



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

TARCIO JUBERTONI DOS SANTOS

**SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO DE CONTROLADOR FACTS:
MODELO TCSC**

Palmas/TO
2020

TARCIO JUBERTONI DOS SANTOS

**SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO DE CONTROLADOR FACTS:
MODELO TCSC**

Trabalho de Conclusão de Curso II foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientadora: Prof^ª. M.^a Gisele Souza Parmezani
Marinho

Palmas/TO
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S237s Santos, Tarcio Jubertoni dos.
Simulação de aplicação de controladores FACTS: modelo TCSC. / Tarcio Jubertoni dos Santos. – Palmas, TO, 2020.
108 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2020.

Orientadora : Gisele Souza Parmezzani Marinho

1. FACTS. 2. TCSC. 3. Perfil de tensão. 4. Fluxos de potências. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

TARCIO JUBERTONI DOS SANTOS

SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO DE CONTROLADORES FACTS MODELO TCSC

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 05/08/2020

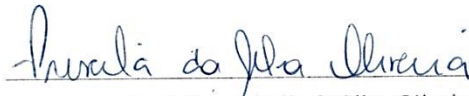
Banca Examinadora



Profª. Me. Gisele Souza Parmezani Marinho, UFT



Prof. Me. Alcy Monteiro Júnior, UFT.



Profª Dra. Priscila da Silva Oliveira.

Palmas-TO, 2020

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo do perfil de tensão em um sistema hipotético de transmissão de energia elétrica, com a finalidade de propor a instalação de FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) e de garantir que os níveis de tensão estejam em conformidade ao estabelecido pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), levando-o a operar próximo aos limites operacionais, de modo a postergar investimentos por parte das concessionárias de transmissão de energia na ampliação destes sistemas. Os Controladores FACTS, através da modificação dos parâmetros do sistema, possibilitam uma melhoria na capacidade de transmissão da rede elétrica, maior controle sobre os fluxos de potências ativa e reativa e das magnitudes de tensão das barras. Em geral, tais equipamentos podem ser conectados em série, em derivação ou mesmo em uma combinação de ambos. O modelo dos Controladores FACTS considerado para estudo aprofundado nesta pesquisa é o TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*). O objetivo principal será estudar a utilização do dispositivo TCSC por meio do *software* OpenDSS, que é então utilizado para avaliar os esperados benefícios do TCSC. No trabalho serão efetuadas medições ao longo do alimentador em regime permanente de forma a levantar as informações referentes as grandezas elétricas relevantes ao estudo, tais como potência e tensão. Os dados obtidos serão lançados em gráficos para poder analisar o perfil da queda de tensão e verificar o seu comportamento ao longo do alimentador sob análise, de forma a certificar que estão dentro dos parâmetros adequados estabelecidos pela ANEEL. A análise dos resultados obtidos nos testes indica que a operação de um sistema elétrico de potência que possui FACTS é mais flexível com vantagens, tais como aumento da transferência de potência ativa, assim como melhor controle dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas, objetivo destacado deste trabalho.

Palavras-chaves: Perfil de tensão. FACTS. Fluxos de potências. TCSC. OpenDSS

ABSTRACT

The present work aims to carry out a voltage profile study in a hypothetical electricity transmission system, in order to propose the installation of FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) and to ensure that the voltage levels are following the established by ANEEL (National Electric Energy Agency), taking it to operate close to the operational limits to postpone investments by the energy transmission concessionaires in the expansion of these systems. The FACTS Controllers, through the modification of the system parameters, allow an improvement in the transmission capacity of the electric network, greater control over the active and reactive power flows, and over the voltage magnitudes of the bars. In general, such equipment can be connected in series, shunt or even in a combination of both. The FACTS Controllers model considered for in-depth study in this research is the TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator). The main objective will be to study the use of the TCSC device through the OpenDSS software, which is then used to evaluate the expected benefits of the TCSC. At work, measurements will be made along the feeder in a permanent regime to gather information regarding the electrical parameters relevant to the study, such as power and voltage. The data obtained will be plotted on graphs to be able to analyze the voltage drop profile and verify its behavior along the feeder under analysis to certify that they are within the appropriate parameters established by ANEEL. The analysis of the results obtained in the tests indicates that the operation of a electric power system that has FACTS is more flexible with advantages, such as increased transfer of active power, as well as better control of the active and reactive power flows in the lines, a highlighted objective of this job.

Key-words: Voltage profile. FACTS. Power flows. TCSC. OpenDSS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de um sistema elétrico de potência.....	22
Figura 2 - Linhas de transmissão de energia elétrica.....	23
Figura 3 - Modelo clássico de uma máquina síncrona	25
Figura 4 - Gráfico de $P \times \delta$	27
Figura 5 - Pontos de equilíbrio de P_m e P	27
Figura 6 - Condições de equilíbrio	30
Figura 7 - Sistema de potência com duas máquinas	32
Figura 8 - Diagrama fasorial.....	32
Figura 9 - Potência em função do ângulo	34
Figura 10 - Sistema de potência com duas máquinas.....	35
Figura 11 - Diagrama fasorial do sistema de potência com duas máquinas.....	36
Figura 12 - Potência em função do ângulo	38
Figura 13 - Compensador série ideal de uma linha de transmissão	39
Figura 14 - Sistema com duas máquinas	41
Figura 15 - Diagrama fasorial.....	41
Figura 16 - Potência em função do ângulo	42
Figura 17 - Circuito do TCR.....	46
Figura 18 - Formas de onda de tensão e corrente	46
Figura 19 - Efeito do ângulo de disparo	47
Figura 20 - Circuito do TSC	48
Figura 21 - Tensões e correntes instantâneas	50
Figura 22 - Efeito do ângulo de disparo	50
Figura 23 - Capacitor positivamente carregado.....	51
Figura 24 - Capacitor negativamente carregado.....	51
Figura 25 - Faixa de compensação de reativos do SVC	53
Figura 26 - Característica $V \times I_{SVC}$	54
Figura 27 - Arranjo de um Compensador Estático de Reativos (SVC).....	55
Figura 28 - Compensador Estático de Reativos Avançado (STATCOM)	56
Figura 29 - Inversor de tensão	56
Figura 30 - Característica estática do STATCOM	58
Figura 31 - Capacitores conectados em série	59
Figura 32 - Comutação com corrente zero e deslocamento da tensão do capacitor	60
Figura 33 - Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC)	61
Figura 34 - Impedância característica.....	63
Figura 35 - Curva de capacidade do TCSC	64
Figura 36 - Proteção MOV associado ao GAP.....	67
Figura 37 - Arranjo geral do SSVC	68
Figura 38 - Arranjo geral de um SSVC Avançado	69
Figura 39 - Arranjo do controlador UPFC	70
Figura 40 - Diagrama fasorial.....	71
Figura 41 - Curvas de potência transmitida.....	72
Figura 42 - Diagrama unifilar do alimentador.....	74
Figura 43 - Modelo PI do alimentador	74
Figura 44 - Perfil diário de carga.....	76
Figura 45 - Modelo da linha de transmissão com a inserção do banco de capacitores controlado a tiristor.....	81
Figura 46 - Perfil da tensão no alimentador modo <i>Snapshot</i> sem TCSC	87

Figura 47 - Perfil da tensão no alimentador modo <i>Snapshot</i> com TCSC.....	90
Figura 48 - Perfil da tensão no alimentador modo <i>Snapshot</i> sem e com TCSC.....	91
Figura 49 - Carregamento do circuito modo <i>Daily</i>	92
Figura 50 - Perfil da tensão na carga no circuito modo <i>Daily</i> sem TCSC	93
Figura 51 - Perfil da tensão na carga no circuito modo <i>Daily</i> com TCSC.....	94
Figura 52 - Perdas totais no sistema	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados nominais da carga.....	75
Tabela 2 - Parâmetros do condutor 336.4 MCM.....	77
Tabela 3 - Dados das linhas.....	78
Tabela 4 - Coordenadas das barras.....	78
Tabela 5 - Tensões de atendimento.....	84
Tabela 6 - Tensões nas barras sem TCSC.....	87
Tabela 7 - Tensões nas barras com TCSC.....	89
Tabela 8 - Potências em situação normal de operação no período de maior carga sem TCSC.....	96
Tabela 9 - Perdas sem TCSC.....	96
Tabela 10 - Potências em situação normal de operação no período de maior carga com TCSC.....	97
Tabela 11 - Perdas com TCSC.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
FACTS	Sistemas Flexíveis de Transmissão de Corrente Alternada (<i>Flexible Alternating Current Transmisson Systems</i>)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
TCSC	Capacitor Série Controlado a Tiristor (<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>)
AT	Alta Tensão
EAT	Extra-alta Tensão
UAT	Ultra-alta Tensão
SIN	Sistema Interligado Nacional
CA	Corrente Alternada
TCR	Reator Controlado a Tiristor (<i>Thyristor Controlled Reactor</i>)
TSC	Capacitor Chaveado a Tiristor (<i>Thyristor Controlled Reactor</i>)
SVC	Compensador Estático de Reativos (<i>Static Var Compensator</i>)
TSSC	Compensador Série Controlado a Tiristor (<i>Thyristor Switched Series Capacitor</i>)
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
GTO	Tiristor de Desligamento pela Porta (<i>Gate Turn Off Thyristor</i>)
STATCOM	Compensador Estático de Reativos Avançado (<i>Advanced Static Var Compensator</i>)
SSSC	Compensador Série Estático Síncrono (<i>Static Synchronous Series Compensator</i>)
UPFC	Controlador Unificado de Fluxo de Potência (<i>Unified power flow controller</i>)
IPFC	Controlador de Fluxo de Potência entre Linhas (<i>Interline Power Flow Controller</i>)
CEC	Compensador Estático Conversível
MOS	Semicondutor de Óxido Metálico (<i>Metal Oxide Semiconductor</i>)
MCT	Tiristor Controlado por MOS (<i>MOS-Controlled Thyristor</i>)
IGCT	Tiristor Comutável por Porta Integrada (<i>Integrated Gate-Comutated Thyristor</i>)
CC	Corrente Contínua
TBM	Modo Tiristor Bloqueado (<i>Thyristor Blocked Mode</i>)
TSR	Reator Plenamente Inserido (<i>Thyristor Switched Reactor</i>)
TPC	Modo de Controle de Fase (<i>Thyristor Phase Controlled</i>)
GAP	Centelhador (<i>Spark Gap</i>)
MOV	Varistor de Óxido Metálico

TP
TC
SSVC

(Metal Oxide Varistor)
Transformador de Potencial
Transformador de Corrente
Compensador Estático de Reativos Série
(Serie Static Var Compensator)

LISTA DE SÍMBOLOS

MVA	Megavoltampères
$E \angle \delta$	Tensão interna do gerador
$V \angle 0^\circ$	Tensão do barramento infinito
X	Reatância total do sistema entre o barramento infinito e a tensão do gerador
X'_d	Reatância transitória da máquina
P	Potência elétrica produzida pelo gerador
δ	Ângulo de potência
R	Resistência da linha
p.u.	Por unidade
S_{base}	Potência base
S_n	Potência da máquina síncrona
\dot{I}	Fasor da corrente no circuito
I	Módulo da corrente no circuito
j	Unidade imaginária
\dot{I}^*	Conjugado do fasor da corrente no circuito
\dot{S}	Fasor da potência aparente
P_m	Potência mecânica
ω_r	Velocidade angular do rotor
ω_s	Velocidade síncrona de referência
δ_0	Ângulo inicial
d	Diferencial
P_{m1}	Nova potência mecânica
δ_1	Novo ângulo de equilíbrio
δ_f	Máxima excursão do ângulo δ
δ_r	Ângulo do rotor
\dot{V}_s	Fasor da tensão por fase da extremidade emissora
V_s	Módulo da tensão por fase da extremidade emissora
\dot{V}_r	Fasor da tensão por fase da extremidade receptora
V_r	Módulo da tensão por fase da extremidade receptora
V	Módulo das tensões por fase das extremidades emissora e receptora
\dot{V}_d	Fasor da tensão no ponto médio
V_d	Módulo da tensão no ponto médio
e	Número de Euler
Q_r	Potência reativa na barra receptora
Q_s	Potência reativa fornecida pela fonte
Q	Potência reativa da linha
$P_{MÁX}$	Potência ativa máxima
$Q_{MÁX}$	Potência reativa máxima
V_m	Tensão no ponto central da linha
I_m	Corrente de compensação
P_p	Potência ativa transmitida com compensação paralela
Q_p	Potência reativa fornecida pela compensação paralela
V_c	Tensão do compensador série ideal
X_{eq}	Reatância equivalente
X_{comp}	Reatância do compensador série ideal
r	Grau de compensação

P_c	Potência ativa transmitida com compensação série
Q_c	Potência reativa fornecida pela compensação série
V_x	Magnitude da tensão total na indutância em série da linha
L	Indutância
SW	Chave bidirecional com tiristores
α	Ângulo de disparo do tiristor
σ	Ângulo de condução da chave
V_m	Tensão de pico da tensão de alimentação
$v(t)$	Tensão instantânea
t	Tempo
ω	Velocidade angular
$i_L(t)$	Corrente instantânea do indutor
$I_{LF}(\alpha)$	Corrente eficaz fundamental do reator
$Y_L(\alpha)$	Admitância em função de α
$Z_L(\alpha)$	Impedância do compensador
Y	Conexão estrela
Δ	Conexão delta
C	Capacitância
s	Variável do domínio da frequência
V_{c_0}	Tensão inicial do capacitor
ω_n	Frequência natural do circuito LC
$V(s)$	Transformada de Laplace de $v(t)$
$I(s)$	Transformada de Laplace de $i(t)$
$i(t)$	Corrente instantânea
I_c	Corrente rms no capacitor
m_{on}	Número de ciclos em que a chave esteve acionada
m_{off}	Número de ciclos em que a chave esteve desligada
k	Ciclo de trabalho da chave
L_{TCR}	Indutância do TCR
I_{SVC}	Corrente do SVC
X_{SVC}	Reatância equivalente do SVC
V_{linha}	Tensão de linha
X_L	Reatância indutiva
X_C	Reatância capacitiva
Q_{SVC}	Potência reativa do SVC
V_0	Tensão na saída do conversor
C_{eq}	Capacitância equivalente
m	Número de capacitores
v_C	Tensão no capacitor
∂	Diferencial parcial
$X_T(\alpha)$	Impedância do TCSC
X_{TCSC}	Reatância efetiva do TCSC
$X_{L_{TCR}}(\alpha)$	Reatância indutiva do TCR
ω	Frequência de ressonância
$\alpha_{L_{LIM}}$	Ângulo limite na região indutiva
$\alpha_{C_{LIM}}$	Ângulo limite na região capacitiva;
α_R	Ângulo de ressonância
i_C	Corrente no capacitor
V_{inj}	Tensão em série injetada

V_L	Tensão de linha V_L
l	Extensão total da linha de transmissão
r	Reatância em ohms por quilometro (Ω/km)
x_L	Resistência em ohms por quilometro (Ω/km)
π	Constante PI
f	Frequência da corrente em hertz (Hz)
C	Capacitância do capacitor em farads (F)
$X_{L\text{TOTAL}}$	Reatância indutiva total

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivos Gerais	18
1.1.2	Objetivos Específicos.....	19
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
1.3	METODOLOGIA	20
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	21
2.2	ESTABILIDADE	23
2.2.1	Modelo Clássico	24
2.2.2	Curva $P \times \delta$.....	25
2.2.3	Estabilidade Rotórica.....	27
2.2.4	Análise de Estabilidade.....	28
2.2.5	Elevação da Potência Mecânica	30
2.3	PRINCÍPIO DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA.....	30
2.4	PRINCÍPIO DA COMPENSAÇÃO EM PARALELO	34
2.5	PRINCÍPIO DA COMPENSAÇÃO EM SÉRIE	37
3.	FACTS – <i>FLEXIBLE ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION SYSTEM</i>	43
3.1	HISTÓRIA DOS CONTROLADORES FACTS	43

3.2	COMPENSADORES EM PARALELO	44
3.2.1	Reator Controlado a Tiristor (TCR)	45
3.2.2	Capacitor Chaveado a Tiristor (TSC).....	47
3.2.3	Compensador Estático de Reativos (SVC).....	51
3.2.4	Compensador Estático de Reativos Avançado (STATCOM).....	55
3.3	COMPENSADORES SÉRIE	58
3.3.1	Capacitor Série Chaveado a Tiristor (TSSC).....	58
3.3.2	Capacitor série Controlado a Tiristor (TCSC).....	60
3.3.2.1	Dispositivos de Proteção	64
3.3.2.1.1	<i>Centelhador</i>	64
3.3.2.1.2	<i>Varistor Óxido Metálico</i>	64
3.3.2.1.3	<i>Disjuntor de Desvio</i>	65
3.3.2.1.4	<i>Circuito de Amortecimento</i>	65
3.3.2.2	Esquemas de Proteção	65
3.3.2.2.1	<i>Proteção por MOV Associado a Spark Gap</i>	66
3.3.3	Compensador Estático de Reativos Série (SSVC)	67
3.3.4	Compensador Estático de Reativos Série Avançado (SSVC Avançado).....	68
3.4	COMPENSADORES MISTOS	69
3.4.1	Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC)	69
4.	SIMULAÇÕES	72
4.1	DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO.....	72

4.2	DADOS DA CARGA	74
4.2.1	Perfil da Carga	75
4.3	DADOS DAS LINHAS	76
4.4	DADOS DO CAPACITOR.....	80
4.4.1	Localização na Linha	80
4.4.2	Dimensionamento do Capacitor Série Controlado a Tiristor	80
4.4.3	Linhas de Código para os Capacitores	82
4.5	NÍVEIS DE TENSÃO.....	83
5.	RESULTADOS E ANÁLISES	85
5.1	PERFIS DE TENSÃO.....	85
5.1.1	Fluxo de Potência no Modo <i>Snapshot</i>	86
5.1.1.1	Situação Normal de Operação	86
5.1.1.2	Situação com Capacitor Série Controlado a Tiristor.....	88
5.1.2	Fluxo de Potência no Modo <i>Daily</i>	92
5.1.2.1	Situação Normal de Operação	92
5.1.2.2	Situação com Capacitor Série Controlado a Tiristor.....	94
5.2	FLUXO DE POTÊNCIA	95
5.2.1	Situação Normal de Operação	95
5.2.2	Situação com Capacitor Controlado a Tiristor	97
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	102

REFERÊNCIAS	103
ANEXO A – <i>SCRIPTS</i> DE COMANDO NO OPENDSS.....	106

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tornou-se claro a crescente necessidade de uma maior flexibilidade nos sistemas elétricos de potência devido ao grande aumento do consumo de energia elétrica, decorrente de sociedades cada vez mais industrializadas. O aumento da flexibilidade de um sistema elétrico de potência (SEP) tem como finalidade proporcionar uma melhor adaptação do sistema às mudanças, cada vez mais constantes, nas suas características de operação. Assim, essa flexibilidade do sistema busca proporcionar uma maior estabilidade e confiabilidade a um baixo custo operacional (PASCHOARELI JR, 2003), (HINGORANI et al., 1999).

A eletrônica de potência está cada vez mais presente em diversos âmbitos do setor elétrico, sendo utilizada na geração, transmissão e distribuição de potência em corrente alternada e contínua. A aplicação da eletrônica de potência na transmissão de energia cresce mais a cada dia, e isso se dá em decorrência dos benefícios de sua aplicação no setor, como no controle e conversão de altos níveis de energia elétrica. Com os grandes avanços tecnológicos contemporâneos, as pesquisas, o aperfeiçoamento e o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao sistema elétrico de potência só aumentam (PASCHOARELI JR, 2003), (SONG et al., 1999).

Os sistemas de transmissão flexível em corrente alternada (*Flexible Alternating Current Transmission Systems - FACTS*) constituem basicamente um conjunto de equipamentos que usam da eletrônica de potência para melhorar a estabilidade e o controle das características operacionais do sistema elétrico (HINGORANI et al., 1999). Esses controladores permitem uma maior precisão e velocidade no que diz respeito ao controle de um ou mais parâmetros do sistema elétrico de potência. Os FACTS são dispositivos revolucionários que surgiram no controle do SEP que possibilitam o ajuste de parâmetros importantes, como a tensão, a frequência e o ângulo de transmissão (PASCHOARELI JR, 2003), (SONG et al., 1999).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo explicar o princípio das compensações série e paralela e como é o funcionamento dos principais controladores FACTS em uma rede de transmissão de energia elétrica com ênfase no Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC). Este, por sua

vez, será objeto de um estudo técnico no ambiente computacional OpenDSS para avaliar o perfil de tensão, o fluxo de potência e as perdas em um sistema elétrico de potência (SILVA, 2019).

1.1.2 Objetivos específicos

- 1) Escolher material didático sobre fluxo de carga e controladores FACTS;
- 2) Estudar o dispositivo TCSC;
- 3) Estudar e aprender a utilizar o programa OpenDSS para simulação;
- 4) Modelar o TCSC e os sistemas a serem analisados;
- 5) Verificar o comportamento de um sistema de transmissão de energia elétrica na presença de compensação de reativos, examinando a colaboração do TCSC para a melhoria de parâmetros de qualidade de energia;
- 6) Obter um controle mais fino e eficiente dos parâmetros do sistema, bem como um melhor rendimento do mesmo;
- 7) Analisar o perfil da tensão e obter a melhor localização para instalação do controlador TCSC. Deseja-se com esse estudo fazer com que a tensão esteja adequada em todos os pontos, atendendo os pontos críticos da queda de tensão, evitando investimentos desnecessários;
- 8) Analisar a elevação do fluxo de potência ativa com a utilização do dispositivo FACTS TCSC, adquirindo informações para sustentar um aumento da flexibilidade do sistema;
- 9) Averiguar a redução da potência reativa;
- 10) Analisar os resultados obtidos entre os sistemas com e sem TCSC e fazer uma comparação.

1.2 JUSTIFICATIVA

Um sistema elétrico de potência tem basicamente o objetivo de atender as demandas de carga e garantir ao sistema uma alta confiabilidade pelo menor custo de implementação, operação e manutenção possíveis. Os profissionais que idealizam tais sistemas têm que dimensioná-los de modo que eles venham a atender as necessidades futuras, como o aumento da demanda energética e/ou integração de novos equipamentos e linhas ao sistema. Nesse panorama, por conta das incertezas futuras, os projetistas durante muito tempo contornavam tal problemática dimensionando sistemas bem robustos que pudessem lidar com os futuros

impactos de crescimento de demanda sobre eles. Todavia, essa solução é hoje demasiadamente inviável, tendo em vista que algumas linhas já estão sobrecarregadas e o crescimento da demanda energética não cessa. Nesse sentido, uma solução simples seria criar novas linhas, entretanto a construção de novas linhas implica em altos investimentos, impacto ambiental e visual, além do processo de implementação demandar bastante tempo. Diante de tal premissa, uma solução para melhorar o desempenho das linhas já existentes é o uso de controladores FACTS, pois os mesmos conseguem fazer com que um sistema já existente aumente sua capacidade de transporte de potência elétrica e melhore as suas características operacionais, aumentando assim o seu rendimento e melhorando suas características de controle operacional (SILVA, 2019).

1.3 METODOLOGIA

No trabalho, a metodologia a ser empregada na etapa teórica consiste em uma revisão bibliográfica que busca mostrar a resposta do sistema elétrico de potência à inserção de um ou mais dispositivos FACTS na transmissão de energia e como esses controladores podem contribuir para melhorar o sistema elétrico. Inicialmente, serão abordadas algumas características dos sistemas elétricos de potência, algumas problemáticas envolvendo a operação do mesmo. Em seguida será mostrado matematicamente como funcionam esses controladores no sistema elétrico e algumas das várias topologias de controladores FACTS (SILVA, 2019). Enquanto a parte prática que compõe este trabalho se caracteriza pela solução no ambiente computacional do OpenDSS para o problema de fluxo de carga com o controlador TCSC para que se avalie os parâmetros deste dispositivo e como o mesmo afeta o perfil da rede elétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

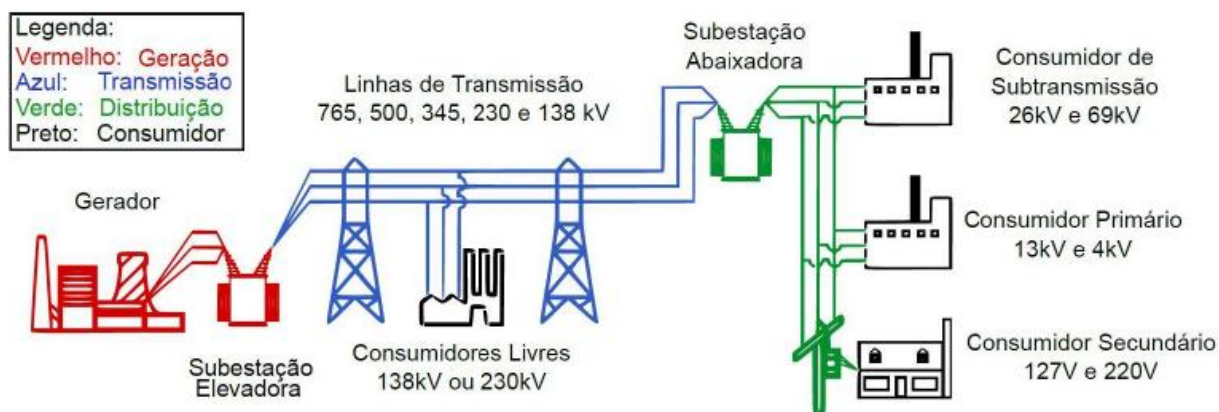
2.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A energia elétrica é um dos elementos mais essenciais para a manutenção das atividades desenvolvidas na sociedade contemporânea. A eletricidade ocupa um lugar de destaque no mundo moderno, pois praticamente todas as atividades humanas dependem dela direta ou indiretamente. Essa energia proporciona as pessoas melhores condições de desenvolvimento humano, industrial e monetário, bem como um maior conforto e comodidade para a sociedade de modo geral (LEÃO, 2009), (PASCHOARELI JR, 2003).

O sistema elétrico de potência trabalha de modo a converter e transportar energia das fontes produtoras até os consumidores, que geralmente se encontram distantes da geração. Os profissionais dessa área trabalham para conseguirem desenvolver o SEP, implementando novas tecnologias, a fim de solucionar problemáticas do sistema elétrico, elevando assim a confiabilidade do mesmo. Um sistema elétrico de potência pode ser subdividido em três partes principais: As usinas geradoras, linhas de transmissão e os sistemas de distribuição (STEVENSON, 1974). Nesse trabalho o foco está na transmissão de energia, logo as particularidades dos demais setores do SEP não serão abordadas. A Figura 1 ilustra um sistema elétrico de potência.

Os níveis de tensão de 115, 138 e 230 kV são considerados alta tensão (AT), os de 345, 500 e 765 kV, extra-alta tensão (EAT) e, por último, os níveis superiores a 1000 kV são classificados como ultra-alta tensão (UAT). Em geral, são poucos os consumidores com alto consumo energético que estão conectados diretamente ao sistema de transmissão, onde predominam as estruturas de linhas aéreas.

Figura 1 - Representação de um sistema elétrico de potência



Fonte: SILVA (2016).

Nas linhas de transmissão a segurança é um fator primordial, pois qualquer falha nesse nível pode levar a descontinuidade de suprimento para uma grande parcela de consumidores (LEÃO, 2009).

Os motivos da elevação nos níveis de tensão na transmissão ficam mais evidentes quando se leva em conta a capacidade de transmissão de potência de uma linha em megavoltampères (MVA). De modo geral, como tensão e corrente são grandezas inversamente proporcionais para que se consiga ter uma potência constante é necessário aumentar uma grandeza na mesma proporção que se reduz a outra, logo, para se transmitir tanta potência é necessário aumentar muito a tensão para que a corrente seja a menor possível. Entretanto, não é trivial estabelecer o limite de operação de uma linha para uma dada tensão porque a capacidade de transmissão depende dos limites térmicos dos condutores, perdas, queda de tensão permitida, confiabilidade e exigências para se manter o sincronismo entre as máquinas do sistema, o que é conhecido por estabilidade (STEVENSON, 1974), (LEÃO, 2009). A Figura 2 mostra linhas de transmissão de energia.

Figura 2 - Linhas de transmissão de energia elétrica



Fonte: CASAL JR (2018).

