

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA

ALEXSANDER BORGES
FELIPE SALLES ROCHA
RODRIGO RAFFAELLI YAGNYCZ

**MODELAGEM DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA COM COMPENSAÇÃO VIA FACTS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

ALEXSANDER BORGES
FELIPE SALLES ROCHA
RODRIGO RAFFAELLI YAGNYCZ

**MODELAGEM DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA COM COMPENSAÇÃO VIA FACTS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro
Eletricista, do Departamento Acadêmico
de Eletrotécnica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Álvaro Augusto W.
Almeida

CURITIBA
2015

**ALEXSANDER BORGES
FELIPE SALLES ROCHA
RODRIGO RAFFAELLI YAGNYCZ**

MODELAGEM DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM COMPENSAÇÃO VIA FACTS

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 01 de julho de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Álvaro Augusto W. Almeida, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Álvaro Augusto W. Almeida, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Andrea Lucia Costa, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo de nossas vidas, e não somente nestes anos como universitários, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos nossos pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Agradecemos a todos os professores por terem nos proporcionado o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

Em especial gostaríamos de agradecer ao nosso professor orientador Álvaro Augusto W. de Almeida por seus ensinamentos, dedicação, paciência e confiança ao longo das supervisões desse trabalho, o nosso muito obrigado.

Também não podemos deixar de agradecer ao Ms. Eng. Miguel Armindo Saldanha Mikilita por ter disposto de seu tempo para nos ajudar na elaboração deste trabalho.

A esta universidade, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior.

Aos nossos colegas de faculdade, companheiros de trabalhos e de brincadeiras, que fizeram parte da nossa formação e que vão continuar presentes em nossas vidas com certeza. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

RESUMO

BORGES, Alexsander; SALLES, Felipe Rocha; YAGNYCZ, Rodrigo Raffaelli; Modelagem de um Sistema de Transmissão de Energia Elétrica com Compensação via FACTS. 2015. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2015.

Este trabalho de conclusão de curso pretende elucidar de que maneira a tecnologia FACTS aplicada nas redes de transmissão de energia elétrica pode solucionar em grande parte os problemas de um SEE (Sistema Elétrico de Energia), que se resumem em basicamente três aspectos: distância de transmissão, estabilidade do sistema e controle do fluxo de potência. São apresentados alguns aspectos técnicos da aplicação dos Controladores FACTS (*flexible alternating current transmission systems*) na operação dos SEE. Os modelos dos Controladores FACTS considerados para simulações nesta pesquisa foram: TSSC (Thyristor Swiched Series Compensator) e TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator). Para avaliar os aspectos técnicos na operação em regime permanente dos FACTS foi utilizado o *software* ANAREDE disponibilizado pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) de cálculo de fluxo de potência baseado no método Newton–Raphson. Os Controladores FACTS estudados foram aplicados ao sistema de teste IEEE de 14 barras. A análise dos resultados obtidos nos testes indica que a operação de um SEE que possui FACTS é mais flexível com vantagens, tais como: aumento da transferência de potência ativa, assim como um melhor controle dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas, objetivo destacado deste trabalho.

Palavras-chave: FACTS, fluxo de potência, ANAREDE.

ABSTRACT

BORGES, Alexsander; SALLES, Felipe Rocha; YAGNYCZ, Rodrigo Raffaelli; Modeling of a Transmission System of Electric Power with Compensation by FACTS. 2015. 71f. Course Completion Thesis (undergraduate) - Electrical Engineering. Federal Technological University of Paraná, Curitiba, Paraná, 2015.

This dissertation wants to elucidate how the FACTS technology applied in electricity transmission networks can largely solve the problems of the SEE (System Electrical Energy) that could be basically resumed in three aspects: distance of transmission, system stability and the power flow control. The technical aspects of the application of FACTS Controllers (flexible alternate current transmission systems) will be presented in the operation of the SEE. The models of FACTS controllers considered for simulations in this research are: TSSC (Thyristor Switched Series Compensator) and TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator). To evaluate the technical aspects of the operation in steady state of the FACTS, was utilized the ANAREDE *software* provided by Cepel (Research Center for Electric Energy) of the power flow calculation based on Newton-Raphson method. The FACTS Controllers studied was applied to IEEE 14-bus test system. The analysis of the results obtained in the tests indicates that the operation of the SEE that has FACTS is more flexible with benefits such as: increase active power transfer lines, as well as better control of active and reactive power flows in the lines, highlighted objective of this work.

Keywords: FACTS, power flow, ANAREDE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Unifilar do TCR	22
Figura 2: Diagrama Unifilar do TSC	23
Figura 3: Diagrama Unifilar do TSSC	24
Figura 4: Diagrama Unifilar do TCSC	25
Figura 5: Diagrama unifilar do STATCOM.....	26
Figura 6: Diagrama básico do compensador série avançado SSSC.....	27
Figura 7: Diagrama unifilar do UPFC	28
Figura 8: Diagrama unifilar do IPFC.	29
Figura 9: Impedância Teórica do TCSC à 60 Hz, em função do ângulo de disparo (α)	36
Figura 10: Curva de Característica de Reatância x Ângulo de Disparo.	37
Figura 11: Curva de Capacidade de Reatância do TSSC	41
Figura 12: Interface gráfica ANAREDE	44
Figura 13: Modelo CSC instalado entre as barras 6 e 15.....	48
Figura 14: Dados de entrada do CSC no ANAREDE	51
Figura 15: Modelo CSC instalado entre as barras 6 e 15.....	54
Figura 16: Comparação entre o caso TSSC e o Caso Base	59
Figura 17: Comparação entre o caso TSSC 2 e o Caso Base	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Vendas adicionais x Capacidade de transmissão.....	31
Gráfico 2: Elevação Linear da Carga na BARRA-13 x Alteração do Fluxo de Potência - Com CSC	60
Gráfico 3: Elevação Linear da Carga na BARRA-13 x Alteração do Fluxo de potência - Sem CSC	61
Gráfico 4: Elevação Linear da Carga na BARRA-11 x Alteração do Fluxo de Potência - Com CSC	64
Gráfico 5: Elevação Linear da Carga na BARRA-11 x Alteração do Fluxo de Potência - Sem CSC	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Carga e Geração de Potência das Regiões – Brasil	15
Tabela 2: Aplicações Estáticas para os FACTS	29
Tabela 3: Mudança da Região de Ressonância para variados valores de ω	38
Tabela 4: Dados de BARRA do caso base	44
Tabela 5: Dados de LINHA do caso base	45
Tabela 6: Dados do fluxo de potência para o caso base.....	46
Tabela 7: Dados do fluxo de potência para o caso base reduzido	47
Tabela 8: Dados de BARRA do caso TSSC 1	49
Tabela 9: Dados de LINHA do caso TSSC 1.....	49
Tabela 10: Dados de entrada do CSC no <i>software</i> ANAREDE.....	51
Tabela 11: Fluxo de potência entre barras do caso TSSC 1	53
Tabela 12: Dados de barra do caso TSSC 2.....	55
Tabela 13: Dados de linha do caso TSSC 2	55
Tabela 14: Valores dos parâmetros do CSC para caso TSSC 2.....	56
Tabela 15: Fluxo de potência entre barras do caso TSSC 2	57
Tabela 16: Variação da Carga na BARRA-13 do caso TSSC1	59
Tabela 17: Variação da Carga na BARRA-13 do caso base.....	60
Tabela 18: Variação de Carga na BARRA-11 do caso TSSC 2	63
Tabela 19: Variação de carga da BARRA-11 do caso base.....	64

LISTA DE SIGLAS

AC	ALTERNATING CURRENT
ANAREDE	ANÁLISE DE REDES
ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
ASVC	ADVANCED STATIC VAR COMPENSATOR
AT	ALTA TENSÃO
BTU	BRITISH THERMAL UNIT
CEC	COMPENSADOR ESTÁTICO CONVERSÍVEL
CSC	CONVERTIBLE SERIES COMPENSATOR
DC	DIRECT CURRENT
EPE	EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA
FACTS	FLEXIBLE ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION SYSTEM
GTO	GATE TURN-OFF THYRISTOR
IEEE	INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS
IGBT	INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR
IPFC	INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER
MME	MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MSC	MECHANICAL SWITCHING OF SHUNT CAPACITORS
MSR	MECHANICAL SWITCHING OF SHUNT REACTOR
PS	PHASE SHIFTER
SE	SUBESTAÇÃO
SEP	SISTEMAS ELÉTRICO DE POTÊNCIA
SIN	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL
SR	SATURATED REACTORS
SSSC	STATIC SYNCHRONOUS SERIES COMPENSATOR
STATCOM	STATIC SYNCHRONOUS SHUNT COMPENSATOR
SVC	STATIC VAR COMPENSATOR
TCC	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
TCR	THYRISTOR CONTROLLED REACTOR
TCSC	THYRISTOR CONTROLLED SERIES CONDENSADOR
TNA	TRANSIENT NETWORK ANALYZER
TSC	THYRISTOR SWITCHED CONDENSADOR
TSR	THYRISTOR SWITCH REACTANCE
TSSC	THYRISTOR SWITCHED SERIES CONDENSADOR
UPFC	UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER
VSC	VOLTAGE SOURCED CONVERTERS

*“Um trabalho bem feito é o mais alto testemunho
que podemos dar do nosso caráter.”*

Orison Sweet Marden

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA.....	12
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3	PROBLEMA E PREMISSAS	13
1.4	OBJETIVOS	16
1.4.1	Objetivo Geral	16
1.4.2	Objetivos Específicos.....	16
1.5	JUSTIFICATIVA	16
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	CONTROLADORES FACTS	19
2.1	HISTÓRICO.....	19
2.2	DESCRITIVO TÉCNICO.....	21
2.2.1	Reator Controlado a Tiristor (Thyristor Controlled Reactor - TCR)	21
2.2.2	Capacitor Chaveado a Tiristor (<i>Thyristor Switched Capacitor - TSC</i>)	22
2.2.3	Compensador Estático de Reativos (<i>Static Var Compensator – SVC</i>)	23
2.2.4	Compensador Série Chaveado a Tiristor (<i>Thyristor Switched Séries Capacitor – TSSC</i>).....	24
2.2.5	Compensador Série Controlado a Tiristor (<i>Thyristor Controlled Series Capacitor – TCSC</i>)	25
2.2.6	Compensador Estático (STATCOM).....	26
2.2.7	Compensador Série Estático Síncrono (<i>Static Synchronous Séries Compensator – SSSC</i>).....	27
2.2.8	Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC).....	27
2.2.9	Controlador de Fluxo de Potência Entre Linhas (<i>Interline Power Flow Controller - IPFC</i>)	28
2.2.10	Compensador Estático Conversível (CEC)	29
2.3	APLICAÇÕES DOS FACTS NO SEP.....	29

3	COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA.....	33
3.1	TCSC.....	34
3.1.1	Análise do TCSC.....	36
3.1.2	Limites de Operação do TCSC	39
3.2	TSSC.....	40
4	SIMULAÇÃO DOS FACTS ATRAVÉS DO ANAREDE.....	42
4.1	INTRODUÇÃO	42
4.2	ESTUDO DO CASO BASE.....	43
4.3	ESTUDO DO CASO TSSC 1.....	48
4.4	ESTUDO DO CASO TSSC 2.....	54
4.5	ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ENTRE O CASO TSSC1 E O CASO BASE.....	58
4.5.1	Análise com Incremento de Carga	59
4.6	ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ENTRE O CASO TSSC 2 E O CASO BASE.....	62
4.6.1	Análise com Incremento de Carga	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
6	REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A concepção de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) surgiu na segunda metade do século XIX. Centrais geradoras e centrais consumidoras formam basicamente o SEP. Estas centrais são interligadas através de linhas de transmissão e distribuição, como também por subestações (SEs) que têm por objetivo a transformação dos níveis de tensão e a realização de manobras para orientação do fluxo de potência.

As cargas demandadas dos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica têm um caráter não linear no que diz respeito à drenagem de carga da rede, tornando o sistema reativo, hora indutivo/hora capacitivo, e isto pode gerar problemas como sobretensões, por exemplo. Esta variação de potência reativa drenada pelo sistema incentivou estudos na área de compensação de reativos, utilizando-se de equipamentos como as compensações por FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*), que são dispositivos que se utilizam de métodos de controle flexíveis de eletrônica de potência e realizam a compensação da situação reativa indutiva ou capacitiva da rede. O fluxo de potência é controlado ajustando-se os parâmetros de um sistema, tais como a magnitude da tensão, impedância da linha e o ângulo de transmissão (GAIGOWAL, S.R.; RENGE, M.M., 2013).

As soluções tradicionais para ampliar a infraestrutura de sistemas de transmissão de energia elétrica são principalmente na forma de novas linhas de transmissão, subestações e associações de equipamentos. No entanto, como experiências provaram ao longo das últimas décadas, o processo para permissão, o local, e a construção de novas linhas de transmissão tornou-se cada vez mais difícil, dispendioso, demorado e controverso. As tecnologias FACTS oferecem soluções avançadas como o custo-benefício alternativo à construção de novas linhas de transmissão. Os benefícios potenciais de equipamentos FACTS são atualmente reconhecidos pela engenharia de sistemas de energia, transmissão e distribuição de energia elétrica (PASERBA, J.J., 2003).

Com relação aos equipamentos FACTS, a tecnologia VSC (*voltage source converter*), que utiliza tiristores/transistores auto-comutados como GTO (*Gate Turn Off Thyristor*) e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), tem sido aplicada com

sucesso em um relevante número de instalações em todo o mundo, como STATCOM (*Static Synchronous Compensators*), UPFC (*Unified Power Flow Controllers*) e CSC (*Convertible Series Compensators*). Estas instalações em sistemas de transmissão mencionadas são anteriores a sistemas eletrônicos de geração de energia, que utilizam tecnologia de equipamentos ligados em paralelo à rede, como SVC (*Static Var Compensators*) e TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensators*) (PASERBA, J.J., 2003).

Os primeiros controladores FACTS surgiram no final da década de 1960, junto com a eletrônica de potência, como um meio de melhorar o equilíbrio entre dois tipos de potência (ativa e reativa) existentes nas redes de corrente alternada. No final dos anos 80 os Estados Unidos da América lançaram os primeiros estudos a respeito dos FACTS, que tinham dois principais objetivos: aumentar a capacidade de transferência de potência nas linhas de transmissão e manter o nível de fluxo de potência ativa o mais elevado possível (YING XIAO, Y.H.; SUN, Y.Z., 2002).

Atualmente existe um interesse crescente na aquisição de metodologias que avaliem os benefícios dos controladores FACTS em um sistema de transmissão de energia elétrica, buscando assim otimizar o fluxo de potência ativa no sistema. Para isso é necessária uma estimativa do investimento econômico, analisando se é ou não conveniente realizar a instalação de controladores FACTS em redes de transmissão de energia elétrica brasileiras, avaliando o impacto técnico e financeiro futuro.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Pretende-se com este trabalho desenvolver e apresentar um estudo técnico referente aos sistemas elétricos de potência, tratando-se principalmente do fluxo de potência entre geração e carga com a utilização de dispositivos FACTS. O problema será modelado e analisado por meio do *software* ANAREDE.

1.3 PROBLEMA E PREMISAS

Durante a operação de um sistema de transmissão de energia elétrica podem ocorrer situações que inviabilizam a plena utilização do mesmo, isto é, reduzem a capacidade de transmissão do sistema. Além de gerarem custos elevados, podem ser evitados quando provém de situações onde o fator de potência não está devidamente equilibrado. Uma das principais causas do fator de potência

estar desequilibrado é pelo excesso de reativos no sistema. A aplicação dos dispositivos FACTS no SEP é destinada ao controle do fluxo de potência, melhoria da estabilidade do sistema, gerenciamento do perfil de tensão, correção do fator de potência e redução das perdas (MAHDAD, B.; BOUKTIR, T.; SRAIRI, K., 2006).

