



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PATRICK ROBERTO DE ALMEIDA

Compensador Série Controlado a Tiristores na Distribuição –
Compensação Dinâmica

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, como validação do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação

Orientador: Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Jr.

Ilha Solteira

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A447c Almeida, Patrick Roberto.
Compensador série controlado a tiristores na distribuição: compensação
dinâmica / Patrick Roberto Almeida. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
98 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2014

Orientador: Dionizio Paschoareli Júnior
Inclui bibliografia

1. Sistemas de distribuição. 2. Facds. 3. Compensador série controlado a
tiristor.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Compensador Série Controlado a Tiristores na Distribuição - Compensação Dinâmica

AUTOR: PATRICK ROBERTO DE ALMEIDA

ORIENTADOR: Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MAURÍCIO AREDES

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio de Janeiro

Data da realização: 09 de junho de 2014.

DEDICO

A Deus, o autor da vida, soberano onipotente, onipresente e onisciente. Inspira-me pelo seu amor incondicional, perdão e justiça. Àquele que é rei do universo e que me ensinou uma pequena parte da engenharia da vida.

“Porque Dele, e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. Amém.” Rm 11:36

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser minha força, meu socorro, meu refúgio e meu pastor.

A minha esposa Samanta, por todo amor, compreensão e apoio durante o mestrado.

A minha família por nunca ter deixado de acreditar em mim, me apoiando e incentivando em todo o tempo.

Ao orientador Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior pela oportunidade, por acreditar na minha capacidade de desenvolvimento e pela orientação.

Ao Prof. Dr. Falcondes J. M. de Seixas, pela orientação durante o trabalho.

Agradecimentos ao Engenheiro Leonardo Zampelin, amigo, irmão e companheiro, sempre compartilhando o conhecimento durante toda jornada do mestrado.

Ao Engenheiro Luciano de Souza da Costa Silva pela amizade e compartilhamento do conhecimento.

A todos os amigos da Igreja Batista Central em Ilha Solteira, pela amizade e orações.

A todos os técnicos e demais professores do departamento de engenharia elétrica pelas contribuições.

RESUMO

Controladores FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) são equipamentos capazes de modificar os parâmetros naturais de um sistema de transmissão, levando-os a operar próximo aos limites operacionais, de modo a postergar investimentos na ampliação destes sistemas. Em geral, tais equipamentos podem ser conectados em série, em derivação ou mesmo em uma combinação de ambos, permitindo a correção de possíveis problemas de estabilidade, de afundamento de tensão, entre outros. Nos sistemas de distribuição, a presença de compensadores de reativos, com destaque aos bancos de capacitores série e derivação chaveados, bem como de controladores eletrônicos para as mais diversas finalidades, tem alterado a topologia clássica, tipicamente passiva. Como exemplo, os compensadores série controlados a tiristor surgem como uma alternativa à compensação série fixa, possibilitando o adiamento de investimentos por parte das concessionárias de distribuição de energia em redes, subestações, etc. Esta dissertação apresenta o D-TCSC (*Distribution - Thyristor Controlled Series Compensator*) como dispositivo FACDS (*Flexible Alternating Current Distribution Systems*) em um sistema de distribuição como alternativa para controle de afundamentos de tensão durante a partida de grandes cargas, conforme os níveis de tensão de atendimento estabelecidos pelo PRODIST – Procedimento de Distribuição.

Palavras-chave: Sistemas de Distribuição. FACDS. Compensador série controlado a tiristor.

ABSTRACT

FACTS controllers (Flexible Alternating Current Transmission Systems) are capable of modifying the natural parameters of a transmission system to operate closed to the rated limits and delaying investments in the expansion these systems. In general, such devices can be series connected, shunt or a combination of both, allowing the correction of power system stability problems, voltage sags and swells, and others. In distribution systems, the reactive compensators, especially switched series capacitor banks and shunt capacitor banks as well as electronic controllers for many different purposes, has changed the classical topology, typically passive. For example, the thyristor controlled series compensators emerge as an alternative to fixed series compensation, allowing postpone of investments in distribution networks, substations, etc. This dissertation presents the D-TCSC (Distribution - Thyristor Controlled Series Compensator), a FACDS (Flexible Alternating Current Distribution Systems) controller which can be used as a solution to voltage control during connection of large loads, according the voltage levels established by PRODIST - Distribution Procedure.

Keywords: Distribution Systems. FACDS. Thyristor controlled series compensator.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONFIGURAÇÃO DO TCSC.....	23
FIGURA 2 – MAPA DO SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISSÃO – HORIZONTE 2007.....	24
FIGURA 3 – INERLIGAÇÃO NORTE - SUL	25
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO.	30
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	31
FIGURA 6 – SISTEMA DE POTÊNCIA SIMPLIFICADO.....	33
FIGURA 7 – CURVA PV PARA O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ESTUDO.	34
FIGURA 8 – CIRCUITO EQUIVALENTE: (A) TCR (B) TCSC.....	37
FIGURA 9 – TCSC OPERANDO NO MODO BLOQUEIO.....	38
FIGURA 10 – TCSC OPERANDO NO MODO VERNIER CAPACITIVO.	39
FIGURA 11 – TCSC OPERANDO NO MODO VERNIER INDUTIVO.	40
FIGURA 12 – IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA.....	42
FIGURA 13 – SISTEMA DE PROTEÇÃO DO D-TCSC.....	46
FIGURA 14 – PERFIL DE TENSÃO DO ALIMENTADOR CST08.	51
FIGURA 15 – PERFIL DE CORRENTE DO ALIMENTADOR ANR 05.....	51
FIGURA 16 – DIAGRAMA UNIFILAR DO RAMAL ATÉ O PAC.....	52
FIGURA 17 – DIAGRAMA UNIFILAR DO RAMAL APÓS O PAC.....	53
FIGURA 18 – MODELAGEM DO ALIMENTADOR CST08.....	56
FIGURA 19 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR.....	58
FIGURA 20 – MODELO EQUIVALENTE POR FASE DO MOTOR DE INDUÇÃO.	61
FIGURA 21 – MODELO DO D-TCSC.	63
FIGURA 22 – IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DO D-TCSC.....	63
FIGURA 23 – ALIMENTADOR COM O D-TCSC.	64
FIGURA 24 – PERFIL DE TENSÃO NO ALIMENTADOR ATÉ O PAC, SEM COMPENSAÇÃO.....	67
FIGURA 25 – PERFIL DE TENSÃO NO ALIMENTADOR ATÉ O PAC, SEM COMPENSAÇÃO.....	68
FIGURA 26 – ENVOLTÓRIA DA TENSÃO NO PAC SEM COMPENSAÇÃO.	68
FIGURA 27 – ENVOLTÓRIA DA TENSÃO NO TERMINAL DO MIT SEM COMPENSAÇÃO.....	69
FIGURA 28 – TRANSITÓRIO DA TENSÃO NO INICIO DA PARTIDA SEM COMPENSAÇÃO.	69
FIGURA 29 – TRANSITÓRIO DA TENSÃO NO FIM DA PARTIDA SEM COMPENSAÇÃO.....	70
FIGURA 30 – PERFIL DE TENSÃO NO ALIMENTADOR ATÉ O PAC COM COMPENSAÇÃO.....	71
FIGURA 31 – PERFIL DE TENSÃO NO ALIMENTADOR ATÉ O PAC COM COMPENSAÇÃO.....	72
FIGURA 32 – ENVOLTÓRIA DA TENSÃO NO PAC COM COMPENSAÇÃO.	72

FIGURA 33 – ENVOLTÓRIA DA TENSÃO NO TERMINAL DO MIT COM COMPENSAÇÃO.....	73
FIGURA 34 – CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO NO D-TCSC.	74
FIGURA 35 – TENSÃO DE CURTO-CIRCUITO NO D-TCSC.....	75
FIGURA 36 – TENSÃO E CORRENTE NO CAPACITOR E REATOR DO D-TCSC DURANTE UM CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO A JUSANTE DO MESMO, T=1S; (A) TENSÃO SOBRE O CAPACITOR; (B) CORRENTE NO CAPACITOR; (C) TENSÃO SOBRE O REATOR; (D) CORRENTE NO REATOR; (E) CORRENTE NA LINHA À MONTANTE DO TCSC.....	77
FIGURA 37 – SIMULAÇÃO DA DESCARGA DE ENERGIA DO BANCO DE CAPACITORES PARA A CHAVE A VÁCUO DA ABB; (A) TENSÃO SOBRE O BANCO DE CAPACITORES; (B) TENSÃO SOBRE A CHAVE A VÁCUO; (C) TENSÃO SOBRE O TCR.....	79
FIGURA 38 – SIMULAÇÃO DA DESCARGA DE ENERGIA DO BANCO DE CAPACITORES PARA A CHAVE A VÁCUO DA ABB; (A) CORRENTE NO BANCO DE CAPACITORES; (B) CORRENTE NA CHAVE A VÁCUO; (C) CORRENTE NO TCR.	80
FIGURA 39 – SIMULAÇÃO DO METAL ÓXIDO VARISTOR PARA A CHAVE A VÁCUO (A) TENSÃO SOBRE O BANCO DE CAPACITORES; (B) TENSÃO SOBRE A CHAVE A VÁCUO; (C) TENSÃO SOBRE O TCR;	82
FIGURA 40 – SIMULAÇÃO DO METAL ÓXIDO VARISTOR DA ABB PARA A CHAVE A VÁCUO DA ABB; (A) CORRENTE NO BANCO DE CAPACITORES; (B) CORRENTE NA CHAVE A VÁCUO; (C) CORRENTE NO TCR; (D) ENERGIA SOBRE O MOV.....	83
FIGURA 41 – ENERGIA SOBRE O MOV.	84
FIGURA 42 – SISTEMA DE POTÊNCIA PARA OBTENÇÃO DA CURVA PV.	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DADOS DO TCSC INSTALADO NA INTERLIGAÇÃO NORTE-SUL.....	25
TABELA 2 – APLICAÇÕES FACTS.....	26
TABELA 3 – PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	34
TABELA 4 – REGIÕES DE OPERAÇÃO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DISPARO.	43
TABELA 5 – PONTOS DE CONEXÃO EM TENSÃO NOMINAL SUPERIOR A 1 kV E INFERIOR A 69 kV	48
TABELA 6 – CLASSIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO.	49
TABELA 7 – NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO NA SE.....	49
TABELA 8 – IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES DA SE.	49
TABELA 9 – PARÂMETROS ELÉTRICOS DOS SISTEMAS.....	50
TABELA 10 – CARACTERÍSTICA DO ALIMENTADOR.	52
TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CARGAS EM DERIVAÇÃO DA SE.	53
TABELA 12 – CARACTERÍSTICA DO ALIMENTADOR APÓS O PAC.	54
TABELA 13 – DISTÂNCIA DA LOCALIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS ATÉ SE.	54
TABELA 14 – IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA POSITIVA E ZERO DO CST08 E REDE PARTICULAR DO CLIENTE.	56
TABELA 15 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRANSFORMADORES.	57
TABELA 16 – VALORES DO CIRCUITO EQUIVALENTE DOS TRANSFORMADORES DA SE E PIVÔS.....	59
TABELA 17 – CARGA DE IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA OS TRAFOS DE 15kVA E 30kVA. .	59
TABELA 18 – CARGA DE IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA AS CARGAS EM DERIVAÇÃO AO LONGO DO ALIMENTADOR.....	60
TABELA 19 – CARACTERÍSTICA GERAIS DOS MITs.....	60
TABELA 20 – PARÂMETROS ELÉTRICOS DOS MITs.....	61
TABELA 21 – REGIÕES DE OPERAÇÃO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DISPARO PARA O D-TCSC MODELADO.	64
TABELA 22 – TENSÃO EM REGIME PERMANENTE E DURANTE A PARTIDA DO ULTIMO MOTOR NO ALIMENTADOR CST08 SEM COMPENSAÇÃO.	67
TABELA 23 – TENSÃO EM REGIME PERMANENTE NO ALIMENTADOR CST08 COM COMPENSAÇÃO.	71
TABELA 24 – DADOS ELÉTRICOS PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO TRIFÁSICA.....	75

TABELA 25 – TENSÃO E CORRENTE MÁXIMAS NO CAPACITOR E REATOR DO D-TCSC DURANTE UM CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO A JUSANTE DO COMPENSADOR (ATP DRAW).	76
TABELA 26 – DADOS DAS CHAVES À VÁCUO DA ABB.	78
TABELA 27 – TEMPO DO CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO, TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELIGADOR E CHAVE A VÁCUO.	78
TABELA 28 – CARACTERÍSTICAS DO MOV	81
TABELA 29 – COMPARATIVO ENTRE OS CASOS SIMULADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DOS VARISTORES.	85
TABELA 30 – NÍVEIS MÁXIMOS DE TENSÃO E CORRENTE NO D-TCSC, OPERAÇÃO NORMAL.	85

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

FACTS - *Flexible Alternating Current Transmission Systems*

FACDS - *Flexible Alternating Current Distribution Systems*

IGTB - *Insulated Gate Bipolar Transistor*

GTO - *GateTurn-Off Thyristor*

UPFC - *Unified Power Flow Controller*

SSSC - *Static Synchronous Series Compensator*

STATCOM - *Static Synchronous Compensator*

IPFC - *Interline Power Flow Controller*

TCSC - *Thyristor Controlled Series Compensator*

TCR - *Thyristor Controlled Reactor*

BC - Banco de Capacitores

N - Norte

NE - Nordeste

S - Sul

SE - Suldeste

CO - Centro Oeste

SIN - Sistema Interligado Nacional

GO- Goiás

MA - Maranhão

FSC – Fixed Series Capacitor

TPSC – Thyristor Protected Series Capacitor

ASC – Advanced Series Compensation

RSS - Ressonância Subsíncrona

DVR - *Dinamic Voltage Restorer*

ATP - Alternative Transients Program

EMTP - Electromagnetic Transients Program

PAC - Ponto de Acoplamento Comum

PRODIST - Procedimentos de Distribuição

SE - Subestação

RT - Regulador de Tensão

TA - Tensão de Atendimento

TL - Tensão de Leitura

TR - Tensão de Referência

TF - Transformador de Força

VTCD - Variação de Tensão de Curta Duração

MOV - Metal Óxido Varistor

LISTA DE SÍMBOLOS

- k_T - Grau de compensação na transmissão
- X_C - Reatância capacitiva do banco de capacitores
- X_L - Reatância indutiva da linha de transmissão
- E - Tensão de alimentação
- P_R - Potência ativa da carga
- Q_R - Potência reativa da carga
- V_1 - Tensão na barra 1
- V_2 - Tensão na barra 2
- k_D - Grau de compensação na distribuição
- R_{TH} - Reatância indutiva de Thévenin
- X_{TH} - Reatância indutiva de Thévenin
- R_L - Resistência da linha de distribuição
- X_L - Reatância indutiva da linha de distribuição
- R_{LD} - Resistência da carga
- X_{LD} - Reatância indutiva da carga
- F_C - Fator de compensação
- R_T - Resistência total, resistência de Thévenin mais a resistência da linha
- X_T - Reatância indutiva total, reatância de Thévenin mais a reatância da linha
- R - Resistência
- r - Resistência em pu
- X - Reatância indutiva
- x - Reatância indutiva em pu
- pu - Por unidade
- Ω - Ohms
- kV - Quilovolt
- kVAr - Quilovolt ampère reativo
- MVA - Mega Volt Ampère
- P - Potência Ativa
- $X_{L\ TCSC}$ - Reatância indutiva do TCSC
- $X_{C\ TCSC}$ - Reatância capacitiva do TCSC
- X_{TCSC} - Reatância equivalente do TCSC
- $X_{LC\ TCSC}$: reatância equivalente resultante do paralelo entre $X_{C\ TCSC}$ e $X_{L\ TCSC}$;

ω : parâmetro de desempenho do TCSC.

$\alpha_{L \text{ lim}}$ - Ângulo limite da região indutiva

$\alpha_{C \text{ lim}}$ - Ângulo limite da região capacitiva

Z_1 - Impedância de sequência positiva

Z_0 - Impedância de sequência zero

R_1 - Resistência de sequência positiva

R_0 - Resistência de sequência zero

X_1 - Reatância de sequência positiva

X_0 - Reatância de sequência zero

Z_{EQ} - Impedância equivalente

$r_{+ \text{ CST08}}$ - resistência de sequência positiva do alimentador CST08 por quilômetro

$x_{+ \text{ CST08}}$ - reatância indutiva de sequência positiva do alimentador CST08 por quilômetro

$r_{0 \text{ CST08}}$ - resistência de sequência zero do alimentador CST08 por quilômetro

$x_{0 \text{ CST08}}$ - reatância indutiva de sequência zero do alimentador CST08 por quilômetro

pk - valores de pico

RMS - Root Mean Square

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 ESTADO DA ARTE.....	21
2.1 INTRODUÇÃO	21
2.2 CLASSIFICAÇÃO DO CONTROLADORES FACTS.....	22
2.3 O TCSC (THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATOR).....	23
2.3.1 A INTERLIGAÇÃO NORTE – SUL.....	23
2.3.2 OUTRAS APLICAÇÕES.....	25
2.4 CONCLUSÃO	26
3 COMPENSAÇÃO SÉRIE NA DISTRIBUIÇÃO.....	28
3.2 INTRODUÇÃO	28
3.2 REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS PARA A COMPENSAÇÃO SÉRIE.....	30
3.2.1 SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	30
3.2.2 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	31
3.3 CURVAS PV	33
3.4 CONCLUSÃO	35
4 O COMPENSADOR SÉRIE CONTROLADO A TIRISTOR.....	37
4.1 INTRODUÇÃO	37
4.2 MODOS DE OPERAÇÃO DO TCSC	38
4.3 IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DO TCSC	41
4.4 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO E MANOBRA DO D-TCSC.....	44
4.4.1 RELIGADOR.....	44
4.4.2 METAL ÓXIDO VARISTOR.....	44
4.4.3 CIRCUITO DE AMORTECIMENTO	45
4.4.4 DISJUNTOR DE BYPASS	45
4.5 CONCLUSÃO	46
5 MODELAGEM DO SISTEMA.....	48
5.1 INTRODUÇÃO	48
5.2 MODELAGEM DA REDE EQUIVALENTE À MONTANTE DA SUBESTAÇÃO	49
5.3 MODELAGEM DO ALIMENTADOR CST08.....	50
5.4 MODELAGEM DA CARGA	57
5.4.1 MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES	57
5.4.2 MODELAGEM DAS CARGAS EM DERIVAÇÃO DO CST08.....	59
5.4.3 MODELAGEM DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	60
5.5 MODELAGEM DO D-TCSC.....	62
5.6 CONCLUSÃO	65
6 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	66
6.1 INTRODUÇÃO	66
6.2 ALIMENTADOR CST08 SEM COMPENSAÇÃO	66
6.3 ALIMENTADOR CST08 COM COMPENSAÇÃO	70
6.4 PROTEÇÃO PARA CURTO-CIRCUITO	74
6.4.1 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO NO ALIMENTADOR.....	74
6.4.2 CÁLCULO DO CIRCUITO DE AMORTECIMENTO	77

6.4.3 CÁLCULO DO METAL ÓXIDO VARISTOR.....	81
6.5 CONCLUSÃO.....	86
7 CONCLUSÃO.....	88
REFERÊNCIAS.....	90

1 INTRODUÇÃO

Energia é um dos assuntos mais tratados atualmente, de forma que a discussão se torna necessária quando há deficiência energética por todo o mundo, o que impulsiona estudos para o desenvolvimento de tecnologias e soluções para suprir a falta de energia assim como alcançar um melhor aproveitamento da mesma.

No Brasil, o desenvolvimento econômico tem gerado uma enorme demanda energética, o que tem exigido do setor elétrico agilidade para solucionar problemas de carência de energia elétrica.

Em geral, a solução primária é a implantação de novas fontes de energias (hidrelétricas, termelétricas, cogeração distribuída), assim como a ampliação das matrizes energéticas existentes, porém inviabilizadas pelo custo e tempo de construção (PIN, 2004).

Deve-se também levar em consideração os problemas relacionados ao sistema de transmissão de energia, responsável por levar toda energia produzida da geração até os consumidores. Problemas como perdas durante o transporte da energia, em virtude das características construtivas (comprimento, impedância, capacitância, geometria, etc), ou perturbações (grandes variações de cargas, faltas, etc) limitam a transferência do fluxo de potência.

A existência das perdas supracitadas está ligada aos limites térmicos e/ou de estabilidade. A eficiência e aproveitamento da energia podem ser comprometidos levando ao desperdício da mesma.

Portanto, a redução de perdas térmicas, o controle da estabilidade e do fluxo de potência são algumas soluções a serem estudadas para o aumento do desempenho dos sistemas de transmissão levando-o a operar mais próximos de seus limites operacionais (PIN, 2004).

Visto os problemas supracitados, há muito já se debate sobre possíveis soluções dos mesmos. A compensação série se destaca entre as alternativas viáveis, pois oferece importantes vantagens como o aumento da capacidade de transferência de potência e da margem de estabilidade eletromecânica, uma melhor regulação de tensão e a redução de perdas. No caso da aplicação de compensadores série controlados é possível, ainda, amortecer oscilações eletromecânicas entre áreas (GONÇALVES, 2007).

A compensação série consiste na redução da reatância indutiva da linha ao qual está conectada, ou seja, compensa parte da queda de tensão indutiva da linha pela inserção de uma tensão de origem capacitiva (SONG, 1999).

Assim como no caso dos sistemas de transmissão, os sistemas de distribuição têm enfrentado novos paradigmas, principalmente devido à presença de cargas sensíveis a qualidade da alimentação e, mais recentemente, a inserção de geração distribuída na baixa tensão.

O sistema de distribuição possui características elétricas diferentes dos sistemas de transmissão (classe de tensão, limites de corrente, geometria da rede, impedâncias, comprimento das linhas, etc.). Assim, o sistema de distribuição exige um grau maior de compensação comparado com o utilizado em sistemas de transmissão. Portanto, tal característica tem restringido a aplicação da compensação série convencional, vista a possibilidade da ocorrência de fenômenos oscilatórios como ressonância subsíncrona e auto-excitação de ferroressonâncias, variação periódica da velocidade síncrona do rotor (*hunting*) de motores durante a operação em regime permanente (JESUS, 2003).

Com os controladores eletrônicos que flexibilizam os sistemas de transmissão em corrente alternada (*Flexible Alternating Current Transmission Systems - FACTS*), surgem alternativas atrativas no que diz respeito ao adiamento de grandes investimentos nos sistemas já existentes, uma vez que é possível levar os sistemas a operar próximos aos seus limites operacionais, postergando os investimentos em redes e geração. A utilização de uma compensação série controlada poderá eliminar os problemas ocasionados pela compensação série convencionais.

Com a franca expansão de mercado dos controladores FACTS, as concessionárias têm investido nesta solução flexível, provendo o sistema de potência de recursos para o controle dinâmico do fluxo de potência em todos os níveis, desde a geração até o consumo. O controle dinâmico, aliado a operação coordenada dos diversos equipamentos distribuídos nos sistemas de energia configura-se na base da proposta das redes inteligentes de energia elétrica (*smart grids*).

Neste contexto, é fundamental que profissionais de engenharia que atuam nas áreas de planejamento, operação e geração de energia elétrica tornem-se familiarizados com os principais aspectos da tecnologia dos compensadores FACTS e tenham domínio técnico e científico destes modernos sistemas.

Dada sua dinâmica de desenvolvimento, os controladores FACTS são projetados para irem ao encontro às necessidades dos investidores, desde o planejamento até a operação das redes elétricas, sem a necessidade de grandes ampliações no sistema. Isto oferece maneiras de otimizar a capacidade da transmissão, com perdas de transmissão mínimas, e também com um

mínimo impacto ambiental, além de, naturalmente, contribuir para investimentos menores e custos menores ao longo do tempo.

Há cerca de 20 anos atrás, a viabilidade dos controladores FACTS era discutida focando apenas os grandes sistemas de energia. No entanto, tais equipamentos, comprovada a sua eficiência, tendem a ser utilizados em sistemas com classes de tensão inferiores (JESUS, 2003). Atualmente estudos estão sendo realizados e alguns controladores eletrônicos que flexibilizam os sistemas de distribuição em corrente alternada (*Flexible Alternating Current Distribution Systems - FACDS*) já estão em uso.

O objetivo deste estudo será modelar um compensador série controlado eletronicamente com controle de tensão em malha aberta, capaz de atender as dinâmicas de grandes cargas no sistema de distribuição, aumentando a confiabilidade, reduzindo perdas e melhorando a qualidade no fornecimento da energia elétrica em sistemas de distribuição. Como consequência, espera-se a difusão da utilização de controladores eletrônicos em sistemas de distribuição, incorporando o conceito da flexibilização em sistemas de menor potência, a partir de uma experiência pioneira, que é a compensação série controlada a tiristores no sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

A nomenclatura FACTS foi utilizada a partir de 1988 através de Hingorani. Porém o conceito de sistemas flexíveis passou a existir no final dos anos 60 (HINGORANI, 1988).

O grande desafio dos conceitos que envolvem a teoria de FACTS é providenciar uma rede de transmissão de energia capaz de entregar toda potência gerada aos centros de cargas independente da distância entre fontes e cargas, com disponibilidade de controle do fluxo a ser distribuído ou transmitido. Problemas como os custos, perdas, estabilidade e o meio ambiente se intensificam quando o desejo é encontrar soluções para a melhoria do sistema de transmissão (SONG, 1999).

O conceito de FACTS baseia-se na utilização de dispositivos de eletrônica de potência em sistemas elétricos, permitindo maior flexibilidade e controle a tais sistemas. Flexibilidade é entendida como a capacidade de rápida e contínua alteração dos parâmetros (nível de tensão, impedâncias de transferência e ângulo de transmissão) que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema elétrico (HINGORANI, 1988).

Assim, observa-se que FACTS vem para solucionar problemas de restrição presentes nos sistemas de transmissão como aumentar a capacidade de transferência de energia das linhas de transmissão com maior segurança e controlar o fluxo de potência em linhas específicas de transmissão. (SONG, 1999).

O aumento da capacidade de transferência de energia implica em forçar uma corrente através das impedâncias de linhas de forma que o fluxo de energia chegue próximos aos seus limites térmicos e ao mesmo tempo através dos controladores FACTS, manterem a estabilidade em tempo real da linha durante e após uma falta no sistema. Observe que este objetivo não significa dizer que a linha estará operando sempre em seus limites, mas sim em caso de contingência.