2.2 ESTABILIDADE

Os conceitos de estabilidade são vastos com diversas problemáticas envolvidas a serem avaliadas, como a resposta do sistema elétrico a grandes e pequenas perturbações (ZANETTA JR, 2006). Basicamente a estabilidade do sistema elétrico de potência pode ser compreendida como a capacidade do sistema de responder as perturbações provenientes de distúrbios na rede, partindo de uma condição normal de operação, passando pelo distúrbio, e retornar as condições normais de operação. Em outras palavras, um sistema é dito estável se é capaz de suportar pequenas e/ou grandes perturbações sem interrupção no fornecimento de energia (KUNDUR, 1994). Assim, diz-se que o sistema elétrico perde sua condição de estabilidade elétrica quando um gerador síncrono que o compõe perde sua capacidade de manter o sincronismo girante com o sistema. Dessa forma, portanto, o sistema instável opera em condições diferentes das nominais, podendo estas serem inadequadas e/ou proibitivas, por ocorrência de uma falta em suas proximidades (MASIERO et al., 2016).

Quando um sistema de potência é submetido a um distúrbio de pequena magnitude e curta duração, este tende a voltar a um ponto de funcionamento, por outro lado, se a perturbação for de grande amplitude e de longa duração, o mesmo não ocorrerá. No período transitório que se segue à ocorrência de uma perturbação, o funcionamento do sistema é oscilatório por natureza, o que influencia nas potências que circulam nas linhas. Se o sistema for estável, estas

oscilações são fortemente amortecidas, porém se o sistema for instável, as oscilações não recuperam o estado de equilíbrio operacional. A partir dessa premissa, os estudos de estabilidade procuram determinar o comportamento das máquinas síncronas após a ocorrência de uma determinada perturbação (MASIERO et al., 2016).

É comum que sistemas elétricos de potência sejam submetidos diariamente a diversos tipos de distúrbios e faltas. Assim, para que não ocorra a perda de um sistema de transmissão estável é necessário garantir que os dispositivos de proteção isolem em tempo hábil o local de ocorrência de uma falta (MASIERO et al., 2016).

Os estudos de estabilidade são usualmente classificados em três tipos, que dependem do tipo e da natureza do distúrbio. Tais estudos são comumente chamados de estudos de estabilidade transitória, dinâmica e em regime permanente (STEVENSON, 1974).

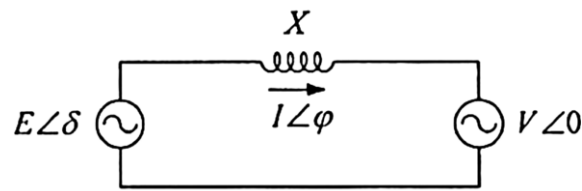
O planejamento dos sistemas de transmissão se inicia com o estabelecimento de perspectivas de crescimento, consumo de energia e da demanda energética, de acordo com previsões de crescimento a médio e longo prazo. O objetivo primordial do planejamento é obter um plano ótimo de expansão que deverá indicar onde novos equipamentos serão alocados para que o sistema trabalhe de forma a atender as necessidades da sociedade, restrições operacionais e financeiras para futuros cenários econômicos (MIASAKI, 2006).

O grande aumento na demanda energética nos últimos anos e as novas interligações com os sistemas elétricos existentes resultaram no atual sistema interligado nacional (SIN), o que tornou a operação e o controle deste sistema uma tarefa extremamente complexa.

2.2.1 Modelo Clássico

Para analisar de modo elementar a estabilidade de um sistema elétrico se partirá de um equacionamento baseado num exemplo clássico de uma máquina síncrona acoplada a um barramento infinito por meio de uma reatância. Supondo que os fluxos permaneceram inalterados durante o período considerado, nesse modelo de gerador se considera a tensão interna E constante. Finalmente, a tensão da barra infinita será tomada como referência angular (ZANETTA JR, 2006). A Figura 3 ilustra o circuito do modelo clássico.

Figura 3 - Modelo clássico de uma máquina síncrona



Fonte: ZANETTA JR (2006).

Onde:

$V\angle 0^\circ$: Tensão do barramento infinito;

$E\angle\delta$: Tensão interna do gerador, onde E é a magnitude e δ é a diferença angular entre as barras;

X : Reatância total do sistema entre o barramento infinito e a tensão do gerador.

Desse modo, nesse modelo simplificado, a máquina síncrona é representada por uma força eletromotriz e uma reatância transitória denominada X'_d . A reatância X da Figura 3 engloba a linha, o transformador e a reatância transitória da máquina (ZANETTA JR, 2006).

2.2.2 Curva $P \times \delta$

A curva $P \times \delta$ representa, no presente caso, a potência elétrica produzida pelo gerador em função do ângulo, que pode ser conjugado ou de potência, em um sistema simples composto apenas por um gerador ligado a um barramento infinito por meio de uma impedância constituída apenas pela sua parcela reativa (ZANETTA JR, 2006). Em representações de linhas de transmissão, que são geralmente extensas, a reatância da linha é muito maior do que a resistência ($X \gg R$) de modo que em alguns estudos se ignora a resistência da linha (STEVENSON, 1974).

Nesse exemplo será trabalhado com valores por unidade (p.u.) adotando como base a potência da máquina síncrona, $S_{base} = S_n$.

Segundo Zanetta Júnior, o valor da corrente no circuito é dado pela equação 1.

$$\dot{i} = \frac{E\angle\delta - V\angle 0^\circ}{jX} \quad (1)$$

Onde o conjugado da corrente é apresentado na equação 2.

$$\dot{i}^* = j \frac{E \angle -\delta - V \angle 0^\circ}{X} \quad (2)$$

Deste modo, pode-se obter a potência aparente fornecida pelo gerador a partir da tensão interna $E \angle \delta$. A potência aparente é dada pelas equações 3, 4, 5 e 6.

$$\dot{S} = \dot{V} \dot{i}^* \quad (3)$$

$$\dot{S} = E \angle \delta \left(j \frac{E \angle -\delta - V \angle 0^\circ}{X} \right) \quad (4)$$

$$\dot{S} = j \frac{E^2}{X} - j \frac{EV \angle \delta}{X} \quad (5)$$

$$\dot{S} = j \frac{E^2}{X} - j \left(\frac{EV}{X} \cos \delta + j \frac{EV}{X} \sin \delta \right) \quad (6)$$

Como somente se quer a transferência de potência ativa, toma-se a parte real de \dot{S} , dado por P , apresentado na equação 7:

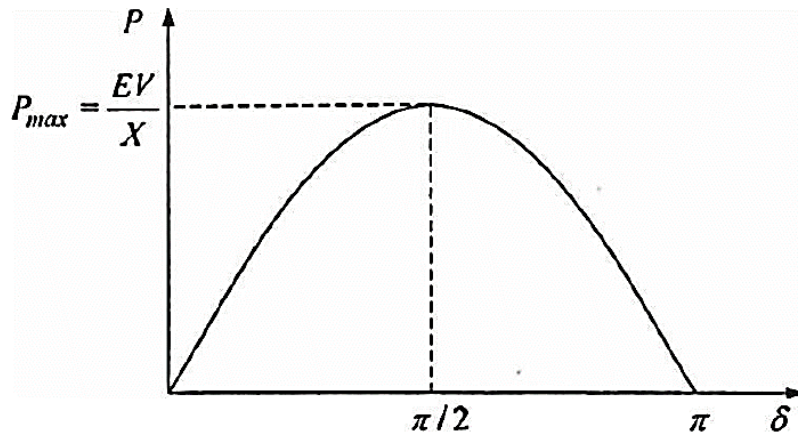
$$P = \text{Re}(\dot{S}) \quad (7)$$

Logo, isso implica que a potência ativa transmitida estará em função do ângulo δ como pode ser visto na equação 8:

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (8)$$

A curva que representa a equação 8 é mostrada na Figura 4.

Figura 4 - Gráfico de $P \times \delta$



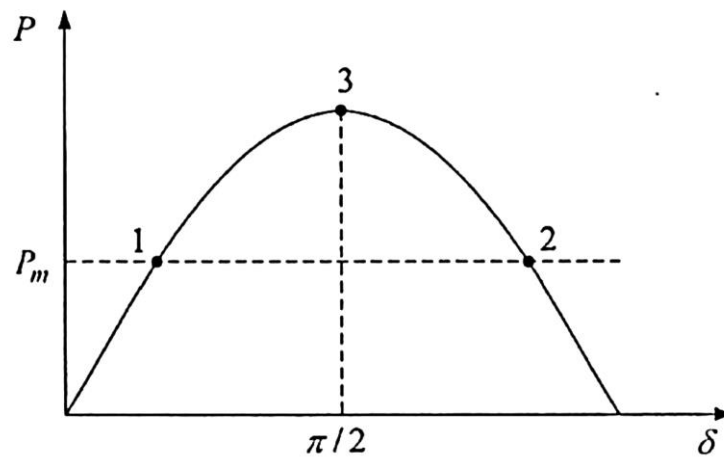
Fonte: ZANETTA JR (2006).

É importante perceber que, como não são consideradas perdas neste modelo elementar, a potência ativa transferida é a mesma em qualquer ponto da rede (ZANETTA JR, 2006).

A curva obtida para a potência ativa transmitida em função do ângulo δ é uma função senoidal, cujo seu valor máximo depende das magnitudes das grandezas E , V e X .

Nesse sentido, em uma condição de operação normal sabe-se que a potência mecânica no eixo é igual à potência elétrica gerada P o que resulta em apenas dois pontos de equilíbrio com apenas um deles estável, conforme será mais bem explicado adiante (ZANETTA JR, 2006). A Figura 5 ilustra graficamente o que foi dito.

Figura 5 - Pontos de equilíbrio de P_m e P



Fonte: ZANETTA JR (2006).

2.2.3 Estabilidade Rotórica

Em operação normal, o torque eletromagnético de uma máquina síncrona contrabalança o torque mecânico aplicado ao eixo da máquina, gerando assim potência elétrica útil para gerar trabalho (FITZGERALD et al. apud MASIERO et al., 2016). Durante a ocorrência de um distúrbio, essa compensação pode ser desequilibrada a ponto de diminuir ou até mesmo eliminar a característica de geração do sistema elétrico. O estudo da estabilidade do ângulo do rotor, portanto, se propõe a analisar as variáveis que contribuem para manter ou restaurar o equilíbrio entre torque eletromagnético e torque mecânico de geradores síncronos (MASIERO et al., 2016).

O ângulo de carga ou ângulo de potência (δ), foco de estudo da estabilidade rotórica, corresponde ao mesmo ângulo entre o campo eletromagnético do rotor e o campo resultante no

entreferro de uma máquina síncrona. Dessa forma, o fenômeno de instabilidade rotórica ocorre na forma de oscilações crescentes de ângulo de potência do rotor de alguns geradores, de modo a causar perda de sincronismo entre as máquinas, pois os desvios de posição angular dos rotores alteram o torque eletromagnético, aumentando o desequilíbrio entre torque mecânico e torque eletromagnético (BOMFIM apud MASIERO et al., 2016).

2.2.4 Análise de Estabilidade

Segundo Zanetta Júnior para se analisar a estabilidade de uma máquina síncrona tendo como referencial o barramento infinito, admitisse que o sistema esteja operando em uma condição de equilíbrio, isto é, a potência na ponta do eixo é igual à potência elétrica gerada, logo a máquina opera em velocidade constante.

A posição angular do rotor é expressa pelo ângulo δ na equação 9:

$$\delta = \omega_r t + \omega_s t + \delta_0 \quad (9)$$

Onde:

ω_r : velocidade angular do rotor;

ω_s : velocidade síncrona de referência;

δ_0 : ângulo inicial.

Nesse cenário, o ângulo δ representa mudanças angulares em relação à referência síncrona. A velocidade $\omega = d\delta/dt$ representa uma velocidade relativa em relação à velocidade síncrona, logo a velocidade (ω) pode ser apresentada pela equação 10:

$$\omega = \omega_r + \omega_s \quad (10)$$

No gerador síncrono de polos salientes, de acordo com o modelo de Park, não abordado a fundo aqui, o ângulo δ indica a posição angular do eixo de quadratura em relação a uma referência adotada na rede. Como o modelo adotado foi o modelo clássico de geradores e a saliência rotórica não foi considerada, tampouco o número de polos, o tratamento de variáveis mecânicas e elétricas ficou simplificado. Nessas condições, em regime permanente, para um dado observador que se localiza em uma referência com rotação angular síncrona (referência síncrona), o ângulo δ será constante e eventualmente nulo se porventura essa referência for coincidente com a posição angular do rotor, o que geralmente não ocorre com a referência angular posicionada na tensão síncrona do barramento infinito (ZANETTA JR, 2006).

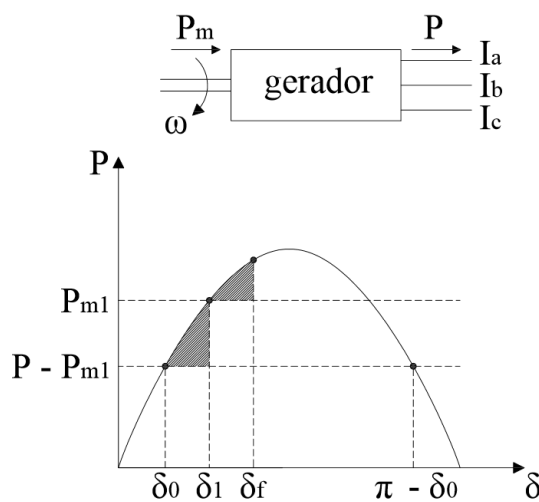
Nesses moldes, supõe-se que os fenômenos a serem estudados têm curta duração e desse modo pode-se admitir que P_m é constante, ou seja, não havendo tempo para que os controladores mecânicos atuem. Assim, será assumido como constantes a potência mecânica P_m e o módulo da potência interna E . Observa-se que, nessa conjuntura, quando ocorrem distúrbios elétricos na rede, têm-se variações na potência elétrica transmitida, que podem ocasionar a frenagem ou aceleração da máquina síncrona (ZANETTA JR, 2006), (ELGERD, 1976).

Na Figura 6 pode-se observar que em uma condição de equilíbrio, $P_m = P$, obtêm-se duas soluções para o ângulo do gerador em relação ao barramento infinito, δ_0 e $\pi - \delta_0$ (ZANETTA JR, 2006).

No gerador síncrono, sabe-se que quando $P_m > P$, a rotação aumenta, e conseqüentemente o ângulo δ . No caso oposto, quando $P_m < P$, a rotação diminui, assim como o ângulo δ .

Deste modo, pode-se verificar que somente o ângulo δ_0 corresponde a um ponto de operação estável, pois admitindo uma pequena perturbação nas condições operacionais, como o aumento da velocidade e conseqüentemente do ângulo δ , a potência elétrica passa a ser maior do que a potência mecânica, causando então o retorno à operação do valor do ângulo δ_0 . Todavia, se a velocidade reduzir, com a diminuição do ângulo δ , a potência mecânica passa a superar a potência elétrica, ocasionando uma aceleração e novamente o retorno ao ângulo operativo δ_0 (MONTICELLI, 1983), (ZANETTA JR, 2006).

Figura 6 - Condições de equilíbrio



Fonte: Adaptado de ZANETTA JR (2006).

2.2.5 Elevação da Potência Mecânica

Considere um caso inicial de uma elevação da potência mecânica de P_m para P_{m1} , conforme a Figura 6. O gerador síncrono que opera inicialmente com o ângulo δ_0 deverá se estabilizar em novo ângulo de equilíbrio δ_1 . Para que tal ocorra, é necessária uma aceleração positiva na velocidade, $P_{m1} > P$, com o aumento de δ até alcançar o valor de δ_1 , porém, ao atingir tal valor, embora a aceleração seja nula, o rotor possui velocidade suficiente para que este valor de ângulo seja ultrapassado. Então, logo após ultrapassar o ângulo δ_1 a aceleração passa a ser negativa, agora com $P_{m1} < P$, com redução na velocidade, passando o rotor a ser submetido a uma condição de frenagem eletromecânica. Deste modo, a velocidade se reduz a um valor nulo na máxima excursão do ângulo δ , chamada aqui de δ_f . Neste ponto, apesar da velocidade ser nula, existe uma aceleração negativa que promove a redução do ângulo δ . Após o sistema oscilar algumas vezes, o ângulo se estabilizará no novo ponto de equilíbrio, com o valor de $\delta_r = \delta_1$, se as componentes de torque que causam esse amortecimento das oscilações forem consideradas (ZANETTA JR, 2006), (ELGERD, 1976).

Sabe-se que se os torques são proporcionais às acelerações angulares e como os torques são iguais às potências em valores por unidade, as acelerações são conhecidas através da diferença $P_m - P$, conhecida como potência acelerante (ZANETTA JR, 2006). A análise de estabilidade ainda é bem mais abrangente, entrando em alguns tópicos como Equação de Swing e critérios das áreas iguais, os quais não serão aqui abordados para não se estender em um tema adjacente ao foco desse trabalho.

2.3 PRINCÍPIO DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA

O controle do sistema elétrico de potência depende intimamente da regulação precisa de parâmetros fundamentais ao sistema, como o fluxo de potência ativa e reativa. Para analisar o fluxo de potência no que diz respeito ao atendimento das demandas de carga pressupõe-se a utilização de ferramentas adequadas e confiáveis, principalmente quando o sistema envolvido é de grande porte. Nesse panorama, a forma de controle do sistema deve ser contemplada no início do projeto, preferencialmente, pois é necessário comparar as alternativas existentes e sua viabilidade, como a construção de novas linhas, programas de investimento na geração e como

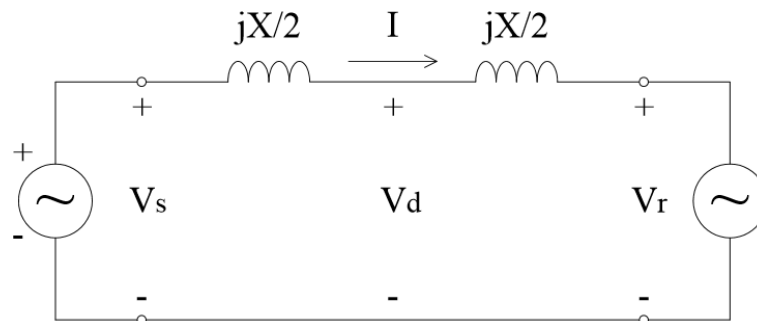
obter a compensação reativa adequada (ZANETTA JR, 2006), (MONTICELLI, 1983).

Na presente análise um modelo bem similar ao modelo clássico de máquina síncrona é usado no estudo de estabilidade. Um circuito simplificado é estudado para realizar uma análise do fluxo de potência de uma linha de transmissão, desprezando-se as perdas ativas. A modelagem de operação em uma linha de transmissão de energia pode ser representada, de maneira simplificada, por uma reatância série, com as tensões transmissão e recepção nas extremidades das barras (ELGERD, 1976). A Figura 7 ilustra como seria o circuito para uma fase de um sistema trifásico, o mesmo é válido para as demais fases que compõem o sistema.

O circuito é composto apenas de duas máquinas interligadas por uma impedância (jX). Este modelo pode representar a interligação entre duas máquinas por uma linha curta. Admite-se que as tensões terminais são fixas, com módulos iguais.

Logo, com base na representação proposta, tem-se que todos os valores de tensão e corrente serão definidos por fase. As tensões V_s e V_r , por definição, são as tensões por fase das extremidades emissora e receptora, respectivamente. Dessa maneira, essas tensões representam os equivalentes *Thévenin* com relação ao ponto médio da linha.

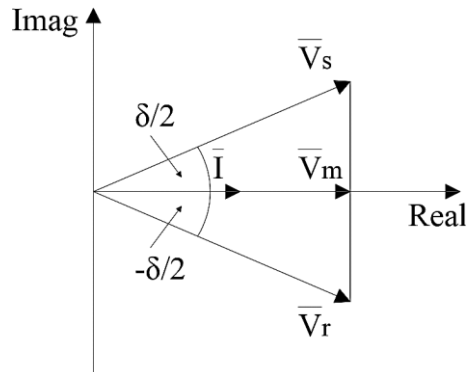
Figura 7 - Sistema de potência com duas máquinas



Fonte: Adaptado de RASHID (2014).

A impedância correspondente ($jX/2$) de cada equivalente de *Thévenin* indica a impedância de curto-circuito da linha em seu ponto médio. A Figura 8 mostra que δ é o ângulo entre as tensões (RASHID, 2014).

Figura 8 - Diagrama fasorial



Fonte: Adaptado de GAMA (1995).

Para simplificar, as magnitudes de tensão adotadas permanecem constantes em ambas as barras e iguais à V , desse modo $V_s = V_r = V_d = V$ (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014). As tensões nas barras, \dot{V}_s e \dot{V}_r , podem ser expressas da seguinte forma pelas equações 11 e 12 respectivamente:

$$\dot{V}_s = Ve^{j\frac{\delta}{2}} = V \left(\cos \frac{\delta}{2} + j \text{sen} \frac{\delta}{2} \right) \quad (11)$$

$$\dot{V}_r = Ve^{-j\frac{\delta}{2}} = V \left(\cos \frac{\delta}{2} - j \text{sen} \frac{\delta}{2} \right) \quad (12)$$

Assim, a tensão no ponto médio \dot{V}_d é expressa pelo valor médio de \dot{V}_s e \dot{V}_r como pode ser visto pela equações 13, 14 e 15:

$$\dot{V}_d = \frac{\dot{V}_s + \dot{V}_r}{2} \quad (13)$$

$$\dot{V}_d = Ve^{j0} \quad (14)$$

$$\dot{V}_d = V \cos \frac{\delta}{2} \angle 0^\circ \quad (15)$$

O fasor da corrente é dado pelas equações 16 e 17:

$$\dot{i} = \frac{\dot{V}_s - \dot{V}_r}{X} \quad (16)$$

$$\dot{i} = \frac{2V}{X} \text{sen} \frac{\delta}{2} \angle 90^\circ \quad (17)$$

A magnitude de \dot{I} é $I = (2V/X) \text{sen}(\delta/2)$. Para uma linha sem perdas, a potência é a mesma em todos os pontos da linha. Portanto, a potência ativa pode ser dada pela equação 18.

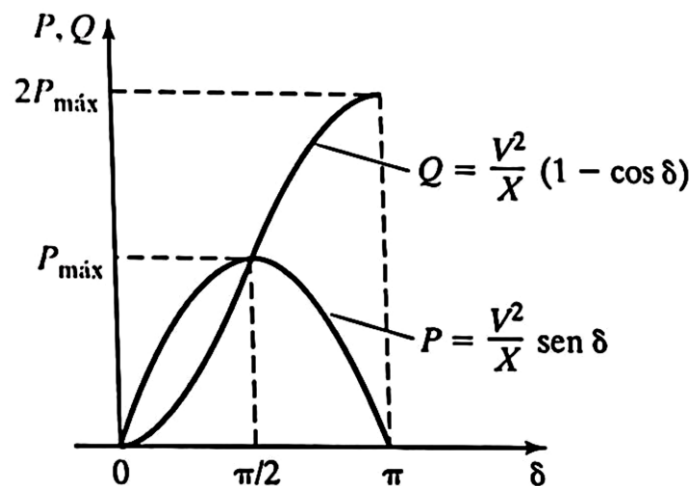
$$P = V_d I = \left(V \cos \frac{\delta}{2} \right) \left(\frac{2V}{X} \sin \frac{\delta}{2} \right) = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (18)$$

A potência reativa na barra receptora, Q_r , é igual e oposta à potência reativa, Q_s , fornecida pela fonte. Logo, a potência reativa Q para a linha, dada pela equação 19, é:

$$Q = Q_s = -Q_r = V I \sin \frac{\delta}{2} = V \left(\frac{2V}{X} \sin \frac{\delta}{2} \right) \sin \frac{\delta}{2} = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (19)$$

Com base nas equações 18 e 19, pode-se afirmar respectivamente que potência ativa é máxima quando $\delta = 90^\circ$ ($P_{MÁX} = V^2/X$) e que a potência reativa é máxima quando $\delta = 180^\circ$ ($Q_{MÁX} = 2V^2/X$) (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014). A Figura 9 mostra a potência ativa e reativa em função do ângulo δ .

Figura 9 - Potência em função do ângulo



Fonte: RASHID (2014).

Para um valor constante da reatância de linha X é possível controlar o fluxo de potência variando-se o ângulo δ . Entretanto, qualquer alteração na potência ativa também modifica a potência reativa demandada nas barras emissora e receptora (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014).

As variáveis controláveis permitem que o fluxo de potência e de corrente possa ser controlado pelos seguintes meios:

- 1) Através da aplicação de tensão no ponto médio, o que pode aumentar ou diminuir a magnitude da potência.
- 2) A aplicação de tensão em série com a linha e em quadratura de fase com o fluxo da

corrente pode aumentar ou diminuir a magnitude da corrente. Com o fluxo atrasado em 90° , há injeção de reativo.

- 3) Se uma tensão com magnitude e fase variável for aplicada em série com a linha, então essas variações de amplitude e ângulo de fase podem controlar ambos os fluxos de corrente, ativa e reativa. Para isso requer uma injeção de potência ativa e reativa em série.
- 4) O aumento ou diminuição dos valores da reatância provocam o aumento ou diminuição da potência transmitida. Para um dado valor do fluxo de potência, a variação da reatância provoca uma alteração proporcional do ângulo δ .
- 5) O fluxo de potência também pode ser controlado pela regulação das tensões nas barras emissora e receptora. Esse tipo de método de controle tem muito mais influência na potência reativa do que na ativa.

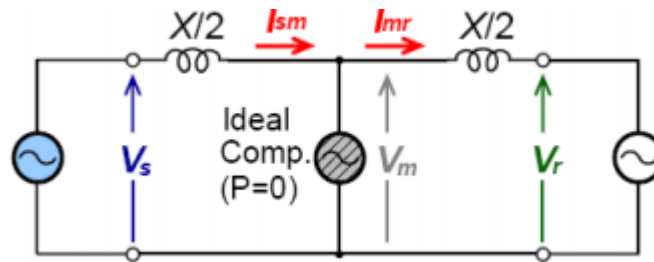
Assim, com base no exposto, pode-se observar que o fluxo de potência em uma linha de transmissão pode ser controlado através de uma aplicação de tensão em paralelo no ponto médio, variando a reatância da linha e de uma tensão com uma magnitude variável em série com a linha (RASHID, 2014), (OLIVEIRA, 2016).

Na próxima seção, será mostrado que o uso de uma fonte de tensão controlada no meio da linha pode aumentar a potência máxima transmissível da linha e ainda melhorar a estabilidade dinâmica do sistema, além de aumentar o limite de estabilidade estática.

2.4 PRINCÍPIO DA COMPENSAÇÃO EM PARALELO

O objetivo de se estabelecer uma compensação em paralelo em um sistema de transmissão é fornecer potência reativa à linha para aumentar o transporte de potência ativa. Deste modo, a compensação em paralelo permite conseguir reduzir a sobretensão da linha em condições de leve carregamento e manter os níveis de tensão dentro da faixa ideal em condições de sobrecarga, as quais ocasionam o afundamento de tensão. Para realizar uma análise desse tipo de compensação será considerada a conexão de um compensador ideal em paralelo com o ponto médio de uma dada linha de transmissão, como é ilustrado na Figura 10 (RASHID, 2014).

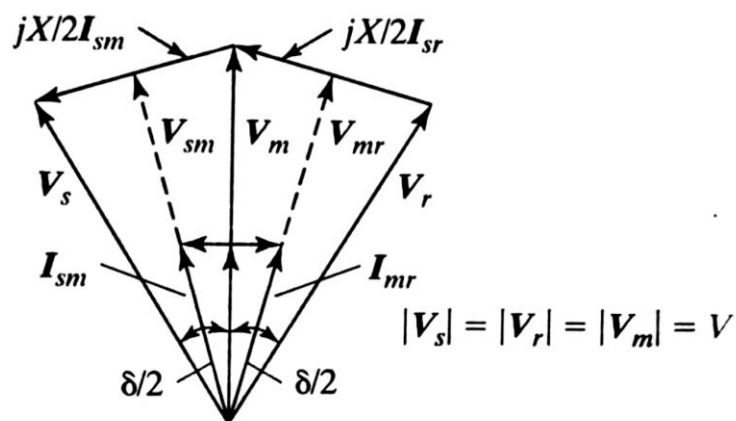
Figura 10 - Sistema de potência com duas máquinas



Fonte: Adaptado de RASHID (2014).