Na operação de um determinado sistema elétrico de potência, ocorrem variações da intensidade de fluxo de potência reativa, isto se deve ao tipo de carga que está instalada na rede/sistema em questão. Conforme a potência elétrica reativa requerida pela carga, notam-se variações do fluxo de potência reativa, inclusive variações de indutiva para capacitiva, gerando no sistema subtensões ou sobretensões, respectivamente. Sobretensões usualmente resultam do desligamento de grandes cargas ou da energização de um banco de capacitores, enquanto as subtensões, mais usuais no sistema de potência, são decorrentes, principalmente, do carregamento excessivo de circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, interagindo com a impedância da rede, dão origem a quedas de tensão acentuadas (PAULILO, G.; TEIXEIRA, M., 2007).

Caso situações como esta não sejam tratadas de forma adequada, o devido atendimento a demanda do sistema será prejudicado, pois com o excesso de reativos na rede ocorre a redução de potência ativa transmitida. Neste caso, se ocorrer um aumento da potência ativa drenada pelo sistema, e o nível de potência reativa do sistema manter-se elevado, será necessário uma possível ampliação do sistema de transmissão.

Essa ampliação resultará em custos, onde os principais itens são: condutores, transformadores, sistema de comando e proteção, visto que estes equipamentos são dimensionados a partir da potência aparente requerida pelo sistema. Mas, se for realizado um devido controle de reativos no sistema, reduz-se os custos com ampliações, já que se tem mais potência ativa disponível para atender a demanda.

Além dos problemas citados no parágrafo anterior, têm-se também problemas estruturais para casos onde houver a necessidade de instalação de linhas de transmissão em paralelo, visando à redução da impedância série da linha. Porém, esta solução requer maiores investimentos para sua aplicação, como custos estruturais de construção e problemas como construção de torres de transmissão em áreas de preservação ambiental.

Para compensação de reativos são utilizados equipamentos como os rotativos e os estáticos. Os rotativos são construídos principalmente com motores síncronos, enquanto que os estáticos são construídos com bancos de capacitores e reatores indutivos, associados ou separados, os quais podem ser substituídos pelos FACTS.

Uma das principais cargas instaladas no sistema elétrico são os motores de indução, os quais requerem energia reativa para o seu funcionamento. Devido ao acúmulo desse tipo de carga nos grandes centros de consumo, tem-se um relativo desequilíbrio em fluxo de potência reativa indutiva do sistema. Para tanto, instalam-se bancos de capacitores para atuarem na correção do fator de potência, os quais, quando operam sem o pleno funcionamento das cargas indutivas, causam também um desequilíbrio no fluxo de potência reativo/capacitivo do sistema.

Conforme a Tabela 1 pode-se notar que no sistema brasileiro de geração e transmissão têm-se um considerável fluxo de energia reativa, que de certa maneira acarreta custos às concessionárias, esses devido a compensação de reativos.

Tabela 1: Carga e Geração de Potência das Regiões – Brasil

Região	Carga		Geração	
	MW	Mvar	MW	Mvar
Norte	2.987,5	661,6	5.994,0	-301,7
Nordeste	8.381,3	2.225,4	8.047,1	-624,9
Sul	10.260,3	2.676,8	9.075,6	333,9
Sudeste/ C.O.	36.237,1	9.988,9	37.899,9	1.186,5
Total	57.866,1	15.552,7	61.016,6	593,8

Fonte: (AFFONSO, C. M., SILVA, L. J., SILVA, L. C. P., 2008)

A instalação de dispositivos FACTS em uma linha de transmissão, busca a compensação dos problemas recorrentes aos fluxos de potência reativa, através da compensação instantânea dos reativos inseridos na rede.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Apresentar um estudo técnico a respeito de compensações de reativos via equipamentos FACTS em uma rede de transmissão de energia elétrica viabilizando a linearização do fluxo de potência ativa baseado em suas respectivas demandas.

1.4.2 Objetivos Específicos

Simular o fluxo de potência do sistema teste IEEE 14-Barras com e sem a inclusão de dispositivos FACTS, para analisar o comportamento desse fluxo.

Através da simulação:

- Analisar a elevação do fluxo de potência ativa com a utilização dos dispositivos FACTS, adquirindo informações para sustentar um aumento da flexibilidade do sistema;
- Averiguar a redução da potência reativa;
- Estudar e aprender a utilizar o programa ANAREDE para simulação;
- Estudar os dispositivos FACTS;
- Modelar a atuação dos FACTS nos sistemas a serem analisados.

1.5 JUSTIFICATIVA

Pensando no aumento da energia demandada no país, devido ao crescente desenvolvimento dos grandes centros consumidores de carga, necessita-se da criação de diversos trechos de linhas de transmissão, dos mais diversos tipos, para entregar essa energia aos grandes centros consumidores de carga do país como Rio de Janeiro e São Paulo.

Com a implantação do sistema de FACTS, obtém-se uma grande quantidade de benefícios. Seguem abaixo os principais ganhos com essa implantação:

- Controle do Fluxo de Potência, entregando um maior fluxo de potência ativa para o sistema.

- Aumento da capacidade de distribuição de potência ativa através das linhas de transmissão.

Segundo Bedin (2012), existe uma crescente utilização de dispositivos FACTS no sistema de transmissão do Brasil e no mundo. Portanto, este trabalho pretende mostrar um estudo técnico fundamentado na utilização dos FACTS nas linhas de transmissão, tendo por base a simulação feita com estes dispositivos através do auxílio do *software* ANAREDE, e enfatizando os principais ganhos obtidos com a implantação desse sistema.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso foram:

- apresentação através de artigos técnicos e em algumas literaturas especializadas, como também notícias que relacionam o uso desses dispositivos nas linhas de transmissão;
- pesquisar o funcionamento destes dispositivos nas linhas de transmissão, e a forma como otimizam o fluxo de potência através das redes de transmissão;

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Respeitando os padrões da metodologia de pesquisa, o Capítulo 1 tem função introdutória ao estudo. Neste capítulo o tema central é devidamente definido e contextualizado, justificando-se quais os problemas da pesquisa e a necessidade de resolução dos mesmos. Além disto, define-se a linha geral de pesquisa a ser adotada para atingir os objetivos propostos.

O Capítulo 1 também destaca a crescente demanda por energia elétrica e a preocupação os controles do fluxo de potência, como justificativa para utilização de compensadores nas linhas de transmissão. Dentre estes compensadores, apresentam-se os dispositivos FACTS.

O Capítulo 2 traz uma apresentação histórica da evolução e utilização dos dispositivos FACTS no mundo e no Brasil. São apresentados alguns modelos e aplicações em grandes centros de transmissão de energia elétrica. Também

apresenta um descritivo dos dispositivos FACTS que se pode encontrar, comercialmente e teoricamente. Serão apresentados os seus respectivos diagramas junto com a implementação destes dispositivos na rede.

O Capítulo 3 apresenta uma análise dos CSC, levando-se em conta os modelos TCSC e TSSC, sendo que esse último será utilizado para as simulações.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através das simulações realizadas no programa ANAREDE, como também as análises fundamentais para o estudo dos casos abordados nesse trabalho.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão a respeito dos resultados obtidos no Capítulo 4, como também do conhecimento adquirido no desenvolvimento do trabalho.

2 CONTROLADORES FACTS

2.1 HISTÓRICO

Antes do surgimento dos dispositivos FACTS, a compensação em série não era muito empregada, e a compensação por *phase shifting*¹ era feita recorrendo a transformadores defasadores com tomadas eletromecânicas. Para compensação em paralelo, o uso de bancos de capacitores, utilizados pela primeira vez em 1914, e de reatâncias fixas, apesar de conferirem alguma correção nas características do sistema, não conseguiram acompanhar as variações dinâmicas do sistema, o que constituiu uma grande limitação. Surgiram então outros dispositivos, baseados em bancos de capacitores e reatâncias ajustáveis mecanicamente, que se mostraram mais versáteis que os seus homólogos fixos, tais como o MSR (*Mechanical switching of shunt reactor*) e o MSC (*Mechanical switching of shunt capacitors*). No entanto, as soluções mais utilizadas foram os Condensadores Síncronos durante mais de 50 anos (antes da década de 1960) juntando-se mais tarde os compensadores SR (*Saturated Reactors*) (DIXON et al., 2005).

O conceito “*Flexible AC Transmission Systems*” ou simplesmente “FACTS” identifica basicamente sistemas de transmissão de corrente alternada que incorpora controladores baseados em eletrônica de potência, surgindo com o objetivo de aumentar o controle e a capacidade de transmissão de potência. Apesar destes dispositivos já existirem no final da década de 1960, o conceito FACTS foi formalizado pela primeira vez pelo Instituto Norte-Americano “*Electric Power Research Institute*”, nos fins da década de 1980, quando Narain Hingorani publicou seu trabalho com a finalidade de propor o uso da eletrônica de potência para o controle de parâmetros dos sistemas de potência em corrente alternada, os FACTS foram lançados pela primeira vez em 1971 com o SVC (DIXON et al., 2005), levando ao início do abandono das soluções eletromecânicas tradicionais. Atualmente pode-se classificar os FACTS em quatro gerações, descritas a seguir.

Na primeira geração de controladores estão incluídos os equipamentos que utilizam chaves semicondutoras, tais como os tiristores. O controle das chaves semicondutoras permite o desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar alterações rápidas nas características do sistema elétrico e utilizar a energia de

¹ *Phase Shifting*: controlar a magnitude e/ou ângulo da tensão do sistema.

maneira mais eficiente e econômica (CAVALIERI, C. A. C., 2001). Os equipamentos que fazem parte desta geração e estão ligados em paralelo à rede são o reator controlado a tiristor (*Thyristor Controlled Reactor* - TCR), o capacitor chaveado a tiristor (*Thyristor Switched Capacitor* - TSC) e o compensador estático de reativos (*Static Var Compensator* – SVC). Também estão incluídos nesta geração, porém, conectados em série na rede, o compensador série chaveado a tiristor (*Thyristor Switched Series Capacitor* - TSSC) e o compensador série controlado a tiristor (*Thyristor Controlled Series Capacitor* – TCSC). Um exemplo de equipamento da primeira geração que possui as características série e paralelo de forma integrada é o transformador defasador (*Phase Shifter* – PS) (CAVALIERI, C. A. C., 2001).

A segunda geração é composta por equipamentos que utilizam chaves autocomutadas tipo IGBT ou GTO. Um controlador que pode ser conectado em derivação e que pertence a esta geração é o compensador estático de reativos avançados (*Advanced Static Var Compensator* - ASVC), cuja nomenclatura mais usual é compensador estático (STATCOM). Um exemplo de compensador ligado em série é o compensador série estático síncrono (*Static Synchronous Series Compensator* – SSSC) (MIASAKI, C. T., 2006).

A terceira geração de controladores FACTS é composta por conversores estáticos com fonte de tensão (VSC). Estes controladores não utilizam elementos passivos na compensação. O controle, tanto de ativo quanto de reativo, é feito a partir da diferença da tensão entre o VSC e a barra onde é conectado. Um equipamento representante desta geração é o controlador unificado de fluxo de potência (UPFC) que se caracteriza pela associação de compensadores série e em derivação. É um controlador versátil, pois consegue controlar, individualmente ou de forma combinada, três parâmetros que interferem no fluxo de potência: tensão, impedância de transferência e ângulo de transmissão. Desta forma, é dito ser possível controlar o fluxo de potência ativa e reativa de forma independente na linha onde o UPFC é instalado. O UPFC é uma combinação do STATCOM (na conexão em derivação) e o SSSC (para a conexão série), que são conectados através de uma ligação em corrente contínua (MIASAKI, C. T., 2006).

Na quarta geração, a integração dos equipamentos série e em derivação é feita em linhas diferentes. Fazem partes desta classe o controlador de fluxo de potência entre linhas (*Interline Power Flow Controller* - IPFC), o compensador estático conversível (CEC), e outras possibilidades (MIASAKI, C. T., 2006).

Como exemplo de aplicações mundiais dos dispositivos FACTS nos sistemas de transmissão, tem-se o UPFC instalado na subestação Inez – AEP Company – U.S.A., outro modelo de utilização conjunta entre um UPFC e um TCSC no controle de fluxo de potência entre a Noruega e a Suécia, e como exemplos de SVC, tem-se: no controle de tensão entre Los Alamos e Novo México do Norte, na plataforma SVC China, e na plataforma SVC Mead-Adelanto nos EUA. Outro exemplo com a utilização do TCSC é no sistema de potência sueco que inclui a Suécia, Finlândia, Noruega, e leste da Dinamarca, instalado na plataforma em Stode (ALAMPI FILHO, S., 2005).

No Brasil tem-se um exemplo de TCSC instalado no sistema interligado Norte/Sul, que abrange os centros geradores (Tucuruí, Sobradinho/Paulo Afonso/Xingo/Itaparica e o sistema interligado sul/sudeste/centro-oeste), conectadas em uma linha de transmissão de 1250km, conectando as subestações de Imperatriz (Eletronorte) com Samambaia (Furnas), passando pelas subestações intermediárias de Colinas, Miracema, Gurupi e Serra da Mesa (ALAMPI FILHO, S., 2005).

Outro exemplo de aplicação nacional é o SVC instalado na subestação de Extremoz, localizada em Natal/RN, que recebe duas linhas de transmissão de 230kV originadas de João Câmara I e João Câmara II, totalizando 1.000MW. Esta subestação conta com 75MVar Indutivo e 150MVar capacitivo, para realizar as compensações (ABB, 2013).

2.2 DESCRITIVO TÉCNICO

2.2.1 Reator Controlado a Tiristor (Thyristor Controlled Reactor - TCR)

O elemento base destes dispositivos consiste em um indutor, ligado em série com um interruptor formado por dois tiristores colocados em antiparalelo, permitindo uma comutação bidirecional. No caso do TCR, o controle da corrente é feito através do controle do ângulo de disparo do tiristor, e, portanto do tempo de condução em cada meio ciclo da onda fundamental, o que permite um ajustamento contínuo da corrente, que se traduz na habilidade de variação contínua da potência reativa desde que não supere os valores nominais do TCR (NARANGI, G.; HINGORANI, L., 1999). A condução máxima é conseguida para um ângulo de disparo de 90° até um mínimo com um ângulo de disparo de 180° . O ajustamento do ângulo de disparo é feito em etapas discretas, não mais do que uma vez a cada meio ciclo da onda

fundamental por limitação do próprio princípio de funcionamento de um tiristor. O TCR possui uma admitância efetiva variável que é função do ângulo de disparo do tiristor (SONG, Y. H.; JOHNS, A. T., 1999).

Na Figura 1 segue representação unifilar do TCR.

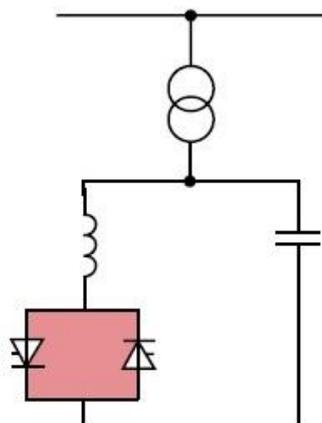


Figura 1: Diagrama Unifilar do TCR
Fonte: ABB (2014).

2.2.2 Capacitor Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Capacitor - TSC*)

O elemento base de um TSC é um capacitor em série com um interruptor constituído por tiristores, com uma configuração idêntica à empregada nos TCR, geralmente incorporando também em série uma indutância para limitar o gradiente de variação da corrente através dos tiristores e prevenir a ocorrência de ressonância do dispositivo com a rede. Neste tipo de dispositivos não é possível a regulação do ângulo de disparo de forma livre como acontece no TCR, porque se tal fosse feito daria origem a transitórios de corrente no circuito devido à diferença de tensão entre a rede e a existente no capacitor, que é de todo indesejável (NARANGI, G.; HINGORANI, L., 1999). Por isso, deve ser comutado no instante em que a tensão do sistema é igual à tensão do capacitor, e quando a tensão na rede se encontra no seu máximo (gradiente de tensão nulo), para prevenir a ocorrência de transitórios. Uma consequência é que não é possível uma variação contínua da potência reativa capacitiva injetada na rede (SONG, Y. H.; JOHNS, A. T., 1999).

Na Figura 2 segue representação unifilar do TSC.