De acordo com estudos e pesquisas realizadas na área, em relação ao fluxo de potência normal, pode-se ter um aumento de até 50%.

O controle do fluxo de potência em linhas específicas é necessário, pois devido às linhas de transmissão ser interligadas, há problemas de fluxo paralelo e fluxo em malha. Tais distúrbios podem restringir o fluxo de energia, aumentando as perdas na transmissão e diminuindo a região segura de operação.

Assim, observa-se a existência de obstáculos que diminuem a eficiência de qualquer sistema de transmissão o que leva a uma constatação de que muita energia é desperdiçada. Os

compensadores e controladores de alta potência e operação em tempo real são a chave para a concretização das ideias expostas.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DO CONTROLADORES FACTS

Os controladores FACTS são classificados em dois grupos quanto ao tipo de compensação (HINGORANI, 1988, p. 3-4).

Compensação de Sistemas

- Regulação de tensão em sistemas elétricos fracos;
- Redução de perdas na transmissão;
- Aumento da capacidade de transmissão;
- Aumento dos limites de estabilidade transitória;
- Amortecimento de oscilações;
- Suporte dinâmico de tensões;

Compensação de Cargas

- Estabilização do nível de tensão nos terminais de linhas longas;
- Redução do consumo de potência reativa;
- Compensação de assimetria de correntes;
- Redução de perdas globais;
- Redução das flutuações de tensão, *flicker*, harmônicas e outras distorções.

Os controladores FACTS ainda podem ser divididos em gerações, que são:

Primeira geração: controladores FACTS baseados em tiristores e chaves semicondutoras.

Segunda geração: equipamentos baseados em comutadores do tipo *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGTB)* ou *Gate Turn Off Thyristor (GTO)*.

Terceira geração: integração de equipamentos conectados em série e em derivação em uma mesma linha, por exemplo, o *Unified Power Flow Controller (UPFC)*, que é a combinação do *Static Synchronous Series Compensator (SSSC)* com o *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*.

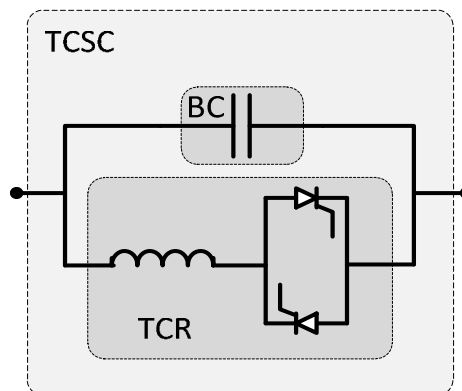
Quarta geração: integração dos controladores conectados em série e em derivação em linhas diferentes, por exemplo, o *Interline Power Flow Controller (IPFC)* entre outros (Cavalieri, 2001).

Conforme as classificações das gerações, os controladores FACTS podem ser conectados em série, derivação ou uma combinação de ambos. Quanto à função dos componentes eletrônicos que os compõe, podem ainda ser divididos em três grupos: Chaveados, Controlados e Avançados. Apenas o grupo dos controlados será detalhado, mais particularmente o *Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)*.

2.3 O TCSC (THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATOR)

O TCSC é um compensador série pertencente à família dos controlados. Em suma, é composto por um *Thyristor Controlled Reactor (TCR)* em paralelo com um Banco de Capacitores (BC). A Figura 1 apresenta o arranjo do controlador supracitado.

Figura 1 – Configuração do TCSC.



Fonte: Elaboração do autor.

O TCSC, controlado pelo ângulo de disparo dos tiristores pode possuir uma reatância equivalente indutiva ou capacitiva, de acordo com a necessidade da operação. Esta característica favoreceu a escolha do TCSC para interligar o subsistema de energia (Norte) ao subsistema de energia (Sul) (SAVELLI, 2007).

2.3.1 A INTERLIGAÇÃO NORTE – SUL

Em 1999 no Brasil a interligação Norte-Sul foi realizada com o objetivo de possibilitar o intercâmbio de energia entre os subsistemas brasileiros, Norte/Nordeste (N/NE) e

Sul/Suldeste/Centro-Oeste (S/SE/CO). Desta forma, o Sistema Interligado Nacional (SIN) foi criado, conectando as subestações de Serra da Mesa, em Goiás (GO) e Imperatriz, no Maranhão (MA) otimizando o aproveitamento energético devido ao melhor utilização dos reservatórios durante o ano (SAVELLI, 2007). A Figura 2 apresenta uma visão simplificada do sistema nacional de transmissão de energia elétrica.

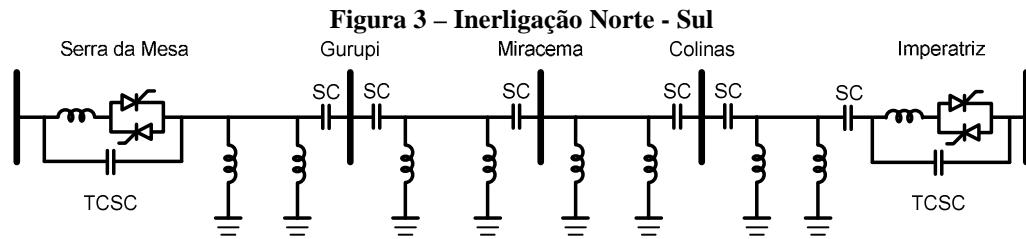
Figura 2 – Mapa do sistema nacional de transmissão – horizonte 2007.



Fonte: ONS (2013).

A interligação dos dois subsistemas resultou no surgimento de um modo de oscilação em baixa frequência, pouco amortecido e instável entre as máquinas geradoras dos mesmos. Assim, surgiu necessidade do emprego de um controlador robusto para estabilizar o sistema frente às pequenas e grandes perturbações, mantendo o amortecimento dos modos de oscilações eletromecânicos do SIN dentro dos valores aceitáveis para uma operação segura.

O TCSC foi à alternativa mais atrativa escolhida para o amortecimento do modo de oscilação NS. O diagrama de conexão da linha de transmissão Serra da Mesa/Imperatriz é apresentado na Figura 3 (SAVELLI, 2007).



FONTE: Savelli (2007).

Uma observação interessante consiste no fato que os TCSCs, instalados no extremo norte da ligação (Imperatriz) e o outro instalado no extremo Sul (Serra da Mesa), foram fornecidos por empresas diferentes.

Os dados do TCSC são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados do TCSC instalado na Interligação Norte-Sul.

PARÂMETROS DO TCSC	VALOR
Potência reativa nominal	108 MVAR
Máxima tensão de linha	550 kV
Tensão nominal sobre o capacitor série	23,9 kV
Corrente nominal da linha (1,0 p.u.)	1500 A
Corrente de sobrecarga de 30 min (1,5 p.u.)	2250 A
Corrente de sobrecarga de 10 s (2,0 p.u.)	3000 A
Corrente máxima de curto-circuito	23 kA
Reatância capacitiva física (1,0 p.u.)	13,27 Ω /fase
Reatância capacitiva nominal (1,2 p.u.)	15,92 Ω /fase
Máxima reatância capacitiva (3,0 p.u.)	39,8 Ω /fase
Reatância indutiva no modo TSR	2,5 Ω /fase
Indutância do reator	5,63 mH

Fonte: Mathur e Varma (2002).

Ao longo da Interligação Norte-Sul foram instalados seis bancos de capacitores série, totalizando 54% de compensação série fixa (FSC - Fixed Series Capacitor), e nas suas extremidades foram instalados dois equipamentos FACTS de compensação série controlada a tiristores (TCSC), cada um fornecendo 6% de compensação série em regime permanente. Durante uma contingência, o TCSC pode fornecer de 7% a 15% de compensação série podendo operar com potência reativa de 241 Mvar.

2.3.2 OUTRAS APLICAÇÕES

Dispositivos compensadores de reativos têm sido aplicados em diversas partes do mundo a mais de 20 anos atrás contribuindo para o aumento da capacidade da transferência de potência sem adição de novas linhas de transmissão, controle direto das rotas de transmissão,

minimização com custo de projetos e instalação de novas fontes de geração de energia elétrica, alta confiabilidade sob contingências e melhorias na qualidade da energia.

Várias empresas possuem aplicações em FACTS pelo mundo. A Tabela 2 apresenta algumas destas aplicações.

Tabela 2 – Aplicações FACTS.

In Operation since ...	Country	Project Name	Application
1990	USA	Kayenta	ASC
1993	Canadá	Montagnais	FSC
1993	Brazil	Serra da Mesa	TCSC
1999	Chile	Atacama	FSC
2000	China	Yangcheng	FSC
2000	USA	Jacinto	FSC
2003	China	Tiang-Guang	TCSC
2003	Mozambique	Maputo-Barberton	FSC
2003	USA	Lexington and Valley	FSC
2004	Brasil	São João do Piauí	FSC
2006	USA	Dayton	FSC
2006	USA	Eldorado-Lugo & Eldorado-Moenkopi	TPSC
2006	China	Fengjie	FSC
2008	Brazil	North South Interconnector III	FSC
2009	India	East-West	FSC

Fonte: Siemens (2002)

Observa-se que a maioria dos FACTS aplicados são compensadores fixos conectados em série com o sistema, como o caso do FSC.

2.4 CONCLUSÃO

Atualmente, os controladores FACTS têm conquistado espaço no mercado por ser uma solução confiável, eficiente, flexível, rápida e com custos reduzidos quando comparado com construções de novas usinas, subestações ou ampliação de redes.

Desde 1990, conforme aplicações de algumas empresas, a compensação série fixa já era adotada como alternativa para o aumento da capacidade de transferência de potência, redução do ângulo de transmissão e, conseqüentemente, aumento da margem de estabilidade e melhor regulação de tensão.

O TCSC, em particular, traz muitos benefícios ao sistema de potência no qual está instalado trazendo principalmente, confiabilidade, flexibilidade, aumento da capacidade de transferência de potência, controle do fluxo de potência em linha de transmissão paralela, aumento da margem de estabilidade, amortecimento de oscilações e mitigação de Ressonância Subsíncrona (RSS). Vista as suas vantagens operacionais e econômicas, principalmente

quanto à postergação de novos investimentos em fontes de energia e construção de novas linhas de transmissão e subestações, e com o avanço da eletrônica de potência, a sua utilização tende a aumentar num futuro próximo.

3 COMPENSAÇÃO SÉRIE NA DISTRIBUIÇÃO

3.2 INTRODUÇÃO

Assim como há muito se debate sobre a utilização de compensadores FACTS e suas aplicações para o melhor aproveitamento da energia em sistemas de transmissão, nos últimos anos, aspectos relacionados com a qualidade de energia elétrica nos sistemas de distribuição, como nível de tensão no ponto de acoplamento com o cliente, níveis de harmônicos, entre outros, tornaram-se o foco de discussões e ações por parte das concessionárias, centro de pesquisas e órgãos reguladores. Tais problemas têm sido tratados com a implantação de algumas medidas corretivas, porém, nem sempre produzindo resultados eficazes. Deste modo, há a necessidade de se utilizar novas tecnologias para a correção de problemas que, geralmente, trazem prejuízos aos consumidores (NASCIMENTO, 2009).

Dentre os diversos problemas existentes no setor elétrico, o afundamento de tensão mostra-se muito importante, dada a sua natureza e ao impacto nos equipamentos eletrônicos, podendo causar grandes prejuízos para os consumidores em geral. Uma das soluções encontradas para resolver esse problema é o Restaurador Dinâmico de Tensão (*Dinamic Voltage Restorer – DVR*). Na literatura, diversos trabalhos tratam de DVRs (BIANCHIN et al., 2008; BORMIO JÚNIOR et al., 2008; COSTA JUNIOR, 2003).

Equipamentos convencionais também são utilizados para elevar e regular o nível de tensão, como bancos de capacitores *shunt* e reguladores de tensão, porém, algumas vezes não são suficientemente eficientes. É o que ocorre em casos como os encontrados em linhas extensas, com carga concentrada na sua extremidade, ou nas partidas de grandes motores de indução, pois o tempo de partida é menor que o tempo de resposta dos equipamentos convencionais. Isto exige que a concessionária insira no seu programa de expansão a construção de subestações, ramais de transmissão, alimentadores, elevando assim os custos dos investimentos (MARAFAO et al., 2004).

Os compensadores eletrônicos aparecem também como solução potencial de problemas em sistemas de distribuição. A compensação série convencional em redes de distribuição pode gerar ressonâncias subsíncronas e ferroressonâncias, fenômenos oscilatórios que podem levar o sistema ao colapso. Portanto, discute-se a possibilidade da aplicação de compensadores série eletronicamente controlados como o TCSC, com grau de compensação superior ao empregado na transmissão, para o controle de potência, controle de tensão, controle de impedância série,

amortecimento de oscilações e estabilidade transitória em sistemas de distribuição, particularmente àqueles onde há geração distribuída.

A compensação série na distribuição é uma técnica simples e conhecida, que consiste basicamente em compensar ou sobrecompensar a reatância indutiva da linha, a partir do ponto de instalação (MARTINS et al., 2007; LARSSON et al., 1995). Ela fornece uma regulação de tensão e uma compensação de reativos aproximadamente instantânea e automática, proporcional a corrente, o que melhora o perfil da tensão e dá suporte à conexão de grandes cargas. Além disso, com a necessidade de melhorar os níveis de qualidade de energia, a utilização de capacitores série também pode ser aplicada para reduzir flutuações de tensão e os respectivos índices de severidade de cintilação luminosa (*flicker*) (HEDIN; PAULSSON, 1993).

A compensação série cumpre suas finalidades ao reduzir a reatância série de uma linha, tornando possível, por exemplo, o aumento da capacidade de transferência de potência e o amortecimento de oscilações eletromecânicas. Por outro lado, a utilização de compensadores série pode causar oscilação eletromecânica entre geradores e as impedâncias do sistema, fenômeno conhecido como Ressonância Subsíncrona (GONÇALVES, 2007).

Vários compensadores série convencionais têm sido instalados nos sistemas de distribuição, ao longo dos anos. Entretanto, a falta de controle dinâmico da compensação resulta, muitas vezes em sobrecompensações ou mesmo em compensações ineficazes. A seguir, o conceito da compensação série é apresentado.

3.2 REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS PARA A COMPENSAÇÃO SÉRIE

3.2.1 SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Em sistemas de transmissão, de forma geral, a impedância da linha é representada apenas pela sua reatância indutiva desprezando a parcela resistiva. Este modelo é válido em aplicações e modelagens uma vez que a relação da resistência pela reatância da linha é muito menor que a unidade, de forma que, a queda de tensão e problemas com estabilidade do sistema devem-se principalmente a reatância indutiva e ao comprimento da linha. Portanto, o grau de compensação série depende apenas da reatância indutiva da linha e da reatância capacitiva do compensador.

O grau de compensação série representa a porcentagem da reatância capacitiva do compensador em relação à linha ao qual está instalado. Em nível de transmissão, o grau de compensação série (k_T) será sempre menor que um, variando normalmente de 0,3 a 0,7 e dado pela equação (1).

$$k_T = \frac{X_C}{X_L} < 1 \quad (1)$$

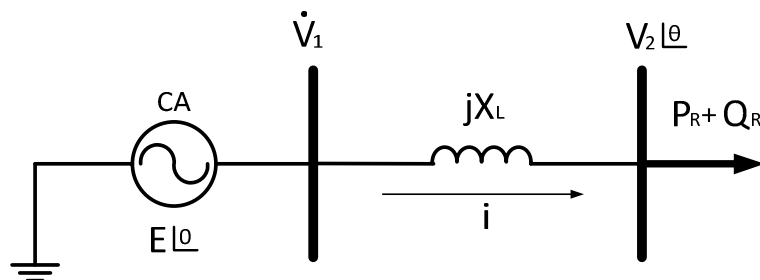
Onde:

X_C – Reatância capacitiva do banco de capacitores;

X_L – Reatância indutiva da linha de transmissão;

Uma representação do sistema de potência para transmissão pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 – Representação do sistema de transmissão.



Fonte: Elaboração do autor.

Onde:

E – Tensão de alimentação;

P_R – Potência ativa da carga;

Q_R – Potência reativa da carga;

3.2.2 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Em sistema de distribuição, a representação da impedância da rede deve ser avaliada cuidadosamente visto que existem diferenças quando comparado com o sistema de transmissão como nível de tensão, corrente, a geometria dos condutores, entre outras.

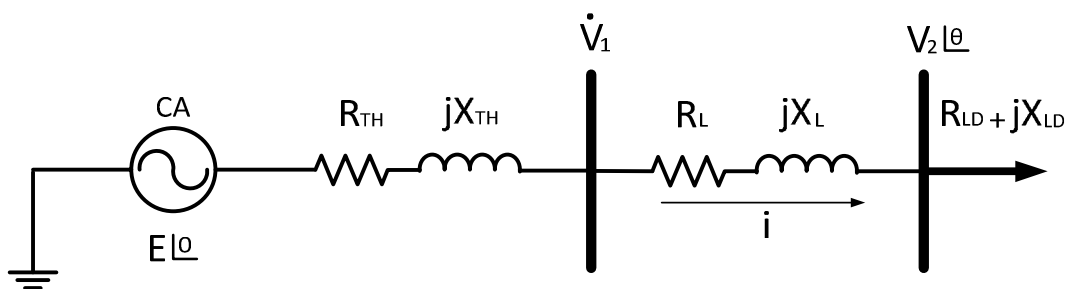
A relação entre a resistência pela reatância indutiva de uma rede convencional pode ser no mínimo igual a um terço, como o cabo 477MCM, sendo maior na maioria dos casos. Dessa forma, as perdas da parcela resistiva são significativas e, portanto não pode ser desprezada.

Geralmente, uma rede de distribuição é representada a partir da subestação que a alimenta até o consumidor. Para estudos de compensação série, deve-se considerar o efeito da impedância equivalente a montante da subestação. Assim, o grau de compensação (k_D) em relação à reatância do sistema será sempre menor que um, conforme a equação (2)

$$k_D = \frac{X_C}{X_{TH} + X_L + X_{LD}} < 1 \quad (2)$$

Uma representação do sistema de potência para distribuição pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5 – Representação do sistema de distribuição.



Fonte: Elaboração do autor.

Onde:

R_{TH} – Resistência de Thévenin;

X_{TH} – Reatância indutiva de Thévenin;

R_L – Resistência da linha de distribuição;

X_L – Reatância indutiva da linha de distribuição;

R_{LD} – Resistência da carga;

X_{LD} – Reatância indutiva da carga;

Um grau de compensação menor que um, significa uma redução da reatância indutiva do sistema de distribuição. Nesta condição, entende-se que houve um “encurtamento elétrico” da rede e a compensação série apresenta vantagens tais como amortecimento de oscilação, aumento da capacidade de transferência de potência e melhor regulação da tensão.

Para um grau de compensação igual a um, o sistema entra em ressonância série. A reatância equivalente do sistema tende a zero e a corrente cresce drasticamente podendo exceder os limites térmicos da rede e dos equipamentos a ela conectados ocasionando danos e prejuízos.

Um grau de compensação maior que um, significa que a reatância capacitiva é superior à soma de todas as reatâncias indutivas. Nesta condição, a rede apresentará característica reativa capacitiva e a compensação série torna-se ineficaz.

O termo “sobrecapacitação” deve-se ao fato que a reatância capacitiva além de compensar a reatância da linha, compensará a reatância indutiva de Thévenin. Assim, o grau de compensação k_D será dado pela equação (1), porém admitirá valor maior que a unidade visto que a reatância indutiva total não é definida apenas pela reatância indutiva da linha.

Para definição do montante de reatância capacitiva disponível para a compensação série na distribuição define-se o fator de compensação (F_C). O fator de compensação expressa à relação da soma da reatância indutiva da linha e a reatância indutiva de Thévenin pela reatância indutiva da linha, dado pela equação (3).

$$F_C = \frac{X_L + X_{TH}}{X_L} \quad (3)$$

O fator de compensação é diretamente proporcional à reatância de Thévenin. Nesta condição, quanto maior X_{TH} maior será o grau de compensação disponível, ou seja, mais reatância capacitiva poderá ser inserida ao sistema.

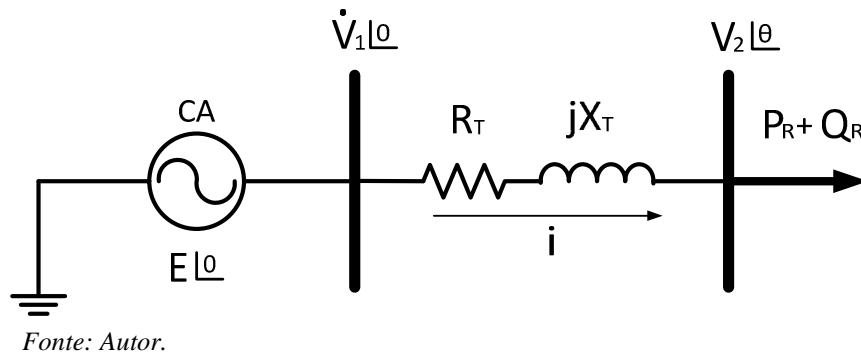
O montante limite de reatância capacitiva, além dos limites térmicos, nível de tensão e corrente, deve ser menor que a soma das reatâncias indutivas do sistema referenciadas a mesma base de tensão e potência evitando a ressonância série.

3.3 CURVAS PV

As curvas PV são equações definidas a partir de um sistema elétrico que informa a potência transferida em função da tensão em uma determinada barra.

Seja um sistema de potência simplificado, representado apenas por um gerador e uma linha de transmissão que alimenta uma carga, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Sistema de potência simplificado.



Onde:

R_T – Resistência total, resistência de Thévenin mais a resistência da linha;

X_T – Reatância indutiva total, reatância de Thévenin mais a reatância da linha;

A tensão de recepção em função dos parâmetros do sistema pode ser observada na equação (4). Para maiores detalhes vide Apêndice A.

$$V_{2A} = \frac{\sqrt{E^2 - 2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) + \sqrt{E^4 - 4 \cdot E^2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) - 4 \cdot (X \cdot Pr - R \cdot Qr)^2}}}{2} \quad (4)$$

$$V_{2B} = \frac{\sqrt{E^2 - 2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) - \sqrt{E^4 - 4 \cdot E^2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) - 4 \cdot (X \cdot Pr - R \cdot Qr)^2}}}{2}$$

Para sistemas de distribuição, conforme observado na seção 0 onde a resistência das linhas é significativa, chegando a ser, dependendo do condutor da linha, maior que a reatância indutiva, seu efeito deve ser considerado.

Os parâmetros elétricos do sistema de distribuição são apresentados na Tabela 3

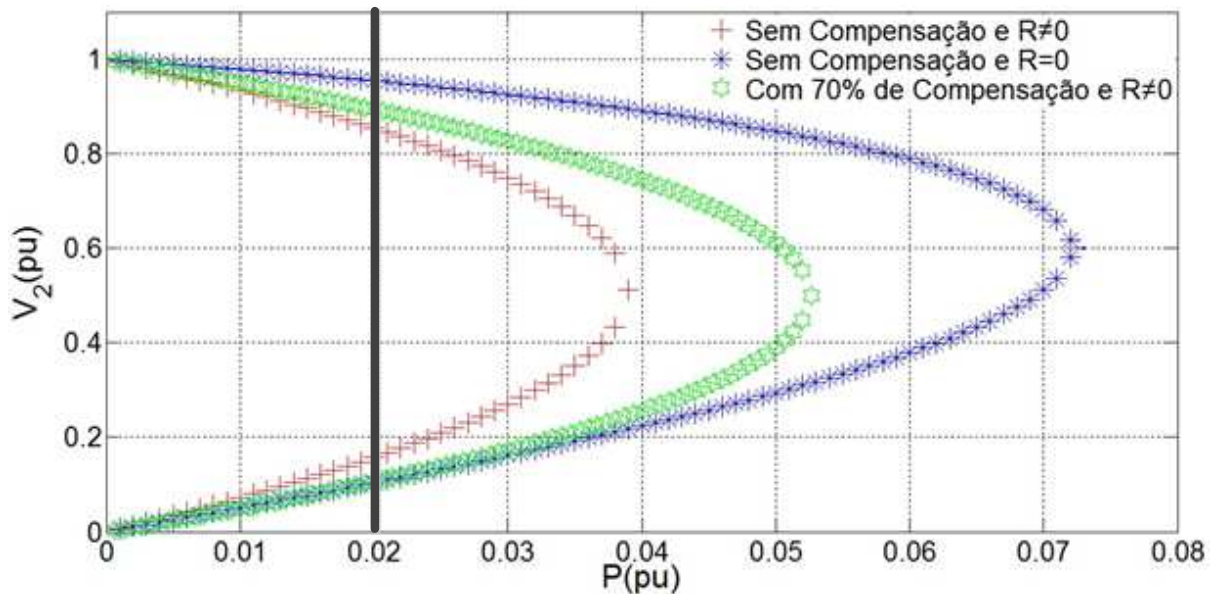
Tabela 3 – Parâmetros elétricos do sistema de distribuição.

Sistemas	R(Ω)	X(Ω)	Classe de Tensão (kV)	Potência Base (MVA)
Distribuição até PAC	7,9174	8,7329	13,8	100

Fonte: Elaboração do autor.

A partir das informações elétricas do sistema, a Figura 7 apresenta a curva PV do sistema de distribuição para três casos: sem compensação e resistência diferente de zero; com 70% de compensação fixa e resistência diferente de zero; sem compensação e desprezando a resistência.

Figura 7 – Curva PV para o sistema de distribuição em estudo.



Fonte: Elaboração do autor.

A curva PV para um ramal sem compensação e desprezando a resistência do mesmo mostra uma máxima capacidade de transferência de potência de 0,0721 pu. Para uma transferência de potência de 0,02 pu, a tensão V_2 será 0,9545 pu. Uma vez que a resistência do sistema foi desprezada, a queda tensão dependerá apenas da reatância indutiva da linha.

A curva PV para um ramal sem compensação e considerando o efeito resistivo, informa que o ponto de máxima transferência de potência diminui de 0,0721 pu para 0,03895 pu e para um mesmo valor de potência (0,02pu), há redução da tensão V_2 (0,9545 pu para 0,8548 pu). Portanto, para análise de fluxo de potência em sistemas de distribuição é errôneo não considerar o efeito das resistências.

Como resultado da compensação série fixa no sistema de distribuição, é possível observar os seguintes efeitos:

- a) aumento do amortecimento de oscilações, devido ao aumento da participação do efeito resistivo na linha de distribuição;
- b) aumento da capacidade de transferência de potência, devido à redução da reatância equivalente indutiva da linha;
- c) aumento da tensão V_2 .