Admite-se também que a fonte ideal de reativos controla a tensão no ponto central da linha e eleva seu módulo para o mesmo valor das tensões terminais. Isto implica dizer que $V_m = V_s = V_r = V$. Generalizando, o compensador a ponto médio segmenta a linha de transmissão em duas partes iguais e independentes, onde o primeiro seguimento, com impedância de $jX/2$, transporta potência da barra emissora até o ponto médio e o segundo seguimento cuja impedância é idêntica ao primeiro transporta potência do ponto médio até a barra receptora (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014). Nesse sentido, um compensador ideal não tem perdas, ou seja, a potência ativa na barra transmissora é a mesma no ponto médio e na barra receptora com base no diagrama fasorial da Figura 11.

Figura 11 - Diagrama fasorial do sistema de potência com duas máquinas



Fonte: RASHID (2014).

Da Figura 11 é possível também concluir que como a corrente de compensação I_m está em quadratura com a tensão V_m . Desta maneira, não existe potência ativa fluindo através do compensador, ou seja, apenas potência reativa flui pela fonte V_m . Esta é uma conclusão importante porque permite uma síntese simplificada desta fonte (compensador) (GAMA, 1995).

É possível obter a magnitude da componente de tensão e corrente com base nas equações 15 e 17 respectivamente. Com estes dados, pode-se obter as equações 20 e 21:

$$V_{sm} = V \cos \frac{\delta}{4} \quad (20)$$

$$I_{sm} = \frac{4V}{X} \sin \frac{\delta}{4} \quad (21)$$

Com base nas equações 20 e 21, a potência ativa transmitida, P_p , dada pela equação 22, para esse tipo de compensação é:

$$P_p = V_{sm} I_{sm} = \frac{4V^2}{X} \sin \frac{\delta}{4} \cos \frac{\delta}{4} = \frac{2V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (21)$$

Se nenhuma compensação estiver presente, a potência transferida é dada pela expressão presente na equação 23:

$$P_p = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (22)$$

Comparando as equações 22 e 23 nota-se que a compensação reativa em derivação aumenta a capacidade de transmissão de potência ativa pela linha CA, em especial se $\delta > 30^\circ$ (WATANABE, 1998).

Nessa linha, a potência reativa Q_s na barra emissora, que é igual e oposta à receptora Q_r , é dada pela equação 24:

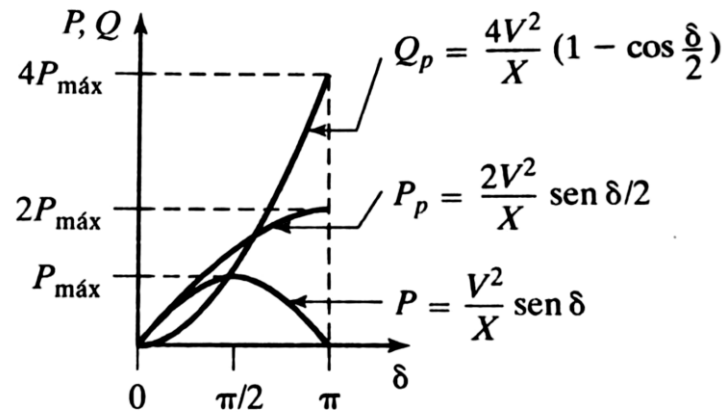
$$Q_s = -Q_r = V I \sin \frac{\delta}{4} = \frac{4V^2}{X} \sin^2 \left(\frac{\delta}{4} \right) = \frac{2V^2}{X} \left(1 - \cos \frac{\delta}{2} \right) \quad (23)$$

A potência reativa fornecida pela compensação paralela é dada pela equação 25:

$$Q_p = 2V I \sin \frac{\delta}{4} = \frac{8V^2}{X} \sin^2 \left(\frac{\delta}{4} \right) \quad (24)$$

Desse modo, a transferência de potência ativa e reativa será máxima, para as curvas P_p e Q_p , nesse tipo de compensação quando o ângulo $\delta = 180^\circ$. A Figura 12 mostra as curvas de potência ativa e reativa em função do ângulo δ (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014).

Figura 12 - Potência em função do ângulo



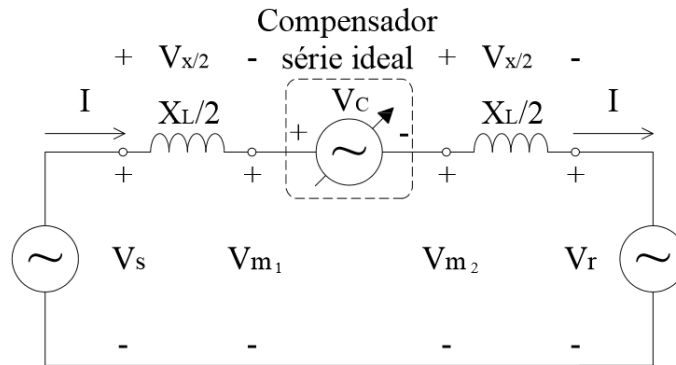
Fonte: RASHID (2014).

A potência ativa transmitida com a compensação em paralelo dobra com relação ao sistema não compensado, mas a custa de ampliar a demanda de potência reativa no compensador em paralelo e nas extremidades transmissora e receptora. Deve-se observar que no ponto médio da linha de transmissão é o melhor local para se instalar um compensador em paralelo, tendo em vista que neste ponto é onde ocorre o maior afundamento de tensão nas linhas não compensadas. Quando a compensação é feita em uma linha que os segmentos não são iguais o segmento com maior comprimento é o que determina a potência transmissível (RASHID, 2014), (MUTIZANO, 2007).

2.5 PRINCÍPIO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE

A compensação em série ocorre, basicamente, colocando-se uma tensão em série com a linha de transmissão para controlar o fluxo de corrente e, portanto, a transmissão de energia da barra emissora para a receptora. O compensador série ideal, representado pela fonte de tensão V_c , é conectado no ponto médio de uma linha de transmissão, como mostra a Figura 13 (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

Figura 13 - Compensador série ideal de uma linha de transmissão



Fonte: Adaptado de RASHID (2014).

A corrente que flui pela linha é expressa pela equação 26:

$$\dot{I} = \frac{V_s - V_r - V_c}{jX} \quad (25)$$

Se a tensão V_c está em quadratura em relação à corrente de linha, o compensador série não poderá fornecer ou absorver potência ativa. Ou seja, a potência nos terminais da fonte V_c só poderá ser reativa. Isso significa dizer que a impedância equivalente da linha, seja ela capacitiva ou indutiva, pode substituir a fonte de tensão V_c (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014). Assim, a impedância equivalente da linha de transmissão é dada pela equação 27:

$$X_{eq} = X - X_{comp} = X(1 - r) \quad (26)$$

Onde r é definido pela expressão presente na equação 28:

$$r = \frac{X_{comp}}{X} \quad (27)$$

E r é o grau da compensação em série, $0 \leq r \leq 1$. X_{comp} é a reatância do compensador série ideal, que é positiva quando a compensação é indutiva e negativa quando for capacitiva. Utilizando a equação 17 e o valor da impedância equivalente da linha com compensação série (X_{eq}), a corrente na linha é obtida através da equação 30:

$$I = \frac{2V}{X(1 - r)} \sin \frac{\delta}{2} \quad (30)$$

Utilizando a equação 18 e a expressão da impedância X_{eq} , a potência ativa que circulará

pela linha é dada pela equação 31:

$$P_c = V_c I = \frac{V^2}{X(1-r)} \text{sen}\delta \quad (31)$$

A equação 31 mostra que a potência ativa transmitida pode ser aumentada consideravelmente variando-se a taxa de compensação série entre os limites $0 < r < 1$ (WATANABE, 1998).

Deve-se lembrar que a tensão da fonte controlada está em quadratura com a corrente de linha I . Dessa forma, o valor da potência ativa fornecida pela fonte é nulo. Por outro lado, a potência reativa fornecida pelo compensador depende da taxa "r" de reativos que se deseja compensar (WATANABE, 1998).

Utilizando a equação 19, a potência reativa, Q_c , nos terminais da fonte V_c é dada pela equação 32:

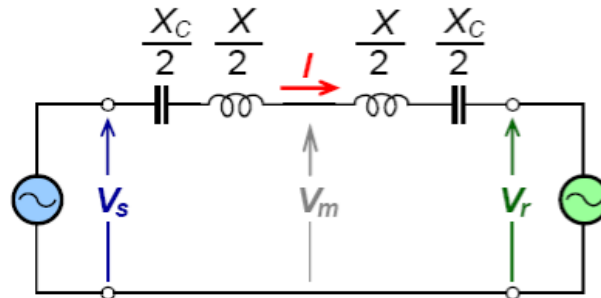
$$Q_c = I^2 X_{\text{comp}} = \frac{2V^2}{X} \frac{r}{1-r} (1 - \cos\delta) \quad (32)$$

Caso a fonte V_c esteja apenas compensando energia reativa capacitiva, a corrente de linha se encontrará adiantada 90° em relação à tensão V_c . Caso a fonte permita a compensação indutiva, a corrente de linha estará atrasada 90° em relação à tensão V_c . Utiliza-se a compensação indutiva quando é necessário diminuir a energia reativa que flui na linha. Nos dois casos, compensação indutiva e capacitiva, nenhuma energia ativa é absorvida pela fonte V_c . Todavia, a utilização da compensação capacitiva é a mais utilizada (MASUDA, 2006), (RASHID, 2014).

A impedância capacitiva em série pode diminuir a impedância série efetiva da linha, a partir da barra emissora, o que proporciona o aumento da capacidade de transmissão de energia (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014). A Figura 14 mostra uma linha com compensação em série utilizando capacitor em dois segmentos idênticos.

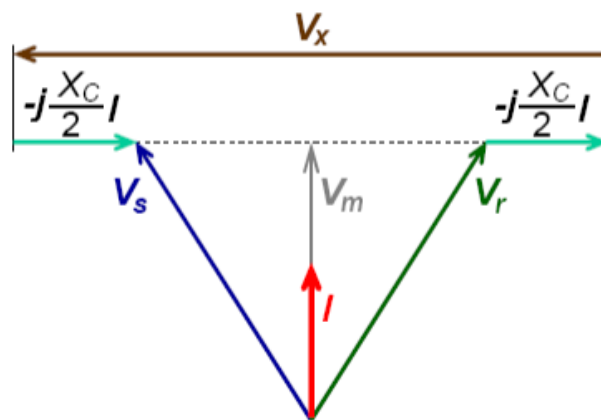
Supondo que as magnitudes das tensões nas barras permaneçam constantes e iguais a V (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014). Para $V_s = V_r = V$, os fasores de tensão e corrente correspondentes são indicados na Figura 15.

Figura 14 - Sistema com duas máquinas



Fonte: Adaptado de RASHID (2014).

Figura 15 - Diagrama fasorial



Fonte: Adaptado de RASHID (2014).

Admitindo que as tensões nas extremidades sejam as mesmas, a magnitude da tensão total na indutância em série da linha, $V_x = 2V_{x/2}$, é aumentada pela magnitude da tensão oposta sobre o capacitor, $-V_c$. Isso resulta no aumento da corrente de linha (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014).

A equação 31 nos mostra que a potência transmitida pode ser expressivamente aumentada variando-se o grau de compensação série, r . As curvas da potência ativa e reativa em função do ângulo δ são mostradas na Figura 16.

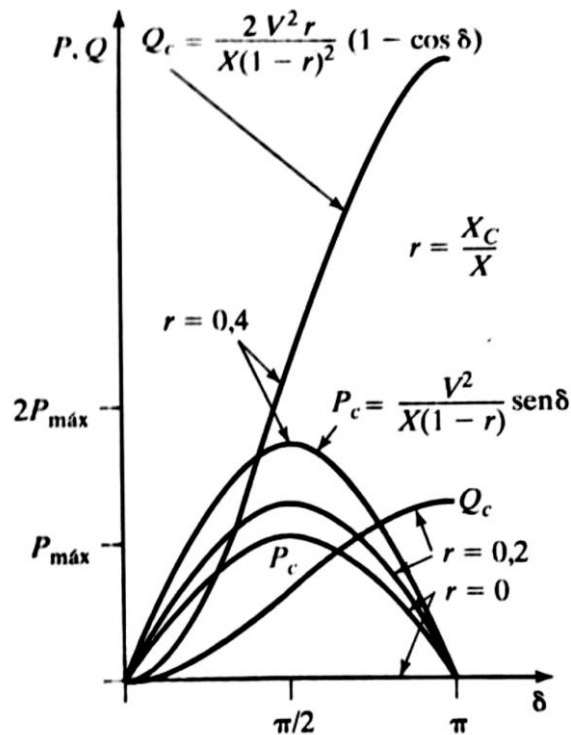
A potência transmitida P_c aumenta rapidamente com o aumento do grau de compensação em série, r . Deste modo, a potência reativa fornecida pelo capacitor série aumenta de forma acentuada com r e varia com δ de modo semelhante ao da potência reativa da linha, Q_c (RASHID, 2014).

A equação 18 mostra que uma grande impedância série reativa de uma linha de transmissão longa pode limitar a capacidade de transmissão de potência. Nesse panorama, a impedância do capacitor da compensação série consegue reduzir uma parte da reatância real da

linha, assim, a impedância efetiva total da linha é reduzida, o que em efeitos práticos é como se a linha tivesse ficado menor (RASHID, 2014).

A Figura 16 apresenta as curvas de potência ativa transmitida e de potência reativa fornecida pelo compensador série em função do ângulo de potência (δ).

Figura 16 - Potência em função do ângulo



Fonte: RASHID (2014).

Vale ressaltar que o fluxo de potência ativo sempre se dá a partir do gerador para a carga, mas o fluxo de potência reativa pode ter os dois sentidos, dependendo das características do sistema. Entretanto, de modo geral, o sistema opera com ângulos de δ pequenos, assim tem-se que a potência reativa tende a fluir da maior tensão para a menor tensão em módulo (CAVALIERI, 2001).

Nesse cenário, os compensadores série e paralelo são, de modo geral, equipamentos destinados a atuarem no controle de parâmetros importantes no sistema elétrico, como a impedância, amplitude e ângulos de defasagem entre as tensões terminais nas barras. Assim, os controladores FACTS se mostram efetivos, pois proporcionam a regulação dos níveis de tensão e o fluxo de potência ativa além de eliminar problemas relacionados a congestionamento e despacho de potência (MIASAKI, 2006).

A utilização dos controladores FACTS proporciona uma maior flexibilidade aos

sistemas elétricos de potência, o que implica em uma maior resiliência as variações nas suas características operacionais, ou seja, ele se adapta mais facilmente as mudanças em suas características de operação, o que não é algo obtido de forma trivial nos sistemas mais tradicionais (MIASAKI, 2006).

3 FACTS – FLEXIBLE ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION SYSTEM

3.1 HISTÓRIA DOS CONTROLADORES FACTS

O termo FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*), que significa sistemas de transmissão flexível em corrente alternada, surgiu em meados de 1980 e foi criado por Narain Hingorani através de seu artigo denominado “*Power Eletronics in Eletric Utilies/Role of Power Eletronics in Future Power System*”, mas a utilização desses controladores já era bem mais antiga, da década de 60 (MASUDA, 2006).

No começo os dispositivos FACTS foram norteados somente pelo uso de tiristores de potência, mas em seguida evoluíram com o desenvolvimento de novos semicondutores autocomutados. Desse modo, os dispositivos convencionais baseados em tiristores possuem limitações relacionadas com o excesso de perdas e a velocidade devido ao chaveamento destes equipamentos. A maior novidade trazida pelos controladores FACTS é a utilização dos dispositivos de controle e conversão eletrônica em altos níveis de potência que são utilizados nos sistemas elétricos. (MASUDA, 2006), (PADIYAR, 2007). Atualmente os FACTS podem ser divididos em quatro gerações.

Na primeira geração os controladores FACTS utilizam o tiristor para a realização do chaveamento. O controle das chaves semicondutoras, como o tiristor, permite aos controladores realizarem rápidas alterações nas características do sistema elétrico, utilizando a energia de forma mais eficiente e econômica. Alguns dos equipamentos que pertencem a essa geração são os *Thyristor Controlled Reactor* – TCR (Reator Controlado a Tiristor), o *Thyristor Switched Capacitor* – TSC (Capacitor Chaveado a Tiristor) e o *Static Var Compensator* – SVC (Compensador Estático de Reativos). Esse grupo de compensadores apresentados são os utilizados em paralelo com a rede. Os demais compensadores que pertencem a essa geração, mas estão conectados em série com a rede são o *Thyristor Switched Series Capacitor* – TSSC (Capacitor Série Chaveado a Tiristor) e o *Thyristor Controlled Series Capacitor* – TCSC (Capacitor Série Controlado a Tiristor) (CAVALIERI, 2001).

A segunda geração é marcada pelo uso de equipamentos que utilizam de chaves autocomutáveis como IGBT ou GTO. O controlador conectado em paralelo que representa essa geração é o *Advanced Static Var Compensator* – ASVC (Compensador Estático de Reativos Avançado), cujo nome usual é compensador estático (STATCOM). O representante dessa geração que é instalado em série com a rede é o *Static Synchronous Series Compensator*– SSSC (Compensador Série Estático Síncrono) (MIASAKI, 2006).

Já a terceira geração dos FACTS é composta por diversos conversores estáticos com fonte de tensão do tipo SVC. Um controlador que representa essa geração é o Controlador Unificado de Fluxo de Potência (*Unified power flow controller* – UPFC) que é caracterizado por ser a associação de compensadores em paralelo e em série. Esse controlador é basicamente a combinação de um STACOM com um SSSC, conectados através de um ramo em corrente contínua (MIASAKI, 2006).

A quarta e última geração é marcada pela integração de equipamentos em linhas distintas. Fazem parte dessa classe o *Power Flow Controller* – IPFC (Controlador de Fluxo de Potência entre Linhas) e o Compensador Estático Conversível (CEC), dentre outros (MIASAKI, 2006).

Todavia, com o desenvolvimento da eletrônica de potência, evoluções graduais e o aperfeiçoamento das tecnologias de chaveamento eletrônico como os GTO e IGBT, por exemplo, irão gerar novos dispositivos com uma maior robustez em comparação com os já existentes (SILVA, Christiano, 2014).

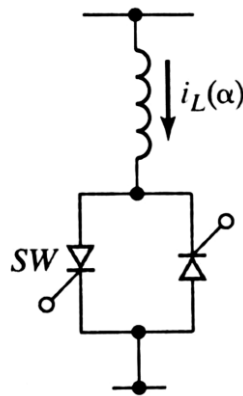
3.2 COMPENSADORES EM PARALELO

Além da classificação por gerações de controladores alguns autores como Narain G. Hingorani dividem os dispositivos FACTS em três categorias básicas, os controladores série, controladores paralelos e controladores série-paralelo. A compensação em paralelo ocorre basicamente através da injeção de uma corrente no ponto de conexão do compensador. Isso pode ser feito variando a impedância paralela de uma fonte de tensão ou uma fonte de corrente. Essa corrente injetada deve estar em quadratura com a tensão de linha, pois esse tipo de compensação somente fornece ou consome potência reativa variável. Para controlar a corrente injetada ou a tensão de compensação podem ser utilizados conversores de potência com tiristores, tiristores de desligamento pela porta (GTOs), tiristores controlados por MOS (MCTs) ou tiristores bipolares de porta isolada (IGBTs).

3.2.1 Reator Controlado a Tiristor (TCR)

O Reator Controlado a Tiristor consiste, geralmente, em um reator fixo com indutância L e uma chave bidirecional com tiristores, SW, como ilustra a Figura 17.

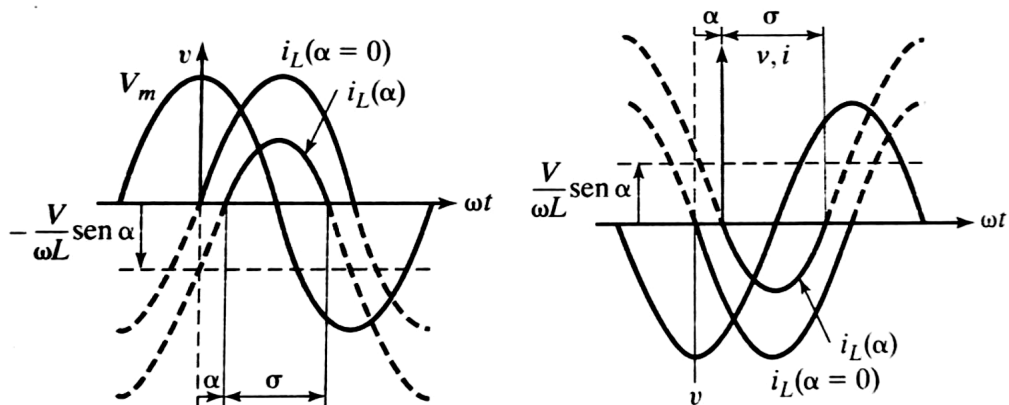
Figura 17 - Circuito do TCR



Fonte: RASHID (2014).

A corrente que percorre o indutor pode ser controlada desde zero até o valor máximo, variando-se o ângulo de disparo α do tiristor. Isso pode ser melhor observado na Figura 18, onde σ é o ângulo de condução da chave, de modo que $\sigma = \pi - 2\alpha$ (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014).

Figura 18 - Formas de onda de tensão e corrente



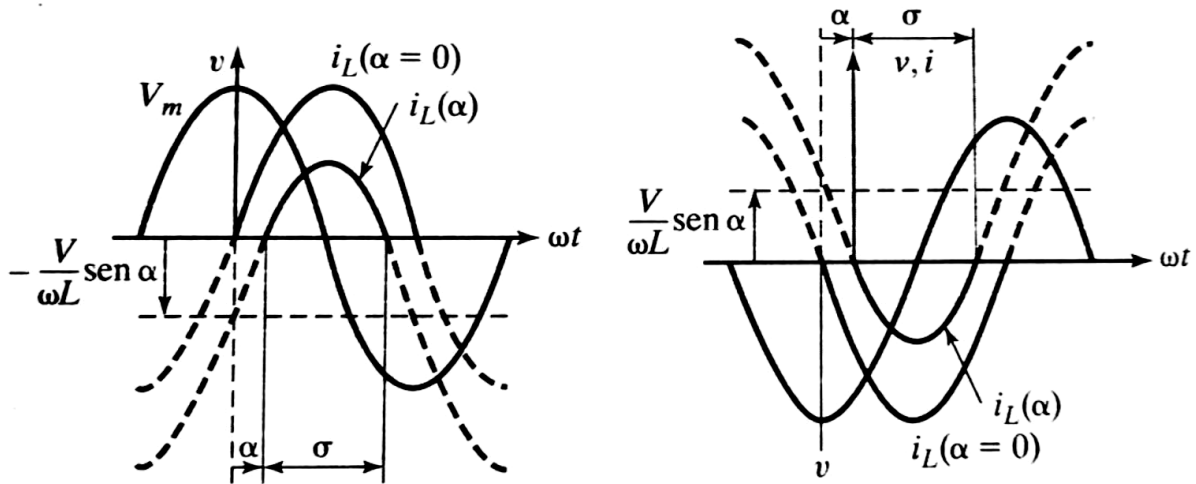
Fonte: RASHID (2014).

Quando $\alpha = 0$, a chave é permanentemente fechada e não tem nenhum efeito sobre a corrente que circula no reator. Se a chave for acionada de forma retardada por um ângulo α com relação à tensão de pico V_m da tensão de alimentação, $v(t) = V_m \cos(\omega t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t)$, a corrente instantânea do indutor, dada pela equação 29, pode ser expressa em uma função de α , que é válida para $\alpha \leq \omega t \leq \pi - \alpha$ (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014).

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) dt = \frac{V_m}{\omega L} [\text{sen}(\omega t) - \text{sen}\alpha] \quad (28)$$

Para o intervalo subsequente do semiciclo negativo, os sinais dos termos na equação 33 se invertem. O termo $(V_m/\omega L)\text{sen}\alpha$ na equação 33 é uma constante dependente de α que desloca-se para baixo durante os semiciclos positivos de corrente positiva e para cima durante os semiciclos negativos. A corrente $i_L(t)$ está em seu valor máximo quando $\alpha = 0$ e é nula quando $\alpha = \pi/2$. As formas de onda de $i_L(t)$ para os vários valores de α ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$) são mostrados na Figura 19 (HINGORANI et al., 1999), (RASHID, 2014).

Figura 19 - Efeito do ângulo de disparo



Fonte: RASHID (2014).

Partindo da equação 33, a corrente eficaz fundamental do reator pode ser expressa como pode ser visto na equação 34:

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \text{sen} 2\alpha \right) \quad (29)$$

A admitância em função de α pode ser expressa pela equação 35:

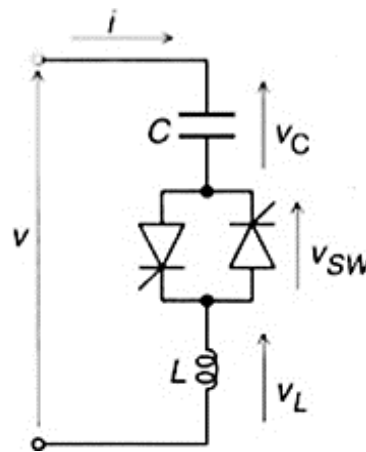
$$Y_L(\alpha) = \frac{I_{LF}}{V} = \frac{1}{\omega L} \left[1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin(2\alpha) \right] \quad (30)$$

Deste modo, o compensador pode variar a impedância, $Z_L(\alpha) = 1/Y_L(\alpha)$, e a corrente de compensação. Entretanto, por conta do controle do ângulo de fase, as correntes harmônicas de baixa ordem também se fazem presente. Logo, faz-se necessário o uso de filtros passivos para se eliminar essas correntes harmônicas. Transformadores Y- Δ são utilizados normalmente nas barras emissoras para evitar a injeção de harmônicos nas linhas de transmissão (MASUDA, 2006), (RASHID, 2014).

3.2.2 Capacitor Chaveado a Tiristor (TSC)

O Capacitor Chaveado a Tiristor é uma capacitância fixa C, uma chave bidirecional com tiristores e um reator limitador de pico relativamente pequeno, L (responsável por limitar a corrente do ramo). A Figura 20 mostra o circuito equivalente (RASHID, 2014), (HINGORANI et al., 1999).

Figura 20 - Circuito do TSC



Fonte: Adaptado de RASHID (2014).

Analisando a Figura 20, nota-se a presença do indutor L cuja finalidade é reduzir a corrente de inrush e evitar ressonância do banco com o sistema elétrico (BRITO, 2015).

Usando as leis de Kirchhoff no domínio de s, Laplace, obtém-se a equação 36:

$$V(s) = \left(Ls + \frac{1}{Cs} \right) I(s) + \frac{V_{C0}}{s} \quad (31)$$

Onde V_{c_0} é a tensão inicial do capacitor. Para uma dada tensão senoidal, $v = V_m \text{sen}(\omega t + \alpha)$, a equação 36 pode ser resolvida para a corrente instantânea $i(t)$, logo obtem-se a equação 37:

$$i(t) = V_m \frac{n^2}{n^2 + 1} \omega C \cos(\omega t + \alpha) - n \omega C \left(V_{c_0} - \frac{n^2 V_m}{n^2 + 1} \text{sen} \alpha \right) \text{sen}(\omega_n t) - V_m \omega C \cos(\alpha) \cos(\omega_n t) \quad (32)$$

Dado que ω_n é a frequência natural do circuito LC, tem-se a equação 38:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = n \omega \quad (33)$$

Deste modo, para se obter um chaveamento sem anomalias transitórias, os últimos dois termos no lado direito da equação 37 devem ser iguais a zero, isto é, devem satisfazer duas condições de existência:

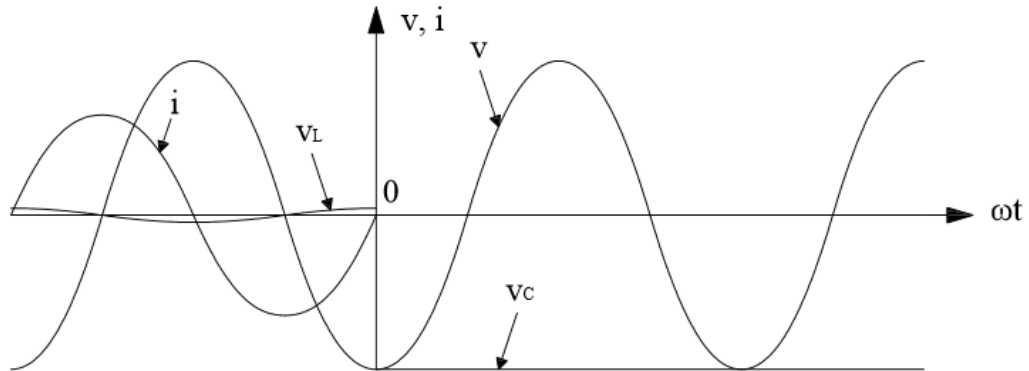
- 1) Condição: $\cos \alpha = 0$ ou $\text{sen} \alpha = 1$;
- 2) Condição: $V_{c_0} = \pm V_m n^2 / (n^2 + 1)$.