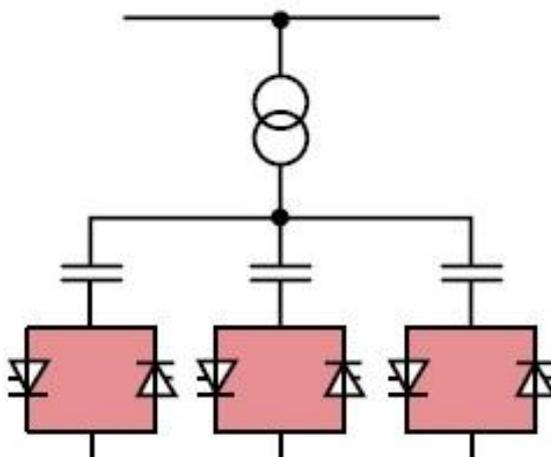


Figura 2: Diagrama Unifilar do TSC
Fonte: ABB (2014).

2.2.3 Compensador Estático de Reativos (*Static Var Compensator – SVC*)

Os dispositivos SVC, também denominados Geradores Estáticos de Energia Reativa de Impedância Variável por Narangi, G. e Hingorani, L. (1999), são compensadores *shunt* que utilizam elementos reativos (indutâncias e/ou capacitores) tal como os dispositivos MSC e MSR, mas com algumas variações e com a comutação eletromecânica substituída por um interruptor formado por tiristores, que lhes conferem tempos de resposta muito mais rápidos. Podem ser compostos por TCR, TSC, TSR de modo singular ou pela combinação de ambos, incluindo variantes dos três tipos de dispositivos. Uma das características principais de um SVC, que constitui a sua maior desvantagem, é que a energia reativa que pode trocar com a rede depende no nível de tensão aplicado ao sistema (é diretamente proporcional com o quadrado da tensão), o que diminui muito a sua eficácia no suporte de tensão do sistema perante colapsos de tensão (DIXON, R. et al., 2005). Quando a tensão no sistema cai, a potência reativa injetada é reduzida justamente quando o sistema mais necessita desta potência (GYUGYI, L., 1992).

2.2.4 Compensador Série Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Series Capacitor* – TSSC)

Este dispositivo na sua forma mais simples, consiste em um interruptor constituído por dois tiristores colocados em anti-paralelo, em paralelo com um capacitor, conseguindo-se assim inserir ou remover rapidamente o capacitor colocado em série com a linha.

Na Figura 3 segue representação unifilar do TSSC.

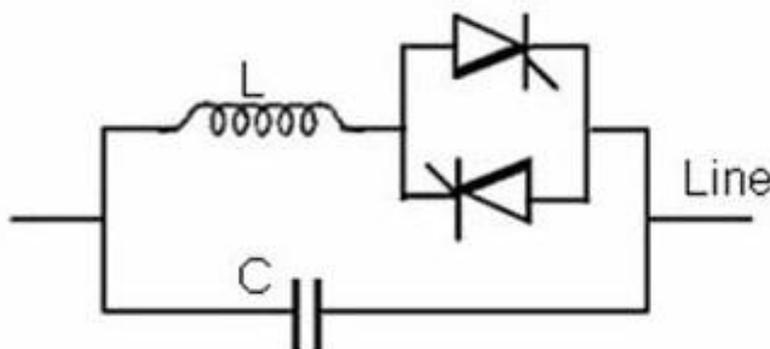


Figura 3: Diagrama Unifilar do TSSC
Fonte: ABB (2014).

O capacitor é removido da linha ativando os tiristores, curto-circuitando os terminais do capacitor (colocando a reatância capacitiva do TSSC a zero), e é colocado na linha bloqueando os tiristores (colocando a reatância capacitiva do TSSC no seu valor máximo). O capacitor é inserido na linha quando os tiristores são bloqueados, o que ocorre somente quando a corrente na linha se anula (NARANGI, G.; HINGORANI, L., 1999).

Para obter uma compensação série regulável, embora em quantidade discreta, através da variação discreta da capacitância total efetiva em série com a linha, podem ser utilizados vários módulos TSSC em série. No entanto, um número de módulos excessivos pode originar ressonâncias subsíncronas. Apesar de em teoria ser possível comandar os TSSC de modo a evitar esse fenômeno, o seu tempo de resposta considerável torna tal opção pouco eficaz, exceto para frequências subsíncronas bastante baixas. Por esta razão, os TSSC não são aconselháveis quando é necessário um alto nível de compensação. Podem, no entanto, ser utilizados no controle do fluxo de potência e no amortecimento de

oscilações de potência na linha, onde o seu tempo de resposta é normalmente suficiente (SONG, Y. H.; JOHNS, A. T., 1999).

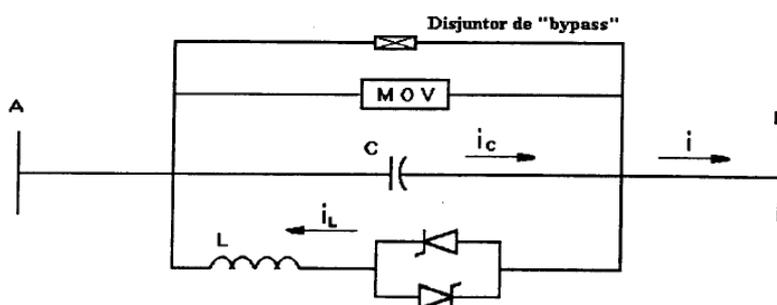
2.2.5 Compensador Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Capacitor – TCSC*)

Este compensador série possui maior flexibilidade e raio de ação que o TSSC no ajustamento da impedância de uma linha. A sua estrutura mais simples consiste em um braço formado por um TCR em paralelo com um capacitor de compensação inserido em série com a linha (NARANGI, G.; HINGORANI, L., 1999).

Podem ser colocados vários compensadores elementares em série para obter o nível de tensão e as características operacionais desejadas. A ideia principal do TCSC é providenciar um capacitor variável, por meio do cancelamento parcial da compensação do capacitor pelo TCR, visto que o TCR é uma impedância indutiva continuamente variável em função do ângulo de disparo dos tiristores (medido a partir do pico da tensão no capacitor). Assim, o TCSC é um circuito LC paralelo ajustável, constituído por uma impedância capacitiva fixa e uma impedância indutiva variável (SONG, Y. H.; JOHNS, A. T., 1999).

A corrente que atravessa o TCR é controlável através do controle do ângulo de disparo dos tiristores colocados em série com o indutor, controlando-se conseqüentemente a tensão no capacitor.

A Figura 4 representa o modelo unifilar do TCSC.



MOV - Varistor de Óxido Metálico

i - Corrente na linha

i_c - Corrente no capacitor

i_L - Corrente no Indutor (válvula)

Figura 4: Diagrama Unifilar do TCSC

Fonte: (GAMA, C. A., 1995)

2.2.6 Compensador Estático (STATCOM)

O funcionamento do STATCOM é explicado com auxílio do compensador paralelo ideal e através deste é mostrado como são controladas as potências reativa indutiva e capacitiva.

No caso do STATCOM a fonte de tensão controlada em amplitude e fase é implementada através de inversores. Estes inversores possuem em seu lado CC capacitores para simular uma fonte de tensão CC. O capacitor do lado CC também serve como sistema de armazenamento de energia. Os transformadores são utilizados para compatibilizar os níveis de impedância do compensador e do sistema CA. Na maioria dos casos o transformador é utilizado também para minimizar o conteúdo dos harmônicos da tensão do inversor.

Assim, o STATCOM é composto por quatro partes básicas: inversores, transformadores, capacitor do lado de corrente contínua e um sistema de controle (CAVALIERI, C. A. C., 2001).

A Figura 5 representa o diagrama unifilar do STATCOM.

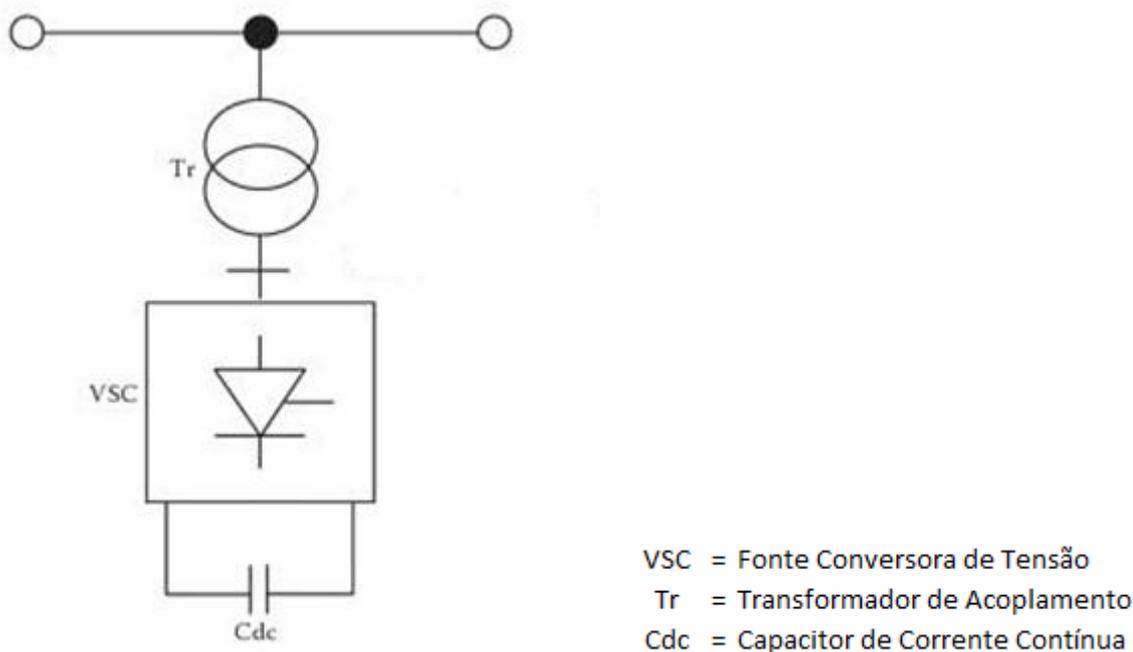


Figura 5: Diagrama unifilar do STATCOM
Fonte: (BORLASE, S., 2012)

2.2.7 Compensador Série Estático Síncrono (*Static Synchronous Series Compensator – SSSC*)

O compensador série estático síncrono faz parte dos controladores FACTS avançados que utilizam conversores estáticos como fonte de tensão na compensação de reativos. O SSSC possui uma fonte de tensão inversa, que gera uma tensão CA controlável sendo conectado em série com a linha de transmissão no sistema de potência. A tensão injetada está em quadratura com a corrente de linha, com uma reatância capacitiva ou indutiva que influencia o fluxo de potência na linha de transmissão. Com a capacidade de mudar a reatância capacitiva para indutiva, o SSSC é muito efetivo controlando o fluxo de potência no sistema, ele oferece uma alternativa de compensação série na linha capacitiva, operando como uma fonte de tensão síncrona que, internamente, gera uma tensão desejada de compensação série, em série com a linha e independente da corrente de linha. Este dispositivo pode ser considerado funcionalmente como um gerador ideal, podendo modificar tanto a potência reativa como a ativa do sistema CA, sendo simples o controle da posição angular da tensão inserida com a respectiva corrente de linha (MIASAKI, C. T., 2006).

A Figura 6 mostra o diagrama básico do compensador série avançado SSSC conectado com a linha de transmissão através de um transformador série (WATANABE et al., 1998).

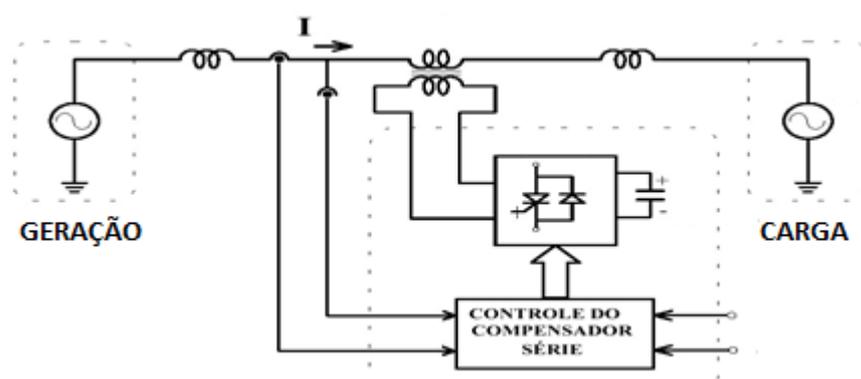


Figura 6: Diagrama básico do compensador série avançado SSSC
 Fonte: (WATANABE et al. - 1998).

2.2.8 Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC)

O UPFC é uma combinação de um compensador estático síncrono (STATCOM) e um compensador estático série (SSSC) acoplados via um barramento

CC comum, para permitir fluxo de potência ativa bidirecional entre os terminais de saída série do SSSC e os terminais de saída paralelo do STATCOM, controlados para disponibilizar compensação ativa e reativa da linha sem fonte de energia elétrica externa. O UPFC, mediante injeção de tensão série angularmente ilimitada, permite controlar, concorrentemente ou seletivamente, a tensão da linha de transmissão, impedância, e ângulo ou, alternativamente, o fluxo de potência ativa e reativa na linha. O UPFC pode também permitir compensação reativa paralelo independentemente controlável (SEN, K. K.; STACEY, E.J., 1998).

A Figura 7 representa o diagrama unifilar do UPFC.

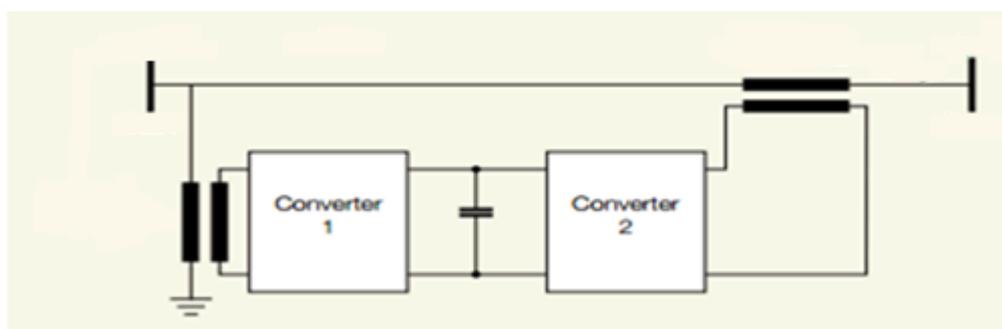


Figura 7: Diagrama unifilar do UPFC

Fonte: ABB (2014).

2.2.9 Controlador de Fluxo de Potência Entre Linhas (*Interline Power Flow Controller - IPFC*)

O IPFC foi proposto recentemente, não dispondo de definição do IEEE, Hingorani (1999) definiu-o como a combinação de dois ou mais SSSC interligados mediante um barramento CC para permitir fluxo de potência ativa bidirecional entre os terminais CA dos SSSC, e controlados para compensação de potência reativa independente por ajuste do fluxo de potência ativa em cada linha e manter a distribuição de fluxo de potência reativa entre as linhas. O IPFC poderá incluir um STATCOM, acoplado ao barramento CC comum, para permitir a compensação paralelo de potência reativa para fornecer ou absorver a potência ativa necessária para os SSSC combinados (GYUGYI, L.; SEN, K. K.; SCHAUDER, C. D., 1999).

A Figura 8 representa o diagrama unifilar do IPFC.

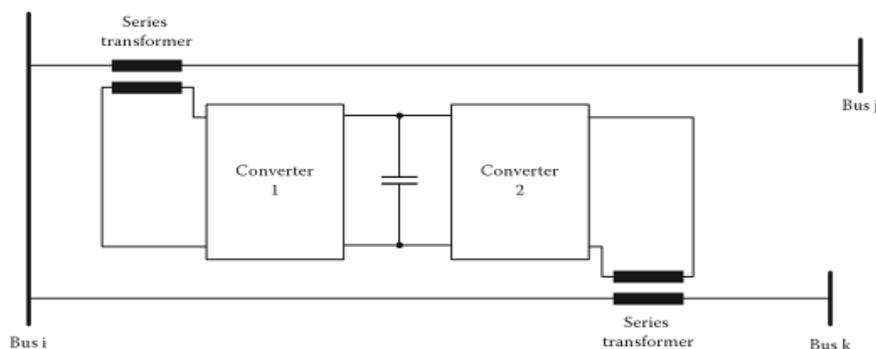


Figura 8: Diagrama unifilar do IPFC.
Fonte: ABB (2014).