Para ramais com reguladores de tensão distribuídos nas linhas de distribuição ou sistemas malhados, o ponto de alocação do compensador série nos sistemas de distribuição tem importância fundamental quanto aos efeitos descritos acima.

3.4 CONCLUSÃO

A compensação série na distribuição consiste na instalação de compensadores FACDS, como o FSC ou TCSC, reduzindo a reatância indutiva efetiva do sistema, efeito de “encurtamento elétrico”.

As concessionárias de distribuição de energia têm avaliado a compensação série como uma alternativa quanto à postergação de investimentos em construções e/ou ampliações de subestações, recondutoramento e/ou construção de ramais.

O desempenho da compensação série na distribuição depende praticamente de dois fatores inerentes ao sistema como:

- a) relação da resistência pela reatância indutiva do alimentador;
- b) nível de curto circuito na subestação.

A compensação série na distribuição é limitada pela geometria dos condutores, pois a influência da parcela resistiva nas quedas de tensões e na capacidade de transferência de potência é muito significativa. Em contra partida, aumentará o amortecimento de possíveis oscilações.

O montante de reatância capacitiva disponível para a compensação depende diretamente da reatância indutiva de Thévenin (X_{TH}) à montante da subestação. Quanto maior a reatância supracitada, maior poderá ser o grau de compensação, a faixa de resposta do compensador e a regulação da tensão terminal.

4 O COMPENSADOR SÉRIE CONTROLADO A TIRISTOR

4.1 INTRODUÇÃO

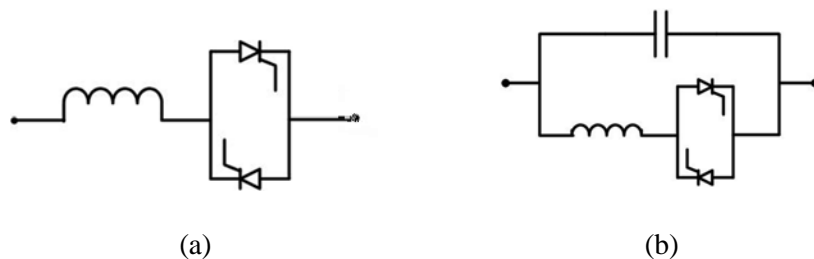
Os primeiros estudos sobre a configuração do compensador controlado a tiristor surgiu com Vithayathil em 1986 como o método de “ajuste rápido da impedância da rede” (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

A concepção do TCSC baseia-se no conceito de sistemas de corrente alternada com fluxos de potência controláveis (WATANABE et al, 1998).

O TCSC utiliza como princípio fundamental a inserção de uma reatância capacitiva variável, de forma a diminuir a queda de tensão indutiva e assim, aumentar a capacidade do sistema de transmissão ou distribuição e controlar o fluxo de potência na linha. De maneira geral, trata-se de um compensador série composto por uma capacitância fixa FC (*Fixed Capacitor*) em paralelo com um reator controlado a tiristores (TCR).

O arranjo do TCR é apresentado na Figura 8(a), o TCSC na Figura 8(b).

Figura 8 – Circuito equivalente: (a) TCR (b) TCSC.



Fonte: Elaboração do autor.

A reatância equivalente do arranjo ilustrado na Figura 8(b) pode ser controlada continuamente através do disparo adequado dos tiristores. Com efeito, a compensação série de uma linha de transmissão pode ser realizada de forma dinâmica com esse dispositivo (WATANABE et al, 1998).

A utilização de um sistema de controle para o disparo dos tiristores no arranjo do TCSC pode oferecer algumas vantagens como (MATHUR; VARMA, 2002):

- a) controle rápido e contínuo do nível de compensação série da linha;
- b) controle dinâmico do fluxo de potência na linha;
- c) amortecimento do balanço de potência local e oscilações entre áreas;
- d) supressão de oscilações subsíncronas;

- e) rápida diminuição do *offset* de tensões contínuas resultantes da inserção de capacitores série através do controle do ângulo de disparo;
- f) aumento da potência reativa com o carregamento da linha, fornecendo suporte de tensão na rede local e alívio para qualquer instabilidade de tensão;
- g) redução dos níveis de corrente de curto-circuito através da alteração do ponto de operação da região capacitiva para a região indutiva.

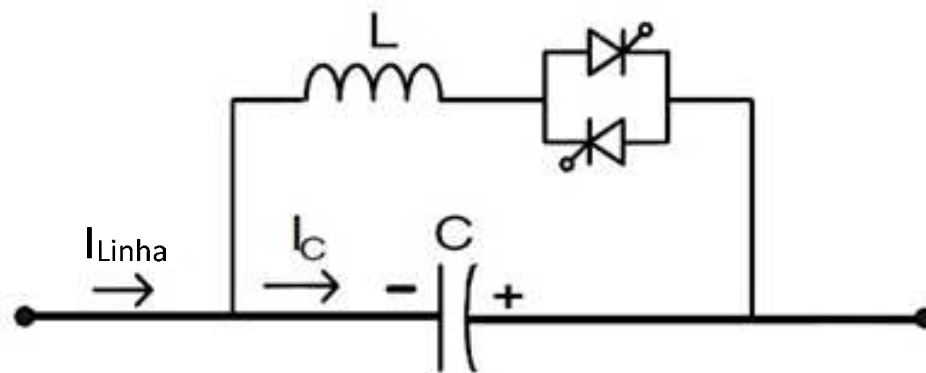
4.2 MODOS DE OPERAÇÃO DO TCSC

O TCSC pode operar, conforme a condição de condução dos tiristores, de quatro modos (SONG, 1999; YEDIDI, 2006):

- **Bloqueio**

Nesta condição, os tiristores não recebem sinal de disparo e o TCSC opera como um banco fixo de capacitores. A Figura 9 apresenta o circuito do TCSC para a condição de operação descrita.

Figura 9 – TCSC operando no modo bloqueio.



Fonte: Yedidi (2006).

Para a transição de um estado inicial de condução para o estado de bloqueio o sistema de controle deve bloquear os pulsos para os tiristores que deixaram de conduzir assim que a corrente através do mesmo atingir o valor zero (MATHUR; VARMA, 2002).

O ângulo de disparo, neste caso, é equivalente a 180° e a corrente da linha passa a ser igual a corrente do banco de capacitores.

Neste modo de operação devem-se monitorar as tensões de *offset* sobre o banco de capacitores e descarrega-las rapidamente (UNTERLAB; WEIB; RENZ, 1992) evitando danos nos transformadores do sistema.

- **Bypass**

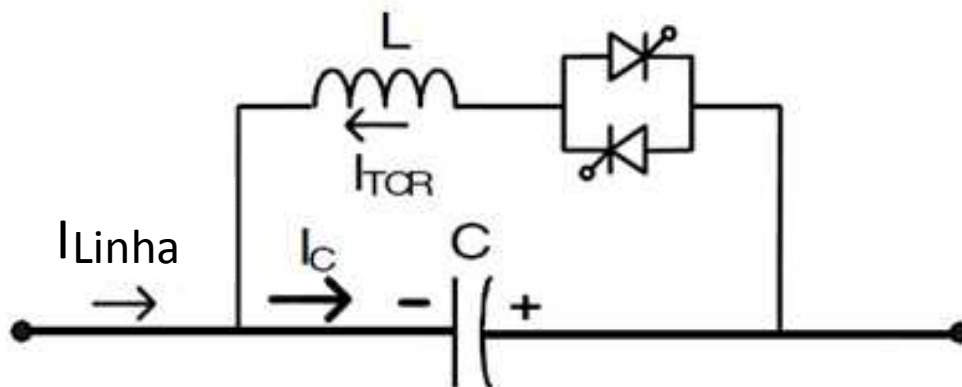
Neste modo de operação, também chamado de TCR (Thyristor-Controlled Reactor), o ângulo de disparo dos tiristores é ajustado de tal forma que os mesmos conduzam continuamente ($\alpha=90^\circ$).

O TCSC se comporta como uma combinação paralela entre o banco de capacitores e o TCR podendo ser útil em certas funções de proteção (MATHUR;VARMA, 2002).

- **Modo Vernier Capacitivo**

A operação do TCSC no modo Vernier Capacitivo implica que a reatância equivalente do compensador será capacitiva. Neste caso, o TCSC funciona como um capacitor “variável” $\alpha_{C\text{ LIM}} \leq \alpha < 180^\circ$. A Figura 10 mostra o circuito para a operação na região capacitiva.

Figura 10 – TCSC operando no modo vernier capacitivo.



Fonte: Yedidi (2006).

Esta condição produz uma corrente no TCR defasada de 180° da corrente no banco de capacitores resultando em um loop de fluxo de corrente no TCSC. Portanto, a corrente no banco de capacitores é resultado da soma da corrente da linha com a corrente do TCR.

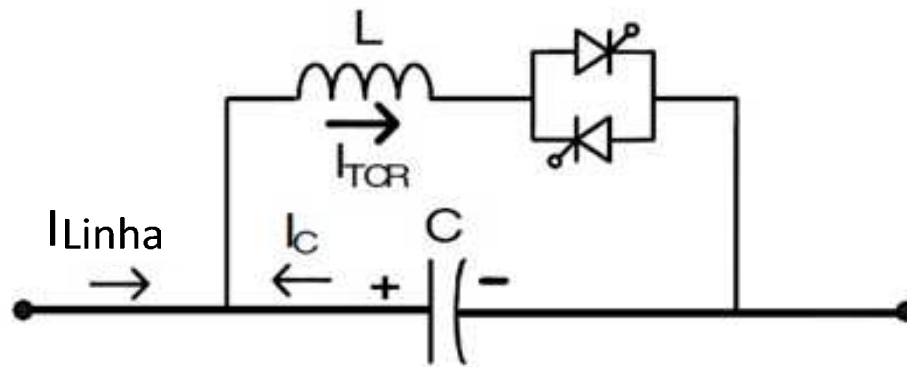
Em virtude do chaveamento dos tiristores, a corrente no TCR pode conter alto conteúdo harmônico resultando em deformação na tensão V_C (IEEE Std 1534-2002). Esta corrente

circula praticamente apenas no TCSC, uma vez que a reatância indutiva da linha se apresenta como uma alta impedância para as componentes harmônicas da referida corrente.

- **Modo Vernier Indutivo**

A operação do TCSC no modo Vernier Indutivo implica que a reatância equivalente do compensador será indutiva. Neste caso, o TCSC funciona como um indutor variável com $90^\circ < \alpha \leq \alpha_{L \text{ lim}}$. A Figura 11 apresenta o circuito para a operação na região indutiva.

Figura 11 – TCSC operando no modo vernier indutivo.



Fonte: Yedidi (2006).

Esta condição produz uma corrente no TCR defasada de 180° da corrente no banco de capacitores resultando em um loop de fluxo de corrente no TCSC. Portanto, a corrente no TCR é resultado da soma da corrente da linha com a corrente do banco de capacitores.

Em virtude do equivalente do TCSC ser uma reatância indutiva, o mesmo pode ser utilizado como limitador de corrente de curto circuito cujo valor dependerá do ângulo de disparo (KUMARA et al., 2006).

Os modos Vernier podem ser chamados de modos contínuos de operação. Além dos quatro modos de operação descritos, o TCSC pode operar com uma ordem de reatância fixa.

4.3 IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DO TCSC

A reatância indutiva do TCR varia de acordo com o ângulo de disparo dos tiristores, conforme a equação (5) (CAÑIZARES, 1999).

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) - \sin(2\alpha)} \quad (5)$$

Para α variando de 90° a 180° , $X_L(\alpha)$ varia do valor de X_L a infinito.

O equivalente entre o capacitor série e a reatância indutiva pode ser controlado continuamente, através do disparo adequado dos tiristores. Desta forma, a compensação série de uma linha de transmissão ou distribuição pode ser realizada de forma dinâmica.

Para o TCSC reduzir a reatância série da linha dinamicamente, o sistema de controle do mesmo deve identificar a necessidade de atuação e determinar a ordem de reatância adequada. Uma vez conhecido o sinal de ordem de reatância, define-se o ângulo de disparo correspondente. A expressão que relaciona o ângulo de disparo (α) com a ordem de reatância (X_{TCSC}) é apresentada em (6) (MEIKANDASIVAM; NEMA; JAIN, 2008):

$$X_{TCSC}(\alpha) = -X_{C_{TCSC}} + (X_{C_{TCSC}} + X_{L_{TCSC}}) \left[\frac{2 \cdot (\pi - \alpha) + \sin(2(\pi - \alpha))}{\pi} \right] - 4 \frac{X_{L_{TCSC}}^2 \cdot \cos^2(\pi - \alpha)}{X_{L_{TCSC}}} \left[\frac{\varpi \cdot \tan(\varpi(\pi - \alpha)) - \tan(\pi - \alpha)}{\pi} \right] \quad (6)$$

Onde:

- a) $X_{C_{TCSC}}$: reatância do banco de capacitores do TCSC;
- b) $X_{L_{TCSC}}$: reatância do reator controlado por tiristor;
- c) $X_{LC_{TCSC}}$: reatância equivalente resultante do paralelo entre X_C e X_L ;
- d) ϖ : relação entre a frequência de ressonância do TCSC (ω_0) pela frequência do sistema (ω).

O controle do parâmetro ϖ pode contribuir para a mitigação de harmônicos, para o custo do projeto e para a obtenção de um único ponto de ressonância. Os valores típicos para o

referido parâmetro estão compreendidos entre 2,4 e 2,75 (TENÓRIO, 1995). Já em (MEIKANDASIVAM, NEMA, JAIN, 2008) o valor de ϖ deve ser menor que 3.

O parâmetro ϖ é definido através das equações ((7), ((8), ((9) e ((10).

$$X_{LTCSC} = \omega \cdot L_{TTCSC} \rightarrow \omega = \frac{X_{LTCSC}}{L_{TTCSC}}; \quad (7)$$

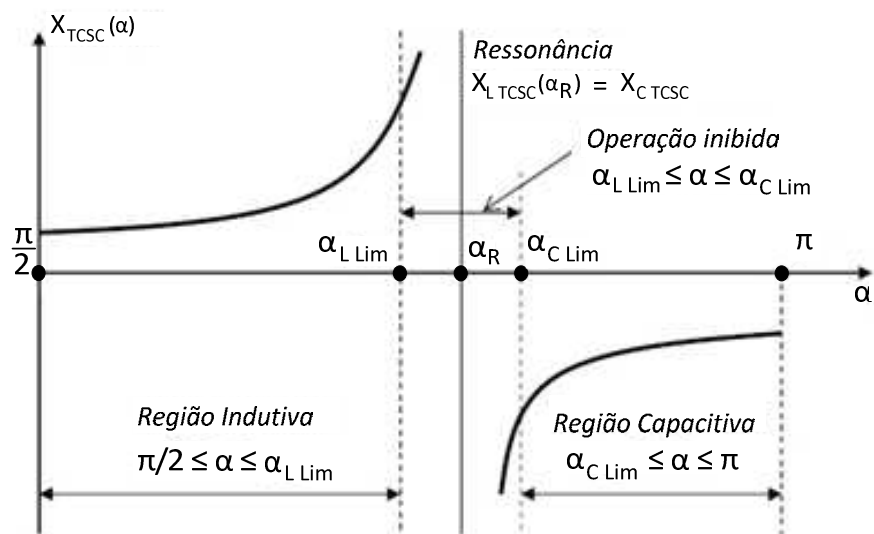
$$X_{CTCSC} = \frac{1}{\omega \cdot C_{TTCSC}} \rightarrow \omega = \frac{1}{X_{CTCSC} \cdot C_{TTCSC}}; \quad (8)$$

$$\omega^2 = \frac{X_{LTCSC}}{L_{TTCSC}} \cdot \frac{1}{X_{CTCSC} \cdot C_{TTCSC}} = \frac{X_{LTCSC}}{L_{TTCSC} \cdot X_{CTCSC} \cdot C_{TTCSC}} \quad (9)$$

$$\varpi^2 = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = \frac{1}{L_{TTCSC} \cdot C_{TTCSC}} \cdot \frac{L_{TTCSC} \cdot X_{CTCSC} \cdot C_{TTCSC}}{X_{LTCSC}} \rightarrow \varpi = \sqrt{\frac{X_{CTCSC}}{X_{LTCSC}}} \quad (10)$$

A Figura 12 mostra a característica que relaciona a ordem de reatância com o ângulo de disparo, indicando as regiões indutiva e capacitiva de operação, bem como o ponto de ressonância, considerando a sincronização pela tensão do banco de capacitor (HINGORANI; GYUGYI, 2000; TENÓRIO, 1995).

Figura 12 – Impedância característica



Fonte: Hingorani e Gyugyi (2000).

Onde:

- a) $\alpha_{L\ LIM}$ – ângulo limite na região indutiva;
- b) $\alpha_{C\ LIM}$ – ângulo limite na região capacitiva;
- c) α_R – ângulo de ressonância.

Na região indutiva, o ângulo pode variar entre a compensação mínima e máxima, que ocorrem para α igual a 90° e $\alpha_{L\ LIM}$ respectivamente. Para a região capacitiva, a compensação mínima e máxima ocorre para α igual a 180° e $\alpha_{C\ LIM}$ respectivamente. Os valores dos ângulos limites são obtidos quando da definição do valor do parâmetro ϖ e da compensação mínima capacitiva do TCSC.

O sistema de controle deve limitar o ângulo de disparo dos tiristores, seja por inibição dos pulsos ou saturação, evitando a faixa de ressonância do compensador.

Para uma operação na região capacitiva e em seguida na região indutiva, ou vice-versa, o sistema de controle deve atuar de forma que o ângulo α “pule” a região de ressonância. Uma forma de realizar a transição contínua do ângulo de disparo pelas regiões supracitadas consiste na utilização de vários módulos TCSCs, eliminando assim a região de ressonância (MATHUR;VARMA, 2002).

Assim, dependendo do ângulo de disparo dos tiristores, o TCSC pode operar na região indutiva ou capacitiva, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Regiões de operação em função do ângulo de disparo.

Faixa do Ângulo de Disparo (α)	Região de Operação
$90^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{L\ LIM}$	Indutiva
$\alpha_{L\ LIM} \leq \alpha \leq \alpha_{C\ LIM}$	Ressonância
$\alpha_{C\ LIM} \leq \alpha \leq 180^\circ$	Capacitiva

Fonte: Meikandasivam (2008).

A reatância indutiva $X_{L\ TCSC}$ deve ser suficientemente menor que a reatância capacitiva $X_{C\ TCSC}$ de forma que o TCSC possa assumir uma reatância efetiva indutiva ou capacitiva (MEIKANDASIVAM, 2008).

Supondo que $X_{C\ TCSC}$ seja menor que $X_{L\ TCSC}$, então a região de operação será apenas a capacitiva, pois qualquer ramo paralelo resulta em um valor de reatância efetiva que terá a característica da menor reatância do ramo.

A reatância indutiva X_L também não deve ser igual à reatância capacitiva X_C , pois o dispositivo entraria em ressonância, condição esta, inaceitável.

4.4 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO E MANOBRA DO D-TCSC

A filosofia dos sistemas de proteção consiste em selecionar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um sistema elétrico, de forma a guardar entre si uma determinada relação para que uma anormalidade no sistema possa ser isolada e removida sem que outras partes do mesmo sejam afetadas (FELTRIN, 2005; GIGUER, 1988).

A função da proteção visa uma rápida retirada de operação de qualquer elemento de um sistema, quando da ocorrência de um curto-circuito, ou quando o mesmo operar sob condição anormal que possa causar dano ou interferir na operação do restante do sistema (RESENDE).

O desempenho do sistema de proteção depende dos seguintes requisitos (FELTRIN, 2005; GIGUER, 1988):

- a) seletividade: a proteção deve somente isolar a parte do sistema atingida pelo defeito, mantendo a continuidade do serviço das demais partes do sistema;
- b) rapidez: as sobrecorrentes ou sobretensões geradas pelos curtos-circuitos, sobrecargas ou qualquer outro defeito devem ser extintas no menor tempo possível, reduzindo a probabilidade de propagação dos defeitos;
- c) sensibilidade: a proteção deve ser suficientemente sensível a defeitos que possam ocorrer durante a operação do sistema. Por sensibilidade entende-se como o menor valor de grandeza capaz de ativar os dispositivos de proteção;
- d) segurança: o sistema de proteção não deve realizar uma falsa operação sob condições normais de operação, ou falhar no caso de faltas no sistema;
- e) economia: o sistema de proteção deve ter sua implantação viável economicamente, evitando-se um número excessivo de dispositivos de proteção.

Os principais elementos de proteção para o D-TCSC são descritos abaixo.

4.4.1 RELIGADOR

A montante do D-TCSC deve ser instalado um religador com o objetivo de isolar o sistema quando da ocorrência de um curto-circuito a jusante do compensador.

4.4.2 METAL ÓXIDO VARISTOR

O banco de capacitores deve ser dimensionado para níveis de tensão e corrente de regime permanente, visto que um projeto que contemple as condições de curto-circuito e de sobretensões elevadas seria inviável. A limitação da tensão sobre os bancos de capacitores

fica restrita à capacidade de absorção do Metal Óxido Varistor (MOV), elemento de proteção dos capacitores.

Conectado em paralelo com o D-TCSC, o MOV, em caso de falta ou sobrecarga na linha, deve limitar a tensão e a corrente sobre o banco de capacitores. Assim, o banco de capacitores deve suportar a tensão limitada pelos varistores.

Para condições normais de operação, o MOV possui uma impedância elevada. Quando de um curto-circuito a jusante do D-TCSC, a tensão sobre os terminais do banco de capacitores aumenta, atingindo o valor nominal do varistor. Nesta situação, em virtude da sua característica resistiva não linear, a impedância do MOV reduz para propiciar um desvio parcial da corrente.

O MOV permite a reinserção imediata dos capacitores após a eliminação de uma falta, uma vez que não é necessário aguardar o tempo de desionização do ar, o que ocorre com os gaps.

O dimensionamento do MOV deve ser realizado através de estudos de transitórios do sistema de potência como o tempo máximo de eliminação da falta, o ciclo de religamento, o tipo de falta e as contingências do sistema.

4.4.3 CIRCUITO DE AMORTECIMENTO

O circuito de amortecimento tem como principal função receber a descarga do banco de capacitores quando da ocorrência de um curto-circuito a jusante do compensador controlado. Sua configuração constitui um reator em série com uma chave a vácuo. Este arranjo, por sua vez, deve ser conectado em paralelo com o banco de capacitores.

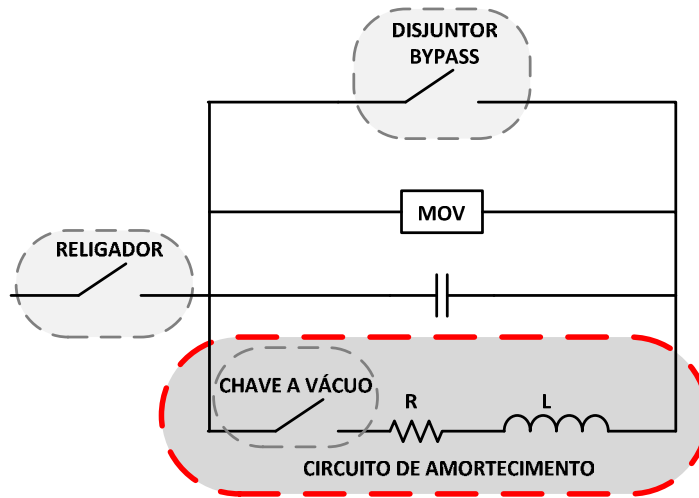
Para um curto-circuito a jusante do D-TCSC, o religador a montante do mesmo deve atuar, abrindo o circuito. A chave a vácuo deve perceber a atuação do religador e fechar o circuito de amortecimento para descarga do banco. O religador não deve fechar o circuito até a descarga total do banco de capacitores, evitando riscos de explosões.

4.4.4 DISJUNTOR DE BYPASS

O disjuntor de *bypass* pode ser fechado em duas situações: na ocasião de uma falta, no caso em que há a superação da capacidade de absorção do MOV ou manobra.

A Figura 13 apresenta o sistema de proteção do compensador controlado.

Figura 13 – Sistema de proteção do D-TCSC.



Fonte: Autor

4.5 CONCLUSÃO

Em 1986, através da necessidade da alteração dinâmica da impedância de uma rede, surge a topologia de um novo compensador série. A inserção de chaves eletrônicas no modelo possibilita o dispositivo a assumir uma reatância equivalente capacitiva ou indutiva variável.

O D-TCSC visa, de forma geral, na sua característica capacitiva diminuir a queda de tensão indutiva da linha, aumentando a capacidade de transferência de potência e melhor regulação da tensão terminal.

O compensador supracitado permite quatro modos de operação:

- a) modo Bloqueio;
- b) modo *Bypass*;
- c) modo Vernier Indutivo;
- d) modo Vernier Capacitivo.

Os valores de impedância que o D-TCSC pode assumir dependem diretamente do parâmetro ϖ cujo valor define a faixa de ressonância e os ângulos limites, $\alpha_{C\ LIM}$ e $\alpha_{L\ LIM}$. A escolha equivocada de ϖ pode resultar em uma impedância característica com duas ou mais faixas de ressonâncias.

O sistema de controle deve ser projetado para responder as variações da carga e impedir que o ângulo de disparo atinja a faixa de ressonância do D-TCSC, evitando assim danos aos componentes do sistema de potência.

A proteção do compensador controlado, composta pelo conjunto religador, MOV, circuito de amortecimento e disjuntor de *bypass*, deve garantir toda a filosofia da proteção

como seletividade, rapidez, sensibilidade, segurança e economia, resguardando a vida útil do equipamento protegido quando da ocorrência de um curto-circuito a sua jusante.

5 MODELAGEM DO SISTEMA

5.1 INTRODUÇÃO

A rede de distribuição proposta para a verificação do desempenho da compensação série controlada, pertence à concessionária de distribuição de energia elétrica que atende a região de Andradina, Castilho e Ilha Solteira.

A escolha do ramal de distribuição baseou-se no histórico de reclamação de tensão em função da grande variação de demanda em um curto período de tempo imposto pelo processo de irrigação de pasto.

A solução adotada para correção dos problemas supracitados visa à utilização da compensação série controlada através do TCSC.

O modelo do sistema será estruturado e simulado no software [®]ATP Draw (Alternative Transients Program) versão 5.6p6 o qual é uma versão gráfica do ATP e no software [®]MatLab 6.5.0.