A primeira condição nos diz que o capacitor deve ser fechado no pico da tensão de alimentação. A segunda condição nos fala que o capacitor deve ser carregado a uma tensão superior a tensão de alimentação antes do disparo (RASHID, 2014). Logo, para que a operação não produza transitório, a corrente em regime permanente deve ser dada pela equação 39:

$$i(t) = V_m \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \cos(\omega t + 90^\circ) = V_m \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \text{sen}(\omega t) \quad (34)$$

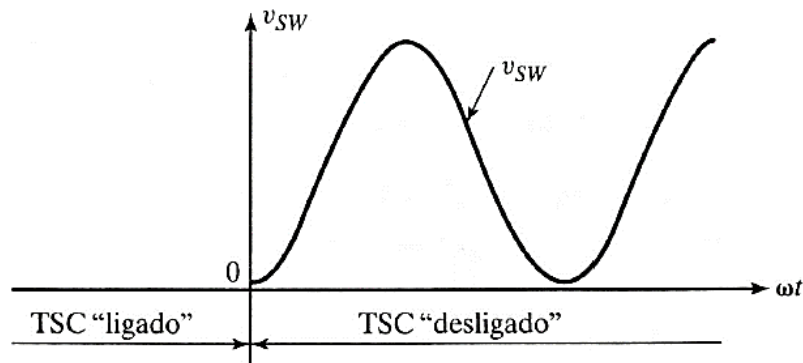
O TSC pode ser desconectado da rede na corrente igual a zero pela remoção prévia do sinal que comanda o tiristor. Todavia, na passagem da corrente pelo zero a tensão no capacitor já é máxima, atingindo assim o seu valor de pico $V_{c_0} = \pm V_m n^2 / (n^2 - 1)$. Nesse sentido, o capacitor desconectado permanece carregado com essa tensão, como pode ser visto na Figura 21, assim, como consequência, a tensão no controlador TSC quando o mesmo não se encontra em condução varia entre zero e valor pico a pico da tensão CA aplicada, como indica a Figura 21 (MASUDA, 2006), (RASHID, 2014), (HINGORANI et al., 1999).

Figura 21 - Tensões e correntes instantâneas



Fonte: Adaptado de RASHID (2014).

Figura 22 - Efeito do ângulo de disparo

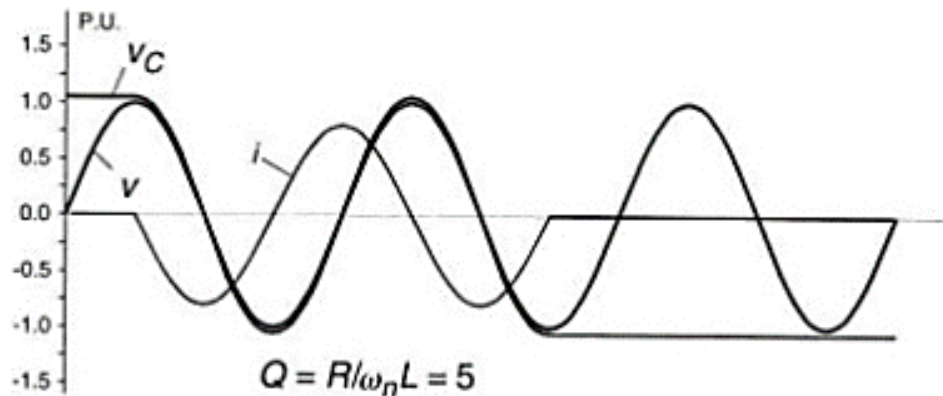


Fonte: RASHID (2014).

Nesse panorama, se a tensão sobre o capacitor desconectado continuar inalterada, o TSC pode voltar a ser ligado, sem nenhum transitório, no pico adequado da tensão CA aplicada. Essa situação é ilustrada graficamente na Figura 23, quando o capacitor é positivamente carregado, e na Figura 24, quando é negativamente carregado (RASHID, 2014), (HINGORANI et al., 1999).

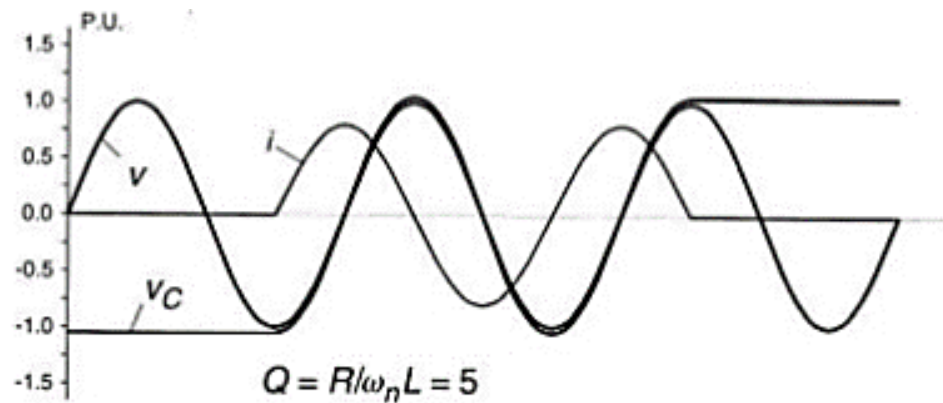
Na prática, a tensão no capacitor diminui vagarosamente entre os períodos em que é acionado, o que pode fazer com que a tensão e a impedância do sistema variem de maneira abrupta, tornando bastante complicada qualquer estratégia de controle. Deste modo, o capacitor deve ser reconectado em uma tensão residual entre zero e $\pm V_m n^2 / (n^2 - 1)$.

Figura 23 - Capacitor positivamente carregado



Fonte: RASHID (2014).

Figura 24 - Capacitor negativamente carregado



Fonte: RASHID (2014).

Isso pode ser realizado com níveis mínimos de perturbação transitória se o controlador, TSC, for ligado nos exatos instantes em que a tensão residual no capacitor e a tensão CA aplicada forem iguais. Assim, o TSC deve ser acionado quando a tensão sobre ele for zero, ou seja, com o chaveamento em tensão zero. Caso contrário, haverá transitórios de chaveamento. Os transitórios ocorrem por causa da taxa de variação da tensão em relação ao tempo ser diferente de zero, $dv/dt \neq 0$, no instante do chaveamento que, sem o reator em série, resulta em uma corrente instantânea através do capacitor $i = Cdv/dt$ (RASHID,2014),(HINGORANI et al., 1999).

As regras para que não ocorra transitórios no chaveamento são:

1) Quando a tensão residual no capacitor V_{c_0} for menor do que o pico da tensão CA, V_m ($V_{c_0} < V_m$) então o TSC deverá ser acionado quando a tensão instantânea CA, $v(t)$, tornar-se igual àquela no capacitor, $v(t) = V_{c_0}$;

2) Quando a tensão residual no capacitor V_{c_0} for igual ou maior do que o pico da tensão CA ($V_{c_0} \leq V_m$), então a tensão deve ser acionada quando a tensão instantânea estiver em seu valor de pico $v(t) = V_m$, de modo que aquela através do TSC tenha um valor mínimo, ou seja, $V_{c_0} - V_m$.

Quando a chave for acionada durante m_{on} ciclos e desligada durante m_{off} ciclos de tensão de entrada, a corrente rms no capacitor será encontrada a partir das equações 40, 41 e 42.

$$I_c = \sqrt{\frac{m_{on}}{2\pi(m_{on} + m_{off})} \int_0^{2\pi} i^2(t) d(\omega t)} \quad (40)$$

$$I_c = \sqrt{\frac{m_{on}}{2\pi(m_{on} + m_{off})} \int_0^{2\pi} \left(-V_m \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \text{sen}(\omega t) \right)^2 d(\omega t)} \quad (41)$$

$$I_c = \frac{n^2 V_m}{(n^2 - 1) \sqrt{2}} \omega C \sqrt{k} \quad (42)$$

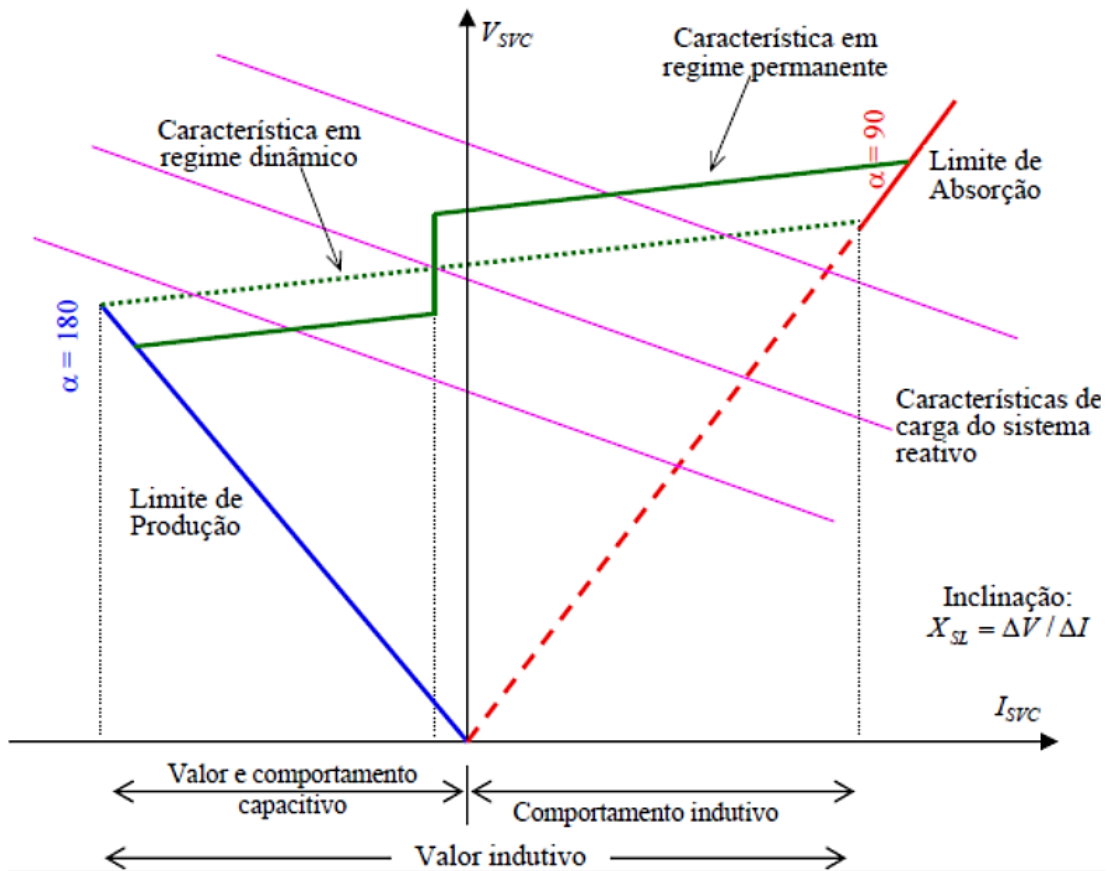
Onde $k = m_{on}/(m_{on} + m_{off})$ é denominado de ciclo de trabalho da chave.

A capacidade de isolamento do semiconductor deve ser o dobro da tensão de pico da rede, garantindo assim a integridade do circuito de chaveamento (GOMES et al., 2018).

3.2.3 Compensador Estático de Reativos (SVC)

Quando se utiliza apenas um tipo de controlador, TCR ou TSC, é possível obter apenas um tipo de compensação, a de reativo indutivo ou a de reativo capacitivo. Todavia, na grande maioria das aplicações é desejável se ter a possibilidade de realizar ambos os tipos de compensação. O Compensador Estático de Reativos, SVC, é constituído basicamente por um TCR em paralelo com um ou mais TSC's. A curva típica de tensão por corrente deste dispositivo, como mostra a Figura 25, é a soma da característica estática do TCR com o TSC. Tem-se um controle no chaveamento de capacitores e reatores e com isso a saída reativa pode variar os valores capacitivos e indutivos dentro da faixa de operação do SVC (MIYASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

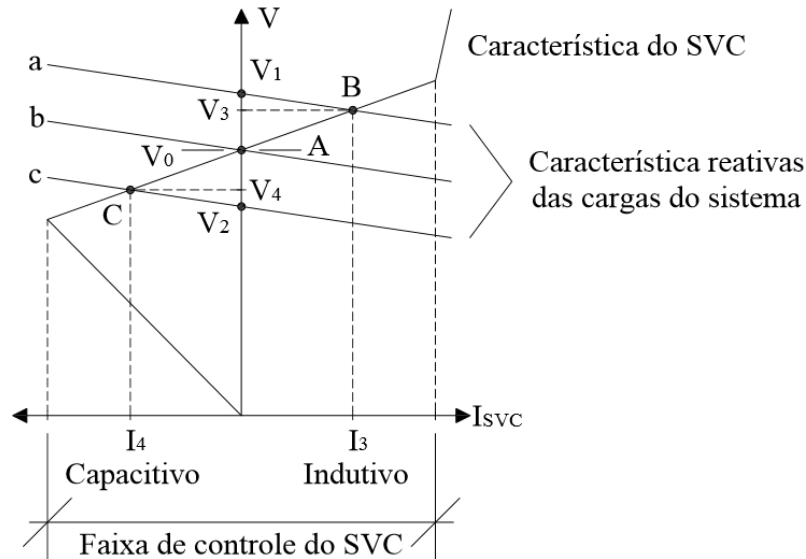
Figura 25 - Faixa de compensação de reativos do SVC



Fonte: DA COSTA (2016).

A Figura 25 mostra a curva característica de operação $V \times I$ do SVC. O comportamento da curva demonstra que quando o ângulo de disparo dos tiristores é configurado para estar em 180° , o capacitor fixo é responsável pela produção de corrente reativa total, pois o TCR não está operando. Por outro lado, quando o ângulo de disparo dos tiristores está em 90° , o indutor L_{TCR} está totalmente inserido e o SVC se encontra no limite de absorção de corrente reativa (ALMEIDA, 2016).

A Figura 26 apresenta a solução gráfica para as características do sistema e do SVC.

Figura 26 - Característica $V \times I_{SVC}$ 

Fonte: Adaptado de ALMEIDA (2016)

São apresentadas três características possíveis, correspondendo a três valores de tensão da rede. A reta b representa as condições nominais do sistema e intercepta a curva característica do SVC no ponto A onde $V = V_0$ e $I_{SVC} = 0$. Se a tensão da rede aumenta no ponto de acoplamento (devido a um decréscimo de carga), a tensão V aumenta para V_1 sem a presença do SVC (reta a). Com o SVC, o ponto de operação desloca-se para o ponto B, absorvendo corrente indutiva I_3 e mantendo a tensão em V_3 . Se a tensão da rede diminui no ponto de acoplamento (devido a um aumento na carga), a tensão V decresce para V_2 sem o SVC (reta c). Com o SVC, o ponto de operação move-se para o ponto C, injetando corrente capacitiva na barra e mantendo a tensão em V_4 . Como se pode notar, se a inclinação da característica do SVC fosse nula (compensador ideal), a tensão seria mantida no ponto A para ambos os casos considerados (ALMEIDA, 2016).

A reatância equivalente do SVC pode ser determinada através da equação 43.

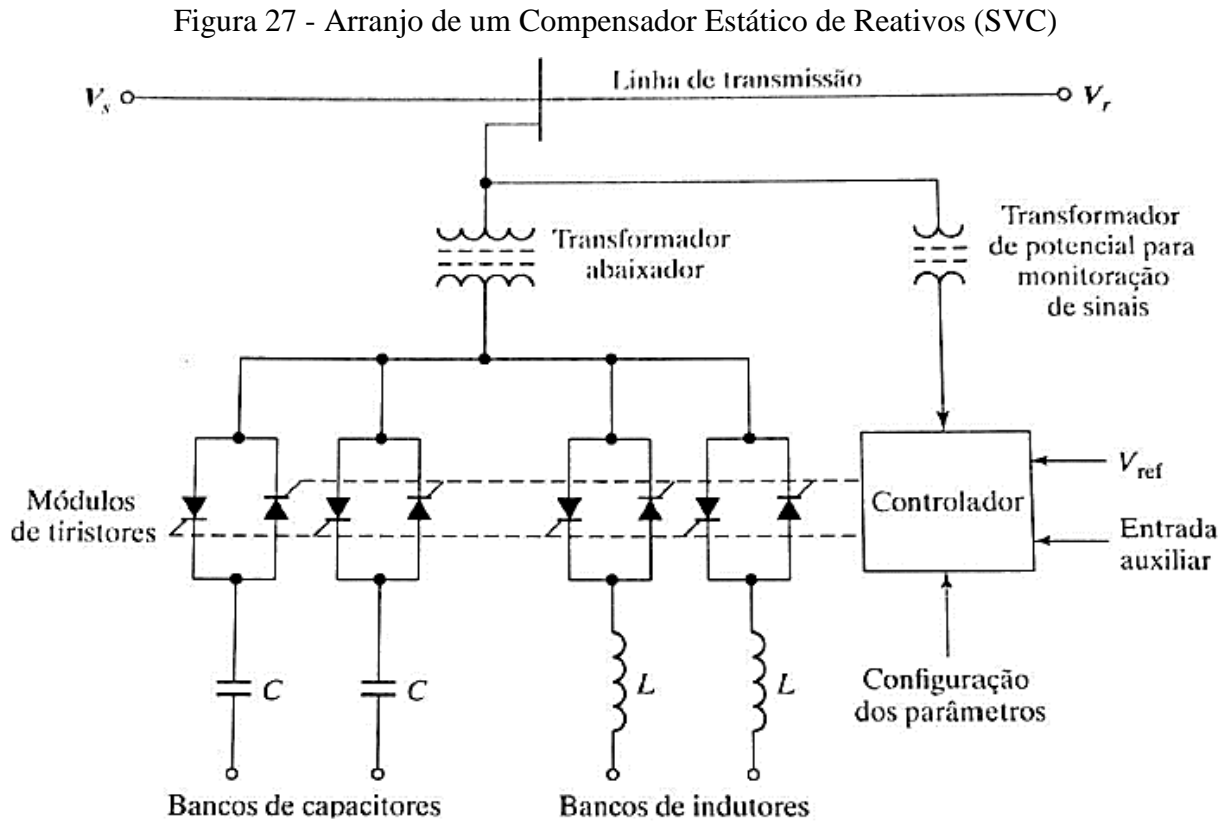
$$X_{SVC}(\alpha, L, C) = \frac{\pi\omega L}{2\alpha - \sin(2\alpha) - \pi\omega^2 LC} \quad 43$$

Sendo L a indutância do TCR do SVC, C a capacitância do TSC do SVC e X_{SVC} a reatância equivalente do SVC.

Através da equação 44 é possível determinar o valor da potência reativa do SVC em função da tensão de linha (V_{linha}), da reatância indutiva (X_L), da reatância capacitiva (X_C) e do ângulo de disparo α dos tiristores do TCR.

$$Q_{SVC} = V_{\text{linha}}^2 \frac{X_C(2\pi - \alpha + 2\alpha) - \pi X_L}{\pi X_C X_L} \quad (44)$$

A Figura 27 mostra um arranjo esquemático do SVC.

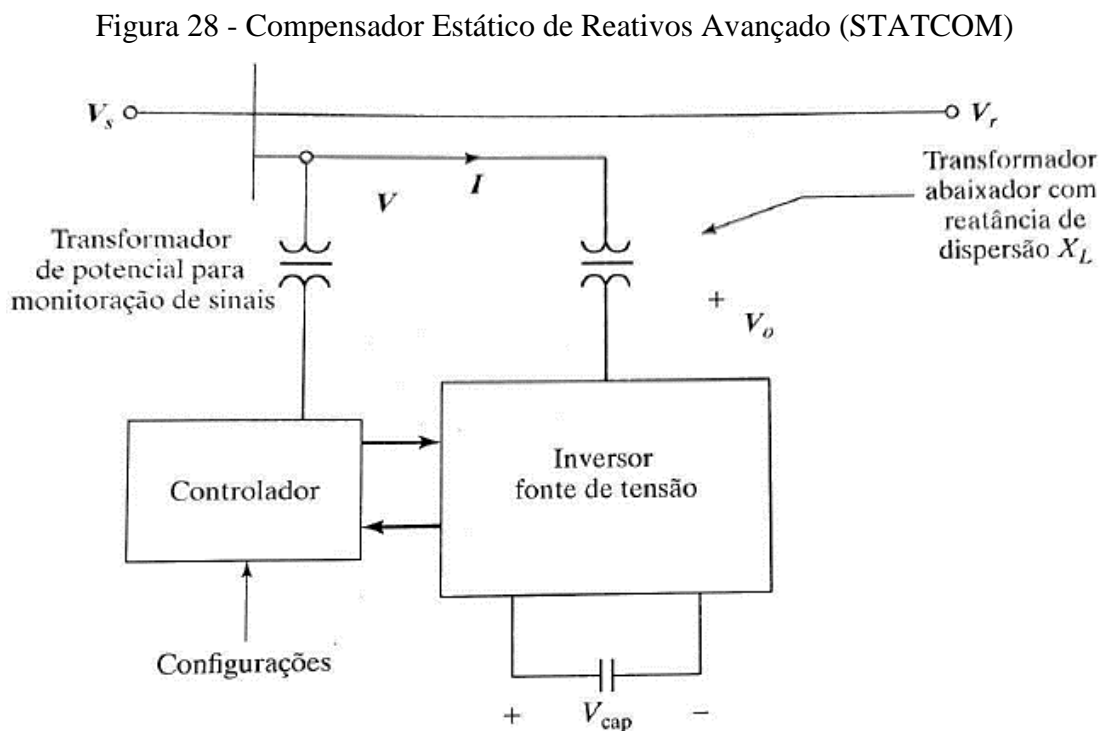


Fonte: RASHID (2014).

Os elementos reativos do compensador em questão são conectados a linha de transmissão através de um transformador abaixador para reduzir os níveis de tensão do sistema. O sistema de controle determina o tempo exato de disparo dos reatores com base em uma estratégia predeterminada. Tal estratégia geralmente procura manter os níveis de tensão da linha de transmissão em um valor fixo. Por esse motivo, o sistema de controle tem em sua entrada um sistema de referência de tensão dada através de um transformador de potencial. Assim, o sistema de controle assegura que a tensão compensada de saída mantenha-se quase sempre constante (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

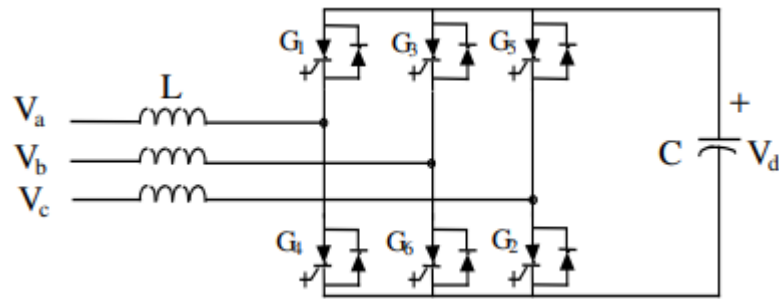
3.2.4 Compensador Estático de Reativos Avançado (STATCOM)

O Compensador Estático de Reativos Avançado, também conhecido simplesmente como compensador estático ou STATCOM, pode ser compreendido basicamente como um inversor de tensão, como mostra a Figura 28. A configuração do STATCOM utiliza um capacitor e um inversor de tensão para produzir uma fonte controlada de tensões trifásicas. A estrutura básica, mostrada na Figura 29, utiliza chaves eletrônicas auto-comutadas para formar o inversor. Cada chave é composta por um GTO em anti-paralelo com um diodo, dessa forma pode-se bloquear a corrente apenas em um sentido. O GTO poderia ser substituído por um IGCT ou IGBT (DECKMANN; POMILIO, [2009?]).



Fonte: RASHID (2014).

Figura 29 - Inversor de tensão



Fonte: DECKMANN; POMILIO ([2009?]).

Normalmente um inversor possui uma fonte no lado CC para conversão em potência CA. Na aplicação como compensador reativo, basta utilizar capacitores no lugar da fonte CC, uma vez que o conversor não entrega potência ativa para a rede na qual está conectada. Quando o STATCOM é conectado à rede através do controle das chaves é possível regular a tensão média sobre o capacitor. Se a tensão de linha, V , estiver em fase com a tensão na saída do conversor (DECKMANN; POMILIO, [2009?]).

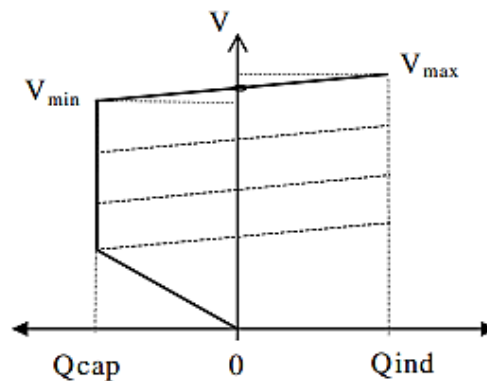
Se a tensão cair, o inversor deve sintetizar uma corrente adiantada de 90° da tensão no ponto de acoplamento, o que equivale a ter um efeito capacitivo, ou seja, o inversor “entrega” reativos à rede. Se a tensão da rede subir, o inversor trata de absorver reativos da rede, produzindo uma corrente que esteja atrasada de 90° em relação à tensão. Em ambos os casos o efeito é de regular a tensão da rede (DECKMANN; POMILIO, [2009?]).

É possível regular a tensão da rede através da troca controlada de reativos com a rede, ou seja, controlando-se o módulo e a fase da corrente do inversor, que se soma à corrente da carga (DECKMANN; POMILIO, [2009?]). Se a tensão de linha, V , estiver em fase com a tensão na saída do conversor, V_0 , e tiver a mesma magnitude de forma que $V \angle 0^\circ = V_0 \angle 0^\circ$, não poderá existir nem um fluxo de corrente para dentro ou para fora do conversor e, portanto, não haverá troca de potência reativa com a linha. Caso a tensão do conversor seja aumentada, a diferença de tensão entre V e V_0 aparece através da reatância de dispersão do transformador abaixador. Deste modo, a corrente ficará adiantada de 90° com relação à tensão V e o compensador se comportará como um capacitor, gerando energia reativa. Nesse sentido, se $V < V_0$, o compensador atrai uma corrente atrasada de 90° da tensão no ponto de acoplamento, atuando como um indutor, absorvendo energia reativa. Esse compensador funciona essencialmente como um compensador síncrono, onde a excitação pode ser menor ou maior que a tensão no terminal. Esse tipo de operação permite o controle da potência reativa, mas de forma muito mais veloz especialmente com a utilização de conversores de comutação forçada, como GTO's,

MCT's ou IGBT's (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

A característica estática do STATCOM é mostrada na Figura 30. Pelo fato de poder absorver e injetar reativos na rede, uma característica simétrica, em termos da potência reativa, é disponibilizada. Devido aos recursos de controle das chaves semicondutoras, a capacidade reativa do STATCOM não se reduz sob baixa tensão, como é o caso do TCR, do TSC e do SVC (DECKMANN; POMILIO, [2009?]).

Figura 30 - Característica estática do STATCOM



Fonte: DECKMANN; POMILIO ([2009?]).

Algumas das principais características do STATCOM são:

- 1) uma larga faixa de operação que proporciona reatância capacitiva total mesmo quando a tensão é baixa;
- 2) especificação nominal menor do que a do equivalente convencional, SVC, para conseguir a mesma estabilidade;
- 3) o aumento da especificação de transitórios e a capacidade superior de lidar com perturbações dinâmicas do sistema.