2.2.10 Compensador Estático Conversível (CEC)

Um dispositivo FACTS ainda mais generalizado é o CEC, sendo basicamente uma combinação de um UPFC com um IPFC. Este dispositivo explora o fato de os VSC poderem ser conectados entre si, providenciando um dispositivo FACTS multifuncional, modular, flexível (UZUNOVIC, E. et al., 2001). Um CEC consegue operar como compensador *shunt* converter-se em um compensador série ou facultar compensação *shunt* e série em simultâneo, com os respectivos conversores conectados ou independentes entre si.

2.3 APLICAÇÕES DOS FACTS NO SEP

Neste tópico apresenta-se um parecer técnico-financeiro sobre a aplicação dos dispositivos FACTS ao sistema de transmissão. A Tabela 2 ilustra os dispositivos FACTS mais indicados para soluções relacionadas ao limite de tensão, limite térmico, e nível de curto circuito. Quatro dispositivos serão considerados: o TCSC, SVC, STATCOM, e o UPFC.

Tabela 2: Aplicações Estáticas para os FACTS

Controle	Problema	Correção	Solução Convencional	FACTS
Limite de Tensão	Tensão baixa com carga pesada	Fornecimento de potência reativa	Capacitor <i>shunt</i> ou série	SVC, TCSC, STATCOM
	Alta tensão em carga leve	Redução de reativo	Chaveamento de LT ou redução de reativo	SVC, TCSC, STATCOM

(Continua)

Controle	Problema	Correção	Solução Convencional	FACTS
Limite de Tensão	Baixa tensão seguida de interrupção	Fornecimento de potência reativa	Chaveamento de Capacitor shunt, série ou reator	SVC, STATCOM
	Alta tensão seguida de interrupção	Fornecimento de reativo	Inserir reator shunt	SVC, STATCOM
	Baixa tensão e sobrecarga	Fornecimento de reativo e limitar sobrecarga	Combinar dois ou mais controladores	TCSC, UPFC, STATCOM, SVC
Limite Térmico	Sobrecarga na linha ou transformador	Reduzir sobrecarga	Adicionar linha ou trafo	TCSC, UPFC
			Adicionar reator série	SVC, TCSC
	Trip em circuitos em paralelo	Limitar carregamento dos circuitos	Adicionar reator ou capacitor série	UPFC, TCSC
Nível de Curto-Circuito	Corrente de falta elevada	Limitar corrente de curto circuito	Instalar reator série	UPFC, TCSC

Tabela 2: Aplicações Estáticas para os FACTS (Continuação)
Fonte: (ALAMPI FILHO, S., 2005)

Para a instalação de FACTS também é necessário realizar um levantamento de custos dos equipamentos, esses custos dependem basicamente dos requisitos de operação, tais como (ALAMPI FILHO, S., 2005):

- Redundância dos sistemas de controle e proteção, e dos componentes principais como reatores, capacitores e/ou transformadores.
- Condições sísmicas.
- Condições ambientais, como temperatura, poluição, salinidade, etc.
- Sistema de comunicação com os centros de operações regionais ou mesmo nacional e custos de infraestrutura.
- Também tem-se custos relacionados a infraestrutura, que dependem da localização da subestação onde os dispositivos FACTS serão instalados.

Esses custos incluem, por exemplo:

- Aquisição do terreno, ou caso haja espaço na subestação existente, etc.
- Modificações na subestação existente.
- Aquisição de disjuntor de alta tensão.
- Construção de edifício fechado para instalação do equipamento (controle, proteção, tiristores, válvulas, auxiliares, etc.).
- Trabalhos civis de drenagem, fundações, etc.
- Conexão com o sistema de comunicação existente.

Devido ao aumento da capacidade de transmissão nas linhas do sistema elétrico de potência, após a instalação dos FACTS, obtém-se um ganho na venda de energia elétrica, pois esses dispositivos tornam o sistema mais eficaz. Graças à eficácia do sistema, investimentos em geração e transmissão de energia elétrica podem ser postergados, frente à inserção de novas cargas no sistema.

Há também benefícios indiretos, os quais pode-se incluir, perdas industriais devido a interrupção do processo produtivo, perdas de receitas nas interrupções nos momentos de picos de consumo, entre outros (ALAMPI FILHO, S., 2005).

O Gráfico 1 indica o ganho em vendas adicionais em relação à capacidade de transmissão, onde cada reta representa um custo de energia elétrica, ou seja, quanto mais caro o custo da energia, maior será o ganho obtido.

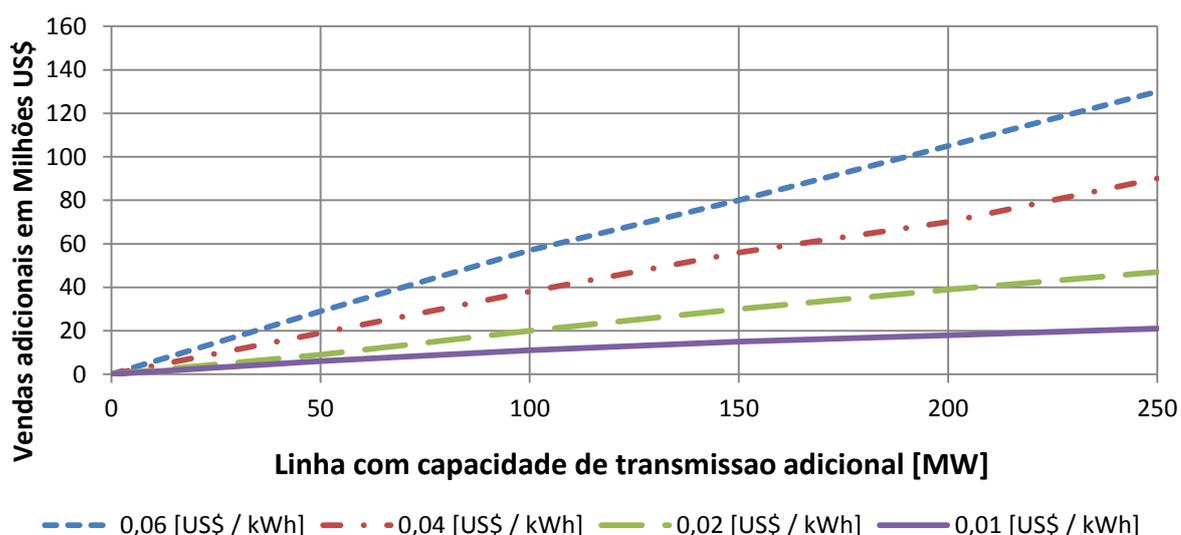


Gráfico 1: Vendas adicionais x Capacidade de transmissão
 Fonte: Adaptado (ALAMPI FILHO, S., 2005).

Diferentemente de outros dispositivos/equipamentos do SEP, os FACTS necessitam de manutenção reduzida, visto que a manutenção pode ser feita juntamente com a manutenção geral da instalação, e o tempo para esta depende diretamente do tamanho da instalação, condições ambientais, e do local (poluição) (ALAMPI FILHO, S., 2005).

Os FACTS podem ser instalados em subestações, onde a operação pode ser realizada automaticamente, dispensando a presença local de operadores. A operação pode ser efetuada remotamente de um centro de operação regional ou nacional (ALAMPI FILHO, S., 2005).

Para analisar a viabilidade na instalação dos dispositivos FACTS, faz-se necessário um estudo minucioso da rede, considerando alguns pontos tais como: inversão do fluxo de potência, risco de afundamento de tensão, ressonâncias subsíncronas e a instabilidade do sistema. Onde houver a possibilidade de ganho e otimização da linha de transmissão, com o aumento da capacidade de transmissão ou pela estabilidade, então o dispositivo FACTS pode ser especificado (ALAMPI FILHO, S., 2005).

3 COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA

Capacitores séries oferecem grandes vantagens comparados aos demais compensadores *shunt*. Com capacitores série, os aumentos de potência reativa assumem valores proporcionais ao quadrado das correntes de linha, enquanto os capacitores *shunt*, a potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão do barramento. Para alcançar os mesmos benefícios para o sistema como aqueles encontrados nos capacitores série, capacitores *shunt* possuem de três a seis vezes mais energia reativa nominal do que os capacitores séries necessitam para serem aplicados (PADIYAR, K. R., 1999). Além disso, capacitores *shunt* devem ser ligados no ponto médio da linha, enquanto que essa exigência não existe para capacitores série (MATHUR, R. M.; VARMA, R.K., 2002).

A compensação nas linhas de transmissão através dos capacitores série resulta no aumento do fluxo de energia elétrica e da capacidade de carga da linha, como também do aumento da capacidade de resposta do fluxo de potência, a partir da interrupção de outra linha no sistema (MALIESZEWSKI, R. M. et. al, 1990). Segundo Malieszewski (1990), o aumento do nível de compensação série fixa reduz as perdas nas demais linhas, porém, as perdas totais do sistema são agravadas devido aos compensadores série. Por outro lado, o aumento da sensibilidade ou capacidade de resposta da linha de compensação, para outras interrupções na rede, pode provocar um carregamento na linha que excede o nível de capacidade do aumento de carga da própria linha. Estes efeitos indesejáveis podem ser evitados pelo emprego de níveis variáveis de compensação em série, em vez de compensação fixa. A compensação série pode ser variada, dependendo da melhoria de transferência de energia elétrica desejada, nesse momento, sem afetar outros critérios de desempenho do sistema.

As principais perdas relacionadas à operação do TCSC são: perdas no capacitor série, perdas na condução do indutor e/ou na condução do tiristor, assim como perdas de comutação por aquecimento. A operação na região indutiva resulta no aumento das perdas, comparadas com a região capacitiva. Quando múltiplos módulos são utilizados, a perda mínima ocorre quando os tiristores estão bloqueados. Em outros pontos operacionais as perdas dependem do nível de reatância (LARSEN, E. V. et al. 1994).

Existem duas formas conhecidas de se implementar o CSC. De um lado tem-se o TCSC que possibilita a variação contínua do nível de compensação de uma linha de transmissão, do outro tem-se o TSSC que permite apenas a variação em degraus do nível de compensação série da linha de transmissão.

Um das alternativas para realizar o controle do fluxo de potência é “forçar” a linha que possui o compensador instalado à absorver todas as variações de despacho de potência dos geradores. Esta filosofia de controle do fluxo de potência é conhecida como estratégia de “ângulo constante”, já que o fluxo de potência nas linhas paralelas e de impedâncias fixas é mantido constante (LARSEN et al., 1992).

3.1 TCSC

O TCSC consiste de um capacitor fixo derivado com reator controlado a tiristor (TCR). Dependendo das variações de carga o disparo do ângulo dos tiristores são variados para proporcionar a impedância necessária para a rede de transmissão. Com base na impedância proporcionada pelo TCSC, existem três modos de funcionamento diferentes. O primeiro modo mantém os tiristores bloqueados, o segundo trabalha com os tiristores “*bypassados*” e o terceiro com os tiristores parcialmente em condução, onde os tiristores operam na região capacitiva ou indutiva (PADMA, S. A., 2014).

O modo bloqueado também é conhecido como modo de espera. Neste modo os tiristores são bloqueados e os capacitores vão conduzir de maneira contínua. A reatância do TCSC para este caso é capacitiva (PADMA, S. A., 2014). Se os tiristores estão conduzindo e ocorre um comando de bloqueio, os tiristores desligam assim que a corrente através deles se anula (MAHAJAN, V., 2006).

No modo “*bypassado*” os tiristores operam em condução completa com ângulo de 180° . Os pulsos no gatilho são aplicados assim que a tensão nos tiristores atinge o valor zero e torna-se positiva, resultando em um fluxo contínuo de corrente através dos tiristores. O TCSC comporta-se como uma ligação paralela entre capacitores e indutores (MAHAJAN, V., 2006). Este modo pode ser utilizado para efeito de controle e para funções de proteção (PADMA, S. A., 2014).

No modo de condução parcial dos tiristores, o TCSC comporta-se como reatância capacitiva controlável ou indutiva controlável, sendo que, o disparo do ângulo dos tiristores ocorre com $\alpha_{min} \leq \alpha \leq 180^\circ$, onde α é o ângulo de disparo do tiristor (α_{min} é maior que o valor correspondente à ressonância paralela do TCR e do

capacitor na frequência fundamental) (PADMA, S. A., 2014). O valor efetivo da reatância do TCSC na região capacitiva aumenta à medida que incrementa-se o ângulo de condução, partindo-se de zero, nessa condição tem-se o controle capacitivo, no qual o tiristor mantém-se fixo quando a tensão e a corrente no capacitor possuem polaridades opostas, essa condição resulta em uma corrente em sentido contrário no TCR à corrente capacitiva, tal corrente aumenta a tensão sobre o TCSC (MAHAJAN, V., 2006). No modo indutivo a reatância aumenta à medida que o ângulo de condução diminui a partir de 180° (PADMA, S. A., 2014).

Segundo Mathur e Varma (2002), o uso de tiristores controlados com capacitores série oferece as seguintes vantagens para o sistema:

- Controle rápido e contínuo do nível de compensação série na linha de transmissão;
- Controle dinâmico do fluxo de energia elétrica nas linhas selecionadas dentro da rede para permitir condições de fluxo de potência ideais;
- Amortecimento das oscilações de potência locais e nas proximidades;
- Eliminação da oscilação subsíncrona. Em frequências subsíncronas, o TCSC apresenta uma reatância inerente resistiva indutiva;
- Diminuição da tensão residual. As tensões residuais, que resultam invariavelmente a partir da inserção de compensadores série, podem ser controladas através dos disparos dos tiristores do TCSC;
- Maior nível de proteção para capacitores série. Um rápido *by-pass* dos capacitores série pode ser obtido pelo controle dos tiristores, quando os capacitores estiverem submetidos a elevadas sobretensões. Da mesma forma, os capacitores podem ser rapidamente reinseridos por ação dos tiristores após a eliminação da falha, para auxiliar na estabilização do sistema;
- Suporte de tensão. O TCSC, em conjunto com os capacitores série, podem gerar potência reativa que aumenta com a carga na linha, ajudando assim a regulação da tensão do sistema local, como também, no alívio de qualquer instabilidade de tensão;
- Redução da corrente de curto circuito. Durante os eventos de altas correntes de curto circuito, o TCSC pode mudar a capacitância controlável para o modo de indutância controlável, restringindo assim, as correntes de curto circuito.

3.1.1 Análise do TCSC

Pode-se analisar a impedância teórica do TCSC, à frequência fundamental, através da sua curva de impedância em contraste ao ângulo de disparo α , conforme a Figura 9.

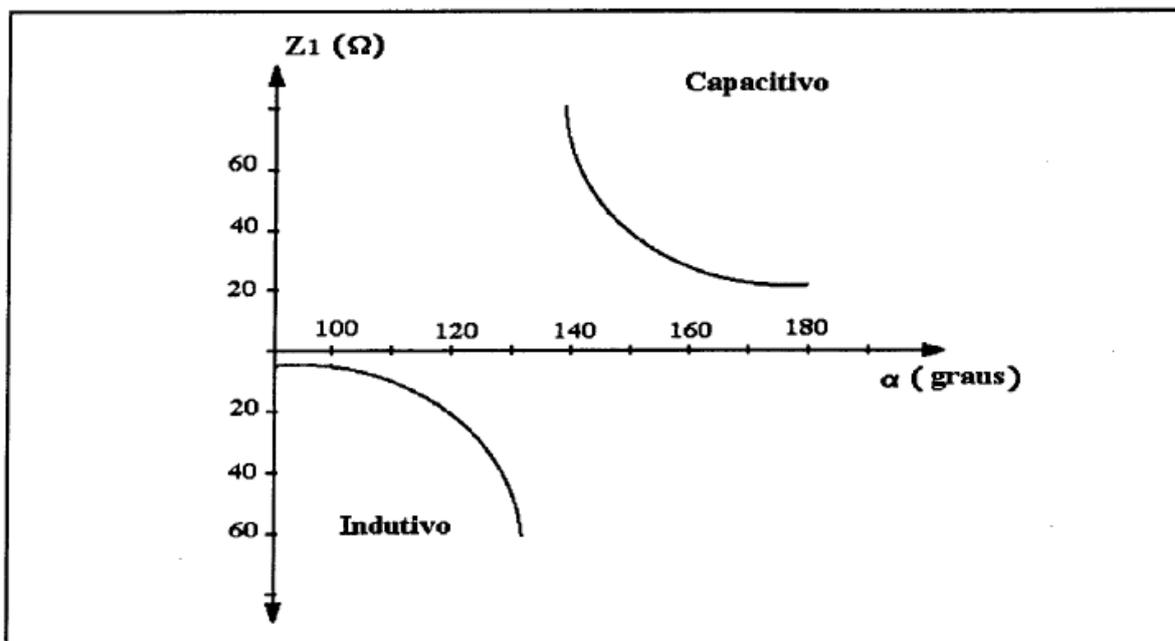


Figura 9: Impedância Teórica do TCSC à 60 Hz, em função do ângulo de disparo (α)
Fonte: (GAMA, C.A., 1995)

Na região de bloqueio dos tiristores (ou com $\alpha = 180^\circ$), o TCSC age como uma compensação série convencional, como por exemplo, capacitores fixos. Já na região de condução ($\alpha = 90^\circ$), o TCSC age como uma indutância de pequeno valor, para esse modo de operação obtém-se o modo "bypassado". Portanto, nota-se que com o controle do ângulo de condução dos tiristores, é possível variar a reatância do TCSC, tanto na direção capacitiva quanto na direção indutiva (GAMA, C. A., 1995).