Para avaliação da recuperação da tensão em regime permanente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) considerou-se os limites estabelecidos conforme os Procedimentos de Distribuição – Módulo 8 – Qualidade de Energia (PRODIST) apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência
Adequada	0,93TR ≤ TL ≤ 1,05TR
Precária	0,90TR ≤ TL < 0,93TR
Crítica	TL < 0,90TR ou TL > 1,05TR

Fonte: Prodlist (2010, p. 30)

Durante a partida dos motores deve-se avaliar a variação momentânea de tensão conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação da Variação de Tensão de Curta Duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da Tensão (valor eficaz) em relação a tensão de referência.
Variação Momentânea de Tensão	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u

Fonte: Prodist (2010, p. 27)

Assim, caracteriza-se uma variação de tensão de curta duração (VTCD) se ocorrer uma sobretensão de 10% ou subtensão de 10% com duração de tempo descrita na Tabela 6.

5.2 MODELAGEM DA REDE EQUIVALENTE À MONTANTE DA SUBESTAÇÃO

De acordo com os valores previamente fornecidos pela concessionária da região os níveis de curto circuito da SE que alimenta o ramal estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Níveis de curto-circuito na SE.

Potência	Módulo (MVA)	Ângulo (Graus)
Trifásica	306,08	-89,39
Monofásica	377,29	-89,33

Fonte: Elektro (2013)

A Tabela 8 mostra as impedâncias equivalentes da subestação.

Tabela 8 – Impedâncias equivalentes da SE.

Z_1		Z_0		X_0/X_1	R_0/X_1
Módulo (pu)	Ângulo (Graus)	Módulo (pu)	Ângulo (Graus)		
0,3267	89,39	0,1417	89,06	0,43	0,01

Fonte: Elektro (2013)

O cálculo das impedâncias de sequência positiva e negativa a montante da subestação fundamenta-se na utilização da teoria de circuitos elétricos, sistema por unidade.

Define-se a impedância base conforme a equação (11).

$$Z_B = \frac{|V^2| (kV^2)}{|S| (MVA)} = \frac{138^2}{100} = 190,44 \Omega \quad (11)$$

Assim,

$$Z_{EQ}^+ = Z_B \cdot z_1 [\Omega] \quad (12)$$

$$Z_{EQ}^- = Z_B \cdot z_0 [\Omega] \quad (13)$$

A Tabela 9 apresenta os parâmetros elétricos referidos.

Tabela 9 – Parâmetros elétricos dos sistemas.

Local	Z_{EQ}^+		Z_{EQ}^0		Classe de Tensão (kV)	Potência Base (MVA)
	$R_+(\Omega)$	$jX_+(\Omega)$	$R_0(\Omega)$	$jX_0(\Omega)$		
A montante subestação	0,6624	62,21	0,4427	26,98	138	100

Fonte: Elaboração do autor.

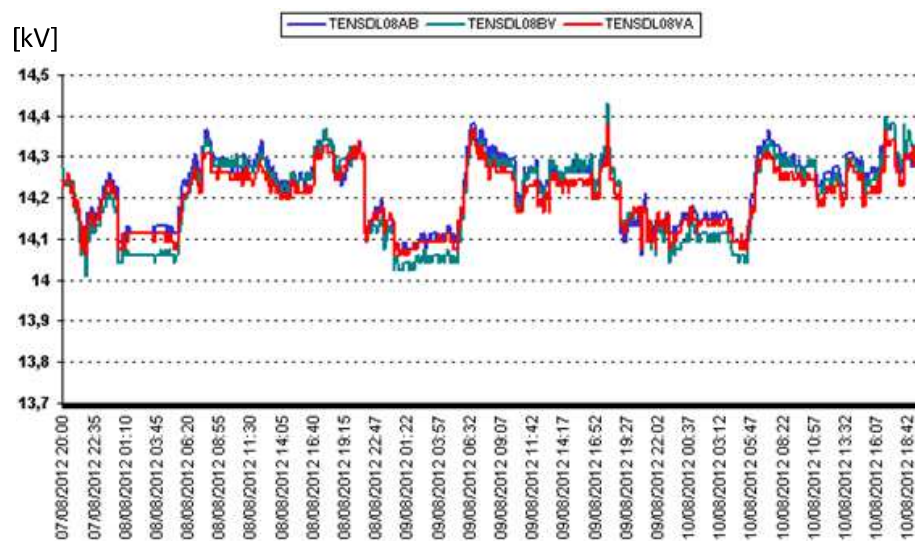
O sistema de transmissão a montante da subestação Castilho possui classe de tensão em 138 kV. Para as simulações, substitui-se este sistema pelo equivalente de Thévenin, cujo valor da fonte de tensão deve prover uma tensão de saída da subestação de 14,145 kV_{RMS} e a impedância deve assumir os valores da Tabela 9.

5.3 MODELAGEM DO ALIMENTADOR CST08

O alimentador em estudo parte da subestação e tem como principal consumidor uma fazenda na sua extremidade, cujas cargas são bombas de irrigação para pasto, e também atende algumas cargas de pequena potência localizadas ao longo do percurso.

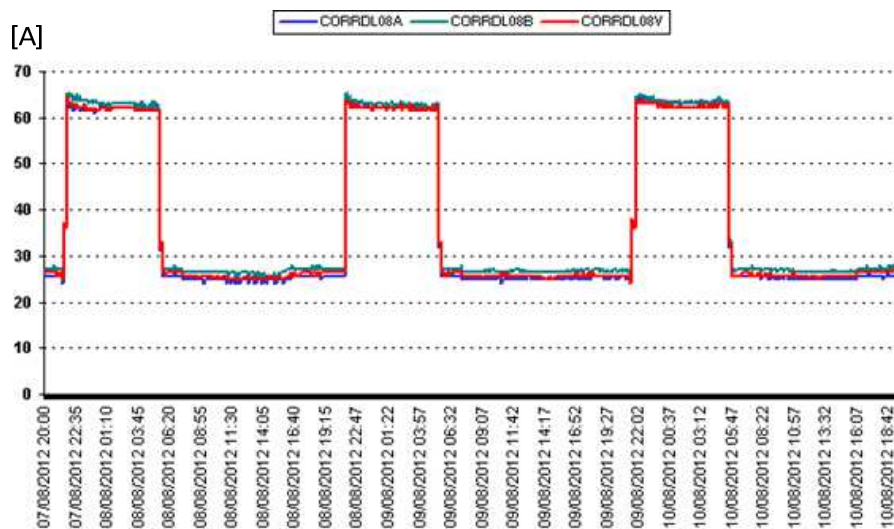
O perfil de tensão e corrente mensurados na SE durante um dia comum de operação é apresentado na Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 – Perfil de tensão do alimentador CST08.



Fonte: Elektro (2013)

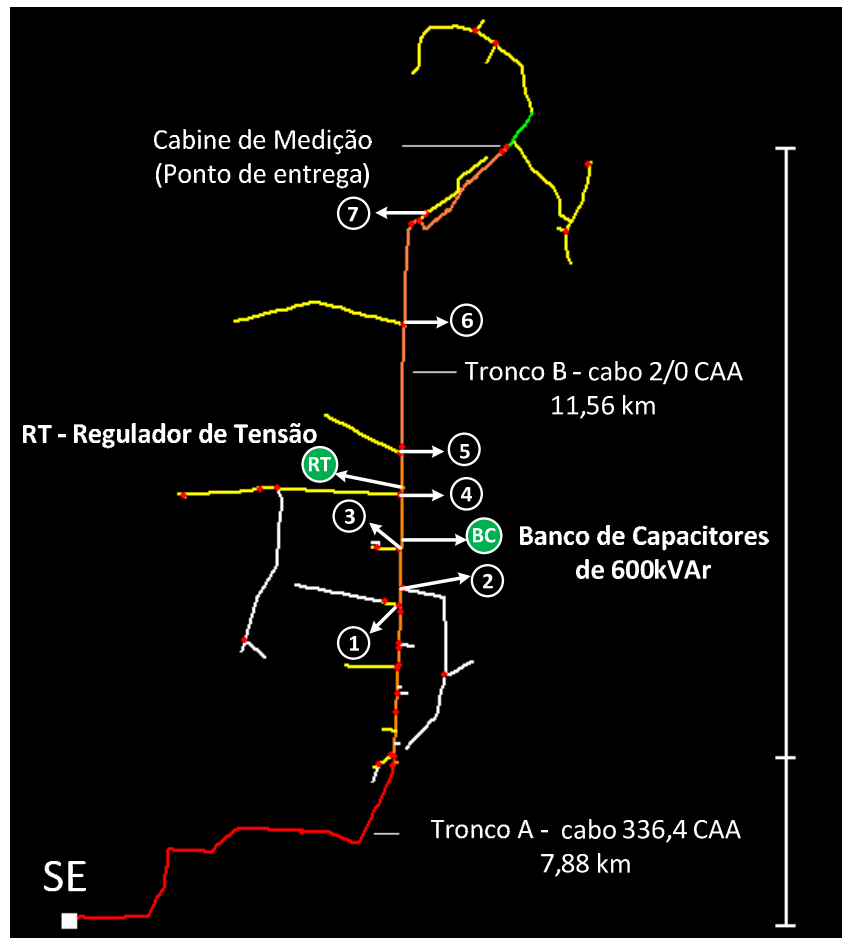
Figura 15 – Perfil de corrente do alimentador ANR 05.



Fonte: Elektro (2013)

O alimentador possui 19,44 km de extensão, mensurado da SE até o PAC, sendo composto por dois troncos com cabos de seções distintas. A Figura 16 mostra o diagrama unifilar do alimentador.

Figura 16 – Diagrama unifilar do ramal até o PAC.



Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

Os pontos indicados de 1 a 6, na Figura 16, representam cargas em derivação atendidas pelo alimentador. A carga número 7, faz parte da principal carga atendida pelo alimentador sendo composta por iluminação e tomadas de uso geral. As mesmas serão modeladas na seção 0.

As características elétricas do ramal e das cargas em derivação são apresentadas na Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 – Característica do alimentador.

Local	Bitola	r_{+} CST08 (Ω/km)	x_{+} CST08 (Ω/km)	r_{0} CST08 (Ω/km)	x_{0} CST08 (Ω/km)	Limite Térmico (A)	Classe de Tensão (kV)	l (km)
Tronco A	336,4 MCM	0,1888	0,3789	0,368	1,96	530	15	7,88
Tronco B	2/0 CAA	0,5562	0,4969	0,75	2,077	270	15	11,56

Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

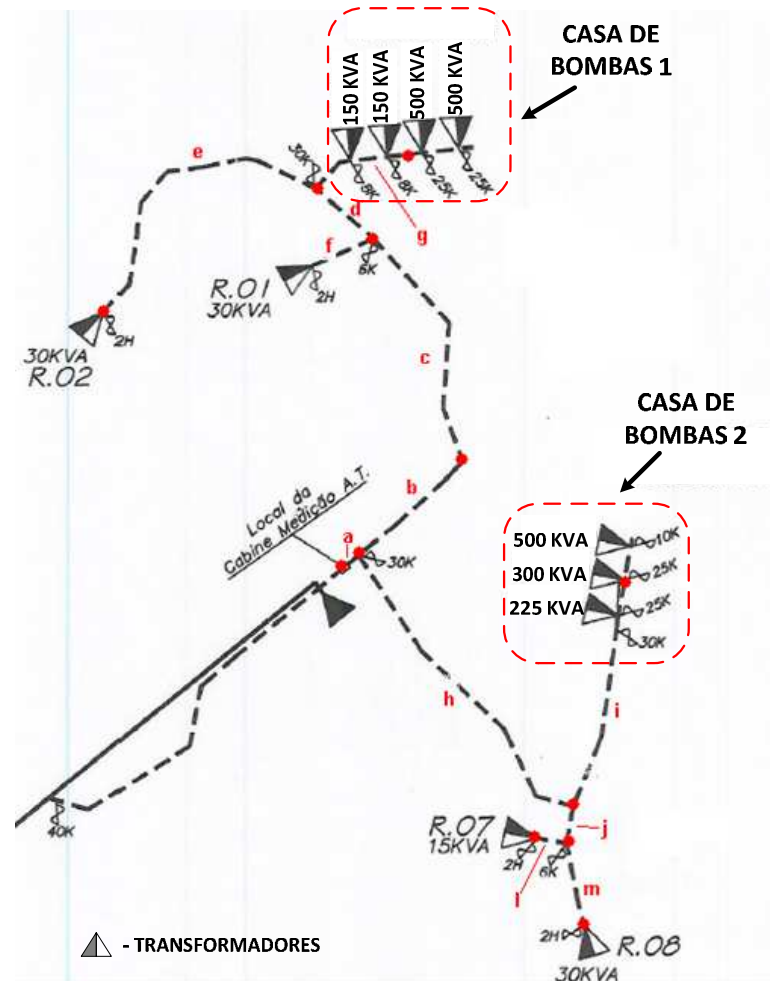
Tabela 11 – Características elétricas das cargas em derivação da SE.

Carga	Tensão (kV)	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kvar)	l (km)
1	13,8	4,05	0,09	10,50
2	13,8	31,32	0,70	10,81
3	13,8	7,54	0,17	11,49
4	13,8	24,52	0,55	12,42
5	13,8	9,94	0,22	13,14
6	13,8	17,41	0,39	15,41
7	13,8	32,15	10,57	17,30

Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

Após o ponto de medição da concessionária, a rede torna-se particular e adentra a propriedade do consumidor, dividindo-se em dois ramos para atender as necessidades do mesmo conforme a Figura 17.

Figura 17 – Diagrama unifilar do ramal após o PAC.



Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

As características elétricas da rede particular do cliente são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Característica do alimentador após o PAC.

Local	Bitola / Seção	$r_{+ \text{ CST08}}$ (Ω/km)	$x_{+ \text{ CST08}}$ (Ω/km)	$r_{0 \text{ CST08}}$ (Ω/km)	$x_{0 \text{ CST08}}$ (Ω/km)	Limite Térmico (A)	Classe de Tensão (kV)	l (km)
Trecho a	2 CAA	1,0503	0,5119	1,23	2,098	180	15	0,079
Trecho b	2 CAA	1,0503	0,5119	1,23	2,098	180	15	0,753
Trecho c	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	1,445
Trecho d	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	0,412
Trecho e	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	1,697
Trecho f	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	0,357
Trecho g	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	0,215
Trecho h	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	1,814
Trecho i	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	1,102
Trecho j	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	0,193
Trecho l	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	0,179
Trecho m	4 CAA	1,5973	0,5086	1,774	2,09	140	15	0,566

Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

A rede em estudo possui, ao longo do caminho, equipamentos que auxiliam na manutenção dos níveis de tensão como reguladores de tensão (RT) instalados em delta aberto e um banco de capacitores *shunt*. A Tabela 13 apresenta os dados dos equipamentos mencionados.

Tabela 13 – Distância da localização dos dispositivos até SE.

Dispositivos	Distância do dispositivo a SE (km)	Tensão de Referência (kV _{L-L RMS})	Faixa de Insensibilidade (kV _{L-L RMS})
Banco de Capacitores Automático	11,59	-	-
Banco de Regulador de Tensão	12,53	14,145	13,977 a 14,315

Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

O banco de capacitores, com 600 kVAr de potência trifásica, conexão estrela aterrada e não possui automatismo para atuação. O cálculo do valor reatância capacitiva e da capacitância segue conforme as expressões (14), (15), (16) e (17).

$$X_c = \frac{V^2 [kV]}{Q [MVA]} [\Omega] \quad (14)$$

$$X_C = \frac{13800^2}{600000} = 317,4 [\Omega] \quad (15)$$

$$C = \frac{1}{X_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} [F] \quad (16)$$

$$C = \frac{1}{317,4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 8,3572 [\mu F] \quad (17)$$

Os reguladores de tensão estão ajustados para tensão de referência de 14,145kV, faixa de insensibilidade de 13,977kV à 14,315kV e temporização de 45 segundos.

Baseado em todas as informações supracitadas do alimentador e equipamentos a ela conectados, calculou-se as impedâncias de sequência positiva e sequência zero, trecho a trecho do mesmo considerando a localização dos bancos de capacitores e reguladores de tensão.

O cálculo das impedâncias de sequências consiste na multiplicação do comprimento da linha (l) pela impedância por quilômetro, dados nas Tabela 10 e Tabela 12, conforme as equações (18), (19) (20) e (21).

$$R_+ = r_{+ \text{ cabo}} \cdot l [\Omega] \quad (18)$$

$$X_+ = x_{+ \text{ cabo}} \cdot l [\Omega] \quad (19)$$

$$R_0 = r_{o \text{ cabo}} \cdot l [\Omega] \quad (20)$$

$$X_+ = x_{+ \text{ cabo}} \cdot l [\Omega] \quad (21)$$

A Tabela 14 mostra os valores das impedâncias e comprimento de cada trecho do ramal de distribuição em estudo.

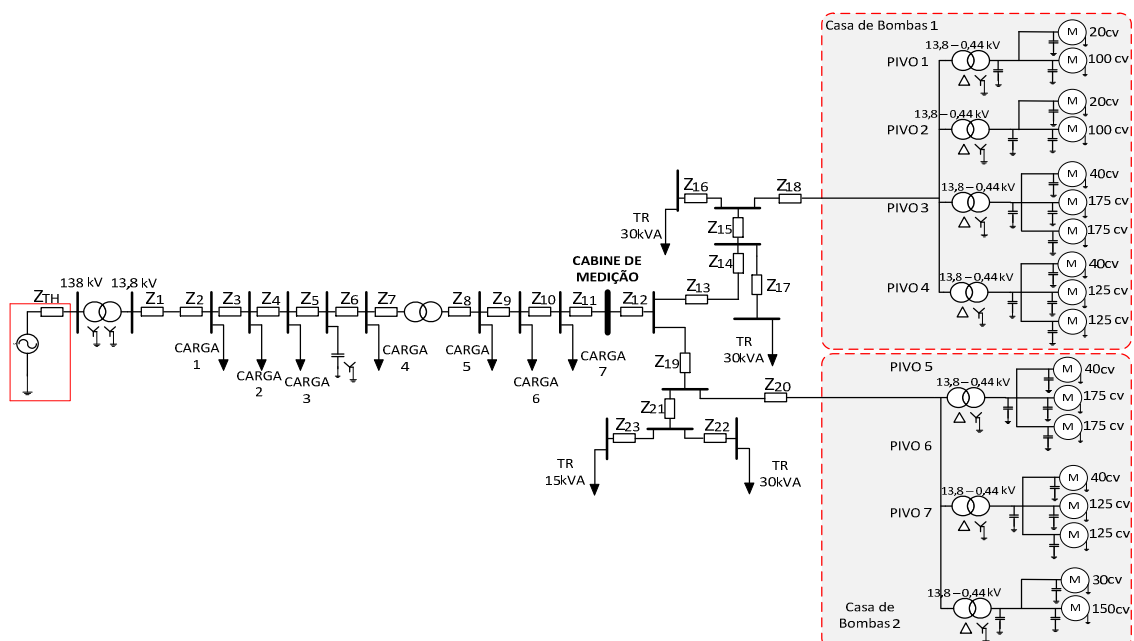
Tabela 14 – Impedâncias de seqüência positiva e zero do CST08 e rede particular do cliente.

Impedância	R_+ (Ω)	X_+ (Ω)	R_0 (Ω)	X_0 (Ω)	l (km)
Z1	1,487744	2,985732	2,899840	15,44480	7,88
Z2	1,457244	1,301878	1,965000	5,441740	2,62
Z3	0,172422	0,154039	0,232500	0,643870	0,31
Z4	0,378216	0,337892	0,510000	1,412360	0,68
Z5	0,05562	0,049690	0,075000	0,207700	0,10
Z6	0,461646	0,412427	0,622500	1,723910	0,83
Z7	0,061182	0,054659	0,082500	0,228470	0,11
Z8	0,339282	0,303109	0,457500	1,266970	0,61
Z9	1,262574	1,127963	1,702500	4,714790	2,27
Z10	1,051218	0,939141	1,417500	3,925530	1,89
Z11	1,190268	1,063366	1,605000	4,444780	2,14
Z12	0,082974	0,040440	0,097170	0,165742	0,079
Z13	0,790876	0,385461	0,926190	1,579794	0,753
Z14	2,308100	0,734927	2,563430	3,020050	1,445
Z15	0,658088	0,209543	0,730888	0,861080	0,412
Z16	2,7106181	0,863094	3,010478	3,546730	1,697
Z17	0,570236	0,181570	0,633318	0,746130	0,357
Z18	0,343420	0,109349	0,381410	0,449350	0,215
Z19	2,897502	0,922600	3,218036	3,791260	1,814
Z20	1,760225	0,560477	1,954948	2,303180	1,102
Z21	0,308280	0,098160	0,342382	0,403370	0,193
Z22	0,904072	0,282780	0,986344	1,162040	0,566
Z23	0,285917	0,091030	0,317546	0,374110	0,179

Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

A Figura 18 apresenta o diagrama unifilar por simbologia de circuitos elétricos do alimentador CST08.

Figura 18 – Modelagem do alimentador CST08.



Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

Onde TF são transformadores do cliente que atende cargas de baixa potência, quando comparadas com os motores de irrigação. Conforme a medição, Figura 14, a tensão na saída da SE Castilho deve ser constante em aproximadamente 14,145 kV_{RMS}. Para tal, inseriu-se uma fonte trifásica e simétrica.

A modelagem das cargas em derivação ao longo do alimentador, dos transformadores de e MIT (*Motor de Indução Trifásico*) será apresentada na seção 0.

5.4 MODELAGEM DA CARGA

5.4.1 MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES

A principal carga do consumidor em estudo compõe-se de sete pivôs para irrigação de pasto, somando um total de sete transformadores e dezoito motores.

As características elétricas dos transformadores são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Características gerais dos transformadores.

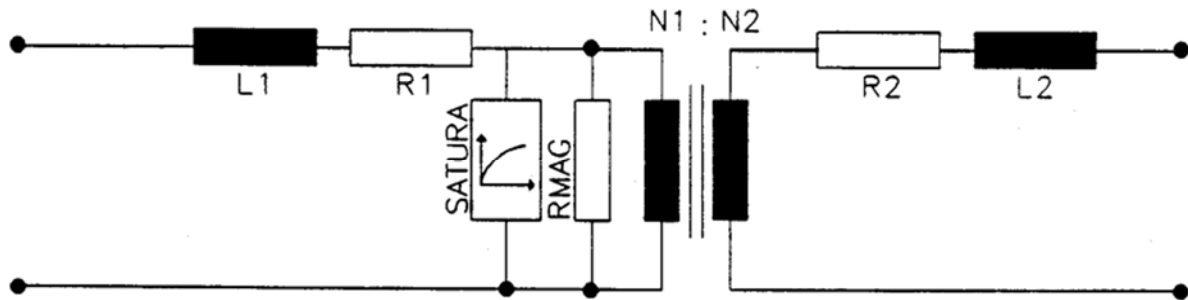
Trafos	Tensão (kV)	Grupo de Ligação	Ligação	Potência (KVA)	Impedância (%)	P _{CC} (kW)	P _{OC} (kW)	BC (kVAr)
SE	138-13,8	Yyn	Y ₁ -Y ₁	10000	9,9	69,90	15,38	-
PIVO 1	13,8-0,44	Dyn1	Δ-Y ₁	150	3,5	0,54	2,45	5,0
PIVO 2	13,8-0,44	Dyn1	Δ-Y ₁	150	3,5	0,54	2,45	5,0
PIVO 3	13,8-0,44	Dyn1	Δ-Y ₁	500	5,0	2,00	7,50	7,5
PIVO 4	13,8-0,44	Dyn1	Δ-Y ₁	500	5,0	2,00	7,50	7,5
PIVO 5	13,8-0,44	Dyn1	Δ-Y ₁	500	5,0	2,00	7,50	7,5
PIVO 6	13,8-0,44	Dyn1	Δ-Y ₁	300	4,5	0,95	4,31	7,5
PIVO 7	13,8-0,44	Dyn1	Δ-Y ₁	225	4,5	0,90	3,60	5,0
TR 15	13,8-0,50	Dyn1	Δ-Y ₁	15	3,5	-	-	-
TR 30	13,8-0,50	Dyn1	Δ-Y ₁	30	3,5	-	-	-

Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

Os bancos de capacitores permanecem conectados ao secundário dos transformadores dos pivôs somente quando a carga está desligada, auxiliando na correção do fator de potência. Quando da partida dos MIT, os capacitores dos transformadores são desconectados automaticamente.

Para a modelagem dos transformadores da SE e dos pivôs aplica-se o conceito de circuito equivalente para transformadores monofásicos, método por unidade, de acordo com a Figura 19 e as equações (22) e (23).

Figura 19 – Circuito equivalente do transformador.



Fonte: Adaptado de Rulebook (2003).

Onde:

- a) L_1 – Indutância de dispersão do enrolamento primário;
- b) R_1 – Resistência do enrolamento primário;
- c) L_2 – Indutância de dispersão do enrolamento secundário;
- d) R_2 – Resistência do enrolamento primário;
- e) R_{MAG} – Resistência de perdas do núcleo;
- f) $Satura = F_o$ – Fluxo em regime permanente do transformador.

$$P_{CC\ pu} = R_{EQ\ pu} \quad (22)$$

$$P_{OC\ pu} = G_C\ pu = \frac{1}{R_{MAG\ pu}} \quad (23)$$

Onde:

- a) $P_{CC\ pu}$ – Perda no Cobre em pu;
- b) $P_{OC\ pu}$ – Perda no Ferro em pu;
- c) $R_{EQ\ pu}$ – Resistência equivalente em pu;
- d) $G_C\ pu$ – Condutância do ferro em pu;
- e) $R_{MAG\ pu}$ – Resistência do ferro em pu.

A Tabela 16 mostra os valores do circuito equivalente por fase dos transformadores da SE e pivôs.

Tabela 16 – Valores do circuito equivalente dos transformadores da SE e pivôs.

Trafos	R ₁ (Ω)	R ₂ (Ω)	X ₁ (Ω)	X ₂ (Ω)	R _{MAG} (Ω)	F _O (Wb)
SE	6,6559	0,0666	94,0325	0,9403	412474	299,0778
PIVO 1	31,1046	0,0105	58,9514	0,0199	352600	51,8018
PIVO 2	31,1046	0,0105	58,9514	0,0199	352600	51,8018
PIVO 3	8,5698	0,0029	27,2502	0,0092	95220	51,8018
PIVO 4	8,5698	0,0029	27,2502	0,0092	95220	51,8018
PIVO 5	8,5698	0,0029	27,2502	0,0092	95220	51,8018
PIVO 6	13,6793	0,0046	40,6068	0,0138	200463	51,8018
PIVO 7	20,3136	0,0069	53,3987	0,0181	211600	51,8018

Fonte: Elaboração do autor.

