petrel	101,8	51,58	30,06	81,64	12 x 2,34	7 x 2,34	11,70	377,4	46,21	0,5586	240
Minorca	110,8	56,14	32,77	88,91	12 x 2,44	7 x 2,44	12,20	410,4	50,24	0,5138	250
Guinea	159,0	80,56	46,97	127,53	12 x 2,92	7 x 2,92	14,63	587,7	71,18	0,3588	300
Dotterel	176,9	89,64	52,19	141,83	12 x 3,08	7 x 3,08	15,40	653,9	76,85	0,3224	310
Dorking	190,8	96,71	56,39	153,10	12 x 3,20	7 x 3,20	16,03	705,8	82,95	0,2987	325
Brahma	203,2	102,97	91,87	194,84	16 x 2,86	19 x 2,48	18,14	1001,7	126,62	0,2805	340
Cochin	211,3	107,06	62,45	169,51	12 x 3,37	7 x 3,37	16,87	782,8	92,00	0,2693	340

Fonte: Alubar (2014)