O TCSC amplia sua faixa de controle quando opera na região indutiva, possibilitando a redução de "gaps" (descontinuidades) em configurações multimodulares (vários módulos TCSC em série), no entanto, o impacto das correntes harmônicas no dimensionamento do TCSC deve ser considerada. Caso o indutor tenha um valor inexpressivo partindo do valor do capacitor, verifica-se a necessidade de restringir a operação na região indutiva, essa, por sua vez, deve considerar os requisitos de desempenho do sistema e os custos do equipamento (GAMA, C. A., 1995).

Outro aspecto a ser considerado diz respeito ao ponto de ressonância do TCSC, já que esse apresenta uma impedância elevada que resulta numa queda de tensão significativa. Essa região de ressonância é evitada pelo controle dos limites do ângulo de excitação. O valor típico do ângulo de disparo que resulta em ressonância é de 145° (MATHUR, R. M.; VARMA, R.K., 2002).

A Figura 10 apresenta a curva de características de reatância para o dispositivo TCSC, elaborada a partir da reatância eficaz do TCSC e do ângulo de disparo. A reatância efetiva do TCSC opera em três regiões: região indutiva, região capacitiva e região de ressonância (MEYKANDASIVAM, S.; NEMA, R. K.; SHAIENDRA, K. J., 2012)

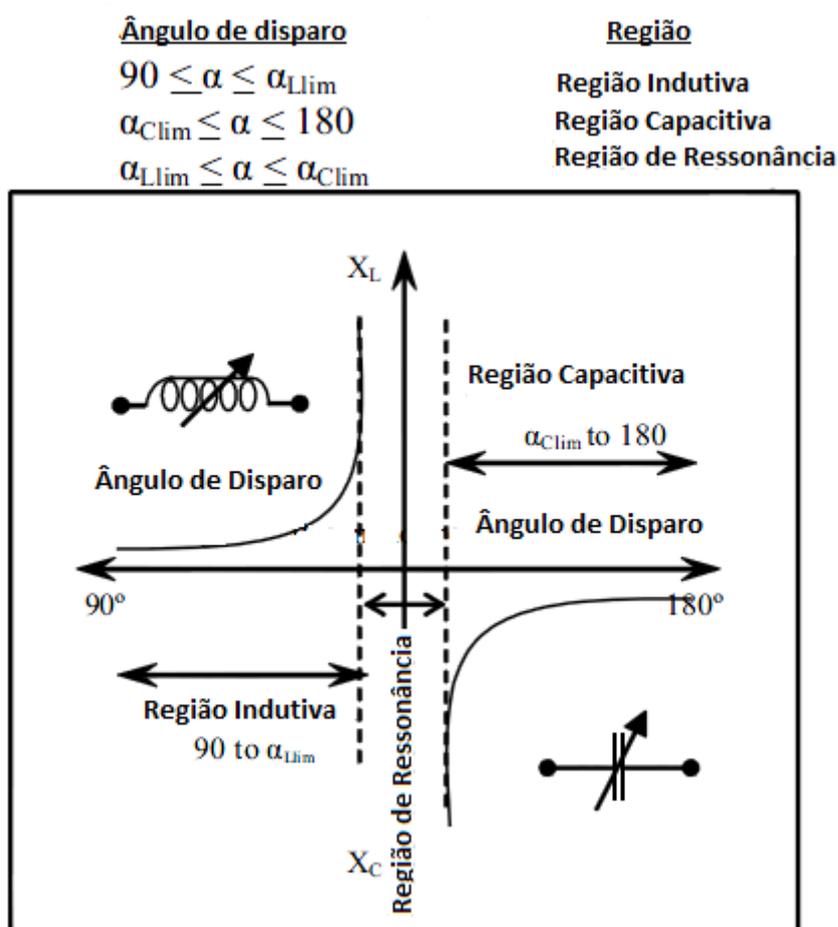


Figura 10: Curva de Característica de Reatância x Ângulo de Disparo.
 Fonte: (MEYKANDASIVAM, S.; NEMA, R. K.; SHAIENDRA, K. J., 2012)

Um valor apropriado para o capacitor e o indutor de um dispositivo TCSC é baseado na reatância líquida da linha de transmissão e demandas esperadas de energia elétrica no futuro. O valor do capacitor é escolhido por um grau de compensação série (k). Normalmente é escolhido um valor acima de 70% da

reatância da linha. A escolha do indutor depende do comprimento da área operacional necessária para a região indutiva e capacitiva. Isso é perfeitamente decidido pelo fator ω , dado na Tabela 3, deslocando a posição da região de ressonância (MEYKANDASIVAM, S.; NEMA, R. K.; SHAIENDRA, K. J., 2012)

Para selecionar o capacitor e o indutor para o dispositivo TCSC têm-se três medidas que devem ser consideradas: grau da compensação série (k), a reatância indutiva deve ser suficientemente menor que a reatância capacitiva, e a ocorrência de condições de multi-ressonância (MEYKANDASIVAM, S.; NEMA, R. K.; SHAIENDRA, K. J., 2012).

Tabela 3: Mudança da Região de Ressonância para variados valores de ω

$\omega = \sqrt{\frac{X_c}{X_l}}$	Intervalo da Região de Ressonância (°)	Intervalo da Região Capacitiva (°)
1,4	115-116	116-180
1,6	123-124	124-180
1,8	129-131	131-180
2,0	134-136	136-180
2,2	139-140	140-180
2,4	142-143	143-180
2,6	145-146	146-180
2,8	147-148	148-180
3,0	149-151	151-180

Fonte: (MEYKANDASIVAM, S.; NEMA, R. K.; SHAIENDRA, K. J., 2012).

Nota-se pela Tabela 3 que a ocorrência da região de ressonância e da região capacitiva ocorre no intervalo entre 90° e 180° do ângulo de disparo do TCSC para diferentes valores de ω . Devido a essas mudanças na região de ressonância, a operação na região indutiva e capacitiva varia. Para $\omega = 1,4$, a região de capacitância é maior com o ângulo de disparo variando entre 116° e 180°, e para $\omega = 3,0$ a região de capacitância é menor com o ângulo de disparo variando entre 151° e 180° (MEYKANDASIVAM, S.; NEMA, R. K.; SHAIENDRA, K. J., 2012).

Segundo Cheng, Hu e Cai (2004), para $\omega > 3$ o ponto de multi-ressonância ocorre nas curvas características de reatância que reduzem o intervalo de funcionamento do dispositivo TCSC.

3.1.2 Limites de Operação do TCSC

Embora o design do TCSC baseia-se nos requisitos de aplicação, os limites operacionais são determinados pelas características dos diversos componentes do dispositivo (MATHUR, R. M.; VARMA, R.K., 2002). Os principais limites são descritos a seguir.

O limite de corrente é um gargalo do sistema com compensador, visto que, para correntes com alta amplitude, torna-se necessário "bypassar" o TCSC para proteger os capacitores. Portanto, no intervalo em que a corrente na linha volta a ser inferior ao valor limite, o TCSC pode ser reinserido. Sugere-se um valor de 2 (duas) vezes a corrente nominal para o limite máximo de corrente na linha (GAMA, C. A., 1995).

Quanto aos limites de tensão, dos quais o maior valor em qualquer equipamento operacional (incluindo os capacitores série) é determinado pelo nível de proteção do equipamento. A restrição à tensão pode variar com o tempo de aplicação de tensão, para períodos curtos (tipicamente inferior a dois segundos), o limite de sobretensão do MOV é mais crítica do que a do capacitor (MATHUR, R. M.; VARMA, R.K., 2002).

Tratando-se dos limites de ângulo de disparo, com intuito de prevenir a operação próxima ao ponto de ressonância, o que pode causar instabilidade de controle, o sistema de controle deve impor alguns limites para o ângulo de disparo, tanto para região de operação capacitiva quanto para região indutiva. Para a região capacitiva, a limitação no ângulo de disparo pode ser expressa como um valor limite constante de reatância capacitiva (GAMA, C. A., 1995).

Com o TCSC operando na região indutiva, tem-se um limite máximo de reatância controlada para evitar que o TCSC opere na região de ressonância. Este limite é atingido para baixos valores de corrente de linha, e é expresso em termos do máximo ângulo de disparo. O limite mínimo de reatância indutiva é atingido quando os tiristores estão totalmente em condução, correspondente a $\alpha = 90^\circ$. Com o aumento da corrente de linha, harmônicos são gerados, o que causa não somente aquecimento no indutor e tiristor, mas também tensões de pico próximo aos limites de tensão dos capacitores e do MOV. As máximas correntes de linha e dos tiristores para a região indutiva, restringem a operação do TCSC (MATHUR, R. M.; VARMA, R.K., 2002).

Quanto aos limites de reatância capacitiva, considerando a operação para baixos valores de corrente, a máxima reatância capacitiva é limitada a um valor máximo fixo devido à limitação do ângulo de disparo. Já para altos valores de corrente, a tensão máxima permitida no capacitor é determinante, logo, o limite de reatância máxima é inversamente proporcional à corrente na linha (GAMA, C. A., 1995).

Com os tiristores bloqueados, obtém-se o limite capacitivo mínimo. Se a operação na região indutiva não é desejada, o valor mínimo de reatância do TCSC é igual ao limite mínimo capacitivo para operação normal (em regime) (GAMA, C. A., 1995).

3.2 TSSC

A diferença básica do TSSC para o TCSC é o tamanho do indutor, visto que no TSSC o indutor é menor e os tiristores operam bloqueados ou em condução total. Através disso, o TSSC possui uma saída do tipo discretizada ou também chamada de saída em degraus, baseada no estado dos tiristores. Já que o nível de compensação do TSSC varia em degraus, o dispositivo opera na região capacitiva. (GAMA, C. A., 1995).

Como descrito por Mathur e Varma (2002), o TSSC oferece os seguintes benefícios comparados aos capacitores série mecanicamente comutados, são eles:

- A comutação do tiristor permite um número ilimitado de operações sem qualquer desgaste. Essa capacidade é utilizada para alterar o grau de compensação de linha com mais frequência, e para alcançar um maior controle sobre o fluxo de potência;
- Instantes exatos de comutação (formas de onda de tensão) podem ser selecionados com os tiristores, o que minimiza significativamente os transientes de comutação. Em contraste, a comutação de disjuntores não está sincronizada;
- Uma velocidade muito rápida de resposta, em que o tempo entre o início de um sinal de controle e a inserção de um capacitor, ou de desvio, é tipicamente inferior a um semi-ciclo (8 ms para 60 Hz). Assim, quando uma grande linha sofre uma interrupção, a capacidade de transferência de potência de uma linha alternativa pode ser aumentada rapidamente através do TSSC.

- Sem geração de harmônicos.

Na figura 11, tem-se a curva de capacidade de reatância para o dispositivo TSSC. Com a análise da figura nota-se que o TSSC apresenta reatância constante, independentemente do valor da corrente de linha, visto que o capacitor é dimensionado para operar com os tiristores bloqueados. Com os tiristores em condução total, o valor da reatância assumido pelo TSSC é praticamente nula, ou seja, o capacitor é dito "bypassado" pelo indutor de valor baixo. (GAMA, C. A., 1995).

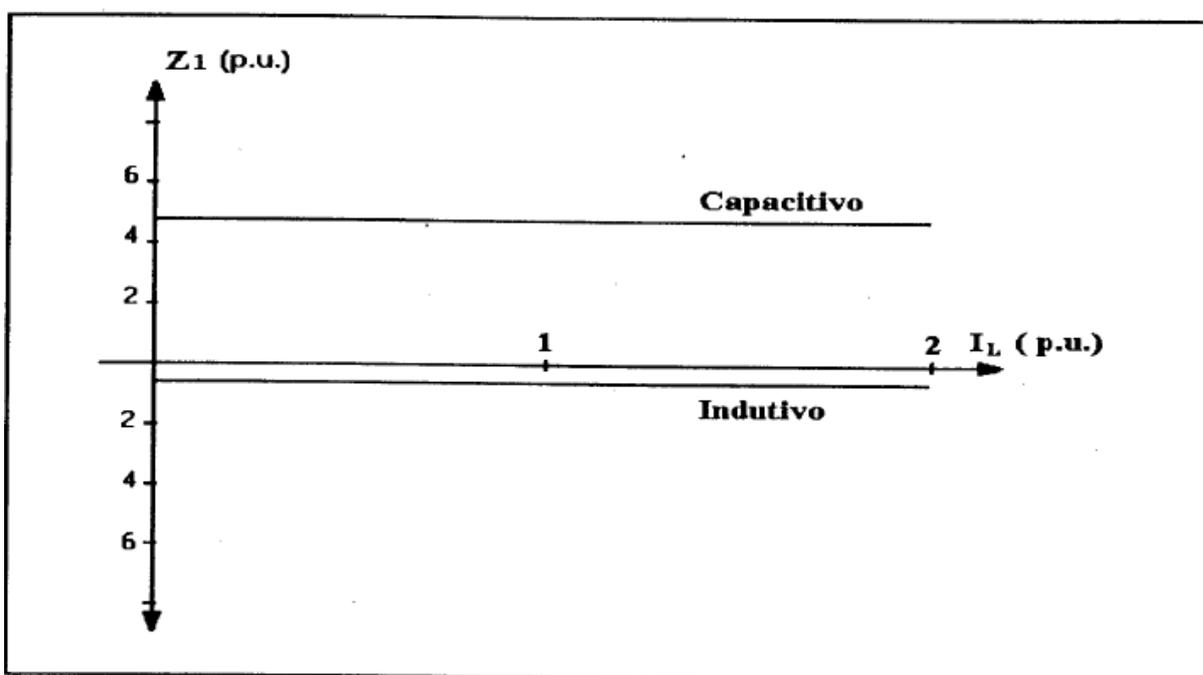


Figura 11: Curva de Capacidade de Reatância do TSSC
Fonte: (GAMA, C.A., 1995)

O dispositivo TSSC é bastante satisfatório quando somente o controle gradual da reatância da linha de transmissão é considerada adequada. Entretanto, quando é desejado o controle contínuo é empregado o TCSC (MATHUR, R. M.; VARMA, R.K., 2002).

4 SIMULAÇÃO DOS FACTS ATRAVÉS DO ANAREDE

4.1 INTRODUÇÃO

O ANAREDE é um sistema integrado para a análise em regime permanente de sistemas elétricos de potência. Esse sistema pode ser utilizado para estudos tanto em ambiente de planejamento quanto de operação em tempo real. O ANAREDE é composto por uma interface gráfica com recursos do tipo menus, caixas de diálogo, planilhas e diagramas unifilares. Estão associadas ao programa ANAREDE duas ferramentas de pós-processamento de resultados que agilizam significativamente a análise de resultados das simulações: FormCepel e PlotCepel. A primeira permite a geração de tabelas personalizadas e tabelas de comparação definidas pelo usuário, além dos relatórios já existentes no ANAREDE. A segunda permite a visualização de curvas dos estudos de segurança de tensão e curvas de capacidade de geração de potência reativa das máquinas. O modelo ANAREDE é constituído por alguns programas computacionais desenvolvidos para realização de estudos em regime permanente, dos quais destaca-se para esse estudo (CEPEL, 2013):

- Programa de fluxo de potência: calcula o estado da rede elétrica para condições definidas de carga, geração e topologia do sistema e faz a representação completa de dispositivos de controle e limites. Os equipamentos da rede elétrica podem ser representados tanto por modelos equivalentes quanto por modelos individualizados. Neste último caso é possível alterar o estado operativo (Ligado ou Desligado) de cada equipamento do sistema.