Não há informações das cargas atendidas pelos transformadores TF15 e TF30. Assim, substituem-se os mesmos pelo equivalente de carga de impedância constante conectada em estrela considerando um fator de potência típico de 0,8 conforme a equação (24).

$$Z_{CARGA} = \frac{|V_L|^2}{S} [\Omega] \quad (24)$$

A Tabela 17 apresenta os valores de impedância utilizados.

Tabela 17 – Carga de impedância constante para os trafos de 15kVA e 30kVA.

Trafos	Tensão (kV)	Potência (KVA)	Impedância	
			R (kΩ)	X (kΩ)
TF 15	13,8	15	10156,75	7617,67
TF 30	13,8	30	5078,37	3808,84

Fonte: Elaboração do autor.

5.4.2 MODELAGEM DAS CARGAS EM DERIVAÇÃO DO CST08

Atualmente as cargas em derivação estão conectadas ao alimentador através de transformadores 13,8 – 0,220/0,127kV. Porém, apenas conseguiu-se adquirir as informações de demanda no PAC de cada consumidor.

Assim, para as cargas em derivação supracitadas utiliza-se o modelo de impedância constante conectado em estrela e dimensionado através da expressão (24).

A Tabela 18 apresenta a demanda em potência ativa e reativa, e as impedâncias das cargas mencionadas.

Tabela 18 – Carga de impedância constante para as cargas em derivação ao longo do alimentador.

Cargas	Tensão (kV)	Potência (kW)	Potência (kvar)	Impedância	
				R (k Ω)	X (k Ω)
1	13,8	4,05	0,09	47,000	1,044
2	13,8	31,32	0,70	6,102	0,136
3	13,8	7,54	0,17	25,244	0,569
4	13,8	24,52	0,55	7,763	0,174
5	13,8	9,94	0,22	19,150	0,424
6	13,8	17,41	0,39	10,933	0,245
7	13,8	32,15	10,57	5,346	1,758

Fonte: Adaptado de Elektro (2013)

5.4.3 MODELAGEM DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os dados elétricos dos MITs utilizados para modelagem são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Característica gerais dos MITs.

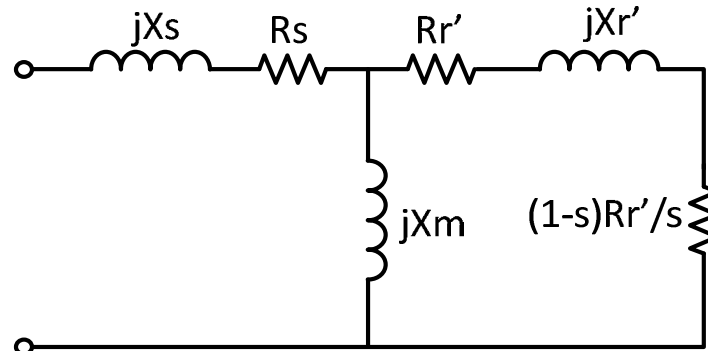
Potência (kW)	Potência (CV)	Tensão de linha (kV)	I _N (A)	I _P /I _N	f _p	BC (kVAr)	Quantidade de motores
14,720	20	0,440	28	6,3	0,83	7,5	2
22,080	30	0,440	42	7,5	0,84	7,5	1
29,440	40	0,440	53	6,6	0,85	10	4
73,600	100	0,440	121	8,0	0,87	25	2
92,000	125	0,440	147	7,8	0,86	25	4
110,400	150	0,440	177	8,0	0,87	25	1
128,800	175	0,440	214	7,2	0,86	40	4

Fonte: Adaptado de JBS e WEG (2013)

Cada motor de indução possui um capacitor por fase, conectado em derivação. A atuação do mesmo ocorre automaticamente quando da partida do MIT, auxiliando no suporte de tensão. O capacitor desconecta automaticamente quando do desligamento da máquina. Toda a operação depende dos contadores e relés temporizados que compõem o sistema de controle.

A Figura 20 apresenta o circuito equivalente por fase do motor de indução.

Figura 20 – Modelo equivalente por fase do motor de indução.



Fonte: Rulebook 2003 – ATPDRAW, adaptada pelo Autor.

Onde:

- a) X_s – Reatância indutiva do estator;
- b) R_s – Resistência do estator;
- c) X_m – Reatância indutiva de magnetização;
- d) R_r – Resistência do rotor;
- e) X_r – Reatância indutiva do rotor.

A Tabela 20 apresenta os valores das resistências, reatâncias, momento de inércia, resistência de carga e de perdas utilizados no modelo dos MITs.

Tabela 20 – Parâmetros elétricos dos MITs.

Potência (CV)	$R_s(\Omega)$	$X_s(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$X_r(\Omega)$	$R_r(\Omega)$	J (kg.m^2)	R_{CARGA}	R_{PERDAS}
20	1,39926	1,334	29,444	1,38604	2,01568	3,9535	7,31	12,97
30	0,67444	1,30333	27,738	0,79548	0,09453	0,661450	2,00	8,034
40	0,84963	1,68784	18,492	0,25386	0,14302	2,27579	1,75	8,16
100	0,0833	0,19289	17,153	0,48224	0,0537	10,1578	0,47	115,4
125	0,052	0,40338	13,006	0,21677	0,0321	5,92711	0,38	24,35
150	0,0425	0,33175	9,387	0,15313	0,0278	5,64977	0,316	25,25
175	0,0365	0,33279	7,804	0,17433	0,0242	6,81036	0,27	8,77

Fonte: Elaboração do autor.

Para o caso em estudo, os dados dos motores adquiridos com o fabricante e catálogos do mesmo não representaram com precisão as cargas do cliente. Portanto, alteraram-se alguns parâmetros dos motores objetivando obter respostas condizentes com os dados de placa dos mesmos, resultando na Tabela 20.

5.5 MODELAGEM DO D-TCSC

A modelagem do D-TCSC visa uma regulação dinamicamente a tensão no PAC do alimentador CST08 com o cliente. Em virtude de todos os benefícios que o compensador pode fornecer, a inclusão do D-TCSC significa também a eliminação dos outros dispositivos compensadores de tensão (BCs e RTs) visto que o mesmo realiza esta função.

O sistema de disparo dos tiristores proposto (controle malha aberta) busca a sincronização com a tensão sobre o capacitor do compensador.

O grau de compensação k_D mínimo escolhido para esta aplicação será de 70%, ou seja, quando o compensador estiver operando no modo bloqueio, o ângulo de disparo será igual 180° e assim, não haverá pulso no *gate* do tiristor. O D-TCSC será resumido a um banco de capacitores série que compensará 70% da linha de distribuição. Utilizando-se da expressão (1), subseção 0 e da Tabela 10, as equações ((25) e (26) apresentam o resultado do dimensionamento do capacitor fixo.

$$X_{Linha} = \sum x_l \cdot l = (0,3789 \cdot 7,88) + (0,4969 \cdot 11,56) = j8,73 \Omega \quad (25)$$

$$X_C = 0,70 \cdot 8,7299 = -j6,11093 [\Omega] \quad (26)$$

Conforme a equação (16), seção 0, a capacitância do banco de capacitores será:

$$C_F = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 6,11093} = 434,07 [\mu F] \quad (27)$$

Para o cálculo do reator do D-TCSC, deve-se definir o parâmetro de desempenho ω . Assim, define-se o mesmo em 1,7 para obtermos apenas um ponto de ressonância e uma ampla região capacitiva. Logo, utilizando-se da equação (10), seção 0, tem-se:

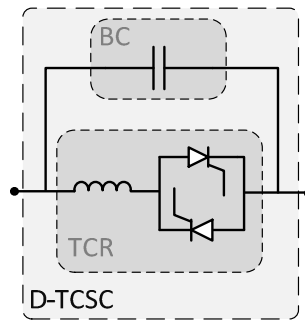
$$X_L = \frac{6,11093\Omega}{1,7^2} = j2,1145 [\Omega] \quad (28)$$

Assim, a indutância do TCR será:

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot f} = \frac{2,1145}{2\pi \cdot 60} \therefore L = 5.6089mH \quad (29)$$

A Figura 21 apresenta o modelo do D-TCSC.

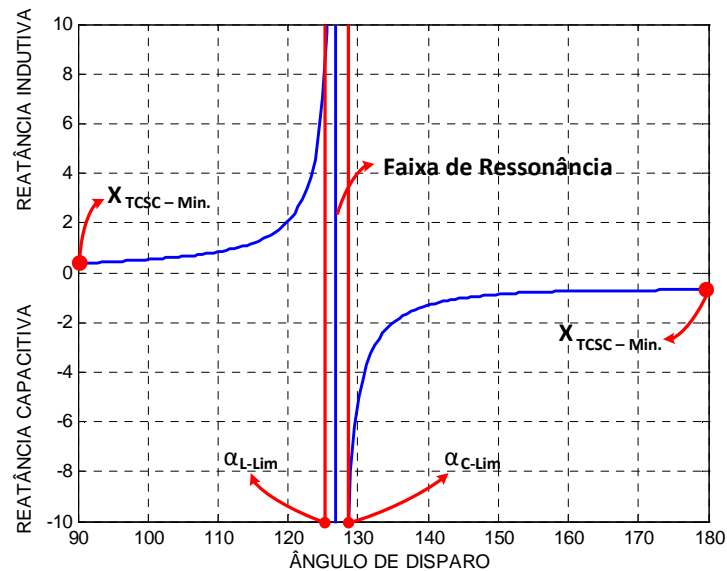
Figura 21 – Modelo do D-TCSC.



Fonte: Autor.

Assim, com os parâmetros do compensador definido, pode-se definir a impedância característica do mesmo através da expressão (6), seção 0, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 – Impedância característica do D-TCSC.



Fonte: Autor.

A Figura 22 apresenta a impedância resultante do compensador série controlado dada em pu, tendo como base a reatância da linha. Assim, dependendo do ângulo de disparo dos

tiristores, o compensador série controlado pode operar na região indutiva ou capacitiva, conforme mostra a Tabela 21.

Tabela 21 – Regiões de operação em função do ângulo de disparo para o D-TCSC modelado.

Faixa do Ângulo de Disparo (α)	Região de Operação
$90^\circ \leq \alpha < 125,5^\circ$	Indutiva
$125,5^\circ \leq \alpha \leq 128,7^\circ$	Ressonância
$128,7^\circ < \alpha \leq 180^\circ$	Capacitiva

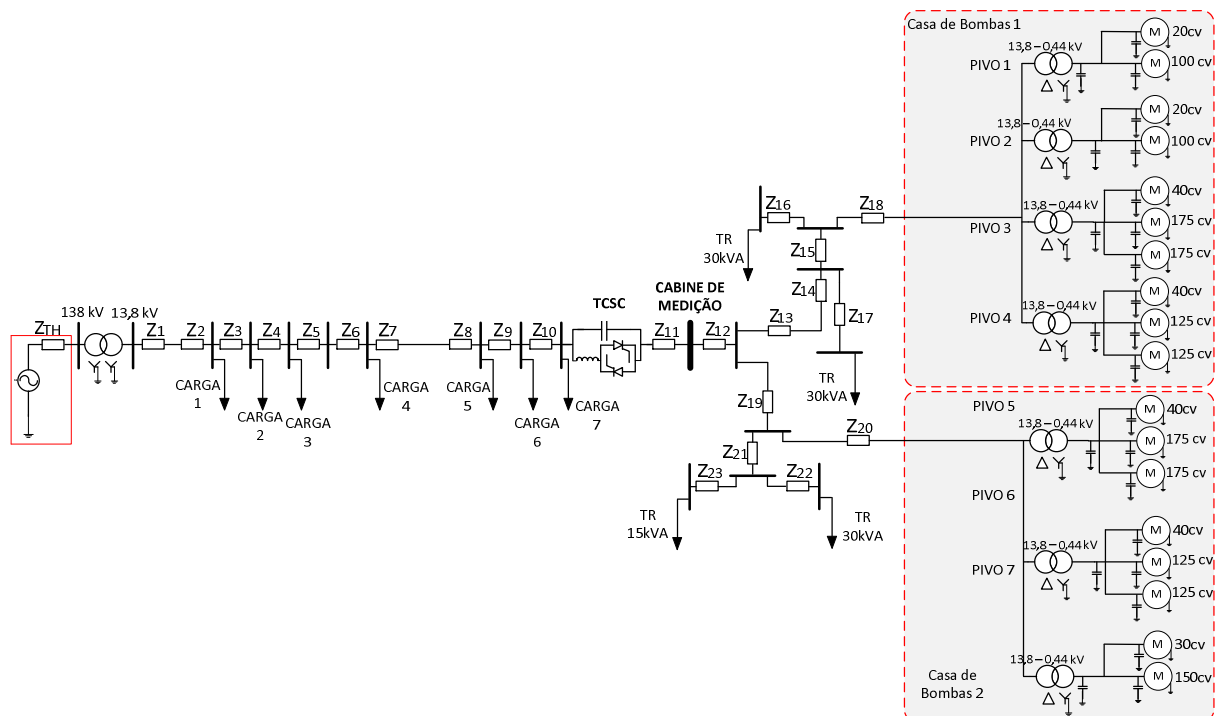
Fonte: Elaboração do autor.

Portanto, $\alpha_{L \text{ lim}}$ que é o ângulo limite na região indutiva, será igual a $125,5^\circ$ e $\alpha_{C \text{ lim}}$ o ângulo limite na região capacitiva igual a $128,7^\circ$.

O ponto de instalação do D-TCSC será a jusante da carga 7, visto que a proximidade do compensador com a carga significa uma regulação de tensão mais eficiente para a mesma.

Assim, a Figura 23 apresenta o sistema com a inserção do D-TCSC.

Figura 23 – Alimentador com o D-TCSC.



Fonte: Elaboração do autor.

5.6 CONCLUSÃO

O alimentador CST08, com classe de tensão em 15kV, parte da subestação para atender várias cargas de baixo consumo. Em sua extremidade localiza-se o consumidor de maior de demanda, composta por sete transformadores e dezoito motores que operam no período noturno.

Para a modelagem da linha, utilizam-se os valores de resistência e indutância dos condutores, assim como o comprimento de cada trecho.

A modelagem dos transformadores é baseada no circuito equivalente por fase dos mesmos.

Os modelos das cargas assumem duas classificações como impedância constante e potência constante.

O D-TCSC fornecerá uma compensação mínima ao sistema de setenta por cento da reatância da linha. A faixa de operação do compensador, na região capacitiva, abrange $51,3^\circ$ partindo de 180° até $128,7^\circ$. Porém, por segurança, soma-se ao ângulo limite da região supracitada o valor de $3,3^\circ$, parâmetro de projeto, levando o ângulo limite para 132° .

O modelo do sistema será estruturado e simulado no *software* [®]ATP Draw (*Alternative Transients Program*) versão 5.6p6 o qual é uma versão gráfica do ATP e no *software* [®]MatLab 6.5.0.

6 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

6.1 INTRODUÇÃO

As simulações foram realizadas visando contemplar o comportamento da tensão ao longo do alimentador CST08 e no ponto de acoplamento comum considerando duas configurações. A primeira consiste em simulações sem a compensação do D-TCSC, com um regulador de tensão e um banco de capacitores *shunt* a fim de obter valores aproximados do estado atual do mesmo. A segunda, com compensação do D-TCSC e retirando os equipamentos reguladores de tensão. Em ambas as simulações realizaram-se partida direta de motores, com carga de impedância constante e potência constante.

6.2 ALIMENTADOR CST08 SEM COMPENSAÇÃO

Ajustou-se a fonte de tensão em $141,500 \text{ kV}_{L-L \text{ RMS}}$, simétrica, de forma que a tensão de saída da SE atingisse a amplitude de aproximadamente $14,145 \text{ kV}_{L-L \text{ RMS}}$.

Para avaliação do sistema sem compensação primeiramente simulou-se o arranjo atual do alimentador em estudo, Figura 16, sem o último motor de 150CV e com os equipamentos reguladores de tensão, banco de capacitor shunt fixo e um regulador de tensão. Assim, pode-se ajustar o RT no *tap* adequado (4º *tap* elevador, 2,5%) para que sua tensão de saída estivesse dentro dos limites estabelecidos.

Realizou-se a partida direta do ultimo motor (150cv) do último Pivô (Pivô 7) e os transformadores dos motores com o *tap* em 13,2 kV. Os demais motores foram modelados como impedância constante em regime permanente.

O tempo de simulação executado é de 10s com passo de integração de $100\mu\text{s}$. A Tabela 22 apresenta as amplitudes da tensão em regime permanente e durante a partida do motor.

Tabela 22 – Tensão em regime permanente e durante a partida do ultimo motor no alimentador CST08 sem compensação.

Local	Tensão em RP (kVL-L RMS)	Sobre/ Subtensão (%)	Tensão na Partida (kVL-L RMS)	Sobre/ Subtensão (%)
SE SECUNDÁRIO	14,134	2,42	13,974	1,26
CARGA 1	13,782	-0,13	13,325	-3,44
CARGA 2	13,720	-0,58	13,227	-4,15
CARGA 3	13,717	-0,60	13,224	-4,17
BC	13,711	-0,64	13,215	-4,24
CARGA 4	13,644	-1,13	13,117	-4,95
RT	13,974	1,26	13,444	-2,58
CARGA 5	13,931	0,95	13,374	-3,09
CARGA 6	13,742	-0,42	13,105	-5,04
CARGA 7	13,595	-1,49	12,884	-6,64
PAC	13,423	-2,73	12,639	-8,41
PIVÔ 7	433,70	-1,43	376,25	-14,49

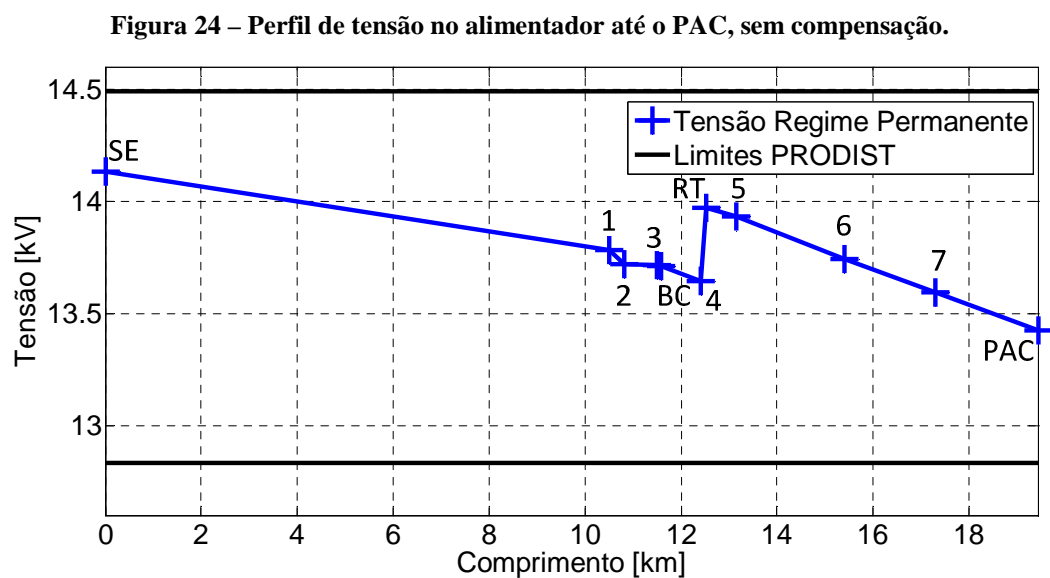
Legenda: RP – Regime Permanente.

Fonte: Elaboração do autor.

Em regime permanente, observa-se que as tensões ao longo do alimentador estão adequadas, conforme os limites estabelecidos pelo PRODIST.

Durante a partida direta do motor, o afundamento de tensão no PAC próximo de 10% não se caracteriza como uma variação momentânea de tensão de curta duração. A subtensão no PIVÔ 7 também não se caracteriza como VTCD, visto que esta avaliação refere-se apenas ao ponto de medição.

A Figura 24 mostra o perfil de tensão no alimentador em regime permanente e quando da partida do último motor.

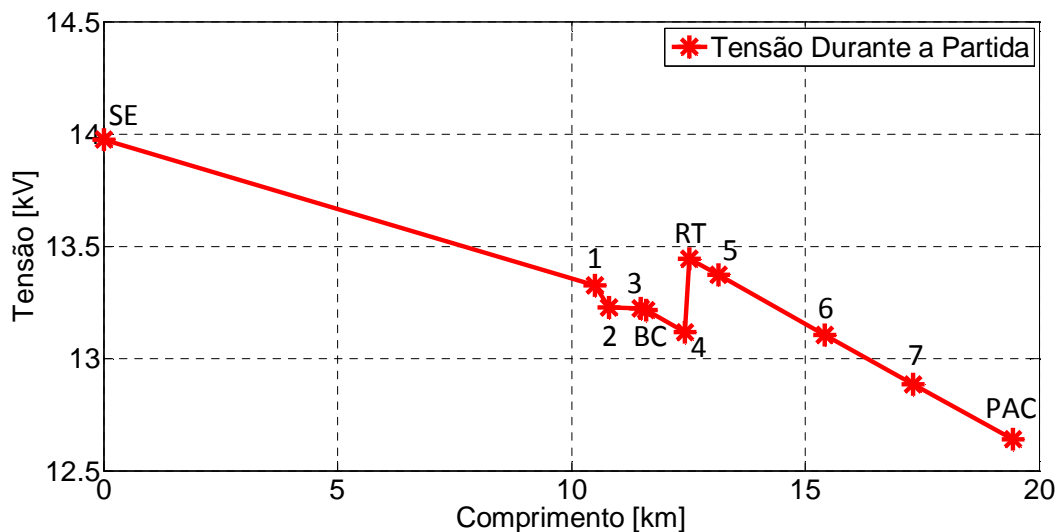


Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 24 mostra que a tensão em todas as cargas conectadas ao longo do alimentador está dentro dos limites estabelecidos pelo PROSIDT.

A Figura 25 mostra o perfil de tensão no alimentador quando da partida do último motor.

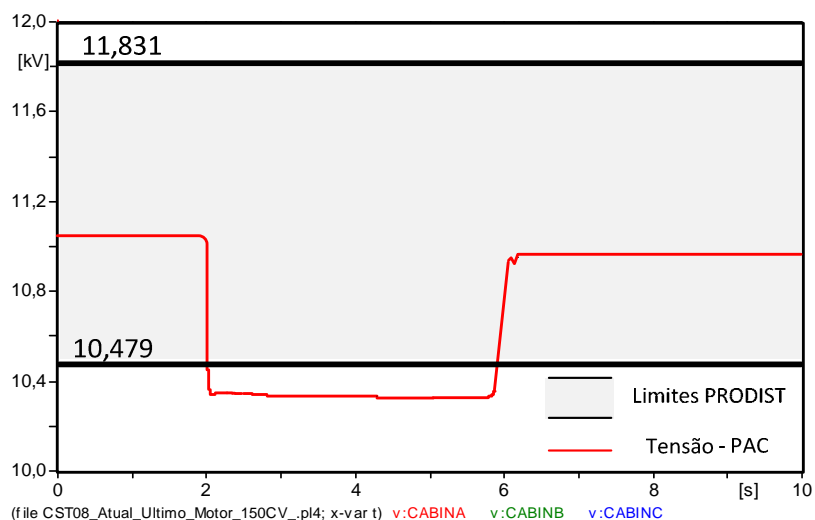
Figura 25 – Perfil de tensão no alimentador até o PAC, sem compensação.



Fonte: Elaboração do autor.

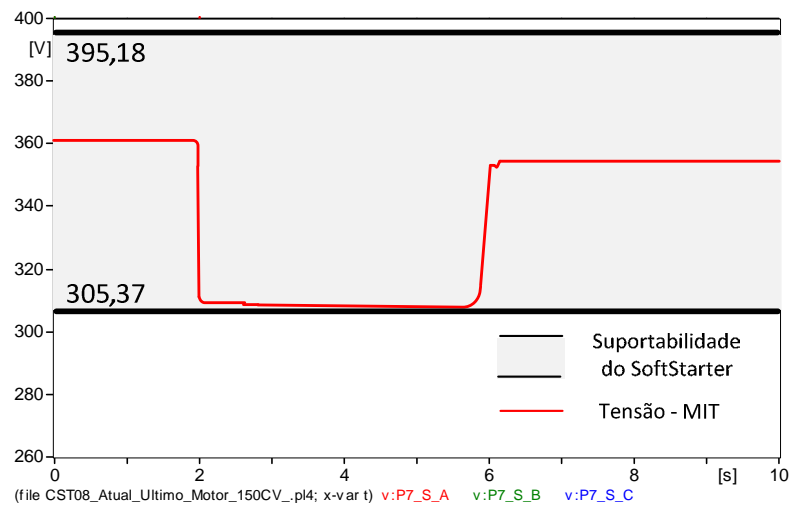
A Figura 26 e a Figura 27 apresentam a envoltória da tensão no PAC e no terminal do MIT.

Figura 26 – Envoltória da tensão no PAC sem compensação.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 27 – Envoltória da tensão no terminal do MIT sem compensação.



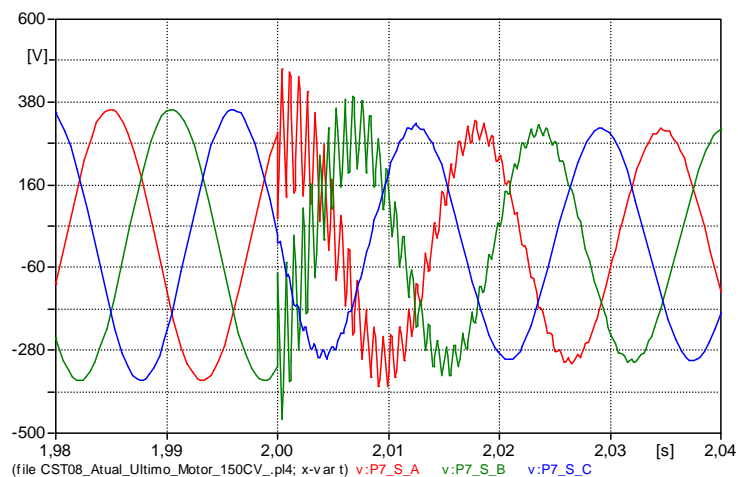
Fonte: Elaboração do autor.

Avaliando o fato de o motor ser controlado por um *softstarter*, o afundamento de tensão no PAC e nos terminais do MIT seria aproximadamente 4,21% e 7,25% respectivamente.