Caso o dispositivo de armazenamento CC (como um arranjo de bobinas supercondutoras) substitua o capacitor, será possível estabelecer a troca de potência reativa e ativa com o sistema. Em situações de baixa demanda, a bobina supercondutora poderá fornecer energia que será liberada para o sistema em situações de contingência (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

3.3 COMPENSADORES EM SÉRIE

O compensador série pode ser compreendido, em princípio, como um dispositivo que injeta uma tensão em série com a linha de transmissão. Uma impedância variável multiplicada pelo fluxo de corrente que flui por ela representa uma tensão série aplicada à linha. Enquanto a tensão estiver em quadratura de fase com a corrente de linha, o compensador fornecerá potência reativa variável. Portanto, o compensador série pode ser entendido como uma impedância série variável ou mesmo uma fonte variável baseada em eletrônica de potência (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

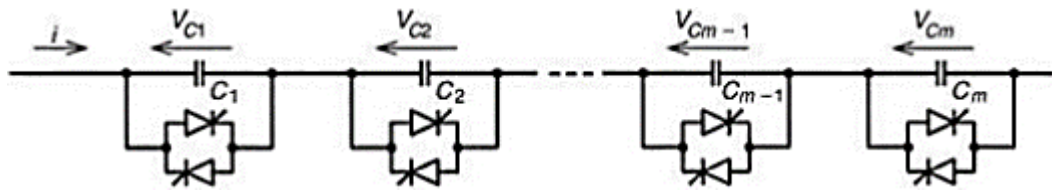
3.3.1 Capacitor Série Chaveado a Tiristor (TSSC)

O Capacitor Série Chaveado a Tiristor (TSSC) consiste, de maneira resumida, em capacitores em série com a linha, cada um deles com sua chave em paralelo composta por dois tiristores em antiparalelo. A Figura 31 mostra o arranjo para esse tipo de compensador. O capacitor é inserido no sistema quando a sua chave correspondente se encontra aberta e é retirado do sistema quando a chave se encontra fechada. Desse modo, se todas as chaves se encontrarem abertas, a capacitância equivalente obtida será $C_{eq} = C/m$ (m é o número de capacitores), e, de modo análogo, se todas as chaves estiverem fechadas, a capacitância equivalente será $C_{eq} = 0$. O valor da capacitância efetiva depende do grau de compensação da linha, que é controlado de forma gradual, inserindo ou retirando capacitores do sistema (MASUDA, 2006), (RASHID, 2014).

No módulo de um TSSC os tiristores operam apenas em dois estágios: bloqueados ou condução total. Quando os tiristores estão operando bloqueados, o TSSC se comporta como um capacitor fixo, porém quando em condução total apresenta uma reatância levemente indutiva, praticamente nula (GAMA, 1995).

Um TSSC pode ser constituído de vários módulos em série, fornecendo uma saída discretizada com um degrau que dependerá da reatância do menor módulo em série (PAIXÃO, 2006).

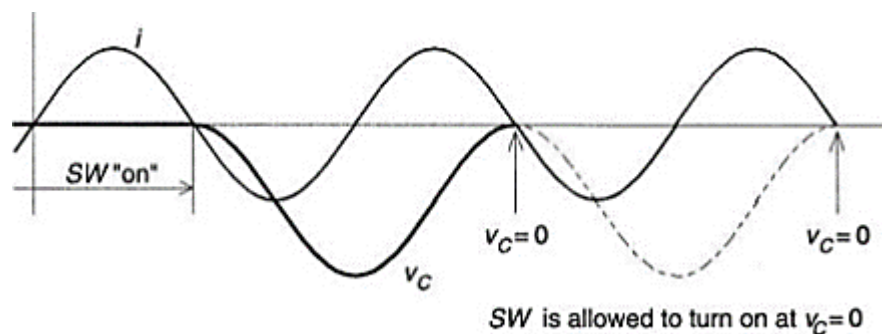
Figura 31 - Capacitores conectados em série



Fonte: RASHID (2014).

Um tiristor é “naturalmente” comutado quando desliga na passagem da corrente pelo zero. Assim, o capacitor pode ser inserido na linha apenas quando a corrente da linha passar pelo zero, ou seja, o chaveamento ocorre quando a corrente é igual à zero. Como o capacitor só pode ser inserido no sistema com a corrente de linha igual à zero, o carregamento ocorrerá do zero ao máximo durante todo o semiciclo da corrente de linha e descarregado desse máximo até o zero pelas sucessivas correntes de linha com a polaridade oposta durante todo o semiciclo seguinte. Isso resulta em uma tensão de compensação CC que possui igual amplitude da tensão CA do capacitor, como mostra a Figura 32 (MASUDA, 2006), (RASHID, 2014). Para amenizar o pico inicial da corrente que flui pela chave e o transitório resultante de acordo com a condição $v_c = Cdv/dt$, os tiristores devem ser ligados somente quando a tensão no capacitor for nula. Assim, evita-se a aplicação de elevada relação $\partial v/\partial t$ sobre a chave, o que poderia causar ruptura dielétrica do componente. Este sistema de compensação não permite um controle contínuo da reatância capacitiva série. Observa-se que, se a conexão e desconexão dos bancos de capacitores forem feitas de maneira esporádica, possivelmente não ocorrerão problemas devido aos harmônicos de chaveamento. Entretanto, dependendo da frequência em que os tiristores são chaveados, tensões subharmônicas (harmônicos com frequência menor que a da rede) podem ser geradas (FILHO, 2005).

Figura 32 - Comutação com corrente zero e deslocamento da tensão do capacitor



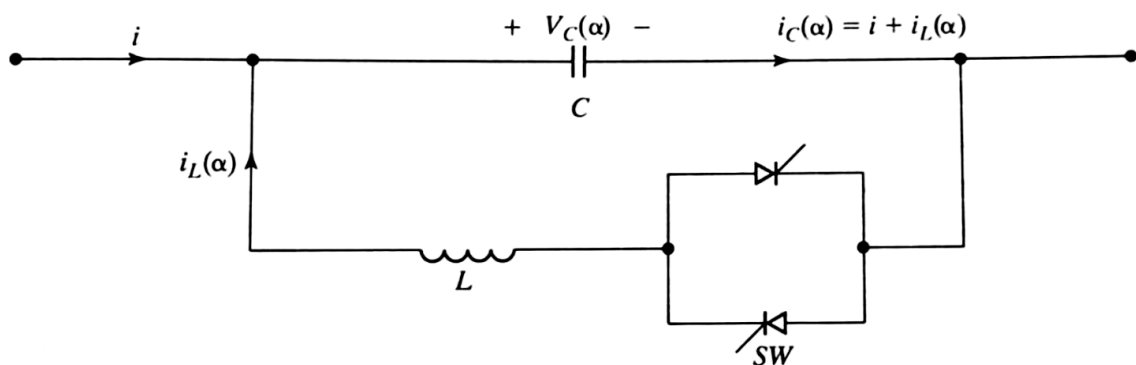
Fonte: RASHID (2014).

A compensação CC e a exigência de $v_c = 0$ podem causar um atraso de até um ciclo completo, o que estabeleceria o limite teórico de tempo de resposta do TSSC. Por conta da limitação de di/dt dos tiristores, é necessário, na prática, o uso de um indutor para limitar a corrente em série com a chave. Nesse sentido, quando um indutor é posto em série com a chave, isso resulta em novo circuito de potência denominado como Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC), que melhora significativamente o desempenho de operação com relação ao TSSC (MASUDA, 2006), (RASHID, 2014).

3.3.2 Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC)

O TCSC é um controlador que consiste em capacitor em série com a linha de transmissão e em paralelo com um indutor controlado por dois tiristores em antiparalelo (TCR), como pode ser visto na Figura 33 (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

Figura 33 - Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC)



Fonte: RASHID (2014).

Pode-se notar que o arranjo é bastante semelhante com o do TSSC. Quando a impedância do reator X_L for suficientemente menor que a do capacitor X_C , ele pode operar no modo on-off, assim como o TSSC. Variando-se o ângulo de disparo α , pode-se alternar a impedância indutiva do TCR. Deste modo, o TCSC pode proporcionar um capacitor continuamente variável pelo cancelamento parcial da capacitância efetiva de compensação através do TCR. Logo, a impedância do TCSC, em regime permanente, é igual a do circuito LC paralelo, composto por uma impedância capacitiva fixa (X_C) em paralelo com uma indutância variável (X_L) (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014). A impedância do TCSC é expressa pela equação 45:

$$X_T(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (45)$$

Onde $X_L(\alpha)$ é dado pela equação 46:

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \text{sen}(2\alpha)}, \text{ para } X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty \quad (46)$$

Assim, $X_L = \omega L$, e α é o ângulo de disparo medido a partir da crista da tensão no capacitor ou na passagem da corrente de linha por zero.

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 (ALMEIDA, 2014).

A Figura 34 mostra o comportamento da reatância efetiva do TCSC (X_{TCSC}) em função da variação do ângulo de disparo. A reatância virtual equivalente pode resultar em valores indutivos ou capacitivos (JESUS, 2003). A faixa de operação depende da relação entre a reatância indutiva e capacitiva. Abaixo são apresentadas as condições para a operação em cada região.

$X_{L_{TCR}}(\alpha) < X_C$: região indutiva;

$X_{L_{TCR}}(\alpha) = X_C$: região de ressonância;

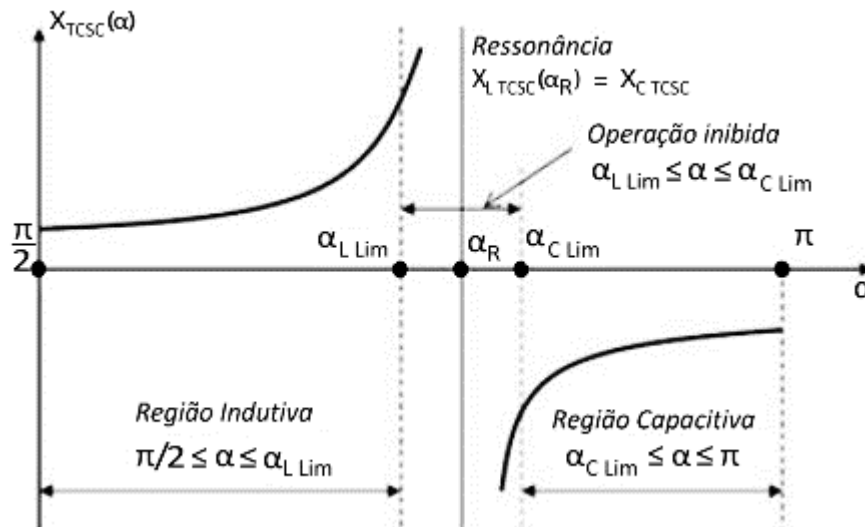
$X_{L_{TCR}}(\alpha) > X_C$: região capacitiva.

É importante observar que pode haver mais de um ponto de ressonância. Para que haja somente um ponto de ressonância durante toda a região de operação do TCSC, a desigualdade matemática, dada pela equação 47, deve ser obedecida (ZAMPELLIN, 2014).

$$\varpi = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} < 3 \quad (47)$$

Salienta-se que quando $X_L(\alpha)$ tende a X_C , a reatância virtual fica na faixa de ressonância, a qual deve ser inibida na operação real em função do valor teoricamente infinito (JESUS, 2003). A operação na região próxima a esta condição de ressonância deve ser evitada, impondo-se limites para os ângulos de disparo dos tiristores (GAMA, 1995).

Figura 34 - Impedância característica



Fonte: ALMEIDA (2014).

Onde:

$\alpha_{L\text{LIM}}$ – ângulo limite na região indutiva;

$\alpha_{C\text{LIM}}$ – ângulo limite na região capacitiva;

α_R – ângulo de ressonância.

Na região indutiva, o ângulo pode variar entre a compensação mínima e máxima, que ocorre para α igual a 90° e $\alpha_{L\text{LIM}}$ respectivamente. Para a região capacitiva, a compensação mínima e máxima ocorre para α igual a 180° e $\alpha_{C\text{LIM}}$ respectivamente (ALMEIDA, 2014).

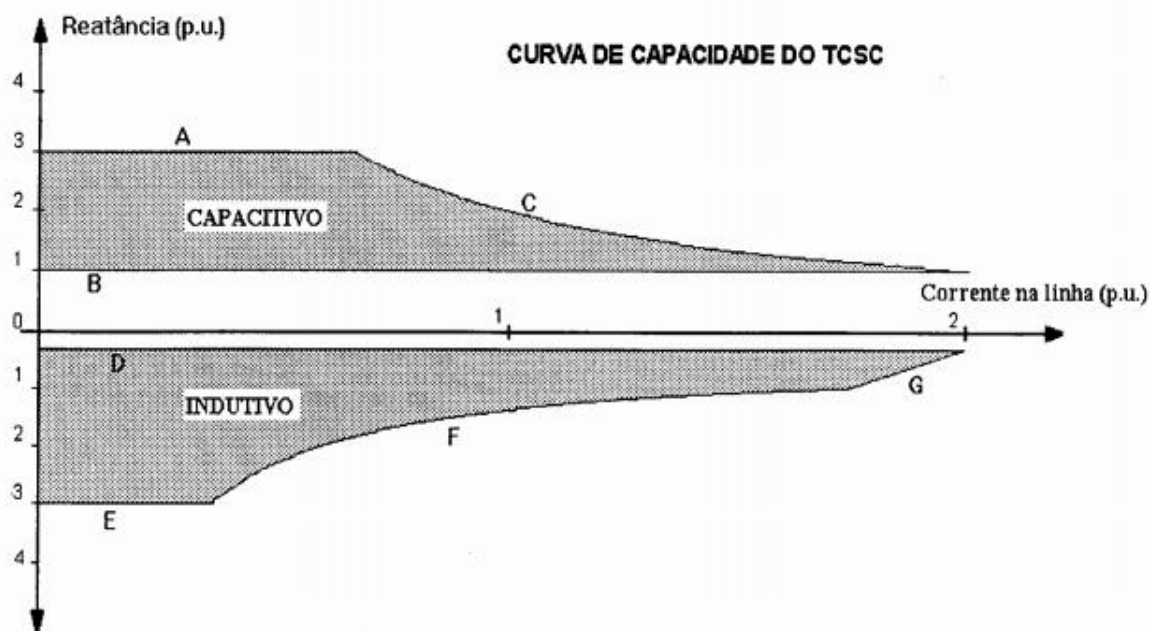
Na prática, existe a possibilidade de operação em três modos de controle do TCSC, ou seja, modo de tiristor bloqueado (TBM - Thyristor Blocked Mode), reator plenamente inserido (TSR - Thyristor Switched Reactor) e tiristor operando no modo de controle de fase/controlado do ângulo de disparo (TPC - Thyristor Phase Controlled). Na operação do modo TBM não são emitidos pulsos de disparo aos tiristores e o TCSC se comporta como um simples banco de capacitores série. A corrente de linha circula através do capacitor série e nenhuma corrente circula no TCR. No modo TSR, os tiristores são continuamente disparados ($\alpha = 90^\circ$), de tal forma que a maioria da corrente de linha flui através do TCR e o TCSC apresenta uma reatância virtual indutiva, uma vez que tipicamente a reatância do indutor (X_L) é menor que a do banco de capacitores série (X_C). O TCSC se comporta como uma combinação paralela entre o banco de capacitores e o TCR. Já no modo TPC, os dispositivos semicondutores operam com controle de fase e ajuste do ângulo de disparo, desta forma, a condução parcial nos tiristores é estabelecida. Através do controle do ângulo de disparo é possível alterar efetivamente a corrente fundamental que flui nos tiristores e, dependendo da magnitude desta corrente, o TCSC pode

apresentar uma reatância líquida capacitiva ou indutiva, como verificado na Figura 34. A operação normal do equipamento é realizada de tal forma que normalmente o controle atua na faixa capacitiva, entretanto, conforme literatura técnica, para frequências inferiores à fundamental, o TCSC apresenta uma característica indutiva, o que intrinsecamente faz com que este sistema apresente certa imunidade a ressonâncias subsíncronas (JESUS, 2003).

Com os tiristores bloqueados (ou com $\alpha = 180^\circ$), o TCSC se comporta como uma compensação série convencional (capacitor fixo). Com os tiristores conduzindo continuamente ($\alpha = 90^\circ$), o TCSC se comporta como uma indutância de pequeno valor, e esta condição operativa é denominada de modo "bypassado". Controlando-se o ângulo de condução dos tiristores, é possível variar a reatância do TCSC tanto na direção capacitiva quanto na direção indutiva (GAMA, 1995).

Os valores nominais e as características do equipamento determinam os limites de operação (Região Operativa do Compensador). Os limites devido aos valores máximos de tensão e corrente, assim como a estabilidade do sistema de controle impõem restrições aos valores de reatância de saída do TCSC. A Figura 35 apresenta uma curva típica de valores de reatância de um módulo TCSC em função da corrente na linha de transmissão. As restrições ou limites operativos serão discutidos posteriormente. É importante notar a redução na faixa dinâmica de operação com o aumento de corrente na linha de transmissão (GAMA, 1995).

Figura 35 - Curva de capacidade do TCSC



Fonte: GAMA (1995).

- A - Limite de Ângulo de Disparo (Capacitivo);
- B - Tiristores Bloqueados;
- C - Limite de Máxima Tensão no Capacitor;
- D - Tiristores em Condução Completa (Reatância de “Bypass”);
- E - Limite de Ângulo de Disparo (Indutivo);
- F - Limite de Aquecimento Harmônico;
- G - Limite de Corrente Máxima nos Tiristores.

A reatância indutiva do TCSC deve ser suficientemente menor que a reatância capacitiva do mesmo de forma que o TCSC possa assumir uma reatância efetiva indutiva ou capacitiva (MEIKANDASIVAM apud ALMEIDA, 2014).

Supondo que a reatância capacitiva seja menor que a reatância indutiva, 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 (ALMEIDA, 2014).

3.3.2.1 Dispositivos de Proteção

3.3.2.1.1 Centelhador

Os centelhadores, também conhecidos pelo termo em inglês *Spark Gap* ou simplesmente GAP, são conectados em paralelo ao banco e consistem em dois eletrodos separados fisicamente. Entre eles, é possível estabelecer um caminho ionizado (arco elétrico), responsável por desviar o fluxo de corrente. O fechamento do arco elétrico é comandado por circuitos de acionamento interno ou externo e visa à proteção dos capacitores contra sobretensões (acionamento interno) ou à proteção térmica do varistor (acionamento externo) (CONCEIÇÃO, 2015).

3.3.2.1.2 Varistor de Óxido Metálico

O varistor de óxido metálico, mais conhecido pela abreviação do termo em inglês MOV, é largamente empregado na proteção de bancos de capacitores em função da característica não-linear de sua resistência. Esses dispositivos são conectados em paralelo ao banco e, em condições normais de operação, apresentam elevada resistência – de modo que a corrente flui

pelos capacitores. No entanto, após perturbações no sistema, a elevação da tensão em seus terminais o leva à saturação, de modo que o MOV passa a representar um caminho de baixa resistência e desvia o fluxo de corrente do banco, mantendo o nível de tensão constante em seus terminais (CONCEIÇÃO, 2015).

3.3.2.1.3 *Disjuntor de Desvio*

O disjuntor de desvio consiste em uma chave mecânica, utilizada, em geral, para operações de manutenção. Esse dispositivo também é associado aos centelhadores a fim de extinguir o arco elétrico após determinado período de tempo para reinserção do banco à linha. Dentre suas finalidades, destaca-se a possibilidade da retirada do banco quando ocorre uma falta interna a este equipamento. Assim como os demais dispositivos, o disjuntor de desvio é conectado em paralelo às unidades capacitivas (CONCEIÇÃO, 2015).

3.3.2.1.4 *Circuito de Amortecimento*

Quando o GAP atua, a tensão sobre os capacitores cai subitamente a zero. Como a relação entre corrente e tensão para este dispositivo é expressa por $i_C = C dV_C/dt$, a intensa variação da tensão sobre os terminais dos capacitores (dV_C/dt) implicaria níveis de corrente muito altos. A fim de se restringir tal corrente de descarga, utiliza-se um circuito de amortecimento – usualmente implementado por um reator em paralelo a um resistor (CONCEIÇÃO, 2015).

3.3.2.2 *Esquemas de Proteção*

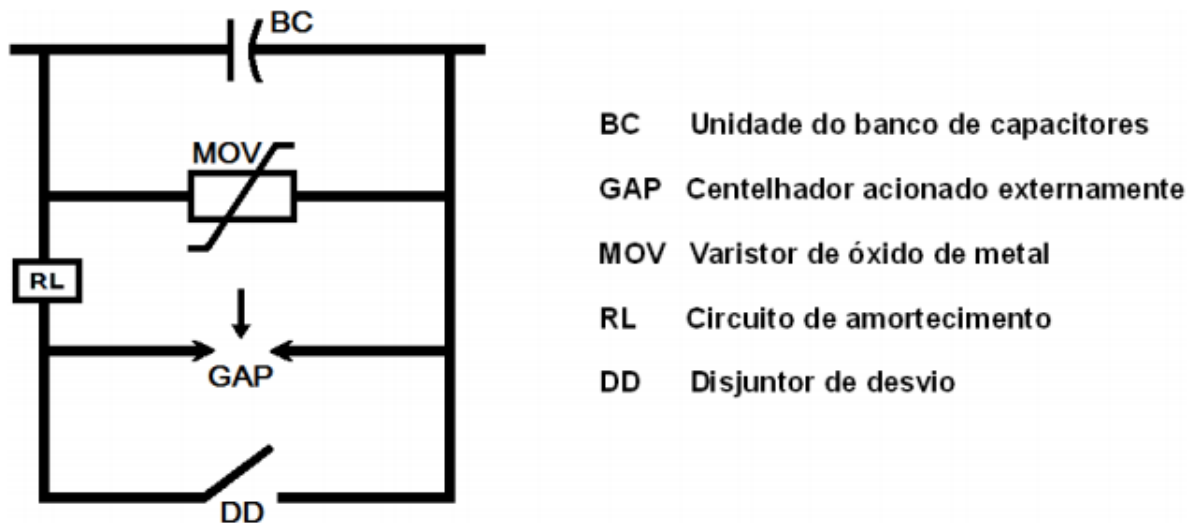
A fim de reduzir as exigências para força dielétrica das unidades capacitivas e, conseqüentemente, limitar suas dimensões, é necessário que o banco de capacitores seja retirado de operação na presença de sobrecorrentes de curto-circuito. Após o restabelecimento das condições normais do sistema, os capacitores devem ser reinseridos na linha – manobra intrinsecamente ligada à estabilidade transitória da rede. Para elevados requisitos de estabilidade, é necessário que o banco seja reinserido rapidamente – no máximo em 100 ms. Por outro lado, para sistemas menos exigentes quanto a esse quesito, pode-se postergar a reinserção até que as oscilações transitórias tenham sido amortecidas, submetendo o banco e seus equipamentos de proteção a tensões menos severas (ANDERSON; FARMER apud

CONCEIÇÃO, 2015).

3.3.2.2.1 Proteção por MOV associado ao GAP

Nesse esquema, a proteção é realizada pelo MOV protegido por *Spark Gap*, ambos associados em paralelo ao capacitor – como descrito na Figura 36.

Figura 36 - Proteção MOV associado ao GAP



Fonte: GAMA (1995).

Dado que o MOV conduz somente para tensões superiores a um valor limite, abaixo deste valor, a corrente flui normalmente pelo capacitor, esse arranjo possibilita a reinserção instantânea. Assim, mesmo durante a falta, o capacitor se mantém conectado por meio ciclo, o que contribui para a estabilidade transitória do sistema. Enquanto conduz, o MOV absorve energia continuamente, de modo que tem que ser dimensionado para suportar tal armazenamento. A fim de limitar o tamanho desses dispositivos, o sistema de proteção (*Spark Gap*, acionado externamente pelo pico de corrente ou energia acumulada no MOV) é imprescindível (CONCEIÇÃO, 2015).

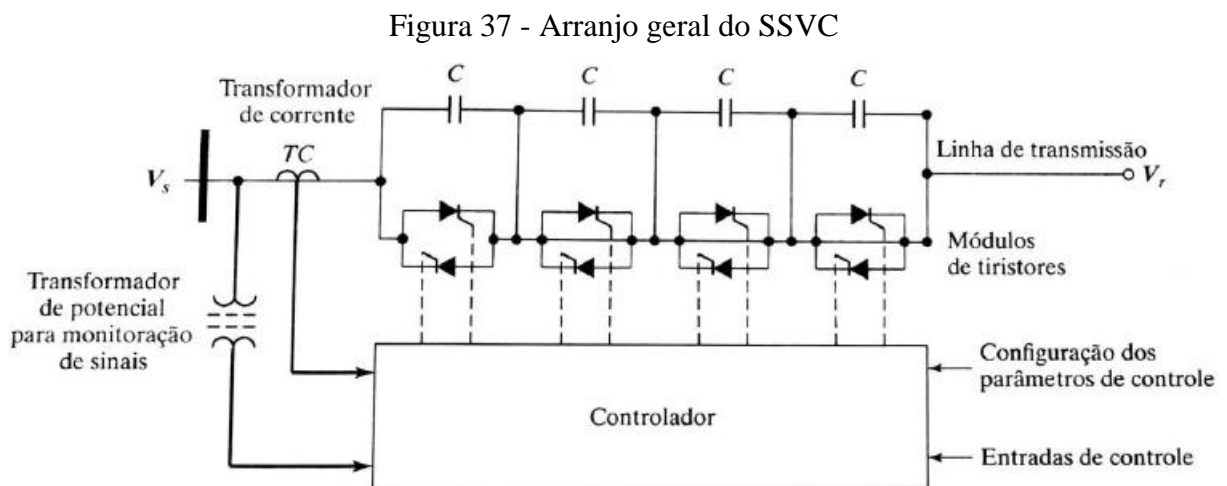
Conforme mencionado anteriormente, a ausência da compensação série para faltas externas pode comprometer seriamente o sistema. Dessa forma, a proteção do MOV deve atuar somente para faltas internas, isto é, o MOV tem de ser dimensionado para suportar a mais crítica configuração de falta externa. A energia acumulada por esse dispositivo é determinada principalmente pelos seguintes fatores (CONCEIÇÃO, 2015):

- Magnitude da corrente que passa pelo MOV;

- Curva característica $V \times I$ do MOV;
- Tempo de duração da falta; e
- Instante de aplicação do curto.

3.3.3 Compensador Estático de Reativos Série (SSVC)

A utilização de compensadores como o TSC e TCSC permite a realização da compensação de reativos em série com a linha de transmissão. O Compensador Estático de Reativos Série (SSVC) é um dos dispositivos que compõe a família dos compensadores série. O arranjo geral do SSVC é mostrado na Figura 37 (MASUDA, 2006), (RASHID, 2014).

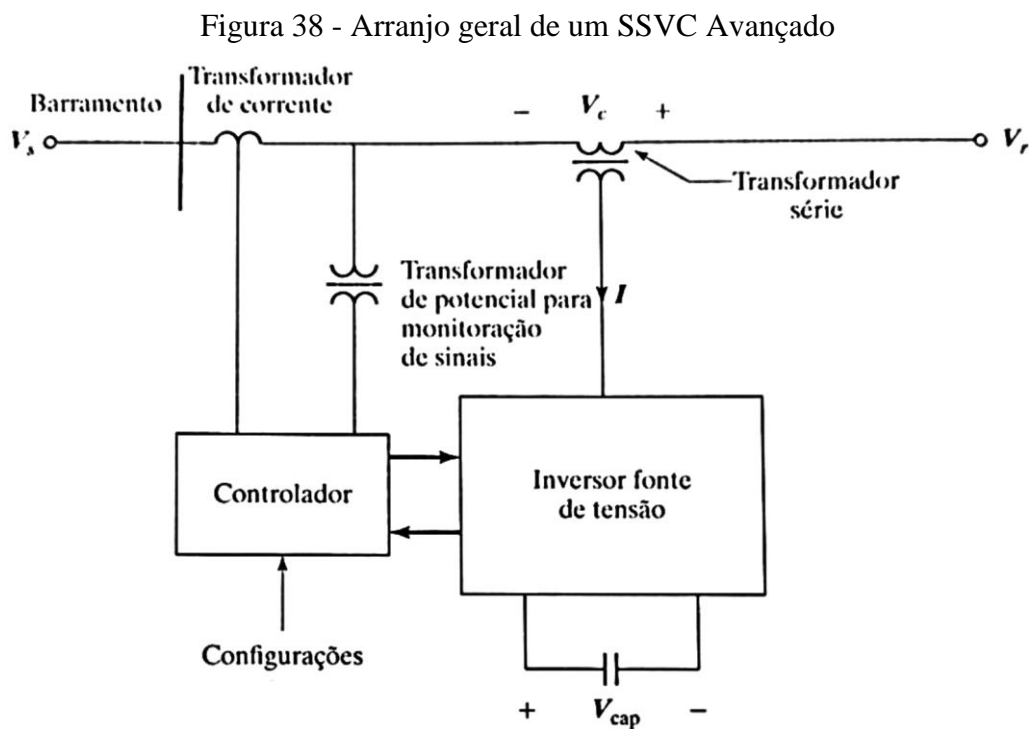


Fonte: RASHID (2014).