Utiliza-se para este trabalho um caso base, desenvolvido utilizando o *software* ANAREDE para simulação de diferentes situações no SEP, considerando diferentes configurações, e também analisando a compensação de energia reativa no sistema. Para isto dispõe-se do sistema elétrico padrão do IEEE 14-barras. O modelo disponibilizado pelo *software* não possui limite de geração, por isso as capacidades de geração e carregamento, máximas e mínimas, das linhas foram estimadas. Primeiramente são apresentadas as simulações do sistema de 14 barras de forma detalhada, e depois é feito o estudo comparativo com os resultados alcançados.

O *software* ANAREDE disponibiliza dois tipos de compensadores série controláveis (CSC), o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) e o TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*). No primeiro modelo a variação da reatância é contínua e no segundo discreta (CEPEL, Manual do Usuário versão 10.00.01, 11/2013). Para este trabalho utilizou-se do modelo CSC, visto que este representa os dois modelos (TCSC e o TSSC) para o regime permanente, já que a principal diferença entre o TCSC e o TSSC é a maneira pela qual é controlada a reatância do sistema (CEPEL – 2013).

O processo iterativo do cálculo do estado operativo da rede elétrica para as condições impostas consiste na obtenção, de forma alternada, de soluções para o sistema CA, até que as variações, entre iterações consecutivas, das potências injetadas na rede CA sejam menores que uma determinada tolerância. Dois métodos estão disponíveis para a solução das equações da rede elétrica CA (CEPEL – 2013):

- Método Desacoplado Rápido
- Método de Newton

Para este trabalho utiliza-se o método de Newton-Raphson.

Realizaram-se as simulações com o intuito de averiguar as diferenças no fluxo de potência, com e sem a utilização dos dispositivos FACTS considerando também diferentes alterações nas configurações do sistema. A partir dos resultados obtidos, torna-se possível a seleção da melhor configuração do sistema.

4.2 ESTUDO DO CASO BASE

O estudo do caso base foi realizado através do modelo IEEE-14 Barras disponibilizado pelo *software* ANAREDE. Os parâmetros de barra e de linha utilizados para simulação são próprios do exemplo apresentado pelo programa.

A simulação do caso base foi realizada com intuito de gerar um relatório com os dados de fluxo de potência ativa e reativa. Este relatório será utilizado como referência para análise dos próximos casos, onde serão verificados os parâmetros de fluxo entre as barras.

A Figura 12 apresenta a interface gráfica do modelo IEEE-14 Barras.

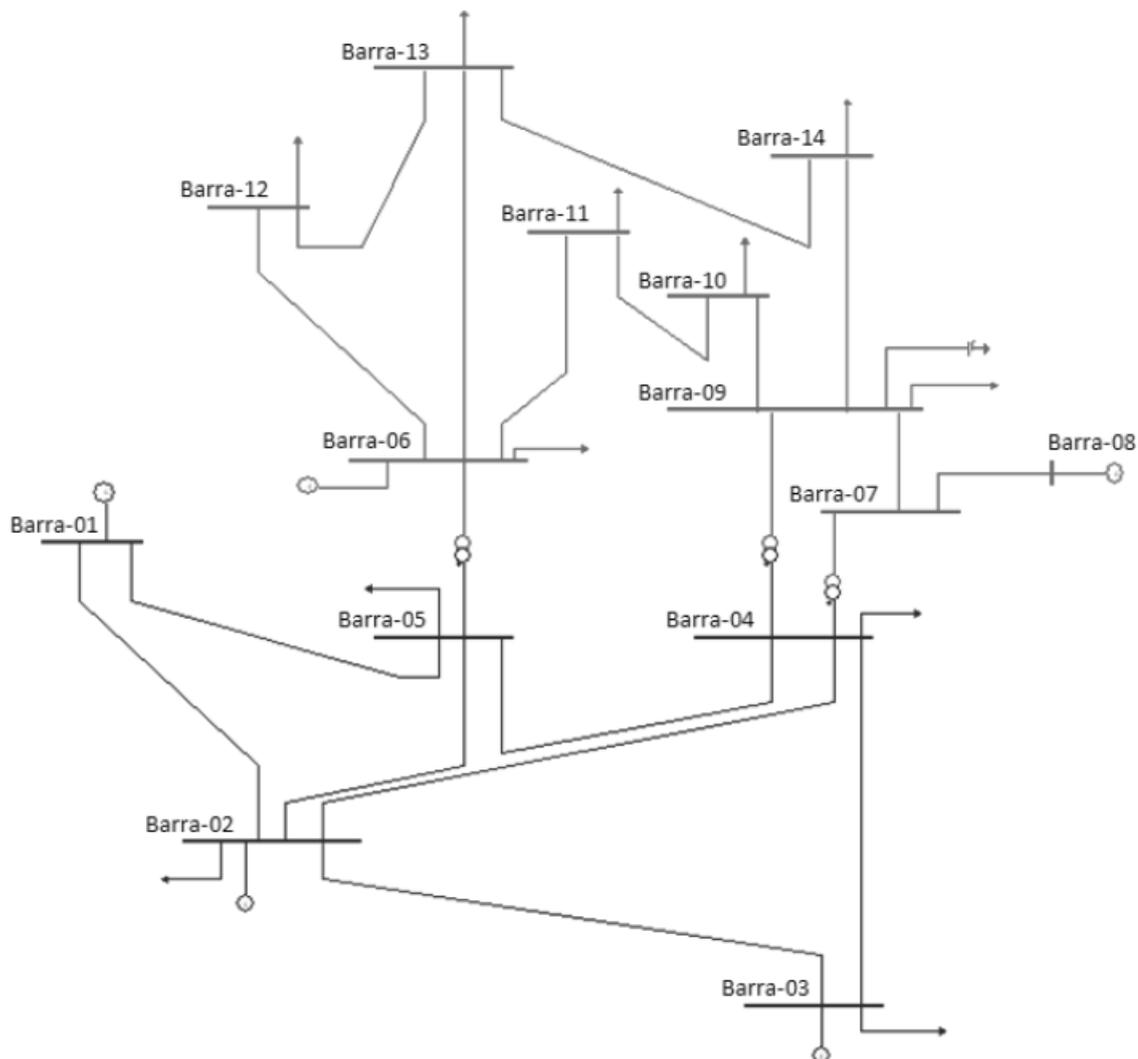


Figura 12: Interface gráfica ANAREDE
 Fonte: Adaptado ANAREDE

As Tabelas 4 e 5 apresentam os dados de barra e de linha para o caso base, respectivamente.

Tabela 4: Dados de BARRA do caso base

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Shunt (MVAr)
1	Ref	1.06	-0.00	0.00	0.00	232.39	-16.55	0.00
2	PV	1.04	-4.98	21.70	12.70	40.00	43.56	0.00
3	PV	1.01	-12.73	94.20	19.00	0.00	25.08	0.00
4	PQ	1.02	-10.31	47.80	-3.90	0.00	0.00	0.00
5	PQ	1.02	-8.77	7.60	1.60	0.00	0.00	0.00

(continua)

Tabela 4: Dados de BARRA do caso base (continuação)

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Shunt (MVar)
6	PV	1.07	-14.22	11.20	7.50	0.00	12.73	0.00
7	PQ	1.06	-13.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	PV	1.09	-13.36	0.00	0.00	0.00	17.62	0.00
9	PQ	1.06	-14.94	29.50	16.60	0.00	0.00	21.18
10	PQ	1.05	-15.10	9.00	5.80	0.00	0.00	0.00
11	PQ	1.06	-14.79	3.50	1.80	0.00	0.00	0.00
12	PQ	1.06	-15.08	6.10	1.60	0.00	0.00	0.00
13	PQ	1.05	-15.16	13.50	5.80	0.00	0.00	0.00
14	PQ	1.04	-16.03	14.90	5.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Adaptado ANAREDE.

Tabela 5: Dados de LINHA do caso base

Barra				Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Fluxo (MW)	Fluxo (MVar)	R (%)	X (%)
De	Tipo	Para	Tipo										
1	Ref	2	PV	1.06	-0.00	232.39	-16.55	0.00	0.00	156.88	-20.40	1,938	5,917
1	Ref	5	PQ	1.06	-0.00	232.39	-16.55	0.00	0.00	75.51	3.85	5,403	22,304
2	PV	1	Ref	1.04	-4.98	40.00	43.56	21.70	12.70	-152.6	27.68	1,938	5,917
2	PV	3	PV	1.04	-4.98	40.00	43.56	21.70	12.70	73.24	3.56	4,699	19,797
2	PV	4	PQ	1.04	-4.98	40.00	43.56	21.70	12.70	56.13	-1.55	5,811	17,632
2	PV	5	PQ	1.04	-4.98	40.00	43.56	21.70	12.70	41.52	1.17	5,695	17,388
3	PV	2	PV	1.01	-12.73	0.00	25.08	94.20	19.00	-70.91	1.60	4,699	19,797
3	PV	4	PQ	1.01	-12.73	0.00	25.08	94.20	19.00	-23.29	4.47	6,701	17,103
4	PQ	2	PV	1.02	-10.31	0.00	0.00	47.80	-3.90	-54.45	3.02	5,811	17,632
4	PQ	3	PV	1.02	-10.31	0.00	0.00	47.80	-3.90	23.66	-4.84	6,701	17,103
4	PQ	5	PQ	1.02	-10.31	0.00	0.00	47.80	-3.90	-61.16	15.82	1,335	4,211
4	PQ	7	PQ	1.02	-10.31	0.00	0.00	47.80	-3.90	28.07	-9.68	0	20,912
4	PQ	9	PQ	1.02	-10.31	0.00	0.00	47.80	-3.90	16.08	-0.43	0	55,618
5	PQ	2	PV	1.02	-8.77	0.00	0.00	7.60	1.60	-40.61	-2.10	5,695	17,388
5	PQ	4	PQ	1.02	-8.77	0.00	0.00	7.60	1.60	61.67	-14.20	1,335	4,211
5	PQ	6	PV	1.02	-8.77	0.00	0.00	7.60	1.60	44.09	12.47	0	25,202
5	PQ	1	Ref	1.02	-8.77	0.00	0.00	7.60	1.60	-72.75	2.23	5,403	22,304
6	PV	5	PQ	1.07	-14.22	0.00	12.73	11.20	7.50	-44.09	-8.05	0	25,202
6	PV	11	PQ	1.07	-14.22	0.00	12.73	11.20	7.50	7.35	3.56	9,498	19,89
6	PV	12	PQ	1.07	-14.22	0.00	12.73	11.20	7.50	7.79	2.50	12,291	25,581
6	PV	13	PQ	1.07	-14.22	0.00	12.73	11.20	7.50	17.75	7.22	6,615	13,027
7	PQ	4	PQ	1.06	-13.36	0.00	0.00	0.00	0.00	-28.07	11.38	0	20,912

(continua)

Tabela 5: Dados de LINHA do caso base (Continuação)

Barra				Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Fluxo (MW)	Fluxo (MVar)	R (%)	X (%)
De	Tipo	Para	Tipo										
7	PQ	8	PV	1.06	-13.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-17.16	0	17,615
7	PQ	9	PQ	1.06	-13.36	0.00	0.00	0.00	0.00	28.07	5.78	0	11,001
8	PV	7	PQ	1.09	-13.36	0.00	17.62	0.00	0.00	0.00	17.62	0	17,615
9	PQ	4	PQ	1.06	-14.94	0.00	0.00	29.50	16.60	-16.1	1.73	0	55,618
9	PQ	7	PQ	1.06	-14.94	0.00	0.00	29.50	16.60	-28.1	-4.98	0	11,001
9	PQ	10	PQ	1.06	-14.94	0.00	0.00	29.50	16.60	5.23	4.22	3,181	8,45
9	PQ	14	PQ	1.06	-14.94	0.00	0.00	29.50	16.60	9.43	3.61	12,711	27,038
10	PQ	9	PQ	1.05	-15.10	0.00	0.00	9.00	5.80	-5.21	-4.18	3,181	8,45
10	PQ	11	PQ	1.05	-15.10	0.00	0.00	9.00	5.80	-3.79	-1.62	8,205	19,207
11	PQ	6	PV	1.06	-14.79	0.00	0.00	3.50	1.80	-7.30	-3.44	9,498	19,89
11	PQ	10	PQ	1.06	-14.79	0.00	0.00	3.50	1.80	3.80	1.64	8,205	19,207
12	PQ	6	PV	1.06	-15.08	0.00	0.00	6.10	1.60	-7.71	-2.35	12,291	25,581
12	PQ	13	PQ	1.06	-15.08	0.00	0.00	6.10	1.60	1.61	0.75	22,092	19,988
13	PQ	6	PV	1.05	-15.16	0.00	0.00	13.50	5.80	-17.6	-6.80	6,615	13,027
13	PQ	12	PQ	1.05	-15.16	0.00	0.00	13.50	5.80	-1.61	-0.75	22,092	19,988
13	PQ	14	PQ	1.05	-15.16	0.00	0.00	13.50	5.80	5.64	1.75	17,093	34,802
14	PQ	9	PQ	1.04	-16.03	0.00	0.00	14.90	5.00	-9.31	-3.36	12,711	27,038
14	PQ	13	PQ	1.04	-16.03	0.00	0.00	14.90	5.00	-5.59	-1.64	17,093	37,802

Fonte: Adaptado ANAREDE.

Efetuando a simulação, obteve-se a Tabela 6 com os dados de fluxo do sistema.

Tabela 6: Dados do fluxo de potência para o caso base

Barra		Fluxo		Perdas	
De	Para	MW	MVar	MW	MVar
1	2	156,9	-20,4	4,3	7,27
1	5	75,5	3,9	2,76	6,08
2	1	-152,6	27,7	4,3	7,27
2	3	73,2	3,6	2,32	5,16
2	4	56,1	-1,6	1,68	1,47
2	5	41,5	1,2	0,9	-0,93
3	2	-70,9	1,6	2,32	5,16
3	4	-23,3	4,5	0,37	-0,36
4	2	-54,5	3	1,68	1,47
4	3	23,7	-4,8	0,37	-0,36
4	5	-61,2	15,8	0,51	1,62

(continua)

Tabela 6: Dados do fluxo de potência para o caso base (continuação)

Barra		Fluxo		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
4	7	28,1	-9,7	0	1,7
4	9	16,1	-0,4	0	1,3
5	1	-72,7	2,2	2,76	6,08
5	2	-40,6	-2,1	0,9	-0,93
5	4	61,7	-14,2	0,51	1,62
5	6	44,1	12,5	0	4,42
6	5	-44,1	-8	0	4,42
6	11	7,4	3,6	0,06	0,12
6	12	7,8	2,5	0,07	0,15
6	13	17,7	7,2	0,21	0,42
7	4	-28,1	11,4	0	1,7
7	8	0	-17,2	0	0,46
7	9	28,1	5,8	0	0,8
8	7	0	17,6	0	0,46
9	4	-16,1	1,7	0	1,3
9	7	-28,1	-5	0	0,8
9	10	5,2	4,2	0,01	0,03
9	14	9,4	3,6	0,12	0,25
10	9	-5,2	-4,2	0,01	0,03
10	11	-3,8	-1,6	0,01	0,03
11	6	-7,3	-3,4	0,06	0,12
11	10	3,8	1,6	0,01	0,03
12	6	-7,7	-2,4	0,07	0,15
12	13	1,6	0,8	0,01	0,01
13	6	-17,5	-6,8	0,21	0,42
13	12	-1,6	-0,7	0,01	0,01
13	14	5,6	1,7	0,05	0,11
14	9	-9,3	-3,4	0,12	0,25
14	13	-5,6	-1,6	0,05	0,11

Fonte: Adaptado ANAREDE.