Quando da não operação das cargas, o regulador de tensão ajustado no 2º *tap* abaixador, a tensão no secundário dos transformadores pode atingir 387,51 $V_{F-N PICO}$ ou 474,60 $V_{L-L RMS}$, ou seja, 7,86% acima do valor nominal. Quando da retirada brusca das cargas, a tensão nos *softstarters* pode atingir momentaneamente 401 $V_{F-N PICO}$ ou 491,12 $V_{L-L RMS}$, ou seja, 11,62% acima do valor nominal e 1,62% acima do limite permitido. Portanto, em virtude da sobretensão temporária, os equipamentos podem estar sujeitos a danos como a diminuição da vida útil, uma vez que os limites de tensão são de +10%, -15%.

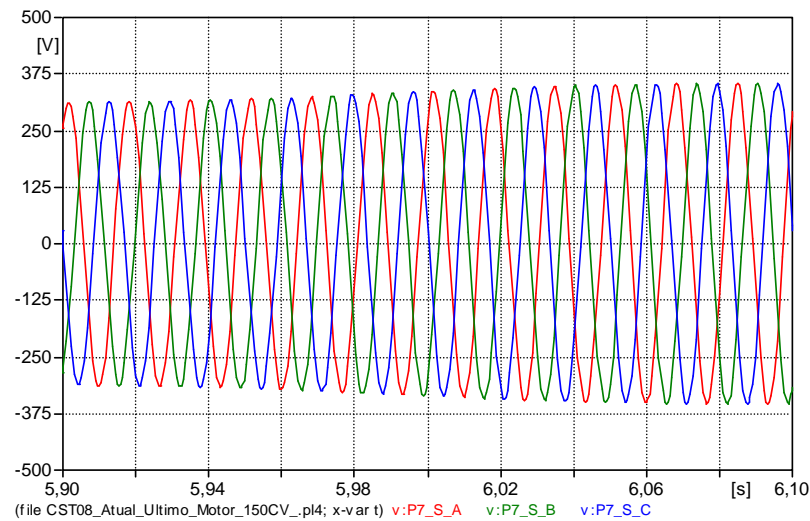
A Figura 28 e a Figura 29 mostram o transitório da tensão do MIT durante a partida e ao fim da mesma, respectivamente.

Figura 28 – Transitório da tensão no início da partida sem compensação.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 29 – Transitório da tensão no fim da partida sem compensação.



Fonte: Elaboração do autor.

No instante inicial da partida, $t=2s$ na Figura 28, em virtude do chaveamento do banco de capacitor do motor, a tensão da fase A e B oscila com amplitude variável na frequência de 1250 Hz durante aproximadamente 30ms, porém a envoltória permanece em 60Hz. Em $t=6s$, na Figura 29, a partida é finalizada e o motor entra em regime permanente.

6.3 ALIMENTADOR CST08 COM COMPENSAÇÃO

Os resultados foram obtidos partindo motor a motor do Pivô 1, em seguida motor a motor do Pivô 2 e assim sucessivamente até a partida do ultimo motor do Pivô 7 avaliando o desempenho do compensador série controlado para cada caso. Porém, será apresentada a análise do pior caso, ou seja, a partida direta do último motor (150 cv) do Pivô 7, ou seja, todas as demais carga já estão em regime permanente.

Ajustou-se a fonte de tensão em $141,500 \text{ kV}_{L-L \text{ RMS}}$, simétrica, de forma que a tensão de saída da SE Castilho atingisse a amplitude de aproximadamente $14,145 \text{ kV}_{L-L \text{ RMS}}$.

Para avaliação do sistema com compensação primeiramente eliminou-se o banco de capacitores *shunt* fixo e o regulador de tensão, conectando o compensador controlado após a derivação da carga sete, conforme a Figura 23.

Considerou-se a partida direta do último motor (150cv) do último Pivô (Pivô 7) e os transformadores dos motores com o *tap* em 13,8 kV. Os demais motores foram modelados como impedância constante em regime permanente.

O tempo de simulação executado é de 10s com passo de integração de 10 μ s. A Tabela 23 apresenta as amplitudes da tensão em regime permanente e durante a partida do último motor.

Tabela 23 – Tensão em regime permanente no alimentador CST08 com compensação.

Local	Tensão em RP (kVL-L RMS)	Sobre/ Subtensão (%)	Tensão na Partida (kVL-L RMS)	Sobre/ Subtensão (%)
SE SECUNDÁRIO	14,167	2,64	14,011	1,53
CARGA 1	13,729	-0,51	13,264	-3,88
CARGA 2	13,716	-0,61	13,227	-4,15
CARGA 3	13,656	-1,04	13,160	-4,64
CARGA 4	13,595	-1,49	13,050	-5,43
CARGA 5	13,540	-1,88	12,974	-5,99
CARGA 6	13,374	-3,09	12,725	-7,79
CARGA 7	13,252	-3,97	12,505	-9,38
D-TCSC	13,999	1,44	14,329	3,83
PAC	13,840	0,29	14,078	1,02
PIVÔ 7	0,417	-5,23	0,391	-11,14

Legenda: RP – Regime Permanente.

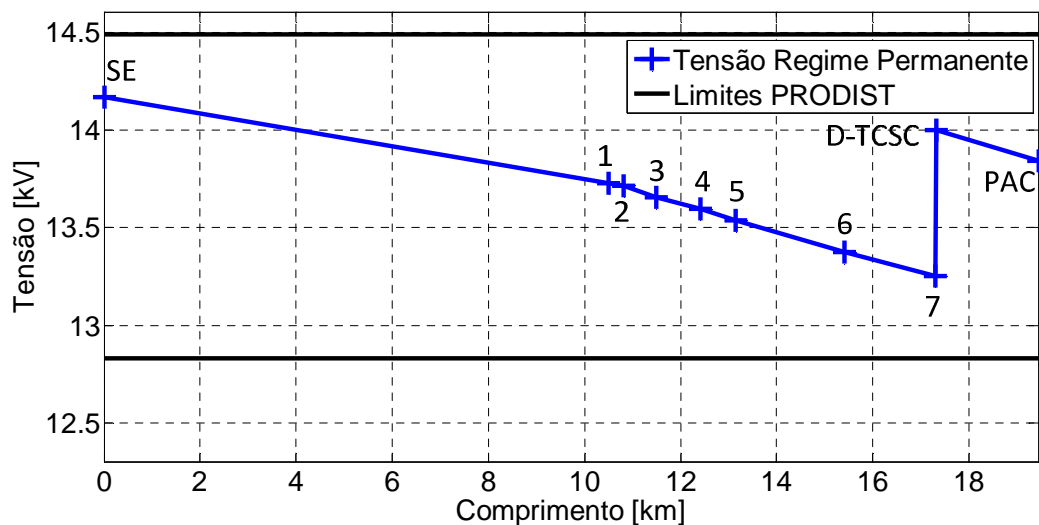
Fonte: Elaboração do autor.

Em regime permanente, observa-se que as tensões ao longo do alimentador estão adequadas, conforme os limites estabelecidos pelo PRODIST.

Durante a partida direta do motor, o afundamento de tensão no PIVO 7 acima de 10% não se caracteriza como uma variação momentânea de tensão de curta duração, visto que esta avaliação refere-se apenas ao ponto de medição.

A Figura 30 mostra o perfil de tensão no alimentador em regime permanente.

Figura 30 – Perfil de tensão no alimentador até o PAC com compensação.

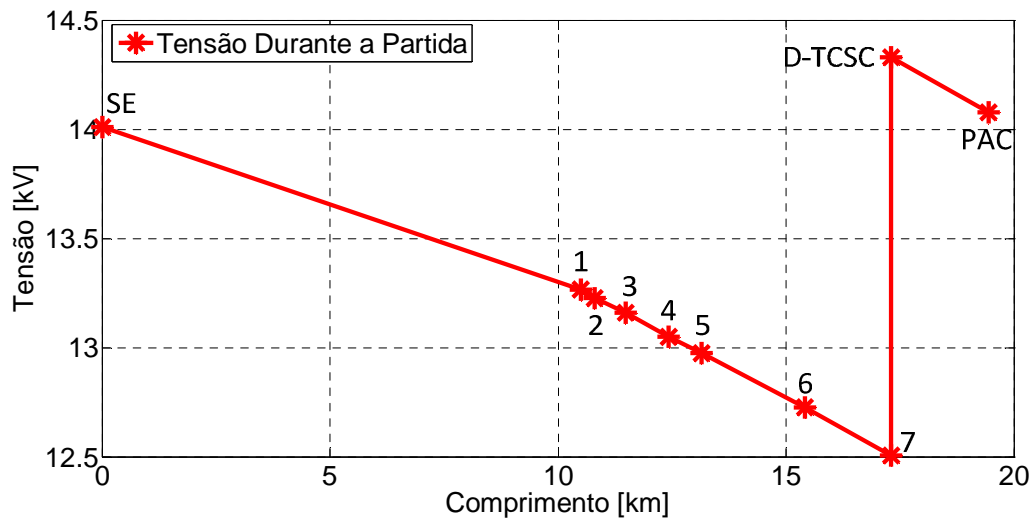


Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 30 mostra que a tensão em todas as cargas conectadas ao longo do alimentador está dentro dos limites estabelecidos pelo PROSIDT.

A Figura 31 apresenta o perfil de tensão no alimentador quando da entrada do último motor.

Figura 31 – Perfil de tensão no alimentador com compensação durante a partida do último motor.

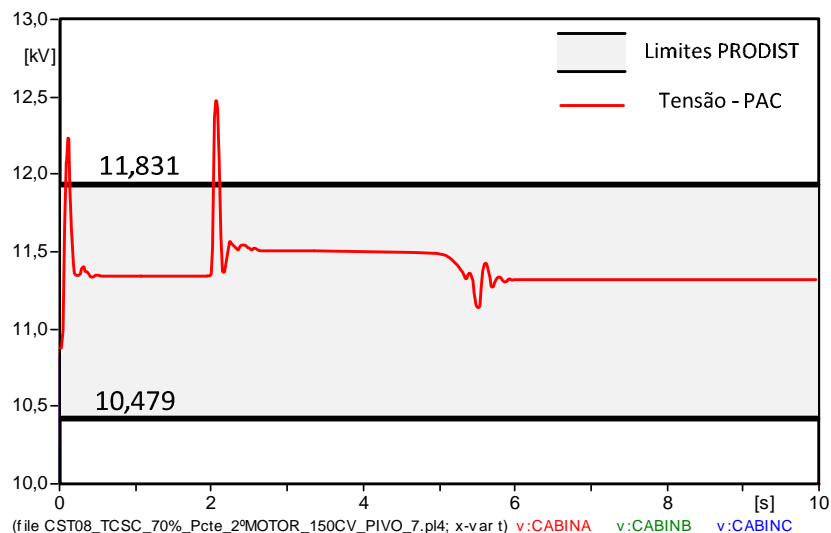


Fonte: Elaboração do autor.

Durante a partida do último motor, observa-se que a tensão nas cargas 6 e 7 é menor que a tensão nas mesmas para o caso sem compensação, porém a tensão de $12,5\text{kV}_{L-L\text{ RMS}}$ na carga 7 não caracteriza um afundamento momentâneo de tensão.

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam a envoltória da tensão no PAC e no terminal do MIT.

Figura 32 – Envoltória da tensão no PAC com compensação.



Fonte: Elaboração do autor.

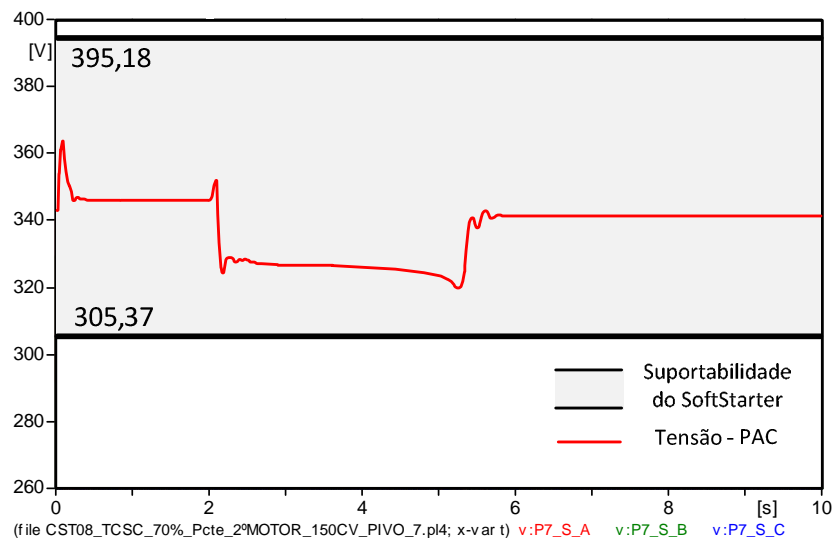
A presença do D-TCSC na rede de distribuição possibilita a regulação da tensão no PAC em regime permanente em 13,840 kV frente à entrada e variações de cargas. Durante a partida, o compensador controlado operou no modo vernier capacitivo com ângulo de disparo de 135,09°, apresentando uma reatância capacitiva de 15,44 Ω e uma compensação de 176,86%.

A Figura 32 mostra, quando da alteração do ângulo de disparo em virtude da partida do MIT, a dinâmica do compensador controlado com comportamento oscilatório amortecido de segunda ordem com tempo de estabelecimento de aproximadamente 500ms.

Nota-se no sistema compensado, níveis de tensão no PAC acima da classe de isolamento (15,27 kV_{L-L RMS}). Visto que tal situação ocorre durante o transitório, mudança do grau de compensação, e uma vez que as isolações devem suportar 34 kV_{L-L RMS} em 1 minuto, é aceitável a operação do sistema em tais condições.

A Figura 33 apresenta a tensão no terminal do MIT.

Figura 33 – Envoltória da tensão no terminal do MIT com compensação.



Fonte: Elaboração do autor.

Considerando um *softstarter* para controle de partida e desligamento do motor, o afundamento de tensão no PAC e nos terminais do MIT seria aproximadamente 0,52% e 5,57% respectivamente.

A presença do D-TCSC oferece uma maior margem de segurança aos limites de tensão da *softstarter* quando comparado com o caso sem compensação.

Quando da não operação das cargas, o compensador controlado altera para o modo de operação bloqueado disparando com ângulo de 180° e compensação mínima de 70%. Nesta

condição, a tensão na cabine de medição atinge $11,587 V_{F-N \text{ PICO}}$ ou $14,191 V_{L-L \text{ RMS}}$, ou seja, 2,83 % acima do valor nominal. No secundário dos transformadores a amplitude da tensão será de $369,32 V_{F-N \text{ PICO}}$ ou $452,32 V_{L-L \text{ RMS}}$, ou seja, 2,80% acima do valor nominal. Portanto, a vida útil dos TCs, TPs e medidores do PAC assim como dos *softstarters* dos MITs estão asseguradas, visto que os mesmos não estarão sujeitos a sobretensões maiores que 2,8%.

6.4 PROTEÇÃO PARA CURTO-CIRCUITO

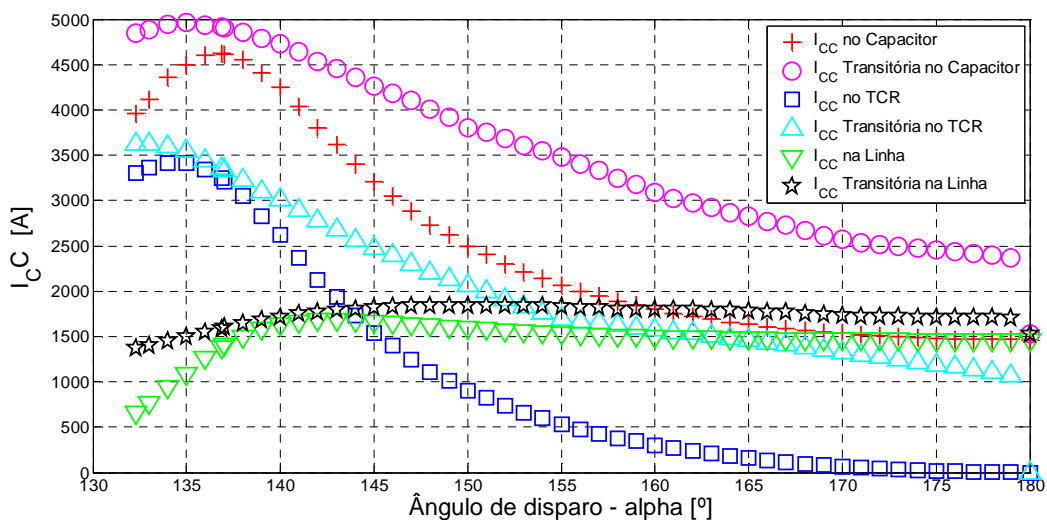
Para o dimensionamento do sistema de proteção supracitado, vale-se da premissa do pior caso: curto-circuito trifásico na saída do D-TCSC. Portanto, necessita-se da realização do cálculo da corrente de curto-circuito.

6.4.1 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO NO ALIMENTADOR

Para o cálculo da corrente de curto circuito do alimentador CST08 são necessárias dispor de informações elétricas do mesmo assim como do D-TCSC.

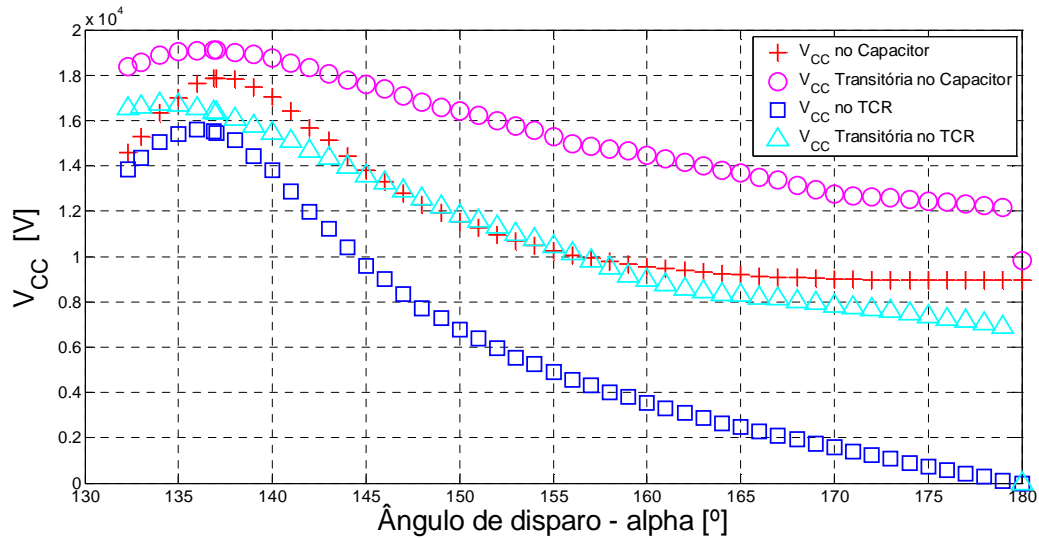
O maior valor da corrente de curto circuito depende do tipo de curto circuito, do local do mesmo, do ângulo de disparo dos tiristores e conseqüentemente do valor da reatância capacitiva equivalente do compensador. Portanto, durante o curto-circuito, varreu-se o ângulo de disparo dos tiristores com passo de 1° . A Figura 34 e a Figura 35 apresenta as correntes e tensões para a ocasião descrita, respectivamente.

Figura 34 – Corrente de curto-circuito no D-TCSC.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 35 – Tensão de curto-circuito no D-TCSC.



Fonte: Elaboração do autor.

Assim, define-se para o cálculo das proteções a condição de ângulo de disparo com maior corrente de curto-circuito através do banco de capacitor. A mesma ocorre para (α) igual a $136,89^\circ$.

A Tabela 24 apresenta a impedância equivalente à montante para um curto circuito trifásico na saída do D-TCSC, a reatância e capacitância equivalente do compensador, o ângulo de disparo e o grau de compensação, prevendo a maior corrente de falta que fluirá através do banco de capacitores.

Tabela 24 – Dados elétricos para determinação da corrente de curto circuito trifásica.

$Z_{EQ} (\Omega)$	$X_{COMP\ EQ} (\Omega)$	$C_{EQ} (\mu F)$	Ângulo α °	Grau de Compensação (%)
$6,7629 - j4,2433$	12,53	211,6985	136,89	143,53

Fonte: Elaboração do autor.

A impedância equivalente à montante vista para um curto circuito trifásico na saída do D-TCSC em coordenada polar é dado pela equação (30).

$$Z = 7,9839 e^{-32,1057^\circ} [\Omega] \quad (30)$$

Assim, a corrente de curto circuito no alimentador é dada pela equação (31).

$$|I_{CC\ 3\phi}| = \frac{V_N}{\sqrt{3} \cdot |Z|} = \frac{13800}{\sqrt{3} \cdot 7,9839} = 997,94 [A_{RMS}] \quad (31)$$

A tensão sobre o capacitor para o curto circuito é apresentada na equação (32).

$$|V_{CC\ CAP}| = |I_{CC}| \cdot |X|_{COMP\ EQ} = 997,94 \cdot 12,53 = 12,504 [kV_{RMS}] \quad (32)$$

A Tabela 25 abaixo apresenta a corrente de curto circuito trifásica para um curto circuito franco permanente na saída do D-TCSC, em $t=1s$, conforme simulação no ATP DRAW.

Tabela 25 – Tensão e corrente máximas no capacitor e reator do D-TCSC durante um curto circuito trifásico a jusante do compensador (ATP DRAW).

V_{CAP} (kV _{PK})	V_{CAP} (kV _{RMS})	I_{CAP} (A _{PK})	I_{CAP} (A _{RMS})	V_{REATOR} (kV _{PK})	V_{REATOR} (kV _{RMS})	I_{REATOR} (A _{PK})	I_{REATOR} (A _{RMS})	I_L (A _{PK})	I_L (A _{RMS})
18,510	14,790	4900	2590	16,100	7,341	3390	1670	1510	1004

Fonte: Elaboração do autor.

Onde:

V_{CAP} – Tensão de sobre o capacitor do D-TCSC;

I_{CAP} – Corrente no capacitor do D-TCSC;

V_{REATOR} – Tensão sobre o reator do D-TCSC;

I_{REATOR} – Corrente no reator do D-TCSC;

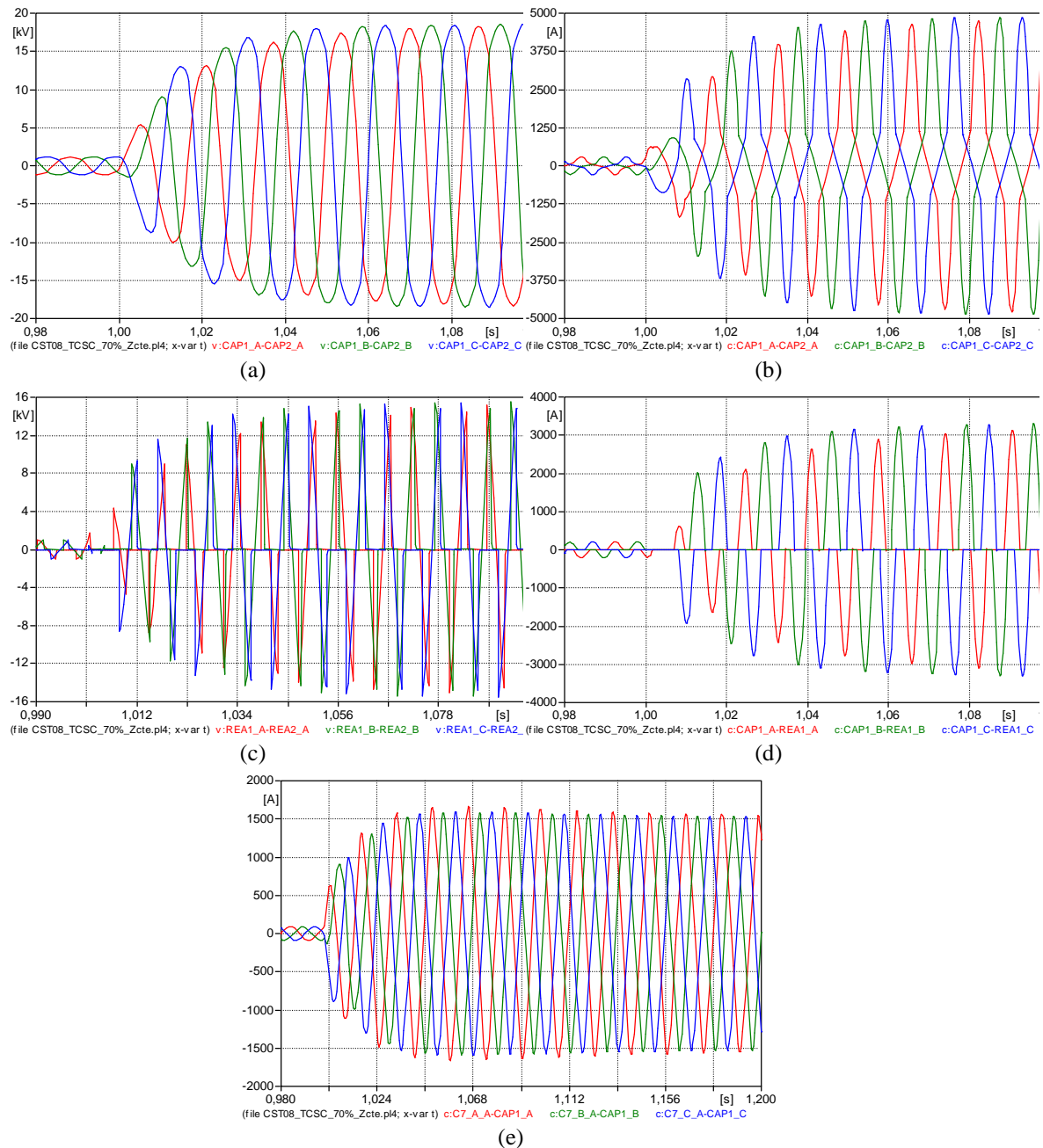
I_L – Corrente na linha à montante do D-TCSC.

pk – pico.

Observa-se que a corrente de curto circuito calculada está próxima dos valores obtidos em simulação com erro de 0,6%. Porém, para a tensão o erro atinge 15,5%, provavelmente devido ao erro embutido no cálculo da reatância de compensação equivalente.

A Figura 36 mostra as formas de onda da tensão e corrente de curto-circuito no banco de capacitor, TCR, e na linha a montante do D-TCSC.