O sistema de controle funciona através de uma tensão de entrada obtida por meio de um transformador de potencial (TP) e de uma corrente de entrada obtida por meio de um transformador de corrente (TC). Tensão e corrente são as grandezas mais básicas necessárias ao sistema de controle, todavia podem existir mais parâmetros analisados pelo controlador. A estratégia de controle desse compensador série é normalmente norteadada pela análise do fluxo de energia que circula pelo sistema, além de sua capacidade de amortecer oscilações de energia no mesmo (MASUDA, 2006), (RASHID, 2014).

3.3.4 Compensador Estático de Reativos Série Avançado (SSVC Avançado)

O Compensador Estático de Reativos Série Avançado é um controlador análogo ao STATCOM, que faz parte do grupo de compensadores estáticos instalados em paralelo com o sistema de transmissão. O Arranjo geral do SSVC Avançado é mostrado na Figura 38 (RASHID, 2014).



Fonte: RASHID (2014).

Esse controlador utiliza um inversor de tensão com um capacitor em seu lado CC, o que substitui os capacitores chaveados nos controladores séries convencionais. Nesse controlador a saída do conversor estático é disposta em série com a linha, utilizando um transformador série. A tensão V_c na saída do conversor pode ser estabelecida em qualquer fase e magnitude, dentro dos seus limites operacionais, ajustando-se de modo a parecer adiantada em relação à corrente de linha em 90° , comportando-se, assim, como um capacitor (RASHID, 2014).

Caso o ângulo entre a tensão V_c e a corrente de linha não fosse 90° o conversor estaria trocando potência ativa com a linha, o que é impossível porque o mesmo não possui fonte de geração de energia ativa. Esse tipo de compensação consegue inverter a fase de V_c , o que

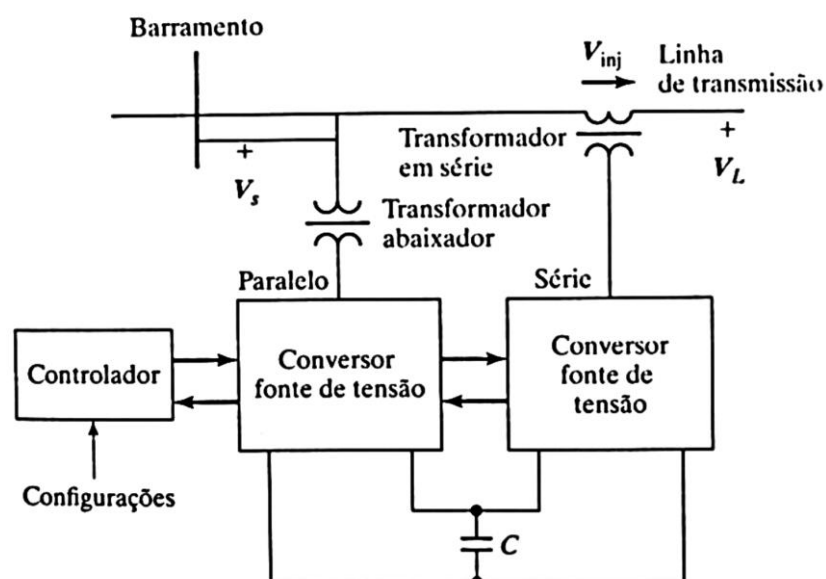
possibilita aumentar a reatância total da linha. Esta capacidade é desejável em caso de controle de corrente de falta ou para amortecer oscilações de energia. De modo geral, o compensador série controlável pode ser usado para aumentar a estabilidade do sistema em relação a transitórios, amortecer ressonâncias subsíncronas quando se utiliza capacitores permanentes e elevar a capacidade de transmissão de potência da linha. A variação na corrente de linha não provoca variação de V_c , desse modo o conversor apresenta uma impedância praticamente nula na frequência fundamental do sistema de energia. A tensão aplicada na linha pelo conversor não é obtida a partir de uma reatância capacitiva real e, portanto, não pode entrar em ressonância. Logo, esse compensador pode ser usado para produzir uma ressonância subsíncrona, ou seja, ressonância entre o capacitor série e a indutância da linha (RASHID, 2014).

3.4 COMPENSADORES MISTOS

3.4.1 Controlador Unificado de Fluxo de Potência

O Controlador Unificado do Fluxo de Potência (UPFC) é um tipo de compensador misto que apresenta um compensador paralelo avançado e um ramo de compensação série com um barramento CC compartilhado, como pode ser observado na Figura 39 (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

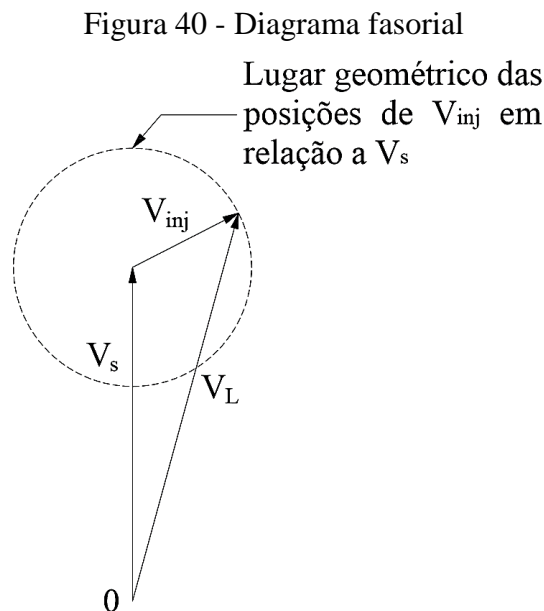
Figura 39 - Arranjo do controlador UPFC



Fonte: RASHID (2014).

A capacidade de armazenamento de energia do capacitor CC é geralmente baixa. Desse modo, a potência ativa retirada pelo ramo paralelo deve ser igual à potência ativa gerada no ramo série. Caso contrário, a tensão no barramento CC pode variar com relação à tensão nominal, dependendo da potência líquida absorvida e gerada em ambos os conversores. Entretanto, a potência reativa no conversor paralelo e série podem ser escolhidas de forma independente, o que proporciona uma maior flexibilidade do sistema para o controle do fluxo de carga (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

O controle de energia é realizado através da injeção de uma tensão em série (V_{inj}) somada a V_s , resultando, assim, na tensão de linha V_L , como mostra a Figura 40.



Fonte: Adaptado de RASHID (2014).

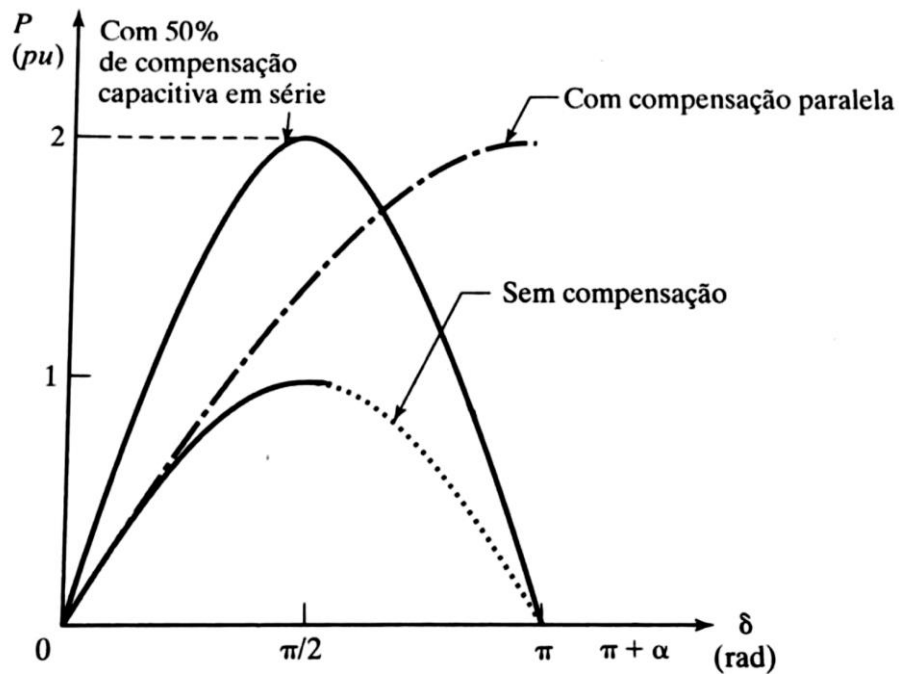
Com dois conversores, paralelo e série, o UPFC pode fornecer tanto energia ativa quanto reativa. A potência ativa pode ser suprida através do conversor com conexão paralela, pois a tensão aplicada V_{inj} pode assumir qualquer fase com relação a corrente de linha. Não há restrições com relação a V_{inj} , o lugar geométrico dela passa a ser um círculo centrado em V_s , com um raio igual à magnitude máxima de V_{inj} (RASHID, 2014).

Nesse panorama, o UPFC se mostra bastante completo, pois o mesmo pode funcionar em qualquer um dos modos de compensação, por isso que é chamado de controlador unificado. É importante salientar que o esquemático mostrado na Figura 40 somente é válido quando a energia flui de V_s para V_L . Quando o fluxo é invertido pode ser necessário modificar algumas ligações do compensador em paralelo. Em um UPFC mais geral, que aceita o fluxo de potência

bidirecional, se faz necessário dois compensadores paralelos, um na barra emissora e outro na receptora (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014).

Assim, o Compensador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC) é basicamente um controlador misto que reúne as características dos controladores série e paralelo. Nesse sentido, o UPFC é um controlador bastante completo e robusto que agrega o melhor dos compensadores série e paralelo, possibilitando a troca tanto de energia reativa quanto ativa (MIASAKI, 2006), (RASHID, 2014). A Figura 41 mostra o impacto dos compensadores na capacidade de transmissão de potência de uma linha de transmissão.

Figura 41 - Curvas de potência transmitida



Fonte: RASHID (2014).

4 SIMULAÇÕES

Como forma de verificar o desempenho do TCSC foram realizadas simulações no software OpenDSS em um sistema de potência radial fictício de 5 barras, ideal para demonstrar a necessidade de compensação de reativos. O sistema possui 5 barras devido a este ser o número mais adequado para o trabalho, pois permite a aferição em vários pontos ao longo do alimentador de parâmetros como tensão e potência. Tais informações serão importantes para as análises futuras.

O sistema de transmissão está conectado a uma barra infinita que fornece toda potência requerida pelo sistema, representando a barra da subestação cuja tensão de linha é 230 kV a uma frequência de 60 HZ.

4.1 DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O barramento 1 (230 kV), que representa o barramento de saída do sistema, é utilizado para inicializar a solução do estudo de fluxo de potência. Para a definição do barramento de saída do alimentador, deve-se atribuir um nome para o mesmo por meio do objeto “*Circuit*”. Além disso, outros parâmetros devem ser especificados, dentre eles, a resistência de sequência positiva da fonte (R1) e a reatância de sequência positiva da fonte (X1). Estes parâmetros foram definidos conforme a Nota Técnica nº 0057/2014-SRD/ANEEL (ANEEL, 2014). Dessa forma, o “*Circuit*” do sistema deve ser editado como se segue:

//Código utilizado pelo OpenDSS para a definição do barramento de saída do alimentador

```
New Circuit.5BUS
```

```
~ basekv = 230
```

```
~ bus1 = 1
```

```
~ pu = 1.00
```

```
~ angle = 0
```

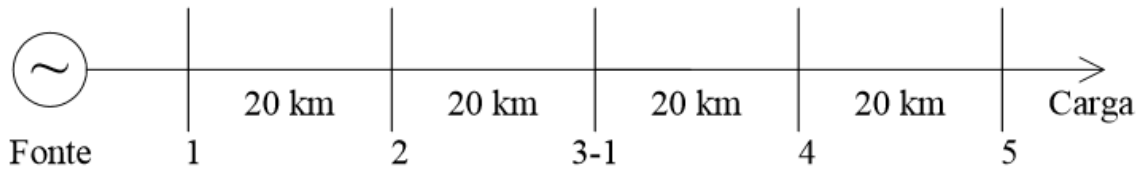
```
~ phases = 3
```

```
~ R1 = 0
```

```
~ X1 = 0.00001
```

A Figura 42 mostra o diagrama unifilar com a distância entre cada uma das barras do sistema de potência trifásico em análise.

Figura 42 - Diagrama unifilar do alimentador

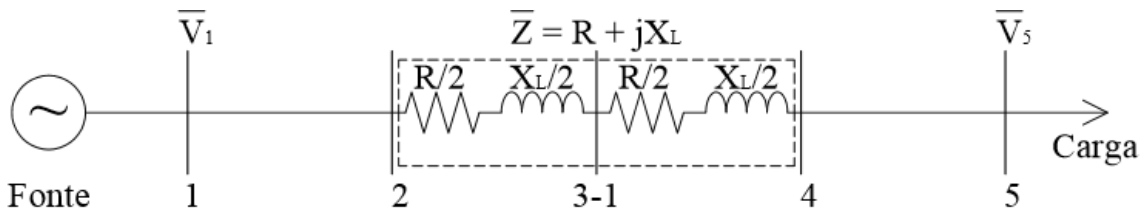


Fonte: O autor (2020).

Este circuito tem como fim fornecer potência à carga conectada à barra 5. Neste barramento está conectada uma única carga. Os dados deste circuito são apresentados na seção seguinte.

É possível observar na Figura 42 que a extensão total da linha de transmissão (l) é igual a 80 km, ou seja, é uma linha considerada curta. Esta extensão foi escolhida de forma que a representação do alimentador seja simplificada e as simulações facilitadas. Deste modo, como pode ser visto na Figura 43, a linha pode ser representada pelo modelo PI para linhas curtas:

Figura 43 - Modelo PI do alimentador



Fonte: O autor (2020).

A capacitância neste tipo de linha pode ser desprezada, já que é pequena. Desse modo, o modelo PI representa a linha por seus parâmetros série, resistência e indutância (X_L – reatância indutiva), facilitando assim as simulações.

Em todas as simulações foram introduzidas as coordenadas das barras para possibilitar a representação gráfica do perfil de tensão no alimentador.

4.2 DADOS DA CARGA

A fim de representar a carga no ambiente OpenDSS, adotou-se a utilização de multiplicadores para representação da variação da carga no modo diário (*Daily mode*). Para isso, deve-se especificar o nome da curva de carga através do parâmetro *daily*. O valor de carga concentrada, 122,5 MVA com FP = 0,9, foi obtido através da soma das cargas nas três fases do alimentador que compõem a mesma e o seu maior valor é apresentado no período da noite, enquanto o menor valor, no período da madrugada. A carga que é trifásica está conectada em estrela aterrada e possui potências ativa e reativa constantes independentes do valor da tensão. Este valor foi estipulado de modo que, no instante em que a demanda é máxima, o sistema não opere mais em condições adequadas. Assim, quando o TCSC for empregado, o mesmo vai propiciar que o sistema já existente retorne para as condições apropriadas de funcionamento. Quanto ao fator de potência, o mesmo foi baseado em bibliografias consultadas ao longo da realização deste trabalho. A Tabela 1 mostra o valor da carga conectada à barra 5.

Tabela 1 - Dados nominais da carga

Conexão	Tipo	Potência Aparente (kVA)	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Tensão de linha (kV)	FP
Estrela aterrada	Trifásica	122500	110250	53396,51	230	0,9 (ind)

Fonte: O autor (2020).

Abaixo as linhas de declaração da carga são apresentadas.

//Definição da carga

New Load.Carga

~ bus1 = 5

~ phases = 3

~ kv = 230

~ kva = 122500

```

~ pf = 0.9
~ conn = wye
~ model = 1
~ daily = dia1h

```

Para análise do sistema em modo *Snapshot*, as linhas de comando que definem o parâmetro *daily* são declaradas como comentários (pelo acréscimo dos caracteres “//”).

4.2.1 Perfil de Carga

O objeto *Loadshape* é fundamental para realizar o estudo em questão, uma vez que permite soluções de estudos de fluxo de carga sequenciais. Esse objeto consiste de uma série de multiplicadores, variando de 0,25 a 1, que são aplicadas aos valores de potência base em kW para representar a variação da carga ao longo de um dia. Para a definição da curva de carga, o objeto “*Loadshape*” recebeu o nome de *dia1h*. A seguir serão apresentados os parâmetros utilizados para a especificação da carga.

- *Npts* = número de pontos da curva de carga;
- *Interval* = intervalo entre os pontos da curva de carga em horas;
- *Mult* = vetor com os multiplicadores dos valores da carga.

Dessa forma, o “*Loadshape*” do sistema deve ser editado como se segue:

```

//Definição da curva de carga

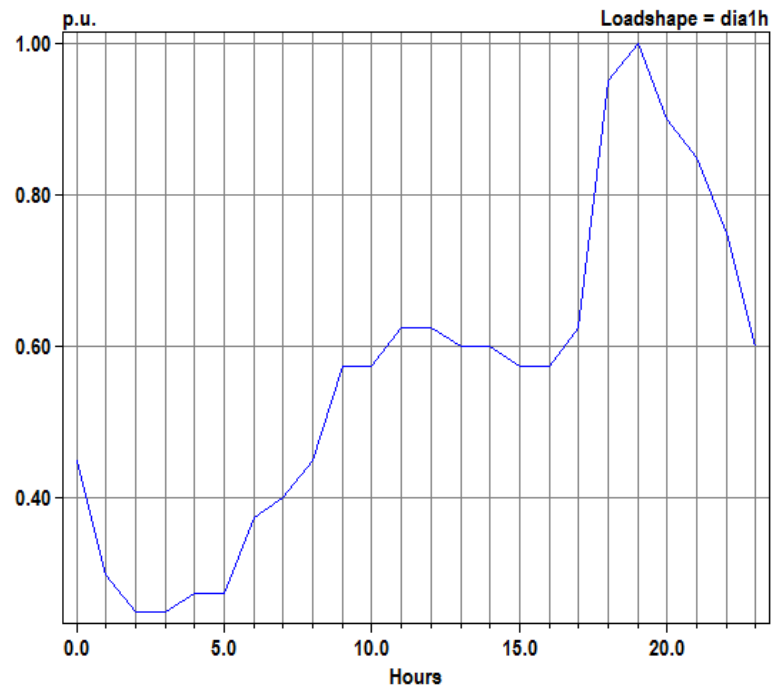
New Loadshape.dia1h npts=24 interval=1
~ mult = (0.45 0.3 0.25 0.25 0.275 0.275 0.375 0.4 0.45 0.5 0.575 0.625 0.625 0.575 0.5
0.5 0.625 0.975 1 0.9 0.825 0.775 0.625 0.5)

```

Para análise do sistema em modo *Snapshot*, as linhas de comando que criam uma curva de carga são declaradas como comentários (pelo acréscimo dos caracteres “//”).

O perfil diário de carga é apresentado na Figura 44. A potência base é igual a 122,5 MVA. O perfil da curva de carga foi desenvolvido de modo que o comportamento da carga se aproxime o máximo possível do real cujo comportamento modifica-se de acordo com a demanda residencial e industrial conjuntamente. Este é um modelo de carga teórico, criado para introduzir distorções na tensão do circuito.

Figura 44 - Perfil diário de carga



Fonte: O autor (2020).

Observa-se na Figura 44 que a demanda mínima de consumo se concentra no período da madrugada das 2:00 às 3:00, e o período onde a demanda atinge o valor máximo do dia ocorre na parte da noite às 19:00.

4.3 DADOS DAS LINHAS

O código do condutor é definido na linguagem empregada pelo OpenDSS por meio do objeto “*LineCode*”. As características da impedância, como os valores de resistência e reatância indutiva de sequência positiva em ohms por quilômetro, do cabo de alumínio nu 336.4 MCM ACSR utilizado nas simulações estão representadas na Tabela 2. Foram desconsideradas as susceptâncias capacitivas (*charging*).

Tabela 2 - Parâmetros do condutor 336.4 MCM

Sequência Positiva		Máxima Corrente Admissível (A)
r (Ω/m)	x _L (Ω/m)	
0,222	0,402	322

Fonte: O autor (2020).

Este condutor foi escolhido por admitir a corrente máxima do sistema sem exceder os limites térmicos do mesmo.

Os parâmetros mostrados na Tabela 2 são declarados no OpenDSS como:

//Definição dos parâmetros dos condutores

New Linecode.L1

~ nphases = 3

~ basefreq = 60

~ R1 = 0.222

~ X1 = 0.402

~ C1 = 0

~ units = km

~ normamps = 322

Na Tabela 3 são apresentados os comprimentos e alguns outros dados das linhas do circuito. As colunas “i” e “k” representam as barras de conexão das linhas.

Tabela 3 - Dados das linhas

Nome	Tipo	Conexão	i	k	Comprimento (km)
LINHA_1-2	Trifásica	Estrela aterrada	1	2	20
LINHA_2-3	Trifásica	Estrela aterrada	2	3	20
LINHA_3-4	Trifásica	Estrela aterrada	3	4	20
LINHA_4-5	Trifásica	Estrela aterrada	4	5	20

Fonte: O autor (2020).

Para utilização da função *Plot*, foram definidas coordenadas arbitrárias para os barramentos. Tais coordenadas são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Coordenadas das barras

Barra	x	y
1	0	0
2	20	0
3	40	0
4	60	0
5	80	0

Fonte: O autor (2020).

Estas coordenadas são inseridas da forma como estão apresentadas na Tabela 4 (com exceção da linha de título) em um arquivo do tipo *.CSV salvo na pasta raiz do OpenDSS. Este arquivo foi nomeado como “Coordenadas.CSV”. O OpenDSS busca essas informações para executar a solução através do comando:

```
BusCoords Coordenadas.CSV
```

A declaração das linhas do sistema de potência teste no OpenDSS foi realizada pelo trecho de código a seguir.

```
//LINHAS
```

```
//Linha 1-2
```

```
New Line.LINHA_1-2
```

```
~ phases = 3
```

```
~ bus1 = 1
```

```
~ bus2 = 2
```

```
~ linecode = L1
```

```
~ length = 20
```

```
//Linha 2-3/1
```

```
New Line.LINHA_2-3/1
```

```
~ phases = 3
```

```
~ bus1 = 2
```

~ bus2 = 3-1
~ linecode = L1
~ length = 20

//Linha 3/2-4

New Line.LINHA_3/2-4

~ phases = 3
~ bus1 = 3-2
~ bus2 = 4
~ linecode = L1
~ length = 20

//Linha 3/1-4

//New Line.LINHA_3/1-4

//~ phases = 3
//~ bus1 = 3-1
//~ bus2 = 4
//~ linecode = L1
//~ length = 20

//Linha 4-5

New Line.LINHA_4-5

~ phases = 3
~ bus1 = 4
~ bus2 = 5
~ linecode = L1
~ length = 20

4.4 DADOS DO CAPACITOR

O OpenDSS possui apenas comandos para a declaração de bancos de capacitores fixos. Então, para representar o capacitor controlado a tiristor (TCSC), o ideal seria se o *software* disponibilizasse um controle que variasse a capacitância do banco de capacitores de acordo com o valor de determinado parâmetro de controle, tais como nível de tensão, fluxo de potência reativa, fator de potência, demanda ou tempo. Porém o programa somente possui um controle ON/OFF para capacitores. Portanto, o TCSC será representado por um capacitor variável. A capacitância série do banco será dimensionada de forma que compense 70% da reatância indutiva da linha. Esta é a compensação máxima sugerida pelas bibliografias de modo que o controlador TCSC atue seguramente sem provocar ressonância série. É claro que, se o capacitor em série é ajustável, então outros níveis de fluxo de potência podem ser realizados de acordo com as propriedades: contrato, limitações térmicas, perdas de transmissão, carga e horários de geração.

4.4.1 Localização na Linha

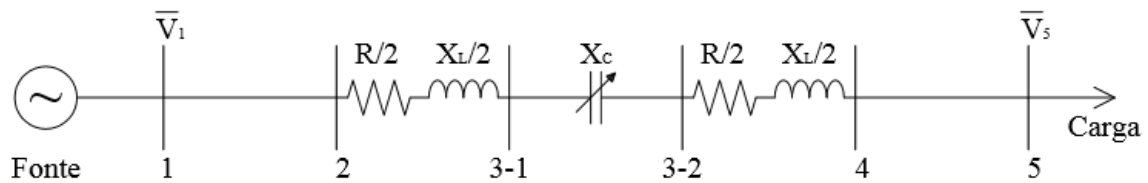
Quando um capacitor série é instalado em uma linha de transmissão, um fator muito importante é a sua localização. As localizações usualmente utilizadas são no meio ou em ambos os terminais da linha. No caso deste trabalho, o local adotado é no meio da linha.

Para esta localização, as correntes de curto e as sobretensões transitórias são menores e, conseqüentemente, as características nominais da proteção MOV são substancialmente menores do que se o capacitor estivesse situado no meio da linha.

4.4.2 Dimensionamento do Capacitor Série Controlado a Tiristor

O modelo da linha de transmissão com a inserção do banco de capacitores controlado a tiristor é ilustrado pela Figura 45.

Figura 45 - Modelo da linha de transmissão com a inserção do banco de capacitores controlado a tiristor



Fonte: O autor (2020).

Devido à necessidade de inserir um banco de capacitores em série com a linha, foi preciso adicionar uma nova barra para que a simulação pelo programa pudesse ser realizada. Vale ressaltar que a distância entre as barras 3-1 e 3-2 é desprezível, sendo que este espaço é preenchido apenas pelo banco e não há valores consideráveis de resistência e reatância dos condutores que conectam o mesmo à barra.

Para análise do sistema sem banco de capacitores, as linhas de comando que criam um segmento de linha que interliga a barra 3-2 com a barra 4 são declaradas como comentários (pelo acréscimo dos caracteres “//”).

Posto isto, pode-se partir da equação 48 que define a reatância capacitiva através da capacitância e da frequência da corrente alternada:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (48)$$

Onde:

- X_C é a reatância capacitiva em ohms (Ω);
- π vale 3,1416 – constante;
- f é a frequência da corrente em hertz (Hz);
- C é a capacitância do capacitor em farads (F).

Manipulando a equação 48 é possível obter a capacitância do banco que é dada pela equação 49.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (49)$$

De acordo com a Tabela 2, a reatância indutiva da linha, x_L , é de 0,402 Ω/km . Então, para se obter a reatância indutiva total ($X_{L_{TOTAL}}$), multiplica-se este valor pelo comprimento total da linha (l) como pode ser observado pelas equações 50, 51 e 52:

$$X_{L_{TOTAL}} = l \times x_L \quad (50)$$

$$X_{L_{TOTAL}} = 80 \times 0,402 \quad (51)$$

$$X_{L_{TOTAL}} = 32,16 \Omega \quad (52)$$

O grau de compensação r escolhido para esta aplicação será de 70%, ou seja, o TCSC será resumido a um banco de capacitores série que compensará 70% da linha de transmissão. Considerando-se, então, esta compensação, a reatância capacitiva do banco deve ser igual à 70% da reatância indutiva total como pode ser observado pelas equações 53, 54 e 55:

$$X_C = 0,70 \times X_{L_{TOTAL}} \quad (53)$$

$$X_C = 0,70 \times 32,16 \quad (54)$$

$$X_C = 22,512 \Omega \quad (55)$$

Sendo assim, basta substituir o valor da reatância capacitiva (X_C) disponível na equação 48 para obter a capacitância do banco de capacitores que é dada pela equação 56:

$$C \cong 117,83 \mu\text{F} \quad (56)$$

Logo, por ser um sistema trifásico, haverá um capacitor em série em cada linha com este valor de capacitância.