Como já dito, serão avaliados os dados de fluxo de potência, principalmente entre as barras 6 e 13 do caso base, os quais seguem na Tabela 7.

Tabela 7: Dados do fluxo de potência para o caso base reduzido

Barra		Fluxo		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
6	5	-44,1	-8	0	4,42
6	11	7,4	3,6	0,06	0,12

(continua)

Tabela 7: Dados do fluxo de potência para o caso base reduzido (continuação)

Barra		Fluxo		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
6	12	7,8	2,5	0,07	0,15
6	13	17,7	7,2	0,21	0,42
13	6	-17,5	-6,8	0,21	0,42
13	12	-1,6	-0,7	0,01	0,01
13	14	5,6	1,7	0,05	0,11

Fonte: Adaptado ANAREDE.

4.3 ESTUDO DO CASO TSSC 1

Como o principal objetivo deste trabalho é apresentar um aumento do fluxo de potência ativa com a utilização de dispositivos FACTS, insere-se entre as barras 6 e 13 do sistema IEEE-14 Barras um compensador série controlável (CSC). Já que não é possível implementar o compensador diretamente na linha, pois este é considerado apenas um dispositivo pelo sistema, coloca-se uma barra 15 do tipo PQ² entre as barras 6 e 13, e insere-se o CSC entre as barras 6 e 15. Logo, a linha de transmissão ficou agora entre as barras 13 e 15, e o CSC ficou em série com a linha de transmissão, como é apresentado na Figura 13. Portanto, o sistema do caso TSSC 1 será composto por 15 barras.

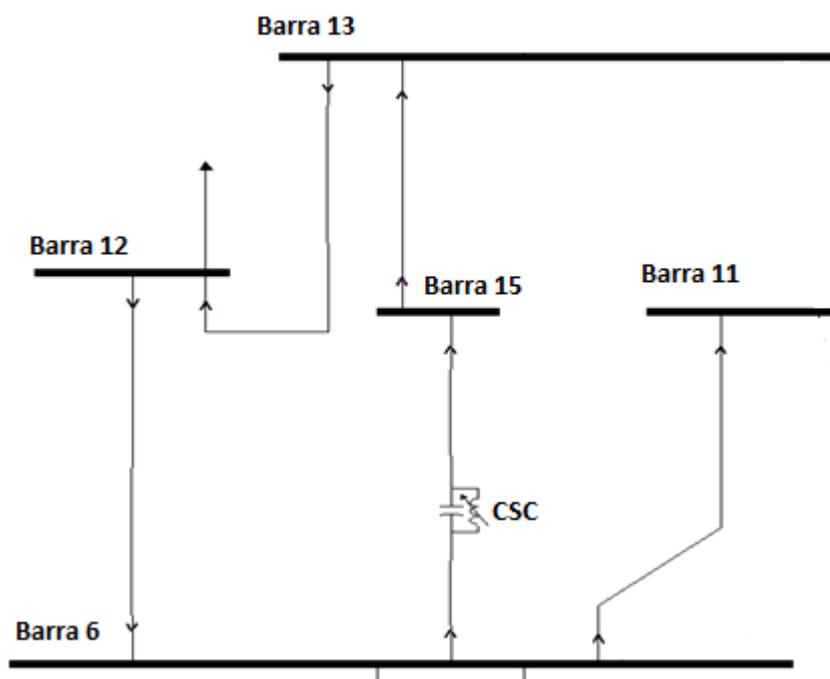


Figura 13: Modelo CSC instalado entre as barras 6 e 15

Fonte: Adaptado ANAREDE.

² PQ é uma barra de carga, portanto, especifica-se no ANAREDE a carga na barra (P em MW e Q em MVAr), e o programa calcula a tensão V (p.u.) e o ângulo em graus.

Para a simulação utilizou-se dos mesmos dados de barra e de linha do caso base, com a ressalva que agora tem-se 15 barras no sistema. As tabelas 8 e 9 apresentam os dados de barra e de linha do caso TSSC 1, respectivamente.

Tabela 8: Dados de BARRA do caso TSSC 1

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Shunt (MVar)
1	Ref	1.06	0.00	0.00	0.00	232.78	-16.46	0.00
2	PV	1.04	-4.99	21.70	12.70	40.00	43.71	0.00
3	PQ	1.01	-12.72	94.20	19.00	0.00	25.06	0.00
4	PQ	1.02	-10.30	47.80	-3.90	0.00	0.00	0.00
5	PQ	1.02	-8.81	7.60	1.60	0.00	0.00	0.00
6	PQ	1.07	-14.63	11.20	7.50	0.00	11.16	0.00
7	PQ	1.06	-13.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	PV	1.09	-13.17	0.00	0.00	0.00	17.83	0.00
9	PQ	1.06	-14.66	29.50	16.60	0.00	0.00	21.15
10	PQ	1.05	-14.94	9.00	5.80	0.00	0.00	0.00
11	PQ	1.06	-14.91	3.50	1.80	0.00	0.00	0.00
12	PQ	1.05	-14.24	6.10	1.60	0.00	0.00	0.00
13	PQ	1.05	-12.99	13.50	5.80	0.00	0.00	0.00
14	PQ	1.03	-14.93	14.90	5.00	0.00	0.00	0.00
15	PQ	1.07	-11.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Adaptado ANAREDE.

Tabela 9: Dados de LINHA do caso TSSC 1

Barra				Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Fluxo (MW)	Fluxo (MVar)	R (%)	X (%)
De	Tipo	Para	Tipo										
1	Ref	2	PV	1,1	0	232,8	-16,5	0	0	157	-20,4	1,938	5,917
1	Ref	5	PQ	1,1	0	232,8	-16,5	0	0	75,8	4	5,403	22,304
2	PV	1	Ref	1	-5	40	43,7	21,7	12,7	-153	27,7	1,938	5,917
2	PV	3	PV	1	-5	40	43,7	21,7	12,7	73,1	3,6	4,699	19,797
2	PV	4	PQ	1	-5	40	43,7	21,7	12,7	55,9	-1,5	5,811	17,632
2	PV	5	PQ	1	-5	40	43,7	21,7	12,7	41,9	1,3	5,695	17,388
3	PV	2	PV	1	-12,7	0	25,1	94,2	19	-70,8	1,6	4,699	19,797
3	PV	4	PQ	1	-12,7	0	25,1	94,2	19	-23,4	4,5	6,701	17,103
4	PQ	2	PV	1	-10,3	0	0	47,8	-3,9	-54,3	3	5,811	17,632
4	PQ	3	PV	1	-10,3	0	0	47,8	-3,9	23,7	-4,9	6,701	17,103
4	PQ	5	PQ	1	-10,3	0	0	47,8	-3,9	-58,9	15,8	1,335	4,211
4	PQ	7	PQ	1	-10,3	0	0	47,8	-3,9	26,5	-9,6	0	20,912
4	PQ	9	PQ	1	-10,3	0	0	47,8	-3,9	15,2	-0,3	0	55,618

(continua)

Tabela 9: Dados de LINHA do caso TSSC 1 (continuação)

Barra				Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Fluxo (MW)	Fluxo (MVar)	R (%)	X (%)
De	Tipo	Para	Tipo										
5	PQ	2	PV	1	-8,8	0	0	7,6	1,6	-41	-2,1	5,695	17,388
5	PQ	4	PQ	1	-8,8	0	0	7,6	1,6	59,4	-14,3	1,335	4,211
5	PQ	6	PV	1	-8,8	0	0	7,6	1,6	47,1	12,6	0	25,202
5	PQ	1	Ref	1	-8,8	0	0	7,6	1,6	-73	2,2	5,403	22,304
6	PV	5	PQ	1,1	-14,6	0	11,2	11,2	7,5	-47,1	-7,6	0	25,202
6	PV	11	PQ	1,1	-14,6	0	11,2	11,2	7,5	5,1	4,7	9,498	19,89
6	PV	12	PQ	1,1	-14,6	0	11,2	11,2	7,5	0,8	7,8	12,291	25,581
7	PQ	4	PQ	1,1	-13,2	0	0	0	0	-26,5	11,1	0	20,912
7	PQ	8	PV	1,1	-13,2	0	0	0	0	0	-17,4	0	17,615
7	PQ	9	PQ	1,1	-13,2	0	0	0	0	26,5	6,3	0	11,001
8	PV	7	PQ	1,1	-13,2	0	17,8	0	0	0	17,8	0	17,615
9	PQ	4	PQ	1,1	-14,7	0	0	29,5	16,6	-15,2	1,5	0	55,618
9	PQ	7	PQ	1,1	-14,7	0	0	29,5	16,6	-26,5	-5,6	0	11,001
9	PQ	10	PQ	1,1	-14,7	0	0	29,5	16,6	7,5	3	3,181	8,45
9	PQ	14	PQ	1,1	-14,7	0	0	29,5	16,6	4,6	5,7	12,711	27,038
10	PQ	9	PQ	1,1	-14,9	0	0	9	5,8	-7,5	-3	3,181	8,45
10	PQ	11	PQ	1,1	-14,9	0	0	9	5,8	-1,5	-2,8	8,205	19,207
11	PQ	6	PV	1,1	-14,9	0	0	3,5	1,8	-5	-4,7	9,498	19,89
11	PQ	10	PQ	1,1	-14,9	0	0	3,5	1,8	1,5	2,9	8,205	19,207
12	PQ	6	PV	1,1	-14,2	0	0	6,1	1,6	-0,7	-7,6	12,291	25,581
12	PQ	13	PQ	1,1	-14,2	0	0	6,1	1,6	-5,4	6,1	22,092	19,988
13	PQ	12	PQ	1,1	-13	0	0	13,5	5,8	5,5	-5,9	22,092	19,988
13	PQ	14	PQ	1,1	-13	0	0	13,5	5,8	10,5	-0,2	17,093	34,802
13	PQ	15	PQ	1,1	-13	0	0	13,5	5,8	-29,5	0,4	6,616	13,027
14	PQ	9	PQ	1	-14,9	0	0	14,9	5	-4,6	-5,6	12,711	27,038
14	PQ	13	PQ	1	-14,9	0	0	14,9	5	-10,3	0,6	17,093	34,802
15	PQ	13	PQ	1,1	-11	0	0	0	0	30	0,7	6,616	13,027

Fonte: Adaptado ANAREDE.

Para implementação do dispositivo CSC no sistema, tornou-se necessária a inserção de alguns valores dos parâmetros. Na Figura 14, pode ser visto a interface gráfica na implementação do CSC.

Figura 14: Dados de entrada do CSC no ANAREDE
Fonte: Adaptado ANAREDE.

Na Tabela 10 seguem as descrições apresentadas pelo manual do *software* ANAREDE para cada campo dos dados de entrada do CSC, como também os valores utilizados para a simulação do caso TSSC 1.

Tabela 10: Dados de entrada do CSC no *software* ANAREDE

Campo	Descrição	Default	Valor Utilizado no Caso TSSC 1
Da Barra	Número da barra de uma das extremidades do CSC como definido no campo Número do Código de Execução DBAR.		6
Para Barra	Número da barra da outra extremidade do CSC como definido no campo Número do Código de Execução DBAR.		15

(continua)

Tabela 10: Dados de entrada do CSC no software ANAREDE (continuação)

Campo	Descrição	Default	Valor Utilizado no Caso TSSC 1
Modo de Controle	<p>P - Potência constante. O valor especificado para o fluxo de potência ativa no circuito é mantido enquanto os valores de reatância do CSC se mantiverem dentro dos limites.</p> <p>I - Corrente constante. O valor especificado para o módulo da corrente no circuito é mantido enquanto os valores de reatância do CSC se mantiverem dentro dos limites.</p> <p>X - Reatância constante. O CSC não atua e a reatância é fixada no valor especificado.</p>	X	P – Potência
Valor Mínimo	Valor mínimo da reatância do CSC, em %.	-9999	-40
Valor Máximo	Valor máximo da reatância do CSC, em %.	9999	-20
Valor Inicial	Valor inicial da reatância do CSC, em %.	Xmax	-24
Valor Especificado	<p>Fluxo de Potência Ativa no CSC, em MW, se o modo de controle especificado é Potência Constante (P), ou;</p> <p>Módulo da Corrente no CSC, em pu, se o modo de controle especificado é Corrente Constante (I), ou;</p> <p>Reatância do CSC, em %, se o modo de controle especificado é Reatância Constante (X).</p>		30
Extremidade de Medição	Número da barra terminal do CSC na qual a potência ou a corrente é medida, como definido no campo Número do Código de Execução DBAR.	Da Barra	6
Número de Estágios	Número de estágios do CSC discreto (TSSC - Thyristor Switched Series Capacitor). O valor default é para o CSC que opera de modo contínuo (TCSC - Thyristor Controlled Series Capacitor).	Null	10

Fonte: Adaptado Manual do Usuário - ANAREDE.

Depois de definidos os parâmetros de linha, barra e CSC, realizou-se a simulação do sistema para a verificação do fluxo de potência entre barras. Na

Tabela 11 apresentam-se os valores de fluxo de potência entre as barras do caso TSSC 1.

Tabela 11: Fluxo de potência entre barras do caso TSSC 1

Barra		Fluxo		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
1	2	157	-20,4	4,3	7,29
1	5	75,8	4	2,79	6,18
2	1	-152,7	27,7	4,3	7,29
2	3	73,1	3,6	2,32	5,14
2	4	55,9	-1,5	1,67	1,44
2	5	41,9	1,2	0,92	-0,88
3	2	-70,8	1,6	2,32	5,14
3	4	-23,4	4,5	0,38	-0,36
4	2	-54,3	3	1,67	1,44
4	3	23,7	-4,9	0,38	-0,36
4	5	-58,9	15,8	0,48	1,51
4	7	26,5	-9,6	0	1,53
4	9	15,2	-0,3	0	1,16
5	1	-73	2,2	2,79	6,18
5	2	-41	-2,1	0,92	-0,88
5	4	59,3	-14,3	0,48	1,51
5	6	47,1	12,6	0	5
6	5	-47,1	-7,6	0	5
6	11	5,1	4,7	0,04	0,08
6	12	0,8	7,8	0,07	0,14
6	15	30	-1,2	0	-1,89
7	4	-26,5	11,1	0	1,53
7	8	0	-17,4	0	0,47
7	9	26,5	6,3	0	0,72
8	7	0	17,8	0	0,47
9	4	-15,2	1,5	0	1,16
9	7	-26,5	-5,6	0	0,72
9	10	7,5	3	0,02	0,05
9	14	4,6	5,7	0,06	0,13
10	9	-7,5	-3	0,02	0,05
10	11	-1,5	-2,8	0,01	0,02
11	6	-5	-4,6	0,04	0,08
11	10	1,5	2,9	0,01	0,02

(continua)

Tabela 11: Fluxo de potência entre barras do caso TSSC 1 (continuação)

Barra		Fluxo		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
12	6	-0,7	-7,6	0,07	0,14
12	13	-5,4	6,1	0,13	0,12
13	12	5,5	-5,9	0,13	0,12
13	14	10,5	-0,2	0,17	0,35
13	15	-29,5	0,4	0,52	1,03
14	9	-4,6	-5,6	0,06	0,13
14	13	-10,3	0,6	0,17	0,35
15	6	-30	-0,7	0	-1,89
15	13	30	0,7	0,52	1,03

Fonte: Adaptado ANAREDE.

4.4 ESTUDO DO CASO TSSC 2

Para esse caso insere-se entre as barras 6 e 11 do sistema IEEE-14 Barras um compensador série controlável (CSC). Como já visto no caso TSSC 1, não é possível introduzir o compensador diretamente na linha, portanto, coloca-se uma barra 15 do tipo PQ entre as barras 6 e 11, e insere-se o CSC entre as barras 6 e 15. Logo, a linha de transmissão ficou agora entre as barras 11 e 15, e o CSC ficou em série com a linha de transmissão, como é apresentado na Figura 15. Diante disso, o sistema do caso TSSC 2 também é composto por 15 barras.