Figura 36 – Tensão e corrente no capacitor e reator do D-TCSC durante um curto circuito trifásico a jusante do mesmo, $t=1s$; (a) Tensão sobre o capacitor; (b) Corrente no capacitor; (c) Tensão sobre o reator; (d) Corrente no reator; (e) Corrente na linha à montante do TCSC.



Fonte: Elaboração do autor.

A partir da determinação da tensão e corrente de curto-circuito no banco de capacitores, pode-se determinar o circuito de amortecimento do mesmo.

6.4.2 CÁLCULO DO CIRCUITO DE AMORTECIMENTO

O dimensionamento do circuito de amortecimento do banco de capacitores depende do maior valor da tensão sobre o mesmo durante um curto circuito trifásico, do valor da

capacitância equivalente do D-TCSC e da corrente assimétrica suportável da chave a vácuo. A Tabela 26 mostra as características da chave utilizada.

Tabela 26 – Dados das chaves à vácuo da ABB.

I_N (A)	I_{TRANS} (A)	t_{OP}/t_{CL} (ms)
200	12000	100

Fonte: Elaboração do autor.

Onde,

I_N (A) – Corrente nominal em 50Hz e 60Hz;

I_{TRANS} (A) – Corrente assimétrica suportável;

t_{OP}/t_{CL} (ms) – Tempo nominal de abertura/fechamento.

A equação (33) determina o valor da indutância do reator de amortecimento para a chave da ABB.

$$L_{REATOR\ AMORT.\ ABB} = \frac{(18510)^2 \cdot (211,695 \cdot 10^{-6})}{12000^2} = 503,687 [\mu h] \quad (33)$$

A resistência do reator para a chave da ABB é dado pela equação (34)

$$R_{REATOR\ AMORT.\ ABB} = \frac{503,687 \cdot 10^{-6}}{0,01} = 0,0504 [\Omega] \quad (34)$$

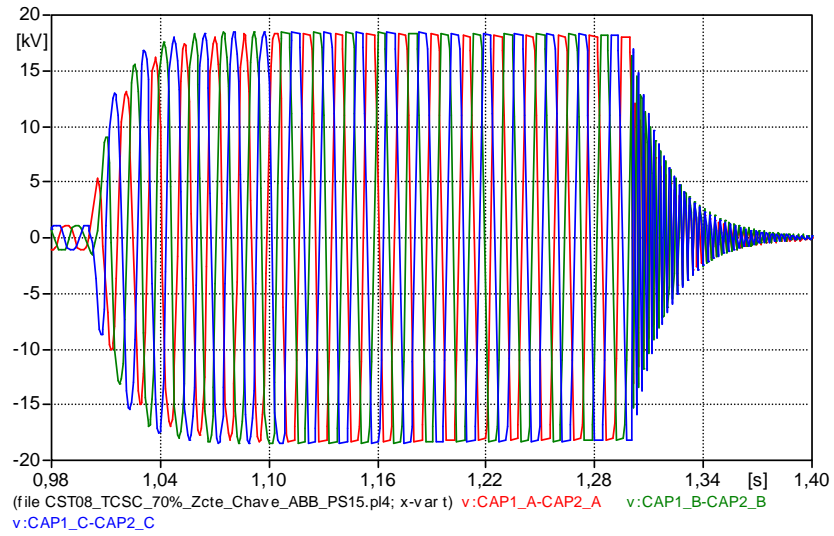
Assim, adotaram-se alguns critérios para a simulação do circuito de amortecimento para a descarga de energia do banco de capacitores. A Tabela 27 apresenta tais considerações e a Figura 37 a descarga do banco de capacitor sobre o circuito de amortecimento e TCR, respectivamente.

Tabela 27 – Tempo do curto circuito trifásico, tempo de atuação do religador e chave a vácuo.

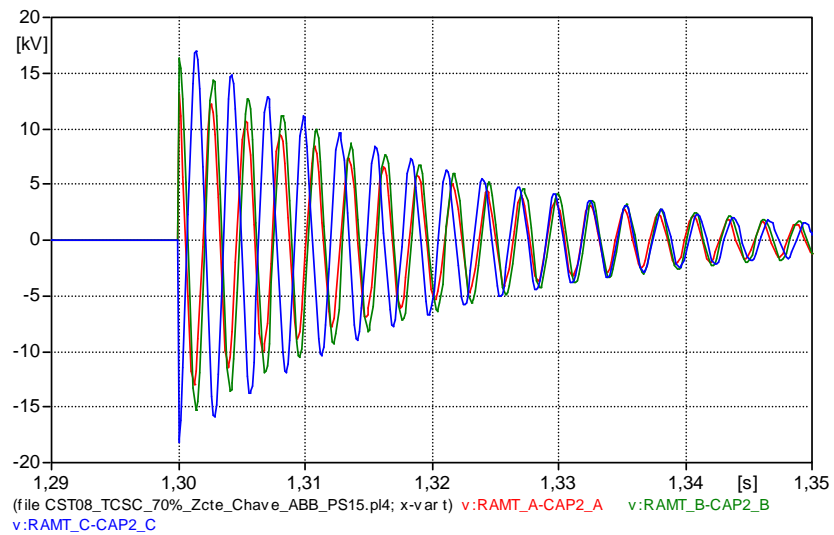
$t_{CC\ 3\Phi\ INICIO-FIM}$ (s)	$t_{ATUAÇÃO\ RELIGADOR}$ (s)	$t_{FECHAMENTO\ DA\ CHAVE\ A\ VÁCUO}$ (s)
1-1,5	1,1	1,3

Fonte: Elaboração do autor.

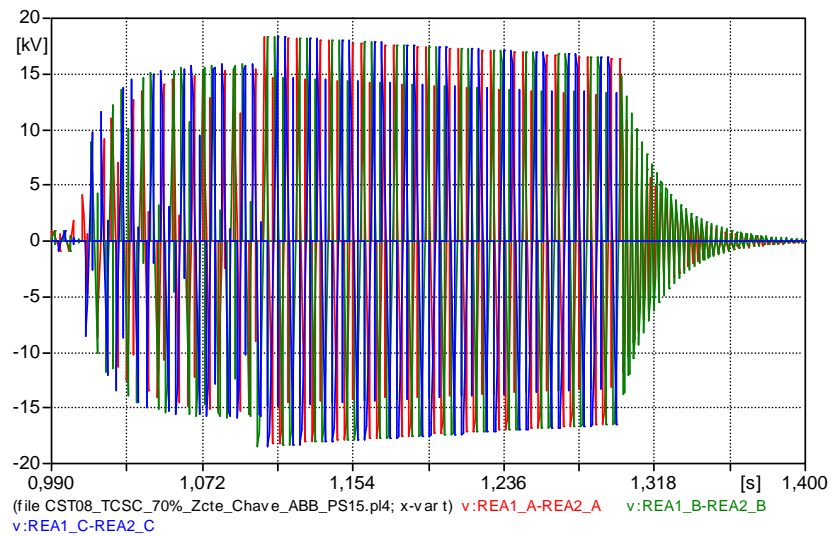
Figura 37 – Simulação da descarga de energia do banco de capacitores para a chave a vácuo da ABB; (a) Tensão sobre o banco de capacitores; (b) Tensão sobre a chave a vácuo; (c) Tensão sobre o TCR.



(a)



(b)

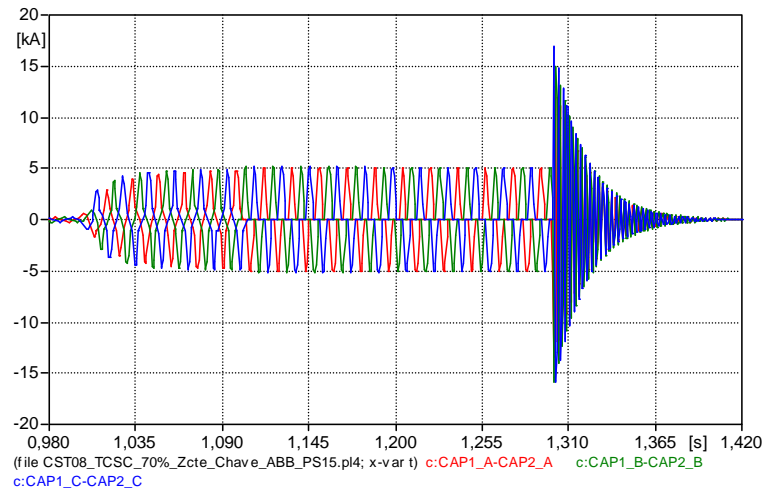


(c)

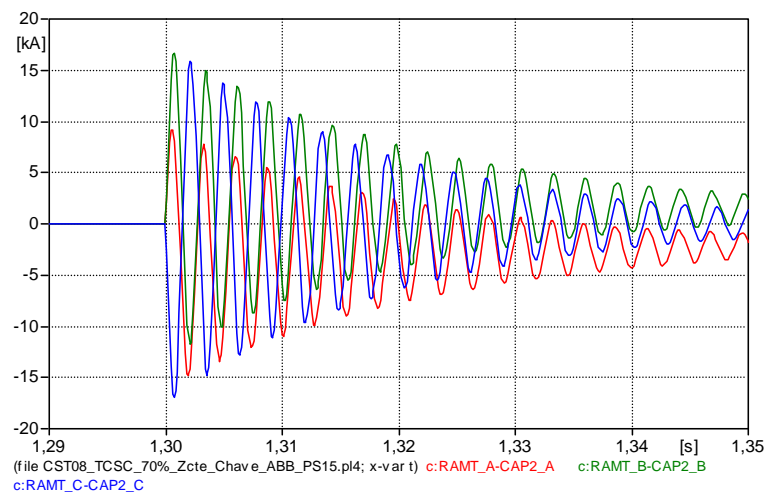
Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 38 apresenta a corrente no D-TCSC e na chave a vácuo quando da descarga do banco de capacitores.

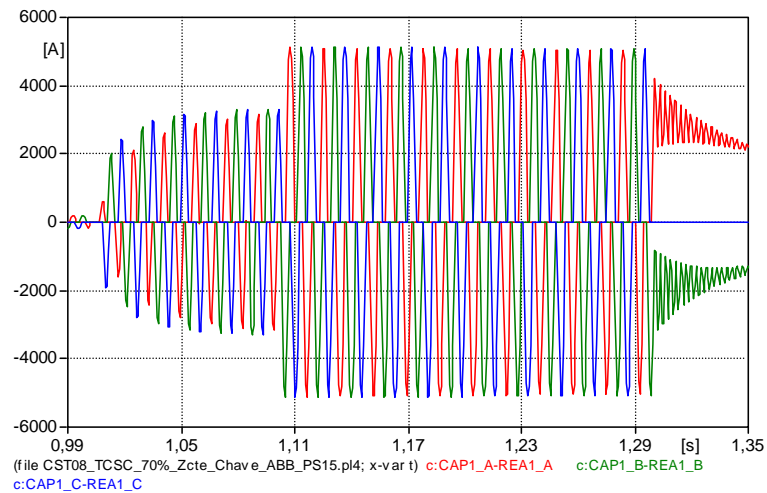
Figura 38 – Simulação da descarga de energia do banco de capacitores para a chave a vácuo da ABB; (a) Corrente no banco de capacitores; (b) Corrente na chave a vácuo; (c) Corrente no TCR.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração do autor.

O tempo de descarga da tensão do capacitor atinge 170ms, com frequência de 370 Hz.

A tensão no banco de capacitores atinge uma amplitude máxima de 18510 kV_{PK} assimétrico diminuindo lentamente com o tempo. A corrente no mesmo atinge 5050 A_{PK}. Quando da atuação da chave a vácuo, a corrente no capacitor cresce rapidamente até 17000 A_{PK} e amortece em um tempo de 200ms.

A chave a vácuo recebe um esforço de tensão e corrente assimétrica de 18,20 kV_{PK} e 16710 A_{PK} respectivamente. A frequência e o tempo total de amortecimento da tensão atingem 370 Hz e 220ms, respectivamente. Para a corrente, a frequência de descarga é 370Hz com tempo total de amortecimento de 800ms.

A tensão sobre o TCR atinge 16,100 kV_{PK} durante 100ms com máximo de 18,500 kV_{PK} após a atuação do religador. A amplitude da corrente chega a 3390 A_{PK} em 100ms, com pico máximo de 5153 A_{PK} quando da atuação do religador. A frequência e o tempo de descarga da tensão é aproximadamente 357Hz e 140ms. Para a corrente, a frequência durante o amortecimento é 370Hz com tempo total de amortecimento de 700ms.

Nota-se que os componentes do compensador controlado estão sujeitos a grandes esforços de tensão e corrente. Os tiristores não suportariam os níveis de esforços mencionados, sendo danificadas rapidamente. Portanto, somente a presença do circuito de amortecimento não garante a vida útil do D-TCSC. Assim, prova-se necessário dimensionar os limitadores de tensão conhecido como Metal Óxido Varistor (MOV).

6.4.3 CÁLCULO DO METAL ÓXIDO VARISTOR

O MOV é um dispositivo de proteção muito utilizado em banco de capacitores. Este equipamento possui uma característica I-V variável.

Dimensiona-se a proteção do banco de capacitores considerando o varistor o *Polin H..N*. As características do MOV estão descritas na Tabela 28.

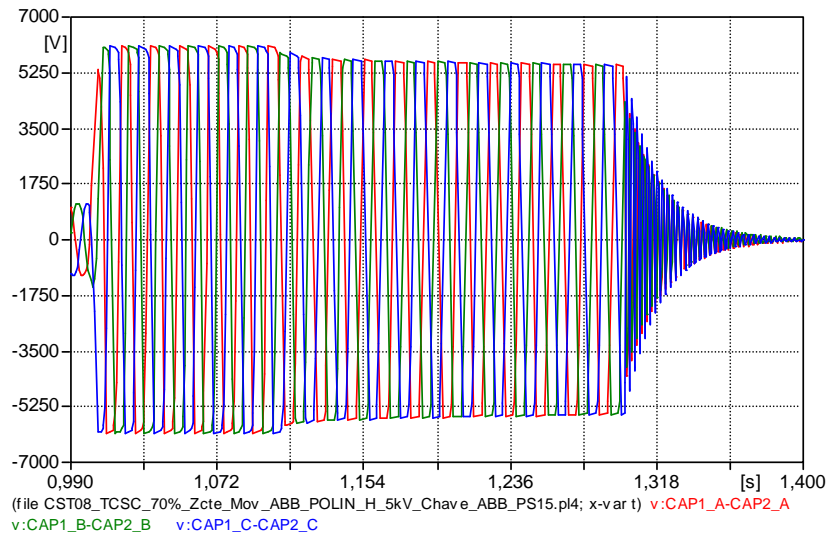
Tabela 28 – Características do MOV

I _N Descarga (kA)	Estabilidade Térmica – ET (kJ/kV-MCOV)	MCOV (kV _{RMS})	U _N (kV _{RMS})
20	13,3	5	6,300

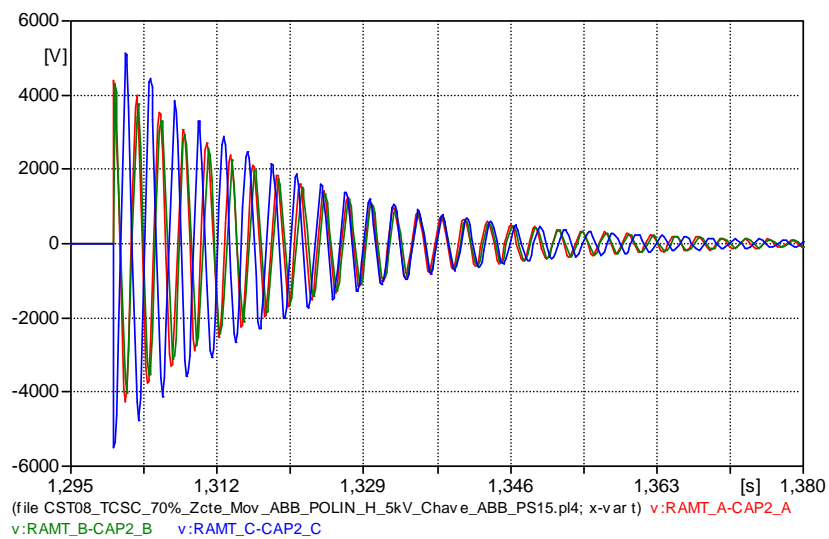
Fonte: Adaptado de Catálogo ABB (2013).

A Figura 38 e a Figura 39 apresenta as tensões e correntes no D-TCSC e circuito de amortecimento quando da presença do MOV.

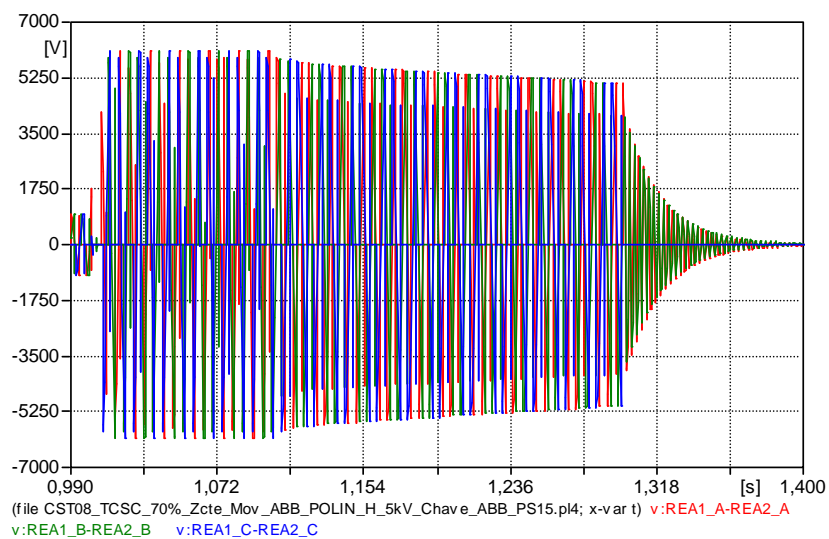
Figura 39 – Simulação do Metal Óxido Varistor para a chave a vácuo (a) Tensão sobre o banco de capacitores; (b) Tensão sobre a chave a vácuo; (c) Tensão sobre o TCR;



(a)



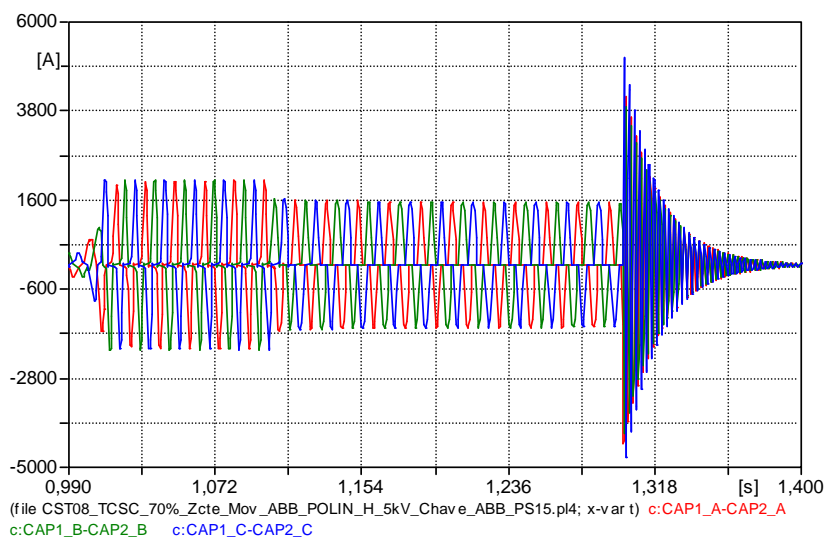
(b)



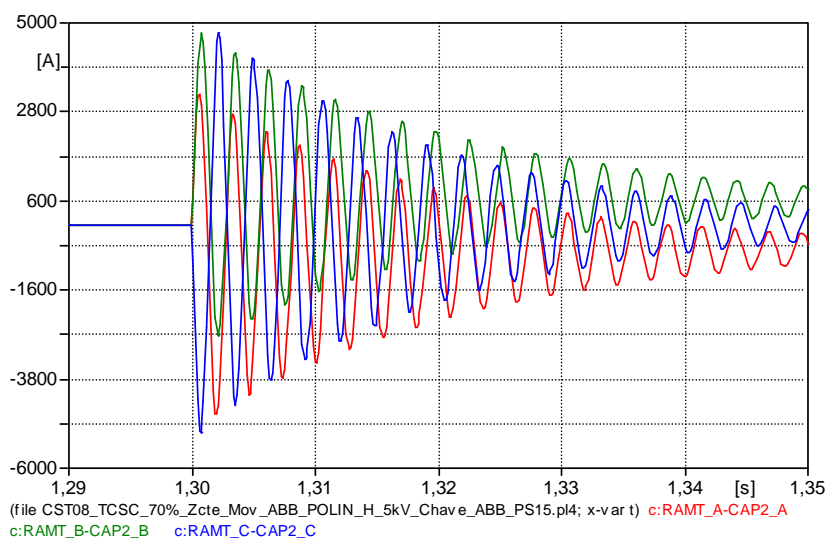
(c)

Fonte: Elaboração do autor.

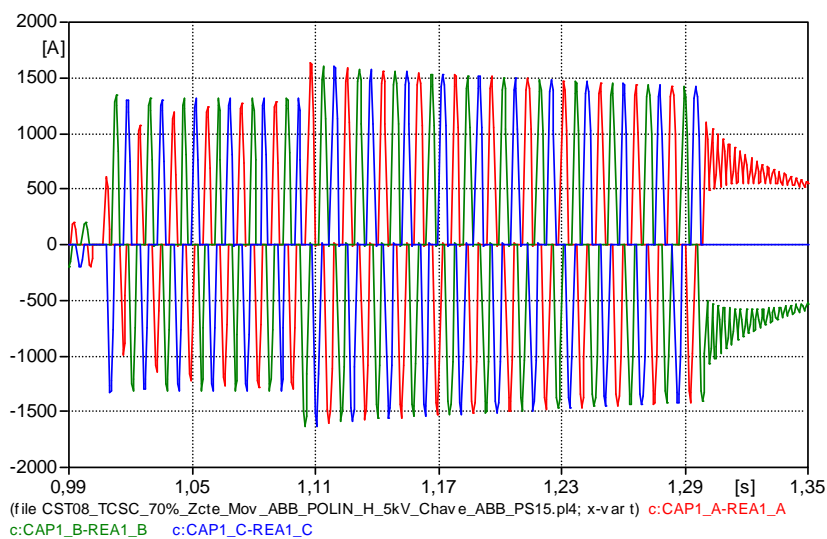
Figura 40 – Simulação do Metal Óxido Varistor da ABB para a chave a vácuo da ABB; (a) Corrente no banco de capacitores; (b) Corrente na chave a vácuo; (c) Corrente no TCR; (d) Energia sobre o MOV.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração do autor.

O tempo de descarga da tensão do capacitor atinge aproximadamente 170ms, com frequência de 370 Hz.

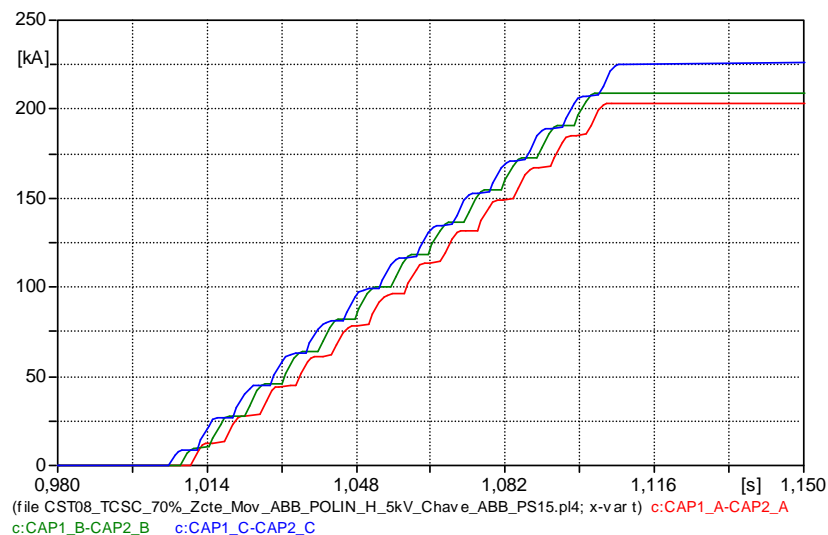
A tensão sobre o banco de capacitores é grampeada em 6,090 kV_{PK}. A corrente no mesmo atinge 2097 A_{PK}. Quando da atuação da chave a vácuo, a corrente no capacitor cresce rapidamente até 5122 A_{PK} e amortece em um tempo de 190ms.

A chave a vácuo recebe um esforço de tensão e corrente assimétrica de 5,500 kV_{PK} e 5120 A_{PK} respectivamente . A tensão na chave apresenta uma frequência de descarga e um tempo total de amortecimento de 370Hz e 190ms, respectivamente. Para a corrente, a frequência de descarga chega a 370Hz com tempo total de amortecimento de 800ms.

A tensão sobre o TCR atinge 6,090 kV_{PK} e corrente de 1348 A_{PK} com pico máximo de 1629A após a atuação do religador. A frequência e o tempo de descarga da tensão aproxima-se de 370Hz e 560ms, respectivamente. Para a corrente, a frequência de descarga chega a 357 Hz com tempo de amortecimento de 700ms.

Durante o curto-circuito, o varistor deve suportar um montante de energia de 226,12 kJ. A Figura 41 mostra a energia que o MOV deve dissipar.

Figura 41 – Energia sobre o MOV.



Fonte: Elaboração do autor.

Conforme a Tabela 28, uma unidade varistora possui suportabilidade térmica de 13,3 kJ por kV de MCOV. Considerando um varistor com MCOV igual a 5kV, o mesmo deve suportar 66,5 kJ. Assim, apenas uma unidade varistor não suportaria a energia de 226,12 kJ gerada pela corrente de falta, sendo necessária a associação em paralelo. Portanto, a quantidade de varistor necessária para dissipar 226,12 kJ será:

$$n_{TOTAL} = \frac{226,12}{66,5} = 3,40 \text{ unidades} \quad (35)$$

Considerando uma margem de segurança de 20% tem-se:

$$n_{TOTAL} = 3,40 \cdot 1,20 = 4,08 \text{ unidades} \quad (36)$$

Assim, aproximamos para um total de 5,0 varistores por fase.

A Tabela 29 apresenta um comparativo dos níveis de tensão e corrente no D-TCSC entre as simulações sem MOV e com MOV.