4.4.3 Linhas de Código para os Capacitores

Este banco de capacitores é declarado ao OpenDSS através dos seguintes comandos:

```
//Definição do capacitor série controlado a tiristor
```

```
New Capacitor.C
```

- ~ bus1 = 3-1
- ~ bus2 = 3-2
- ~ phases = 3
- ~ Cuf = 117.83
- ~ kv = 230

Um dos principais motivos para a inserção de uma compensação série de reativos, é o controle de tensão, uma vez que em uma linha de transmissão, há perdas indesejáveis de potência elétrica.

Desta forma, o ideal é que a tensão distribuída na linha permaneça dentro da faixa de tolerância de $\pm 5\%$, ou seja, a tensão pode variar de 218,5 kV até 241,5 kV. Sendo assim, o dimensionamento do banco de capacitores foi feito de modo que a tensão na barra a qual a carga está conectada fique dentro dos limites citados. A seguir determina-se faixas de classificação de tensões em regime permanente.

4.5 NÍVEIS DE TENSÃO

Segundo o manual de fiscalização da transmissão, os valores de tensão em regime permanente nos pontos de conexão, deve atender aos requisitos que constam na resolução da ANEEL nº 505/2001.

No anexo do documento da ANEEL são estabelecidas faixas de classificação de tensões em regime permanente em pontos de conexão com o sistema de acordo com a tensão conectada. Para a tensão de 230 kV, caso abordado neste trabalho, as faixas de classificação da tensão são reproduzidas na Tabela 5 e submetem-se a sistemas cujos pontos de conexão estejam em tensão nominal igual ou superior a 230 kV (ANEEL, 2009).

Tabela 5 - Tensões de atendimento

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95 TR \leq TL \leq 1,05 TR$
Precária	$0,93TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,93 TR$ ou $TL > 1,07 TR$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2001).

Estas faixas servirão de referência, nas análises futuras, para definir se o sistema está operando em níveis adequados ou não.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Foram realizados estudos de perfis de tensão e de potência ao longo do dia (modo *Daily*) e para o instante de maior carregamento do sistema (modo *Snapshot*). Serão exibidos neste capítulo os resultados gerados pelo OpenDSS e gráficos mostrando a variação de tensão no decorrer do alimentador. Após realizada a solução do circuito no OpenDSS, a execução do comando “*Plot Profile*” e “*Plot Monitor*” criam arquivos de extensão (*.DSV) que são automaticamente exibidos na tela e apresentam os perfis de tensão no modo *Snapshot* e no modo *Daily* respectivamente. Para análise do sistema em modo *Snapshot*, as linhas de comando que plotam a tensão ao longo do dia na carga são declaradas como comentários (pelo acréscimo dos caracteres “//”).

Para compreensão e estudo dos efeitos da inserção de compensadores de reativos no sistema, foram levantados os valores de tensão em todos os barramentos sem e com banco de capacitores controlado a tiristor.

Outra análise realizada é a da potência circulante no sistema. Através deste estudo serão verificadas as alterações nos valores de ativos e reativos provocadas pela inserção de compensador em série. Após realizada a solução do circuito no OpenDSS, a execução do comando “*Show Powers*” cria um arquivo de texto (*.TXT) que é automaticamente exibido na tela. Esse arquivo mostra, para todos os elementos existentes no circuito ativo, o valor das potências ativa (kW), da reativa (kVAr) e das perdas totais no sistema. Os valores das potências são exibidos por terminal na entrada e saída de cada elemento.

Posteriormente, será feita uma comparação entre os valores das tensões e das perdas nas linhas em condições normais de operação e no sistema com o banco de capacitores controlado a tiristor.

O intuito dessa simulação e desse estudo do sistema em diversas condições é verificar se os níveis de tensão nas barras não ultrapassam os limites estipulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

5.1 PERFIS DE TENSÃO

Aqui os resultados gerados pelo OpenDSS são apresentados por meio de gráficos que mostram a variação da tensão no decorrer do alimentador e na carga. Dentro deste período, o nível de tensão oscila em torno da adequada, precária e crítica.

Os valores de tensão em regime permanente para sistemas com tensão nominal igual ou superior a 230 kV são classificados pela ANEEL, como mencionado anteriormente, em adequados, críticos ou precários. Os valores considerados adequados estão compreendidos entre 0,95 pu e 1,05 pu. Tensões na faixa de 0,93 pu a 0,95 pu ou de 1,05 pu a 1,07 pu são consideradas precárias. Valores abaixo de 0,93 pu ou acima de 1,07 pu são chamados de críticos.

No ambiente do programa, após executar a solução do circuito, utiliza-se o comando “*Show Voltages LL Nodes*” que gera um arquivo texto do tipo *TXT que exibe a magnitude das tensões fase-fase em “por unidade” e o ângulo as tensões de linha em cada barramento do sistema.

5.1.1 Fluxo de Potência no Modo *Snapshot*

Nesta simulação objetivou-se analisar o comportamento da tensão para atendimento da carga conectada à barra 5, apontando os possíveis desvios ou violações para o circuito em teste.

Neste primeiro cenário utiliza-se o modo *Snapshot* para simulação do fluxo de potência, obtendo-se o resultado completo para os valores nominais do circuito. Através de resultados gráficos são explorados os potenciais locais de aplicação da compensação série.

O perfil de tensão pode ser visualizado a seguir em ambas configurações através do comando já citado “*Plot Profile*”.

5.1.1.1 Situação Normal de Operação

Nesta simulação pretende-se mostrar a relação inversamente proporcional do valor de tensão com a distância da fonte alimentadora e que a queda de tensão é diretamente proporcional a corrente demandada pela carga, comprovando que a operação do sistema não ocorre mais dentro de padrões aceitáveis considerados pela ANEEL devido ao aumento do carregamento do sistema, ou seja, o sistema não satisfaz mais as condições de projeto.

A Tabela 6 mostra as tensões em todas as barras do sistema sem o banco de capacitores no instante de maior carregamento do sistema.

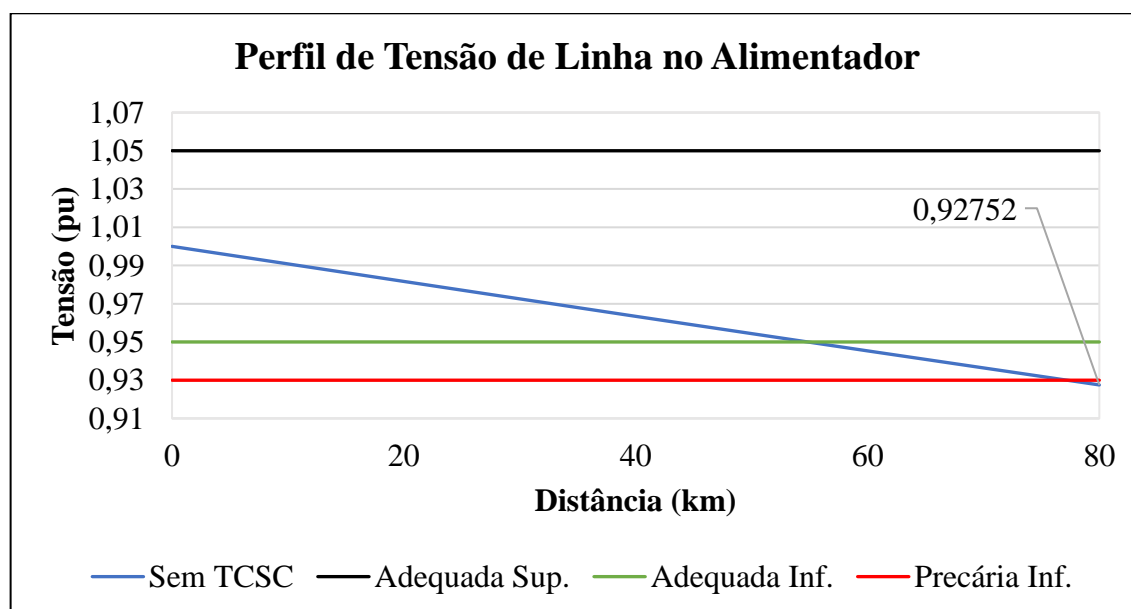
Tabela 6 - Tensões nas barras sem TCSC

Barra	Distância (km)	Tensão (pu)
1	0	1,00000
2	20	0,98166
3-1	40	0,96345
4	60	0,94541
5	80	0,92752

Fonte: O autor (2020).

Pode-se observar na Tabela 6 que as tensões identificadas nas barras 4 e 5 estão fora da faixa de operação considerada adequada pela ANEEL. O valor da tensão na barra 4, 0,94541 pu, está dentro da faixa considerada precária, enquanto o valor da tensão na barra 5, 0,92752 pu, viola a faixa adequada se enquadrando na faixa considerada crítica. De acordo com a Figura 46, esta é a menor tensão encontrada ao longo do alimentador, na barra mais distante do sistema.

A Figura 46 mostra os perfis de tensão nas barras em função do ponto de origem no instante de maior carregamento do sistema.

Figura 46 - Perfil da tensão no alimentador modo *Snapshot* sem TCSC

Fonte: O autor (2020).

O gráfico demonstra o perfil da tensão em pu ao longo do alimentador. Nota-se que a tensão após o quilômetro 55 está abaixo de 0,95 pu, ou seja, estes valores não respeitam a faixa

estabelecida pela ANEEL para operação adequada, embora os valores de tensão das demais barras atendam a faixa de operação adequada.

Este recurso mostra-se útil para implantação do banco de capacitores controlado a tiristor já que é possível verificar visualmente em qual ponto do alimentador a correção do nível de tensão pode ser necessária.

As análises em condição normal permitem inferir que os valores de tensão diminuem conforme o aumento da distância da fonte alimentadora. As maiores quedas de tensão em um barramento são encontradas nos dois últimos barramentos.

5.1.1.2 Situação com Capacitor Série Controlado a Tiristor

É apresentado, assim como na seção anterior, o perfil de tensão para todo o circuito, porém, desta vez, o perfil do alimentador é mostrado com o emprego de um Capacitor Série Controlado a Tiristor. Desta forma pode-se comparar, no período de máxima demanda, as duas situações, operação normal e operação com TCSC, e verificar a eficiência do TCSC para melhoria dos perfis de tensão e no fluxo de potência. Esta última será abordada em seção futura. A escolha da barra para alocação do banco de capacitores foi baseada nas análises da configuração original do circuito. Tomando como base os resultados da seção anterior, o banco de capacitores foi alocado num ponto de forma que a tensão na barra 5 durante o período de maior carregamento do sistema, à noite, possua tensão de atendimento adequada.

Se o banco fosse alocado a jusante do centro da linha, a tensão poderia diminuir até atingir valores precários ou críticos e, se fosse alocado a montante, os mesmos níveis poderiam ser atingidos com a elevação da tensão. Pode-se notar claramente, ao longo desta seção, os efeitos do TCSC no comportamento da tensão nas barras.

A Tabela 7 mostra as tensões em todas as barras do sistema com o banco de capacitores controlado a tiristor.

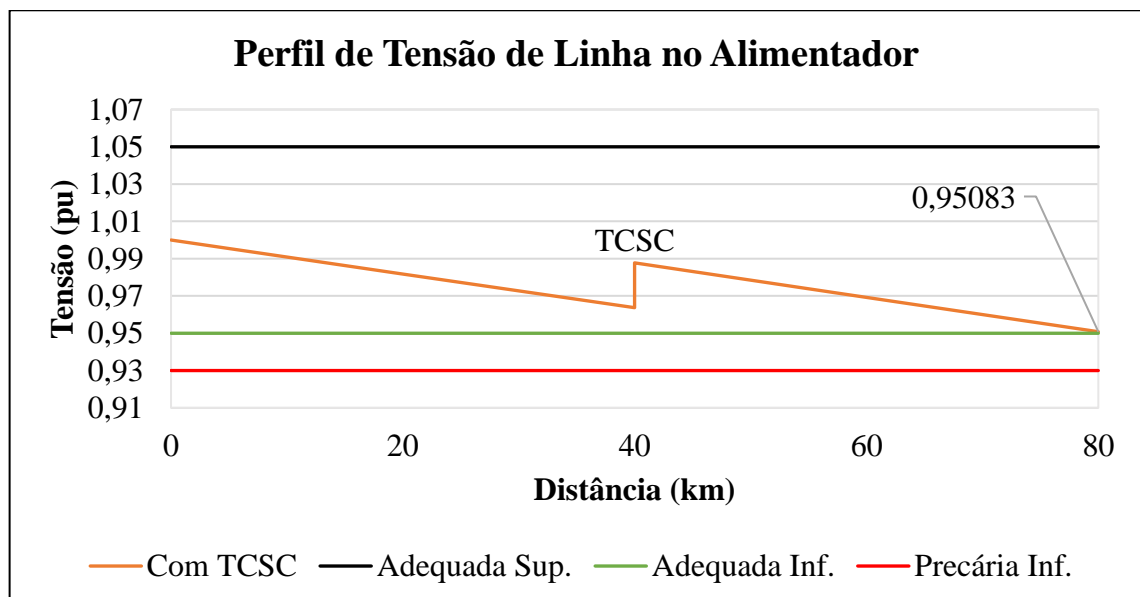
Tabela 7 - Tensões nas barras com TCSC

Barra	Distância (km)	Tensão (pu)
1	0	1,00000
2	20	0,98179
3-1	40	0,96375
3-2	40	0,98770
4	60	0,96918
5	80	0,95083

Fonte: O autor (2020).

Conforme a Tabela 7 pode-se notar uma situação melhor de valores de tensão, isto é, pode-se verificar que, após a barra 3-1, os valores apresentados são mais altos do que os valores em condição normal de operação mostrados na Tabela 6. A menor tensão encontrada, nesta nova configuração, foi de 0,95083 pu na barra 3-1 durante o período de maior carregamento.

O banco de capacitores controlado a tiristor, situado entre as barras 3-1 e 3-2, apresenta capacitância igual à 117,83 μF e os perfis são mostrados na Figura 47, onde pode-se observar a atuação dos bancos de capacitores regulando a tensão no alimentador. A Figura 47 mostra os perfis de tensão nas barras em função do ponto de origem e com isso pode-se observar se a tensão permanece dentro dos parâmetros de queda de tensão conforme a ANEEL. Nos gráficos vão estar delimitados os critérios de tensão como tensão adequada inferior, adequada superior e precária inferior.

Figura 47 - Perfil da tensão no alimentador modo *Snapshot* com TCSC

Fonte: O autor (2020).

Nesta condição os níveis de tensão foram superiores à condição anterior nas barras a jusante da barra 3-1 devido à presença de compensação de reativos, demonstrando a melhora significativa das variáveis monitoradas na configuração com banco de capacitores controlado a tiristor.

Verificou-se também que a inserção do TCSC para compensar os reativos contribuí para a elevação de tensão nas barras apontadas na simulação anterior como precárias ou críticas, ou seja, nas barras posteriores a instalação do TCSC (barras 3-2, 4 e 5) principalmente no período de maior carregamento do circuito.

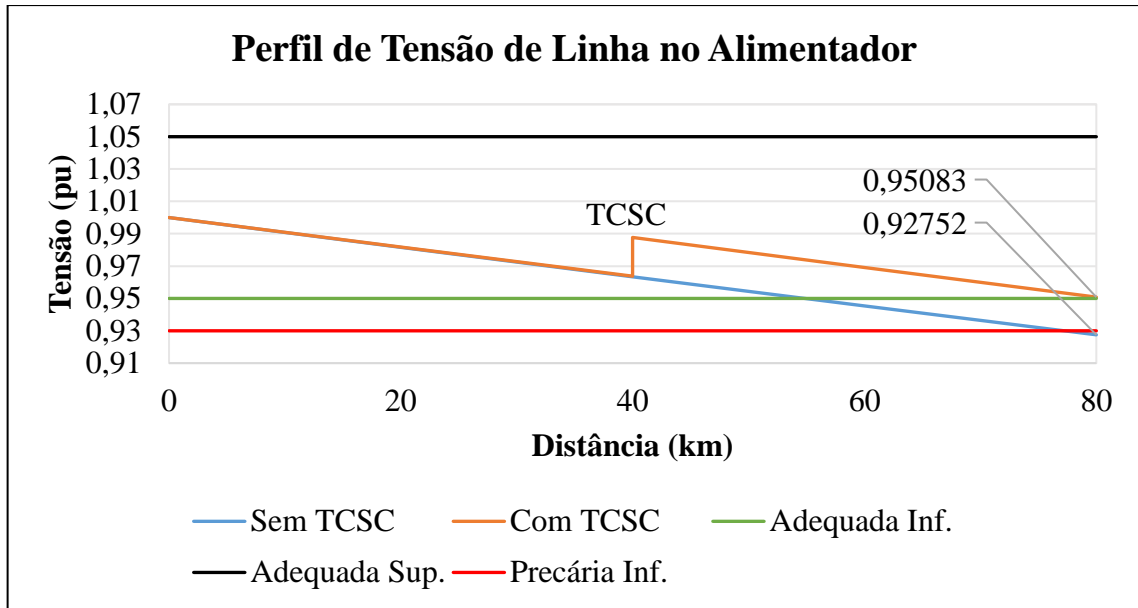
A barra 5 apresenta tensão de 0,95083 pu, enquanto a tensão neste mesmo ponto, se não existisse o banco de capacitores, seria de 0,92752 pu no mesmo período. Ou seja, a instalação dos capacitores provoca uma grande elevação de tensão nos períodos de muita demanda para restaurar a tensão em níveis próximos à tensão de atendimento na barra conectada à carga, enquanto nos períodos de baixa carga, apenas uma leve elevação na tensão já é o suficiente para atingir este nível, uma vez que a compensação série é proporcional ao quadrado da corrente.

A fim de manter os níveis de tensão nos lugares mais distantes dentro da faixa adequada, a tensão no ponto onde o TCSC está alocado sofre um súbito aumento na tensão e evita que a tensão entre nos patamares precários.

As violações do nível da tensão verificadas no caso abordado ocorrem essencialmente devido aos problemas de regulação provocados pela impedância da fonte e da linha, onde a impedância da linha geralmente é preponderante.

A figura 48 demonstra o gráfico da tensão em operação normal e com TCSC de forma conjunta para fazer uma análise simultânea do perfil das duas quedas de tensão.

Figura 48 - Perfil da tensão no alimentador modo *Snapshot* sem e com TCSC



Pode-se verificar no gráfico da Figura 48 grandes diferenças nos valores de tensão entre as configurações com e sem banco de capacitores e as melhoras significativas provocadas na qualidade de energia elétrica envolvida pela inserção do banco de capacitores. A influência direta do banco pode ser vista por meio do distanciamento das curvas de perfil de tensão especialmente depois da barra onde está alocado o capacitor série. Antes desse ponto, os valores de tensão ficam bem próximos. Por meio desta análise, pode-se constatar que a compensação série controlada é mais efetiva após o ponto da sua instalação.

Além disso, com a introdução de bancos de capacitores, verifica-se a ocorrência de valores de tensão dentro da faixa chamada adequada ao longo do alimentador.

Os valores de tensão são maiores quando o banco de capacitores é incluído no circuito. Isso se deve ao fato da diminuição dos reativos circulantes em todo o sistema após a inserção do banco. Quando os capacitores são retirados do sistema, a potência reativa consumida pelo circuito aumenta, provocando queda de tensão em todo circuito.

5.1.2 Fluxo de Potência no Modo *Daily*

Este cenário realiza a simulação do fluxo de potência no modo *Daily*. Este modo executa uma série de soluções seguindo as curvas diárias de carga descritas na seção 4.2.1.

Os resultados obtidos no modo *Daily* demonstram o comportamento do circuito em um cenário de 24 horas de operação.

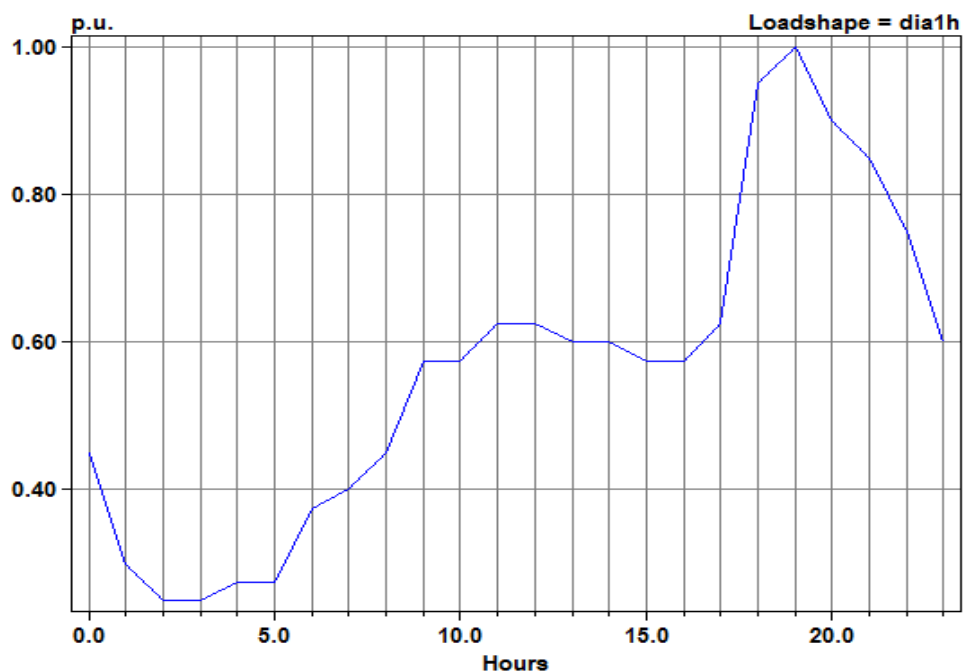
Ao contrário do modo instantâneo *Snapshot*, no modo *Daily* os resultados são sempre exibidos em função do tempo proposto, conforme se destaca na Figura 49.

5.1.2.1 Situação Normal de Operação

Nesta simulação pretende-se mostrar a relação diretamente proporcional do valor de tensão com a impedância da carga, comprovando que a operação do sistema não ocorre mais dentro de padrões aceitáveis considerados pela ANEEL devido ao aumento do carregamento do sistema.

A Figura 49 mostra o perfil de carga alimentada pelo sistema durante um período de 24 horas.

Figura 49 - Carregamento do circuito modo *Daily*

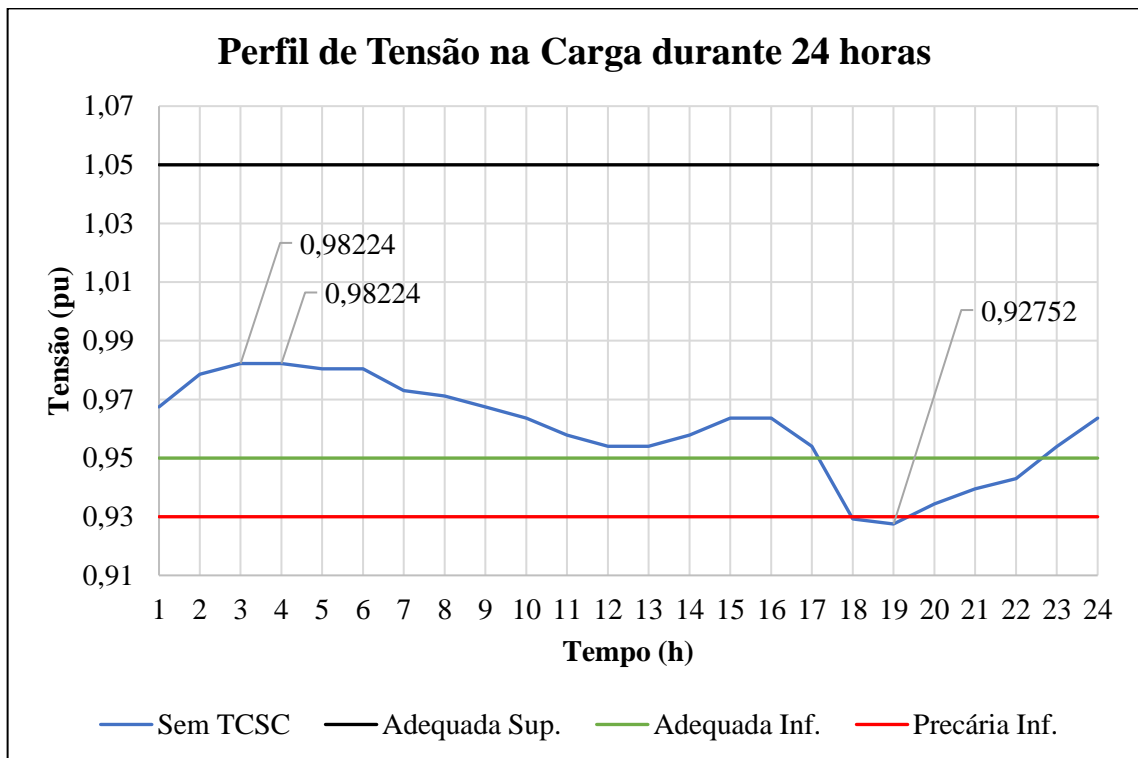


Fonte: O autor (2020).

Foram realizadas análises, principalmente em condições extremas de carga, para o comportamento da tensão no ponto de entrega de energia à carga. Conforme se verifica na Figura 50, no período de carga elevada se observa alterações significativas no módulo da tensão.

A Figura 50 mostra os perfis de tensão, em pu, na barra que conecta a carga ao sistema durante o período de 24 horas.

Figura 50 - Perfil da tensão na carga no circuito modo *Daily* sem TCSC



Fonte: O autor (2020).

As análises em condição normal permitem inferir que os valores de tensão diminuem conforme o aumento da carga. Por exemplo, a tensão entre as 3:00 e as 4:00 é de 0,98224 pu, este é o maior valor de tensão encontrado no dia, enquanto o menor valor observado, que ocorre às 19:00, é de 0,92752 pu. Os valores máximo e mínimo encontrados coincidem com os períodos de demanda mínima e máxima respectivamente.

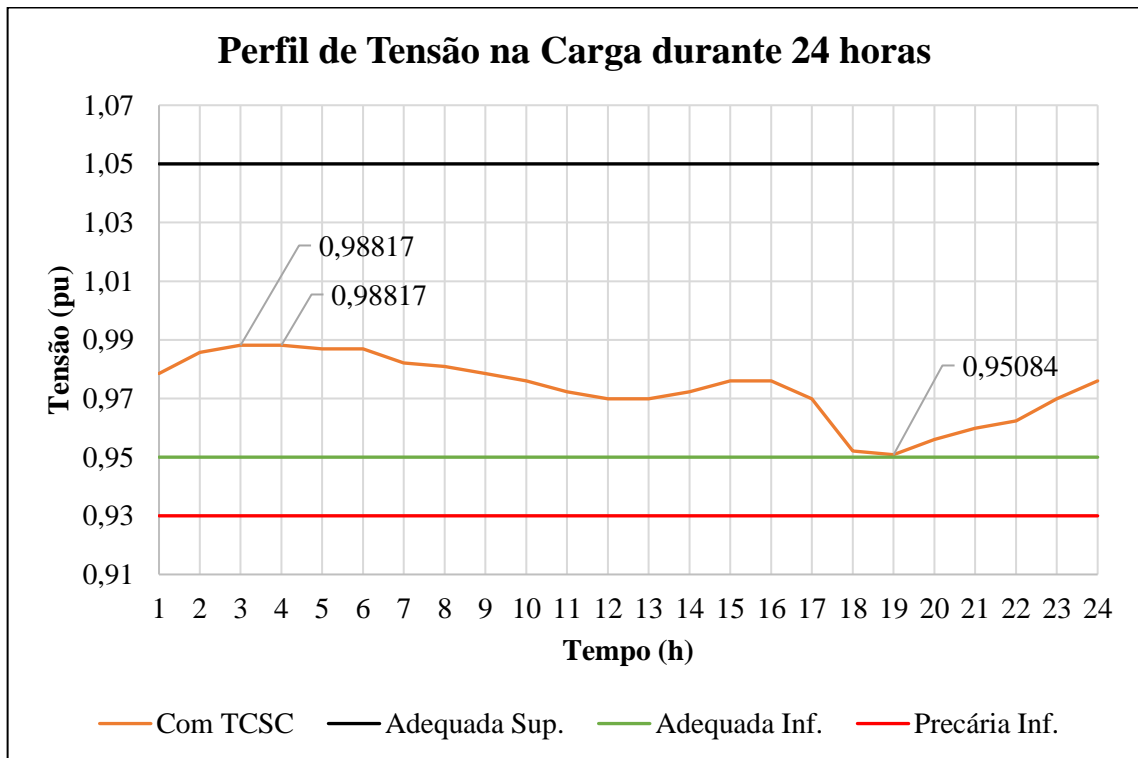
Outra constatação que pode ser feita é que a tensão de atendimento fica abaixo dos valores adequados entre as 17:15 e as 22:30 e dentro deste período a tensão chega a extrapolar a faixa precária e adentrar na faixa crítica entre as 18:00 e as 19:30. Conclui-se, então, através deste estudo, que o sistema opera fora do intervalo de valores de tensão considerados adequados pela ANEEL durante o período do dia em que o carregamento supera 80%.