Tabela 29 – Comparativo entre os casos simulados para o dimensionamento dos varistores.

Resultados com curto circuito sem o Metal Óxido Varistor						
Locais	Tensão (kV _{PK}) RP	Tensão (kV _{RMS}) RP	Corrente (A _{PK}) RP	Corrente (A _{RMS}) RP	Tensão (kV _{PK}) TST	Corrente (A _{PK}) TST
Capacitor	18,510	14,790	4900	2590	18,540	4900
Reator	18,500	7,341	3390	1670	18,500	3276
Tiristor	18,510	12,770	3390	1182	18,540	3276
Reator de Amortecimento					18,200	16710
Resultados com curto circuito com o Metal Óxido Varistor						
Capacitor	6,090	5,281	2097	1042	-	10410
Reator	6,090	2,872	1348	634	-	1630
Tiristor	6,070	4,420	1321	450	-	1595
Reator de Amortecimento	-	-	-	-	5,495	4920

Fonte: Elaboração do autor.

A Tabela 30 apresenta os níveis máximos de tensão e corrente no D-TCSC em operação normal.

Tabela 30 – Níveis máximos de tensão e corrente no D-TCSC, operação normal.

Locais	Tensão pico (kV) RP	Tensão rms (kV) RP	Corrente pico (A) RP	Corrente rms (A) RP	Tensão pico (kV) TST	Corrente pico (A) TST
Capacitor	2,010	1,649	540	292	3,766	1026
Reator	1,900	0,928	452	236	3,692	943
Tiristor	2,010	1,350	452	167	3,766	943
Linha	-	-	90	63,64	-	92,60

Fonte: Elaboração do autor.

Onde,

rp – Regime Permanente;

tst – Transitório;

A presença do metal óxido varistor garante a limitação dos níveis de tensão e corrente do D-TCSC quando da ocorrência de uma falta. Portanto, o banco de capacitores, o reator controlado e os tiristores devem ser dimensionados para suportar os níveis supracitados limitados pelo MOV.

6.5 CONCLUSÃO

O sistema atual, sem compensação, garante a operação das cargas devido a alteração dos *taps* dos transformadores das mesmas para 13,2 kV. O banco de capacitores *shunt* e o regulador de tensão auxiliam no suportem de tensão, porém não possuem velocidade de atuação passível de acompanhar a dinâmica da carga.

Observa-se que o compensador controlado a tiristor é capaz de substituir o banco de capacitores *shunt* e o regulador de tensão, permitindo alteração dos *taps* dos transformadores das cargas para 13,8 kV.

A amplitude da tensão da subestação manteve-se em 14,145 kV_{L-L RMS}.

Para obtenção dos resultados o compensador série controlado atuou na região capacitiva, com ângulo de disparo 135,09° durante a partida, fornecendo uma reatância capacitiva de 15,44Ω e uma compensação de 176,86%.

Durante a operação em vazio, cargas desligadas, o compensador deve atuar no modo de operação bloqueado, com ângulo de disparo igual 180°, fornecendo uma compensação mínima de 70%. Nesta condição, a sobretensão no PAC e nos terminais dos MITs atinge 2,83% e 2,8% respectivamente.

O D-TCSC, frente às variações de cargas e conseqüentemente alteração do ângulo de disparo, apresenta comportamento oscilatório amortecido de segunda ordem. Os níveis de *overshoot* assim como o tempo de estabelecimento podem ser ajustados através dos ganhos do controlador Proporcional-Integral. Porém, esta avaliação não está no escopo deste trabalho.

Nota-se no sistema compensado níveis de tensão acima da classe de isolamento. Visto que tal situação ocorre durante o transitório e uma vez que as isolações suportam 34 kV em 1 minuto, é aceitável a operação do sistema em tais condições.

A proteção do compensador controlado deve ser realizada para a pior condição de curto-circuito. Assim, um curto-circuito trifásico na saída do mesmo, reflete a menor impedância equivalente a montante.

O dimensionamento da proteção do banco de capacitores deve considerar o ângulo de disparo que fornecerá uma reatância capacitiva equivalente, resultando nos maiores esforços de tensão e corrente sobre o banco.

Para uma aplicação prática do D-TCSC, é extremamente importante considerar o dispositivo de proteção MOV e o circuito de amortecimento. A presença destes permite o dimensionamento de um compensador controlado com níveis de suportabilidade menores e conseqüentemente custos menores.

7 CONCLUSÃO

As necessidades presentes no setor de distribuição de energia, em virtude da demanda de crescimento do setor elétrico brasileiro, possibilitaram a inclusão dos dispositivos controlados eletronicamente.

A compensação série, através de bancos de capacitores fixo, apesar de não simulada neste artigo, provou ser uma alternativa eficiente quanto a regulação de tensão para concessionárias de energia.

Os FACDS aos poucos ganham seu espaço no mercado sendo uma promessa para a solução de problemas e postergação de investimentos com novas redes e subestações.

A compensação série na distribuição é limitada pela geometria dos condutores, pois a influência da parcela resistiva nas quedas de tensões e na capacidade de transferência de potência é muito significativa. Em contra partida, aumenta o amortecimento de possíveis oscilações causadas pela sobrecompensação.

O D-TCSC, dada a sua dinâmica de funcionamento, poderá trazer uma nova alternativa para solucionar os afundamentos e oscilações de tensão decorrentes das grandes variações de cargas dos consumidores.

O Compensador Série Controlado apresentou ser uma forma de compensação mais eficiente quando comparada com equipamentos convencionais como banco de capacitores shunt e reguladores de tensão, fornecendo a possibilidade de voltar os *taps* dos transformadores para 13,8 kV evitando sobretensões nos circuitos de comando das *soft-starters* quando das cargas estarem desligadas.

O suporte de tensão é “instantâneo” frente às variações de cargas, mantendo a referência de 14,070 kV eficaz no ponto de acoplamento comum. O Compensador Série Controlado, através da sobrecompensação da reatância indutiva da linha de distribuição, proporciona uma regulação de tensão dinâmica durante a partida dos motores.

Nota-se no sistema compensado níveis de tensão acima da classe de isolamento. Visto que tal situação ocorre durante o transitório e uma vez que as isolações suportam 34 kV em 1 minuto, é aceitável a operação do sistema em tais condições.

Conforme o PRODIST – Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica a tensão em regime permanente no ponto de acoplamento comum está dentro dos limites estabelecidos. Assim, a concessionária não está sujeita a penalização aplicada através de multa.

A proteção do compensador controlado deve ser realizada pelo MOV, em paralelo com o banco de capacitores, para a pior condição de curto-circuito. Assim, um curto-circuito trifásico na saída D-TCSC, reflete a menor impedância equivalente a montante.

O dimensionamento da proteção do banco de capacitores deve considerar o ângulo de disparo que fornecerá uma reatância capacitiva equivalente, resultando nos maiores esforços de tensão e corrente sobre o banco.

Para uma aplicação prática do D-TCSC, é extremamente importante considerar o dispositivo de proteção MOV e o circuito de amortecimento. A presença destes permite o dimensionamento de um compensador controlado com níveis de suportabilidade menores e conseqüentemente custos menores.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. R.; ZAMPELLIN, L.; SEIXAS, F. J. M.; GARCIA, H. L.; BORGES, W. M.; PASCHOARELI JÚNIOR, D. D-TCSC: compensador série controlado a tiristor para uma rede de distribuição. In: SEMINÁRIO ANUAL DE AUTOMAÇÃO, ELETRÔNICA INDUSTRIAL E INSTRUMENTAÇÃO (SAAEI 12), 2012, Guimarães. *Anais...* Guimarães: SAAEI, 2012.
- ALMEIDA, P. R.; PASCHOARELI JÚNIOR, D.; ZAMPELLIN, L.; SEIXAS, F. J. M.; SILVA, L. S. C.; GARCIA, H. L.; BORGES, W. M.; RESENDE, J. F. D-TCSC: compensador série controlado a tiristores como solução para partida de motores. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 10., 2013, Araxá. *Anais...* Araxá: CBQEE, 2013.
- BIANCHIN, C. G.; DEMONTI, R.; PAULILLO, G.; ORTEGA, M. R.; GRUPELLI JÚNIOR, F. A.; TAKIGUCHI, C. Pesquisa e aplicação de restauradores dinâmicos de tensão (DVR) em linhas de distribuição. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 8., 2008, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: IEEE, 2008.
- BORMIO JÚNIOR, E.; AHN, S. U.; JARDINE, J. A.; MATAKAS JUNIOR. L.; KOMATSU, W.; GALASSI, M.; GIARETTA, A. R.; OLIVEIRA, M. A.; MONTEIRO, T. C.; CAMARGO, J. Micro-DVR: development plataform for DVR and FADS – description and experimental results. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 8., 2008, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: IEEE, 2008. p. 1-7.
- CAÑIZARES, C. A.; FAUR, Z. T. Analysis of svc and tcsc controllers in voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 14, n. 1, p.158-165, 1999.
- CATÁLOGO SIEMENS. *Power transmission and distribution: flexible ac transmission systems, series compensation*. [S. l.], 2013.
- CAVALIERI, C. A. C. *Análise de STATCOM operando em sistemas desbalanceados*. 212 f. 2001. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- COSTA JUNIOR., D. R. *Desenvolvimento e implementação em DSP do controle de um restaurador dinâmico de tensão – DVR*. 122 f. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- DATASHEET ABB. *Surge arrester POLIM-H..N*. [S. l.: s. n.], 2013.
- FELTRIN, A. P.; MANTOVANI, J. R. S. *Apostila de sistemas de distribuição de energia elétrica*. Ilha Solteira: UNESP, 2005.
- GONÇALVES, D. N. *Desempenho do relé de distância em linhas de transmissão compensadas com TCSC*. 161 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- GIGUER S. *Proteção de sistemas de distribuição*. Porto Alegre: SAGRA, 1988.

HEDIN, J. S.; PAULSSON, L. H. Application and evaluation of a new concept for compact series compensation for distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 12., 1993. *Proceedings...* Birmingham: Conf. Publ. no. 373, p. 1.22/1-5.

HINGORANI, N. G. *High power electronics and flexible ac transmission systems*. Piscataway: IEEE Power Engineering Review, 1988.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS concepts and technology of flexible ac transmission systems*. Piscataway: IEEE Press, 2000.

IEEE Std. *IEEE Recommended practice for specifying thyristor-controlled series capacitors*. Piscataway: IEEE Press, 2002.

JESUS, N. C. Modelagem e simulação dinâmica do TCSC utilizando o programa de Transitórios Eletromagnéticos Microtran para estudos de qualidade de energia. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 5., 2003, Aracaju. *Anais...* Aracaju: [s. n.], 2003.

KUMARA, J. R. S. S.; BANDARA, A. M. T. K.; ATPUTHARAJAH, A.; EKANAYAKE, J. B. Design and testing of na TCSC for distribution network application. In: International Conference on Industrial and Information Systems, 1., 2006, Sri Lanka. *Proceedings...* Sri Lanka: ICIIS, 2006.

MANUAL ATP DRAW. *Rulebook*. [S. l.], 2003.

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. Piscataway: IEEE Press, 2002.

MEIKANDASIVAM, S.; NEMA, R. K.; JAIN, S. K. Behavioral study of TCSC device: a MATLAB/simulink implementation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, London, v. 2, p. 615-619, 2008.

MARAFÃO, F. P.; CAMARGO, J.; ZANETTI, E. R.; SOUZA JÚNIOR, R. A. Capacitor série como alternativa de investimentos para a expansão da distribuição. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16., Brasília, DF. *Anais...* Brasília: SENDI, 2004.

NASCIMENTO, B. M. *Implementação de um controle digital para o compensador regenerativo de potência ativa*. 165 f. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual, Ilha Solteira, 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS. *Sistemas de transmissão*. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/pop/pop_sistema_transmissao.aspx>. Acesso em: 26 mar. 2013.

PIN, R. A. M. *Utilização de conversores como fonte de tensão no controle do fluxo de potência*. 156 f. 2004. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO. *PRODIST*: módulo 8: qualidade de energia. [S. l.], 2010.

RESENDE, J. W. *Apostila de proteção de sistemas*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

SAVELLI, D. C. *Síntese de sinais e escolha de estrutura de controladores de sistemas elétricos de potência interligados considerando robustez a perturbações externas*. 206 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2007.

SIEMENS. *Series capacitor*. [S. l.], 2012. Disponível em: <<http://www.energy.siemens.com/co/en/power-transmission/facts/series-capacitor/#content=References>>. Acesso em: 01 jun. 2012.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible ac transmission systems (FACTS)*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999.

TENÓRIO, A. R. M. *A Thyristor controlled series capacitor model for electromagnetic transient studies*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Institute of Science and Technology, University of Manchester, Manchester, 1995.

UNTERLAB, F.; WEIB, S.; RENZ, K. *Control and protection of advanced series compensation*. [S. l.]: Transactions of Engineering and Operation Division, 1992.

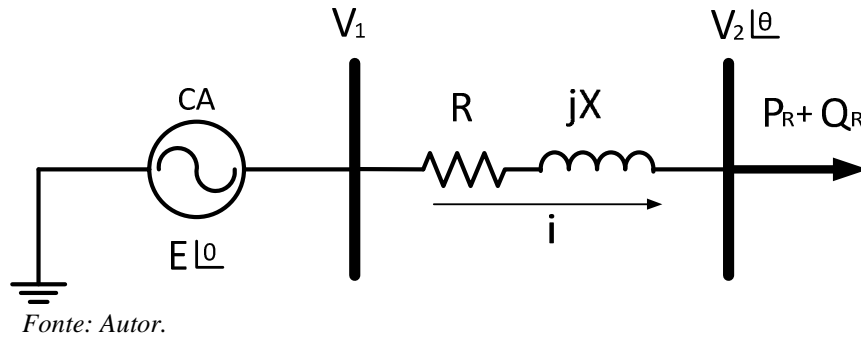
WATANABE, E. H, BARBOSA, P. G., ALMEIDA, K. C., TARANTO, G. N. Tecnologia FACTS: tutorial. *SBA controle e automação*, Heidelberg, v. 9, n 1, p. 39-55, 1998.

YEDIDI, V. K., JOHNSON, B. K. *Design of TCSC for classroom and research applications on an analog model power system*. Piscataway: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.

APÊNDICE A – EQUACIONAMENTO DAS CURVAS PV

Seja um sistema de potência simplificado, representado apenas por um gerador e uma linha de transmissão que alimenta uma carga, conforme a Figura 42.

Figura 42 – Sistema de potência para obtenção da curva PV.



$$S_r = V\angle\theta \cdot \left(\frac{E\angle 0 - V(\cos\theta + j\text{sen}\theta)}{R + jX} \right)^*$$

$$S_r = V(\cos\theta + j\text{sen}\theta) \cdot \left(\frac{E\angle 0 - V(\cos\theta + j\text{sen}\theta)}{R + jX} \right)^*$$

$$S_r = V(\cos\theta + j\text{sen}\theta) \cdot \left(\frac{E\angle 0 - V(\cos\theta - j\text{sen}\theta)}{R - jX} \right)$$

$$S_r = \frac{EV(\cos\theta + j\text{sen}\theta) - V^2(\cos\theta + j\text{sen}\theta) \cdot (\cos\theta - j\text{sen}\theta)}{R - jX}$$

$$S_r = \frac{EV(\cos\theta + j\text{sen}\theta) - V^2(\cos^2\theta - j\cos\theta \cdot \text{sen}\theta + j\text{sen}\theta \cdot \cos\theta + \text{sen}^2\theta)}{R - jX}$$

$$S_r = \frac{EV(\cos\theta + j\text{sen}\theta) - V^2(\cos^2\theta + \text{sen}^2\theta)}{R - jX}$$

Sabendo que:

$$(\cos^2\theta + \text{sen}^2\theta) = 1$$

Temos:

$$S_r = \frac{EV(\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta) - V^2}{R - jX}$$

$$S_r = \frac{EV(\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta) - V^2}{R - jX} \cdot \frac{(R + jX)}{(R + jX)}$$

$$S_r = \frac{EV(\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta) \cdot (R + jX) - V^2 \cdot (R + jX)}{(R - jX) \cdot (R + jX)}$$

$$S_r = \frac{EV(R \cdot \cos \theta + jX \cos \theta + jR \operatorname{sen} \theta - X \operatorname{sen} \theta) - RV^2 - jXV^2}{(R^2 + RjX - RjX + X^2)}$$

$$S_r = \frac{EV(R \cdot \cos \theta - X \operatorname{sen} \theta) + EV(jX \cos \theta + jR \operatorname{sen} \theta) - RV^2 - jXV^2}{(R^2 + X^2)}$$

$$S_r = P_r + jQ_r$$

$$P_r = \frac{EV(R \cdot \cos \theta - X \operatorname{sen} \theta) - RV^2}{(R^2 + X^2)} \quad (37)$$

$$Q_r = \frac{EV(jX \cos \theta + jR \operatorname{sen} \theta) - jXV^2}{(R^2 + X^2)} \quad (38)$$

Elevando ao quadrado as equações (37) e (38) temos:

$$P_r = \frac{EV(R \cdot \cos \theta - X \operatorname{sen} \theta) - RV^2}{(R^2 + X^2)}$$

$$P_r \cdot (R^2 + X^2) = EV(R \cdot \cos \theta - X \operatorname{sen} \theta) - RV^2$$

$$P_r \cdot (R^2 + X^2) + RV^2 = EV(R \cdot \cos \theta - X \operatorname{sen} \theta)$$

$$[P_r \cdot (R^2 + X^2) + RV^2]^2 = [EV \cdot R \cdot \cos \theta - EV \cdot X \operatorname{sen} \theta]^2$$

$$\left[P_r^2 \cdot (R^2 + X^2)^2 + 2P_r(R^2 + X^2)RV^2 + R^2 \cdot V^4 \right] = [EV \cdot R \cdot \cos \theta - EV \cdot X \cdot \text{sen} \theta]^2 \quad (39)$$

$$Q_r = \frac{EV(X \cdot \cos \theta - R \cdot \text{sen} \theta) - XV^2}{(R^2 + X^2)}$$

$$Q_r \cdot (R^2 + X^2) = EV(X \cdot \cos \theta - R \cdot \text{sen} \theta) - XV^2$$

$$Q_r \cdot (R^2 + X^2) + XV^2 = EV(X \cdot \cos \theta - R \cdot \text{sen} \theta)$$

$$\left[Q_r \cdot (R^2 + X^2) + XV^2 \right]^2 = [EV \cdot (X \cdot \cos \theta - R \cdot \text{sen} \theta)]^2$$

$$\left[Q_r^2 \cdot (R^2 + X^2)^2 + 2Q_r(R^2 + X^2)XV^2 + X^2 \cdot V^4 \right] = [EV \cdot X \cdot \cos \theta - EV \cdot R \cdot \text{sen} \theta]^2 \quad (40)$$

Somando as equações (39) e (40) temos:

$$\left[P_r^2 \cdot (R^2 + X^2)^2 + 2P_r(R^2 + X^2)RV^2 + R^2 \cdot V^4 \right] + \left[Q_r^2 \cdot (R^2 + X^2)^2 + 2Q_r(R^2 + X^2)XV^2 + X^2 \cdot V^4 \right] \\ = [EV \cdot R \cdot \cos \theta - EV \cdot X \cdot \text{sen} \theta]^2 + [EV \cdot X \cdot \cos \theta - EV \cdot R \cdot \text{sen} \theta]^2$$

$$\left(P_r^2 + Q_r^2 \right) \cdot (R^2 + X^2)^2 + V^4(R^2 + X^2) + (R^2 + X^2) \cdot (2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2) \\ = [EV \cdot (R \cdot \cos \theta - X \cdot \text{sen} \theta)]^2 + [EV \cdot (X \cdot \cos \theta - R \cdot \text{sen} \theta)]^2$$

$$\left(P_r^2 + Q_r^2 \right) \cdot (R^2 + X^2)^2 + V^4(R^2 + X^2) + (R^2 + X^2) \cdot (2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2) \\ = [(EV)^2 \cdot (R \cdot \cos \theta - X \cdot \text{sen} \theta)^2 + (EV)^2 \cdot (X \cdot \cos \theta - R \cdot \text{sen} \theta)^2]$$

$$\left(P_r^2 + Q_r^2 \right) \cdot (R^2 + X^2)^2 + V^4(R^2 + X^2) + (R^2 + X^2) \cdot (2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2) \\ = (EV)^2 \cdot [(R \cdot \cos \theta - X \cdot \text{sen} \theta)^2 + (X \cdot \cos \theta - R \cdot \text{sen} \theta)^2]$$

$$\left(P_r^2 + Q_r^2 \right) \cdot (R^2 + X^2)^2 + V^4(R^2 + X^2) + (R^2 + X^2) \cdot (2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2) = \\ (EV)^2 \cdot \left[(R^2 \cdot \cos^2 \theta - 2R \cdot X \cos \theta \cdot \text{sen} \theta + X^2 \cdot \text{sen}^2 \theta) + (X^2 \cdot \cos^2 \theta + 2X \cdot R \cos \theta \cdot \text{sen} \theta + R^2 \cdot \text{sen}^2 \theta) \right]$$

$$\left(P_r^2 + Q_r^2 \right) \cdot (R^2 + X^2)^2 + V^4(R^2 + X^2) + (R^2 + X^2) \cdot (2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2) = \\ (EV)^2 \cdot \left[R^2 \cdot \cos^2 \theta + X^2 \cdot \text{sen}^2 \theta - 2R \cdot X \cos \theta \cdot \text{sen} \theta + 2X \cdot R \cos \theta \cdot \text{sen} \theta + X^2 \cdot \cos^2 \theta + R^2 \cdot \text{sen}^2 \theta \right]$$

$$\begin{aligned} & (P_r^2 + Q_r^2) \cdot (R^2 + X^2)^2 + V^4 (R^2 + X^2) + (R^2 + X^2) \cdot (2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2) = \\ & (EV)^2 \cdot [R^2 \cdot \cos^2 \theta + R^2 \cdot \text{sen}^2 \theta + X^2 \cdot \text{sen}^2 \theta + X^2 \cdot \cos^2 \theta] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (P_r^2 + Q_r^2) \cdot (R^2 + X^2)^2 + V^4 (R^2 + X^2) + (R^2 + X^2) \cdot (2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2) = \\ & (EV)^2 \cdot [R^2 \cdot (\cos^2 \theta + \text{sen}^2 \theta) + X^2 \cdot (\text{sen}^2 \theta + \cos^2 \theta)] \end{aligned} \quad (41)$$

Sabendo que:

$$(\text{sen}^2 \theta + \cos^2 \theta) = 1$$

Temos:

$$\begin{aligned} & (P_r^2 + Q_r^2) \cdot (R^2 + X^2)^2 + V^4 (R^2 + X^2) + (R^2 + X^2) \cdot (2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2) - \\ & (EV)^2 \cdot (R^2 + X^2) = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

Dividindo a equação por $(R^2 + X^2)$ encontramos

$$(P_r^2 + Q_r^2) \cdot (R^2 + X^2) + V^4 + 2P_r \cdot RV^2 + 2Q_r \cdot XV^2 - (EV)^2 = 0 \quad (43)$$

Adotamos a convenção de que se o fluxo de potência está saindo de uma barra ele é negativo e se ele estiver entrando numa barra ele é positivo podendo fazer o seguinte balanço de potência para a barra dois.

$$P_r - P = 0$$

$$Q_r - Q = 0$$

E após eliminarmos θ obtemos a seguinte equação em V:

$$V^4 + [2(R \cdot P + X \cdot Q) - E^2] \cdot V^2 + (P^2 + Q^2) \cdot (R^2 + X^2) = 0 \quad (44)$$

A equação 24 pode ser transformada na expressão:

$$V^4 + bV^2 + c = 0$$

Desta forma através do teorema de Baskará temos:

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

As variáveis são:

$$X_a = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$X_b = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}$$

Resolvendo a equação 24 teremos quatro soluções possíveis, porém as soluções de interesse são apenas as soluções positivas:

$$V = \left\{ \pm \sqrt{X_a}, \pm \sqrt{X_b} \right\}$$

$$a = 1$$

$$b = \left[2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) - E^2 \right]$$

$$c = (Pr^2 + Qr^2) \cdot (R^2 + X^2)$$

$$V_a = \sqrt{\frac{E^2 - 2 \cdot (RPr + XQr) \pm \sqrt{\left[2(R \cdot Pr + X \cdot Qr) - E^2 \right]^2 - 4 \cdot (Pr^2 + Qr^2) \cdot (R^2 + X^2)}}{2}}$$

$$V_a = \sqrt{\frac{E^2 - 2 \cdot (RPr + XQr) + \sqrt{4(RPr + XQr) - 4(RPr + XQr)E^2 + E^4 - 4 \cdot (Pr^2 + Qr^2) \cdot (R^2 + X^2)}}{2}}$$

$$V_a = \sqrt{\frac{E^2 - 2 \cdot (RPr + XQr) + \sqrt{4(R^2 Pr^2 + 2 \cdot RPr \cdot XQr + X^2 Qr^2) - 4(RPr + XQr)E^2 + E^4 - 4 \cdot (Pr^2 R^2 + Pr^2 X^2 + Qr^2 R^2 + Qr^2 X^2)}}{2}}$$

$$V_a = \frac{\sqrt{E^2 - 2 \cdot (RPr + XQr) + \sqrt{4 \cdot R^2 Pr^2 + 8 \cdot RPr \cdot XQr + 4 \cdot X^2 Qr^2 - 4(RPr + XQr)E^2 + E^4 - 4 \cdot Pr^2 R^2 - 4 \cdot Pr^2 X^2 - 4 \cdot Qr^2 R^2 - 4 \cdot Qr^2 X^2}}}{2}$$

$$V_a = \frac{\sqrt{E^2 - 2 \cdot (RPr + XQr) + \sqrt{E^4 - 4 \cdot E^2 (RPr + XQr) - 4 \cdot Pr^2 X^2 + 8 \cdot R \cdot Pr \cdot X \cdot Qr - 4 \cdot Q^2 R^2}}}{2} \quad (45)$$

$$V_{2A} = \frac{\sqrt{E^2 - 2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) + \sqrt{E^4 - 4 \cdot E^2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) - 4 \cdot (X \cdot Pr - R \cdot Qr)^2}}}{2} \quad (46)$$

Analogamente, temos:

$$V_{2B} = \frac{\sqrt{E^2 - 2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) - \sqrt{E^4 - 4 \cdot E^2 \cdot (R \cdot Pr + X \cdot Qr) - 4 \cdot (X \cdot Pr - R \cdot Qr)^2}}}{2} \quad (47)$$