5.1.2.2 Situação com Capacitor Série Controlado a Tiristor

Será mostrado aqui, assim como na seção anterior, o perfil de tensão para todo o dia, porém, desta vez, será exibido o perfil do alimentador com o emprego de um capacitor controlado a tiristor. Desta forma pode-se comparar as duas situações, situação normal de operação e operação com TCSC, e verificar a eficiência do TCSC para melhoria dos perfis de tensão e no fluxo de potência. Esta última será abordada na próxima seção.

Na Figura 51, apresenta-se o perfil de tensão verificado nas três fases da carga.

Figura 51 - Perfil da tensão na carga no circuito modo *Daily* com TCSC



Fonte: O autor (2020).

As análises do sistema com Capacitor Série Controlado a Tiristor permitem inferir que os valores de tensão diminuem conforme o aumento da carga, assim como na situação anterior, porém, desta vez uma menor queda de tensão é verificada. Por exemplo, a tensão entre as 3:00 e as 4:00, na configuração sem TCSC, é de 0,98224 pu, este é o maior valor de tensão encontrado no dia, enquanto o valor encontrado na nova configuração no mesmo horário é de 0,98817 pu. Já o menor valor observado, que ocorre às 19:00, na configuração sem TCSC, é de

0,92752 pu, enquanto o valor encontrado na nova configuração no mesmo horário é de 0,95083 pu.

Diferente da situação normal de operação que extrapola a faixa de valores de tensão adequados durante a noite, na situação com TCSC, observa-se que a tensão de atendimento permanece durante o dia todo em níveis adequados, ou seja, a tensão não decai além de 0,95 pu em momento algum. Isto pode ser constatado pela tensão mínima diária citada anteriormente.

Conclui-se, então, através deste estudo, que o sistema opera dentro do intervalo de valores de tensão considerados adequados pela ANEEL durante o dia todo, inclusive quando o carregamento é máximo.

5.2 FLUXO DE POTÊNCIA

Será apresentado aqui os resultados gerados pelo OpenDSS que mostram a variação de potência no decorrer do alimentador no período de maior carregamento do sistema, ou seja, quando a potência aparente da carga é a nominal.

No ambiente do programa, após executar a solução do circuito, utiliza-se o comando “*Show Powers kVA Elements*” que gera um arquivo texto do tipo *TXT que é automaticamente exibido na tela. Esse arquivo mostra em ambos os terminais, para todos os elementos de fornecimento de energia existentes no circuito ativo, o valor das potências ativa (kW), reativa (kVAr) e aparente (kVA).

Outro comando utilizado é o “*Show Losses*”. Este comando também gera um arquivo texto, porém este arquivo exhibe as perdas totais no sistema de potência em kW e kVAr dos elementos do circuito.

5.2.1 Situação Normal de Operação

Nesta seção serão mostrados os fluxos de potência e as perdas verificadas no circuito em sua configuração original. A ausência do banco de capacitores série controlado deve provocar aumento de reativos circulantes no sistema.

A Tabela 8, retirada do arquivo texto gerado pelo OpenDSS, mostra os valores das potências ativa e reativa que entram (sentido positivo) e saem dos terminais dos elementos de interesse do circuito no período de maior carga sem o banco de capacitores série controlado.

Tabela 8 - Potências em situação normal de operação no período de maior carga sem TCSC

Elementos de Fornecimento de Energia	Terminal	P1 (kW)	Q1 (kVAr)	S1 (kVA)	FP
Vsource.SOURCE	1	0	0	0	0
Vsource.SOURCE	2	-110111,0	-60350,7	125565,3	0,8769
Line.LINHA_1-2	1	110111,0	60350,7	125565,3	0,8769
Line.LINHA_1-2	2	-108787,7	-57954,4	123261,8	0,8826
Line.LINHA_2-3/1	1	108787,7	57954,4	123261,8	0,8826
Line.LINHA_2-3/1	2	-107464,4	-55558,1	120976,4	0,8883
Line.LINHA_3/1-4	1	107464,4	55558,1	120976,4	0,8883
Line.LINHA_3/1-4	2	-106141,0	-53161,8	118710,1	0,8941
Line.LINHA_4-5	1	106141,0	53161,8	118710,1	0,8941
Line.LINHA_4-5	2	-104817,7	-50765,5	116464,1	0,9000

Fonte: O autor (2020).

A fonte de potência do sistema fornece 125565,3 kVA, sendo que a componente ativa vale 110111,0 kW e a componente reativa, 60350,7 kVAr. Ao longo do alimentador, as linhas provocam perdas por aquecimento tanto ativas quanto reativas. Dessa maneira, os valores de potências ativa e reativa, no ponto de acoplamento com a carga, são de -104817,7 kW e de -50765,5 kVAr respectivamente. Estes valores são menores do que os solicitados pela carga.

A partir da observação da Tabela 8, pode-se inferir que, à medida que a potência reativa diminui no decorrer do alimentador numa proporção maior que a ativa, o fator de potência cujo valor é a relação entre as potências ativa e reativa aumenta.

Através do arquivo texto gerado pelo comando “*Show Losses*” é possível extrair os dados que preenchem a Tabela 9, onde as perdas no alimentador no período de máxima demanda são apresentadas.

Tabela 9 - Perdas sem TCSC

Elemento	Perdas	
	(kW)	(kVAr)
Line.LINHA_1-2	1323,32	2396,29
Line.LINHA_2-3/1	1323,32	2396,29
Line.LINHA_3/1-4	1323,32	2396,29
Line.LINHA_4-5	1323,32	2396,29
Total	5293,30	9585,16

Fonte: O autor (2020).

Como o cabo utilizado é o mesmo e as linhas possuem a mesma extensão, as perdas ativas e reativas em cada linha são idênticas, sendo a perda ativa, conforme a Tabela 9, equivalente a 1323,32 kW e a reativa, a 2396,29 kVAr. Por meio da Tabela 9, é possível verificar também que, como a reatância indutiva do condutor é menor do que a resistência do mesmo, as perdas reativas são superiores às perdas ativas.

5.2.2 Situação com Capacitor Controlado a Tiristor

Nesta seção serão mostrados os fluxos de potência e as perdas verificadas no circuito em sua nova configuração. A implantação do banco de capacitores série controlado deve provocar redução de reativos circulantes no sistema, visando a diminuição das perdas de potência no sistema e melhoria nos perfis de tensão.

A Tabela 10, retirada do arquivo texto gerado pelo OpenDSS, mostra os valores das potências ativa e reativa que entram (sentido positivo) e saem dos terminais dos elementos de interesse do circuito no período de maior carga com o banco de capacitores série controlado.

Tabela 10 - Potências em situação normal de operação no período de maior carga com TCSC

Elementos de Fornecimento de Energia	Terminal	P1 (kW)	Q1 (kVAr)	S1 (kVA)	FP
Vsource.SOURCE	1	0	0	0	0
Vsource.SOURCE	2	-115822,6	-56423,8	128835,2	0,8990
Line.LINHA_1-2	1	115822,6	56423,8	128835,2	0,8990
Line.LINHA_1-2	2	-114429,4	-53901,1	126488,8	0,9047
Line.LINHA_2-3/1	1	114429,4	53901,1	126488,8	0,9047
Line.LINHA_2-3/1	2	-113036,3	-51378,4	124165,0	0,9104
Line.LINHA_3/2-4	1	113036,3	58442,0	127250,4	0,8883
Line.LINHA_3/2-4	2	-111643,1	-55919,2	124864,5	0,8941
Line.LINHA_4-5	1	111643,1	55919,2	124864,5	0,8941
Line.LINHA_4-5	2	-110250,0	-53396,5	122500,0	0,9000

Fonte: O autor (2020).

Nesta condição os níveis de potência aparente e ativa foram superiores à condição anterior enquanto a reativa foi inferior, a fonte de potência do sistema desta vez, ao invés de entregar 125565,3 kVA, fornece 128835,2 kVA, sendo que a componente ativa vale 115822,6 kW e a componente reativa, 56423,8 kVAr. Com a implantação do TCSC entre as barras 3-1 e 3-2, há uma injeção de reativos neste ponto do circuito, provocando uma elevação

de potência reativa de 51378,4 kVAr para 58442,0 kVAr. Isto é, a compensação série controlada injeta no sistema 7063,6 kVAr. Sem o TCSC, a potência reativa nesta mesma posição é de 55558,1 kVAr.

Ao longo do alimentador, do mesmo modo que na simulação anterior, as linhas provocam perdas por aquecimento tanto ativas quanto reativas. Dessa maneira, os valores de potências ativa e reativa, no ponto de acoplamento com a carga, na nova configuração do circuito, são de 110250,0 kW e de 53396,5 kVAr respectivamente. Estes valores são maiores do que os obtidos na simulação anterior e, além disto, são iguais aos solicitados pela carga.

A partir da observação da Tabela 10, pode-se inferir que, os níveis de fator de potência, na presença da compensação série controlada, aferidos em todos os barramentos são maiores principalmente nas barras a jusante da 3-1. Por exemplo, na barra 1, o fator de potência registrado, sem TCSC, é de 0,8769, enquanto, com TCSC, é de 0,8990. Além do mais, o maior fator de potência registrado ao longo da linha fica situado na barra 3-1 cujo valor é de 0,9104. A melhoria no fator de potência acarreta o aumento da capacidade de transmissão de potência ativa. Através destas últimas análises, é possível verificar que a instalação do TCSC reduz a quantidade de reativos circulantes nas linhas e, conseqüentemente, as perdas reativas da linha diminuem. A compensação série de linhas de transmissão se faz para aumentar a capacidade de transferência de potência. Como consequência deste aumento, é provável o aumento das perdas ativas na linha compensada.

Através do arquivo texto gerado pelo comando “*Show Losses*” é possível extrair a Tabela 11, onde as perdas no alimentador com TCSC no período de máxima demanda são apresentadas.

Tabela 11 - Perdas com TCSC

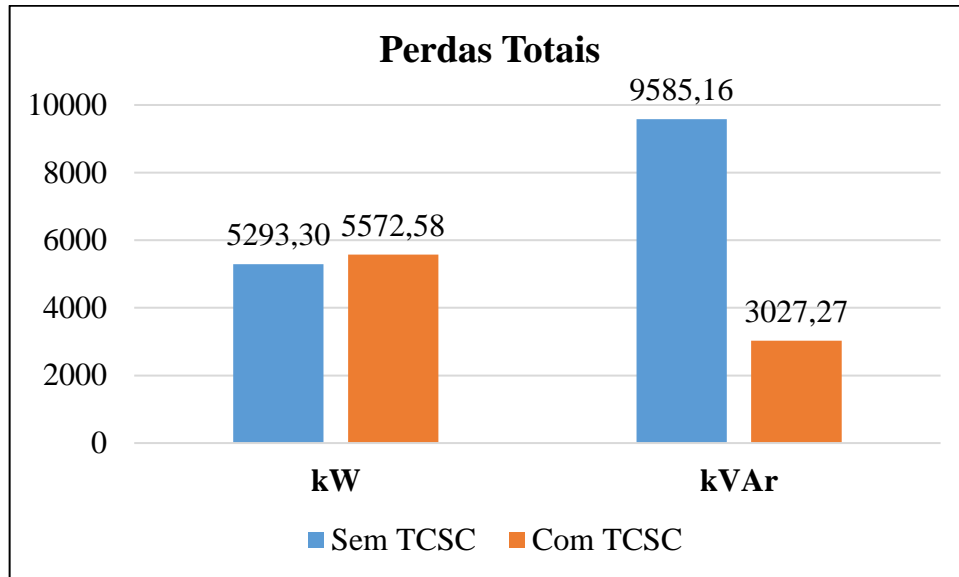
Elemento	Perdas	
	(kW)	(kVAr)
Line.LINHA_1-2	1393,15	2522,72
Line.LINHA_2-3/1	1393,15	2522,72
Capacitor.C	0	-7063,61
Line.LINHA_3/2-4	1393,15	2522,72
Line.LINHA_4-5	1393,15	2522,72
Total	5572,58	3027,27

Fonte: O autor (2020).

Por meio das Tabelas 10 e 11, pode-se obter o gráfico, apresentado na Figura 52, que mostra um comparativo entre as perdas totais no circuito de interesse antes e depois da

compensação série controlada no período que possui maior corrente circulante, fluxo de potência e as mais elevadas quedas de tensão para ambas configurações.

Figura 52 - Perdas totais no sistema



Fonte: O autor (2020).

Assim como na situação anterior, as perdas ativas e reativas em cada linha, pelas mesmas razões, são idênticas, sendo a perda ativa, conforme a Tabela 11, equivalente à 1393,15 kW e a reativa, à 2522,72 kVAr. Por meio da Tabela 11, é possível verificar, através do sinal negativo, a potência reativa capacitiva injetada pela compensação série controlada no sistema cujo valor corresponde à 7063,6 kVAr. Este valor representa exatamente 70% das perdas reativas totais que equivalem à 10090,88 kVAr. Porém, devido a este fornecimento de reativos, o total de perdas reativas é de apenas 3027,27 kVAr, bastante inferior ao valor da simulação anterior, sem TCSC, de 9585,16 kVAr.

A ausência do banco de capacitores aumentou significativamente as perdas reativas e praticamente manteve as ativas no circuito como pode ser visto na Figura 52 que mostra as perdas totais no sistema.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho foi motivada pela percepção do crescimento dos sistemas elétricos de potência devido ao aumento da demanda de energia elétrica e pelas necessidades de maior confiabilidade dos sistemas, de atender os consumidores com níveis de tensão adequados e de redução de custos.

Várias estratégias e ferramentas são utilizadas pelas concessionárias para cumprir essas exigências. Os controladores FACTS destacaram-se nesse cenário devido a velocidade de resposta e margem de controle.

Os controladores FACTS baseiam-se em eletrônica de potência e tem como principais objetivos aumentar a capacidade das atuais linhas de transmissão e controlar o fluxo de potência, além de aumentar os limites de estabilidade angular e de tensões e amortecer oscilações transitórias. Dentre os diversos controladores FACTS, o TCSC foi o escolhido para modelagem e análise em regime permanente em um algoritmo de fluxo de carga.

Este trabalho mostrou que o TCSC utiliza como princípio fundamental a injeção de uma reatância capacitiva variável, de forma a diminuir a queda de tensão indutiva da linha de transmissão e assim, aumentar a capacidade do sistema de transmissão e controlar o fluxo de potência. De maneira geral, trata-se de um compensador série composto por uma capacitância fixa em paralelo com um reator controlado a tiristores.

As quedas de tensão dos trechos sob análise resultaram em percentuais de valores de queda de tensão, os quais foram inseridos graficamente em forma de perfil, para possibilitar uma melhor leitura dos gráficos.

Verificam-se nos gráficos dois perfis para efetuar a análise da tensão, um apresenta a queda de tensão em todo o circuito ora sem, ora com TCSC, e o outro apresenta a tensão no ponto de conexão com a carga durante um período de vinte e quatro horas. A tensão tem uma queda gradativa ao longo do alimentador devido a demanda que oscila entre dois períodos, atingindo valores de carga máxima e mínima. A demanda máxima tem um comportamento mais acentuado na queda de tensão comparado com a demanda mínima, mas a queda de tensão na demanda máxima mostra que a tensão no gráfico ficou estabelecida dentro da tensão adequada na presença do TCSC, mantendo-se dentro dos parâmetros estabelecidos pela ANEEL.

De forma geral conclui-se que a presença de capacitores é fundamental para manutenção dos valores de tensão dentro dos parâmetros adequados, evitando a flutuação da tensão no consumidor. Como visto, ao retirar-se o banco de capacitores do sistema, é observada queda de tensão ao longo do alimentador. No período de maior demanda, o perfil de tensão sem TCSC

chega a 0,92752 pu, considerado crítico pela ANEEL. Nesta situação o nível de tensão para os consumidores não será mais adequado, com isso os consumidores localizados no final do circuito podem estar sujeitos às variações de tensão, tendo problemas no ponto de conexão.

O banco de capacitores controlado no alimentador tem a finalidade de manter a tensão dentro dos parâmetros estabelecidos. É interessante que no período de menor carga não teria a necessidade de um banco para regular a tensão elevando o nível, já que a queda de tensão não foi expressiva, mantendo-se dentro dos parâmetros, ou seja, o sistema sem a compensação de reativos responde com perfil de tensão muito próximo do que seria com a compensação de reativos. A queda de tensão na demanda mínima com a ajuda do TCSC instalado seria só para manter o ajuste da tensão, onde a tensão no alimentador teve uma queda considerável, mas se manteve dentro dos parâmetros estabelecidos. Nesta situação o TCSC teria a função de elevar a tensão para os consumidores localizados após o ponto definido pela instalação do banco, mantendo uma tensão mais equilibrada para o funcionamento de seus equipamentos.

Porém, no período de maior demanda, é possível observar que o sistema sem a compensação de reativos apresenta níveis de tensão bem mais baixos, quase sempre encontrados na faixa precária de operação e, em alguns barramentos, na faixa crítica, abaixo de 0,93 pu. Em contrapartida, o TCSC eleva a tensão e mantém o equilíbrio da mesma a partir deste ponto até o fim, deixando os consumidores com o nível de tensão dentro dos parâmetros estabelecidos pela agência reguladora ANEEL. Ou seja, o sistema não consegue manter os níveis de tensão nos períodos de carga máxima sem a atuação da compensação de reativos.

Outro benefício que a compensação série proporciona é a melhora do desempenho do sistema em regime permanente através do controle do fluxo de potência, aumentando a capacidade de transmissão. Como consequência deste aumento, é provável um moderado aumento das perdas ativas e uma expressiva redução das perdas reativas na linha compensada.

Observa-se também que o fluxo de potência reativa apresenta uma grande variação durante o dia, mas o fator de potência varia menos. Isto se deve ao fato de que o fator de potência é uma relação entre potência ativa e aparente. No caso em questão, quando o fluxo de potência reativa aumentou, os fluxos de potência ativa e aparente também aumentaram, e, conseqüentemente, o fator de potência permaneceu praticamente constante. E, com a compensação de 70% da linha, houve uma redução dos reativos circulantes, o que favorece o aumento do fator de potência.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é sugerida a análise dos fluxos de potência distribuídos em sistemas de potência CA não radiais na presença do TCSC. Os fluxos de potência em malha são distribuídos fundamentalmente em função das impedâncias das linhas de transmissão, ou seja, uma linha com baixa impedância terá fluxos de potência maiores do que uma linha com alta impedância.

Outro estudo sugerido é o da redução da corrente de curto-circuito. Durante eventos com elevadas correntes de curto-circuito o TCSC pode alterar seu modo de operação de capacitância controlável para indutância controlada, restringindo as correntes de curto-circuito.

E por fim, a última análise proposta visa a aplicação do capacitor série controlado para sobrecompensar a parcela da reatância indutiva das linhas. A sobrecompensação pode ainda proporcionar, se tomados os devidos cuidados, melhores resultados, pois além de compensar a indutância da linha compensa parte dos reativos da carga, reduzindo a corrente que circula na linha, minimizando as perdas e ampliando a faixa de regulação do banco série.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Felipe Augusto Ferreira de. **Compensadores Estáticos de Reativos Empregados em Redes de Baixa Tensão com Geradores Distribuídos de Energia**. Sorocaba, 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/146733/almeira_faf_me_bauru.pdf?sequence=4&isAllowed=y. Acesso em: 22 nov. 2019.

ALMEIDA, Patrick Roberto de. **Compensador Série Controlado a Tiristores na Distribuição: Compensação Dinâmica**. Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/126308/000800821.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 22 nov. 2019.

ANEEL. **Resolução n. 395, de 15 de dezembro de 2009**. Aprova os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2009395.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

ANEEL. **Nota Técnica n° 0057/2014-SRD/ANEEL, de 11 de junho de 2014**. Aprimoramento da metodologia de cálculo de perdas na distribuição regulamentada no Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição do PRODIST. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/026/documento/nota_tecnica_0057_srd.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2020.

BRITO, M. E. **Dispositivos de Compensação de Energia Reativa e Controle da Tensão para Redução de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição**. Recife, 2015. Disponível em: https://www.ufpe.br/documents/39830/745800/57_MarcioBrito/f40bbfcc-aaf8-4f6c-bb69-f575dfb231a0. Acesso em: 21 nov. 2019.

CAVALIERI, C. A. C. **Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados**, 2001, 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

DA COSTA, Janayna Silva. **Estudo e Simulação de um Dispositivo Compensador Estático de Reativos – SVC (Static Var Compensator)**. 2016.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. [2009?], Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/it741/cap5.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2019.

ELGERD, Olle Ingemar. **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**. McGraw-Hill do Brasil, 1976.

FILHO, Sergio Alampi. **Análise de Controladores Eletrônicos em Sistemas de Distribuição de Energia**. Ilha Solteira, 2005. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87283/alampifilho_s_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 22 nov. 2019.

GAMA, Carlos Aparecido. **Utilização de Equipamentos com Tecnologia FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em Sistemas de Potência: Compensação Série Controlada**.

Florianópolis, 1995. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/111583/99774.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 nov. 2019.

GOMES, Gabriel de Novais et al. **Compensação de Reativos e os seus Efeitos sobre o SEP (Sistema Elétrico de Potência)**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/10/revista-esfera-tecnologia-v03-n01-artigo08.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. California: Wiley-IEEE Press, 1999.

JESUS, Nelson C. de. **Modelagem e Simulação Dinâmica do TCSC Utilizando o Programa de Transitórios Eletromagnéticos Microtran para Estudos de Qualidade de Energia**. Aracaju, 2003. Disponível em: <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/MODELAGEM-E-SIMULAC%CC%A7A%CC%83O-DINA%CC%82MICA-DO-TCSC-UTILIZANDO-O-PROGRAMA-DE-TRANSITO%CC%81RIOS-ELETROMAGNE%CC%81TICOS-MICROTRAN-PARA-ESTUDOS-DE-QUALIDADE-DE-ENERGIA.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2019.

MASUDA, M. **Aplicação do dispositivo FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em sistema de distribuição – Simulação e desempenho**, São Paulo, 2006, p. 83. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. Estados Unidos: McGraw Hill, 1994.

MASIERO, A. C. C. et al. **Estudo de Estabilidade Transitória em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Métodos Energéticos**. Curitiba, 2016. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10086/1/CT_COELE_2016_1_11.pdf. Acesso em: 20 nov. 2019.

MIASAKI, C. T. **Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Controladores FACTS**, 2006, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), UNESP, Ilha Solteira, SP, 2006.

MONTICELLI, Alcir José; GARCIA, Ariovaldo. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Ed Unicamp, 1999.

MUZITANO, G.F. **Comparação da Compensação de Reativo entre Linhas Convencionais e não Convencionais**, Rio de Janeiro, 2007. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ONS. **Diagnóstico dos Bancos de Capacitores Série Fixos (FSC) e Controlados (TCSC) da Interligação Norte/Sudeste**. Rio de Janeiro, 2016.

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

PAIXÃO, Richard Lester Damas. **A Compensação Série Chaveada como Solução para o Problema do Colapso Transitório de Tensão na Interligação Norte-nordeste**. Brasília, 2006. Disponível em:

http://www.gsep.ene.unb.br/producao/marco/Dissertacao_RichardLester.pdf. Acesso em: 22 nov. 2019.

PASCHOARELI, JR. D. **Introdução aos sistemas flexíveis e controladores FACTS**” – Março de 2003, DEE-DEIS/UNESP.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência - Dispositivos, circuitos e aplicações**. Tradução de L. Abramowicz; revisão técnica C. Stein - 4.Ed. - São Paulo: Person Education Brasil, 2014.

SILVA, David. **Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Considerando Redução de Barras**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Aluno, Londrina, 2016.

SILVA, Marcelo Santos. **Estudo Comparativo do Modelo Linear de Heffron e Phillips e Modelo de Sensibilidade de Potência com a Inclusão dos Dispositivos FACTS SVC e TCSC**. 2008.

SILVA, W. R. **Estudo de Dispositivos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems)**. Dissertação de graduação, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. **Flexible AC Transmission Systems (FACTS)**, The Institution of Electrical Engineers (IEE), Londres, Reino Unido, (1999).

STEVENSON, William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. McGraw-Hill do Brasil, 1974.

WATANABE, E. H. Et al. SBA Controle & Automação. **Tecnologia FACTS – Tutorial**. [S. l.], v. 9, 1998.

ZAMPELLIN, Leonardo. **Regulação de Tensão Utilizando Compensador Série Controlado a Tiristores para Sistemas de Distribuição**. Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/fff9/b9e68c832d11e1c734cee560d0f60d7bc928.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2019.

ZANETTA JR, Luiz Cera. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. Editora Livraria da Física, 2006.

ANEXO A – SCRIPTS DE COMANDO NO OPENDSS

Clear

//Definição do circuito

New Circuit.5BUS

~ basekv = 230

~ bus1 = 1

~ pu = 1.00

~ angle = 0

~ phases = 3

~ R1 = 0

~ X1 = 0.00001

//Definição da curva de carga

//New Loadshape.dia1h npts=24 interval=1

//~ mult = (0.45 0.3 0.25 0.25 0.275 0.275 0.375 0.4 0.45 0.5 0.575 0.625 0.625 0.575 0.5 0.5
0.625 0.975 1 0.9 0.825 0.775 0.625 0.5)

//Definição dos parâmetros dos condutores

New Linecode.L1

~ nphases = 3

~ basefreq = 60

~ R1 = 0.222

~ X1 = 0.402

~ C1 = 0

~ units = km

~ normamps = 322

//LINHAS

//Linha 1-2

New Line.LINHA_1-2

~ phases = 3

~ bus1 = 1

~ bus2 = 2

~ linecode = L1

~ length = 20

//Linha 2-3/1

New Line.LINHA_2-3/1

~ phases = 3

~ bus1 = 2

~ bus2 = 3-1

~ linecode = L1

~ length = 20

//Linha 3/2-4

New Line.LINHA_3/2-4

~ phases = 3

~ bus1 = 3-2

~ bus2 = 4

~ linecode = L1

~ length = 20

//Linha 3/1-4

//New Line.LINHA_3/1-4

//~ phases = 3

//~ bus1 = 3-1

//~ bus2 = 4

//~ linecode = L1

//~ length = 20

//Linha 4-5

New Line.LINHA_4-5

~ phases = 3

~ bus1 = 4

~ bus2 = 5

~ linecode = L1

~ length = 20

//Definição do capacitor

//New Capacitor.C

//~ bus1 = 3-1

//~ bus2 = 3-2

//~ phases = 3

//~ Cuf = 117.83

//~ kv = 230

//Definição da carga

New Load.Carga

~ bus1 = 5

~ phases = 3

~ kv = 230

~ kva = 122500

~ pf = 0.9

~ conn = wye

~ model = 2

//~ daily = dia1h

```
//Modo de solução

Set mode = daily
Set stepsize = 1h
Set number = 24

Set voltagebases = (230)
Calc voltagebases

//Monitor

New Monitor.Carga_Voltage element=Load.Carga terminal=1 mode=0 ppolar=no

//Coordenadas

BusCoords Coordenadas.CSV

//Medidor de tensão
New EnergyMeter.Tensao element=line.LINHA_1-2 terminal=1

Solve

Show Voltages LL Nodes
Show Powers kVA Elements
Show Losses

//Plota o circuito geograficamente
Plot Circuit Voltage max=2000 dots=n labels=n subs=n C1=$00FF0000

//Plota a tensão ao longo do alimentador
Plot Profile

//Plota a tensão ao longo do dia na barra 5
Plot Loadshape object=dia1h
Export Monitors Carga_Voltage
Plot Monitor object=Carga_Voltage channels=(1 3 5) bases=[132790.562 132790.562
132790.562]
```