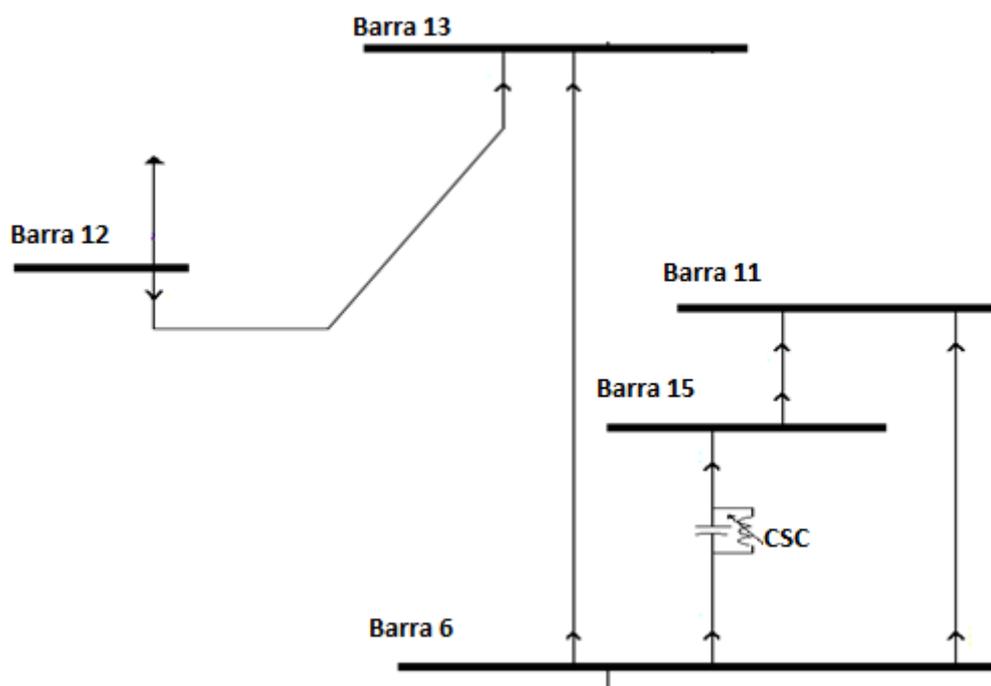


Figura 15: Modelo CSC instalado entre as barras 6 e 15
Fonte: Adaptado ANAREDE.

Para a simulação do caso TSSC 2, considerou-se os mesmos dados de barra e de linha do caso base, assim como no caso TSSC 1. As tabelas 12 e 13 apresentam os dados de barra e de linha do caso TSSC 2, respectivamente.

Tabela 12: Dados de barra do caso TSSC 2

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Shunt (MVar)
1	Ref	1.06	-0.00	0.00	0.00	232.37	-16.56	0.00
2	PV	1.04	-4.98	21.70	12.70	40.00	43.42	0.00
3	PQ	1.01	-12.72	94.20	19.00	0.00	24.98	0.00
4	PQ	1.02	-10.30	47.80	-3.90	0.00	0.00	0.00
5	PQ	1.02	-8.78	7.60	1.60	0.00	0.00	0.00
6	PQ	1.07	-14.31	11.20	7.50	0.00	12.98	0.00
7	PQ	1.06	-13.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	PV	1.09	-13.30	0.00	0.00	0.00	17.42	0.00
9	PQ	1.06	-14.85	29.50	16.60	0.00	0.00	21.21
10	PQ	1.05	-14.97	9.00	5.80	0.00	0.00	0.00
11	PQ	1.06	-14.56	3.50	1.80	0.00	0.00	0.00
12	PQ	1.06	-15.15	6.10	1.60	0.00	0.00	0.00
13	PQ	1.05	-15.22	13.50	5.80	0.00	0.00	0.00
14	PQ	1.04	-16.01	14.90	5.00	0.00	0.00	0.00
15	PQ	1.07	-13.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Adaptado ANAREDE.

Tabela 13: Dados de linha do caso TSSC 2

Barra				Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Fluxo (MW)	Fluxo (MVar)	Fluxo (MVA)	R (%)	X (%)
De	Tipo	Para	Tipo											
1	Ref	2	PV	1,06	0	232,4	-16,6	0	0	156,8	-20,4	158,1	1,938	5,917
1	Ref	5	PQ	1,06	0	232,4	-16,6	0	0	75,6	3,8	75,7	5,403	22,304
2	PV	1	Ref	1,04	-5	40	43,4	21,7	12,7	-153	27,7	155	1,938	5,917
2	PV	3	PV	1,04	-5	40	43,4	21,7	12,7	73,2	3,6	73,3	4,699	19,797
2	PV	4	PQ	1,04	-5	40	43,4	21,7	12,7	56,1	-1,6	56,1	5,811	17,632
2	PV	5	PQ	1,04	-5	40	43,4	21,7	12,7	41,6	1,1	41,6	5,695	17,388
3	PV	2	PV	1,01	-12,7	0	25	94,2	19	-70,9	1,6	70,9	4,699	19,797
3	PV	4	PQ	1,01	-12,7	0	25	94,2	19	-23,3	4,4	23,7	6,701	17,103
4	PQ	2	PV	1,02	-10,3	0	0	47,8	-3,9	-54,4	3,1	54,5	5,811	17,632
4	PQ	3	PV	1,02	-10,3	0	0	47,8	-3,9	23,7	-4,8	24,2	6,701	17,103
4	PQ	5	PQ	1,02	-10,3	0	0	47,8	-3,9	-60,6	15,9	62,6	1,335	4,211
4	PQ	7	PQ	1,02	-10,3	0	0	47,8	-3,9	27,6	-9,8	29,3	0	20,912
4	PQ	9	PQ	1,02	-10,3	0	0	47,8	-3,9	15,8	-0,5	15,8	0	55,618

(continua)

Tabela 13: Dados de linha do caso TSSC 2 (continuação)

Barra				Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	Fluxo (MW)	Fluxo (MVar)	Fluxo (MVA)	R (%)	X (%)
De	Tipo	Para	Tipo											
5	PQ	4	PQ	1,02	-8,8	0	0	7,6	1,6	61,1	-14,3	62,8	1,335	4,211
5	PQ	6	PV	1,02	-8,8	0	0	7,6	1,6	44,8	12,6	46,5	0	25,202
5	PQ	1	Ref	1,02	-8,8	0	0	7,6	1,6	-72,8	2,3	72,8	5,403	22,304
5	PQ	2	PV	1,02	-8,8	0	0	7,6	1,6	-40,7	-2,1	40,7	5,695	17,388
6	PV	5	PQ	1,07	-14,3	0	13	11,2	7,5	-44,8	-8	45,5	0	25,202
6	PV	12	PQ	1,07	-14,3	0	13	11,2	7,5	7,7	2,5	8,1	12,291	25,581
6	PV	13	PQ	1,07	-14,3	0	13	11,2	7,5	17,4	7,3	18,9	6,615	13,027
7	PQ	4	PQ	1,06	-13,3	0	0	0	0	-27,6	11,5	29,9	0	20,912
7	PQ	8	PV	1,06	-13,3	0	0	0	0	0	-17	17	0	17,615
7	PQ	9	PQ	1,06	-13,3	0	0	0	0	27,6	5,5	28,2	0	11,001
8	PV	7	PQ	1,09	-13,3	0	17,4	0	0	0	17,4	17,4	0	17,615
9	PQ	4	PQ	1,06	-14,9	0	0	29,5	16,6	-15,8	1,8	15,9	0	55,618
9	PQ	7	PQ	1,06	-14,9	0	0	29,5	16,6	-27,6	-4,7	28	0	11,001
9	PQ	10	PQ	1,06	-14,9	0	0	29,5	16,6	4,1	4,1	5,8	3,181	8,45
9	PQ	14	PQ	1,06	-14,9	0	0	29,5	16,6	9,8	3,5	10,4	12,711	7,038
10	PQ	9	PQ	1,05	-15	0	0	9	5,8	-4,1	-4	5,8	3,181	8,45
10	PQ	11	PQ	1,05	-15	0	0	9	5,8	-4,9	-1,8	5,2	8,205	19,207
11	PQ	10	PQ	1,06	-14,6	0	0	3,5	1,8	4,9	1,8	5,2	8,205	19,207
11	PQ	15	PQ	1,06	-14,6	0	0	3,5	1,8	-8,4	-3,6	9,2	9,498	19,89
12	PQ	6	PV	1,06	-15,2	0	0	6,1	1,6	-7,6	-2,4	8	12,291	25,581
12	PQ	13	PQ	1,06	-15,2	0	0	6,1	1,6	1,5	0,8	1,7	22,092	19,988
13	PQ	6	PV	1,05	-15,2	0	0	13,5	5,8	-17,2	-6,9	18,5	6,615	13,027
13	PQ	12	PQ	1,05	-15,2	0	0	13,5	5,8	-1,5	-0,8	1,7	22,092	19,988
13	PQ	14	PQ	1,05	-15,2	0	0	13,5	5,8	5,2	1,9	5,6	17,093	34,802
14	PQ	9	PQ	1,04	-16	0	0	14,9	5	-9,7	-3,2	10,2	12,711	7,038
14	PQ	13	PQ	1,04	-16	0	0	14,9	5	-5,2	-1,8	5,5	17,093	34,802
15	PQ	11	PQ	1,07	-13,9	0	0	0	0	8,5	3,7	9,3	9,498	19,89

Fonte: Adaptado ANAREDE.

Diferentemente do caso TSSC 1, para o caso TSSC 2 foram utilizados os valores dos parâmetros conforme a Tabela 14.

Tabela 14: Valores dos parâmetros do CSC para caso TSSC 2

Campo	Valor Utilizado no Caso TSSC 2
Da Barra	6
Para Barra	11

(continua)

Tabela 14: Valores dos parâmetros do CSC para caso TSSC 2 (continuação)

Campo	Valor Utilizado no Caso TSSC 2
Modo de Controle	P – Potência
Valor Mínimo [%]	-50
Valor Máximo [%]	-10
Valor Inicial [%]	-34
Valor Especificado	30
Extremidade de Medição	6
Número de Estágios	10

Fonte: Autoria Própria.

Após definidos os parâmetros de linha, barra e CSC, efetuou-se a simulação do sistema no *software* ANAREDE para a verificação do fluxo de potência entre barras. Na tabela 15 verificam-se os valores de fluxo de potência entre as barras do caso TSSC2.

Tabela 15: Fluxo de potência entre barras do caso TSSC 2

Barra		Fluxo		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
1	5	156,7	-20,4	4,29	7,24
1	2	76	4,2	2,8	6,23
2	1	-152,4	27,6	4,29	7,24
2	3	73	3,6	2,31	5,09
2	4	55,5	-1,3	1,64	1,36
2	5	42,2	1,4	0,93	-0,83
3	2	-70,7	1,5	2,31	5,09
3	4	-23,5	4,7	0,38	-0,34
4	2	-53,9	2,7	1,64	1,36
4	3	23,9	-5	0,38	-0,34
4	5	-56	15,5	0,44	1,37
4	7	24,3	-9,3	0	1,31
4	9	13,9	0	0	0,98
5	1	-73,2	2,1	2,8	6,23
5	2	-41,3	-2,3	0,93	-0,83
5	4	56,5	-14,1	0,44	1,37
5	6	50,3	12,8	0	5,69
6	5	-50,3	-7,1	0	5,69
6	12	7,2	3	0,07	0,14
6	13	15,2	8,6	0,18	0,35
6	15	16,7	-1,3	0	-1,22
7	4	-24,3	10,6	0	1,31

(continua)

Tabela 15: Fluxo de potência entre barras do caso TSSC 2 (continuação)

Barra		Fluxo		Perdas	
De	Para	MW	MVAr	MW	MVAr
7	8	0	-18	0	0,51
7	9	24,3	7,4	0	0,63
8	7	0	18,5	0	0,51
9	4	-13,9	1	0	0,98
9	7	-24,3	-6,8	0	0,63
9	10	-3,8	8,5	0,02	0,07
9	14	12,5	1,7	0,18	0,39
10	9	3,8	-8,4	0,02	0,07
10	11	-12,8	2,6	0,13	0,3
11	10	12,9	-2,3	0,13	0,3
11	15	-16,4	0,5	0,23	0,49
12	6	-7,2	-2,8	0,07	0,14
12	13	1,1	1,2	0,01	0
13	6	-15,1	-8,3	0,18	0,35
13	12	-1,1	-1,2	0,01	0
13	14	2,6	3,7	0,03	0,06
14	9	-12,3	-1,4	0,18	0,39
14	13	-2,6	-3,6	0,03	0,06
15	6	-16,7	0	0	-1,22
15	11	16,7	0	0,23	0,49

Fonte: Autoria Própria.

4.5 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ENTRE O CASO TSSC1 E O CASO BASE

Visto que a compensação série controlada atua em sistemas de potência com a função de controlar o fluxo de potência ativa, por meio da variação de sua reatância série, essa comparação com o caso base tem a intenção de verificar o aumento do fluxo de potência ativa entre as barras 6 e 13 do sistema anterior (caso base), que agora é percebido entre as barras 6, 15 e 13. Pela análise da Figura 16, nota-se que o fluxo de potência ativa na linha sem o compensador era de 17,7 MW e o fluxo de potência reativa é de 7,2 MVAr. Com a inserção do compensador entre as barras 6 e 15, em série com a nova linha, percebe-se que o fluxo de potência reativa diminui de 7,2 MVAr para 0,7 MVAr, visto que o compensador cancela uma parte da reatância da linha. No entanto, o fluxo de potência ativa aumenta de 17,7

MW para 30 MW, ou seja, um ganho de 69,5 % do fluxo de potência ativa através da linha.

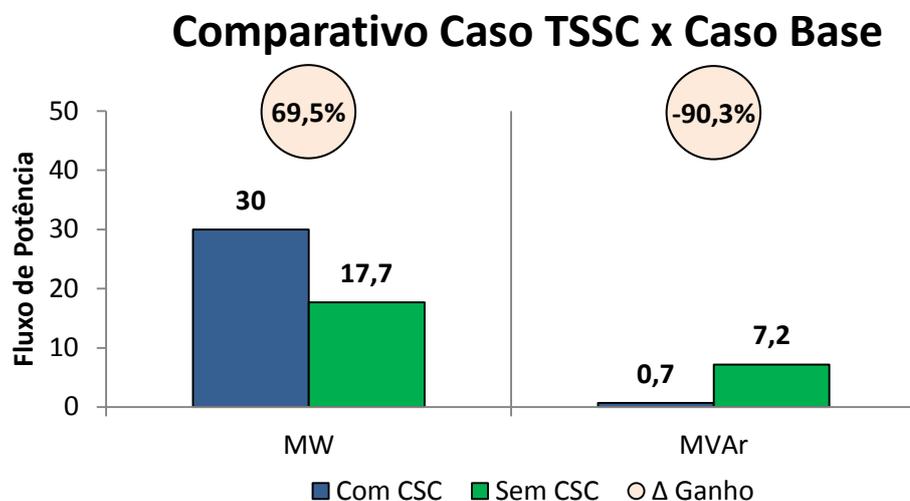


Figura 16: Comparação entre o caso TSSC e o Caso Base
 Fonte: Autoria própria (2015).

4.5.1 Análise com Incremento de Carga

Com o intuito de verificar o comportamento do fluxo de potência na linha com o compensador série controlado instalado e sem o compensador, variou-se linearmente as cargas (ativa e reativa) na barra 13 do sistema, conforme valores das tabelas 16 e 17, com e sem a utilização do CSC, respectivamente, a fim de averiguar a flexibilidade dos dispositivos FACTS no sistema estudado. Os valores de fluxo de potência (ativa, reativa e aparente) das Tabelas 16 e 17 foram obtidos através de simulações realizadas no *software* ANAREDE, com os respectivos incrementos nas cargas.

Tabela 16: Variação da Carga na BARRA-13 do caso TSSC1

Nº	Caso	Carga MW	Carga MVar	Fluxo MW	Fluxo MVar	Fluxo MVA
1	Base com CSC	13,5	5,8	30	0,7	28,1
2	Com CSC + 10%	14,85	6,38	30,4	2,4	28,4
3	Com CSC + 20%	16,2	6,96	30,5	4	28,6
4	Com CSC + 30%	17,55	7,54	31,9	4,3	29,9
5	Com CSC + 40%	18,9	8,12	33,3	4,7	31,2
6	Com CSC + 50%	20,25	8,7	34,7	5,2	32,5
7	Com CSC + 60%	21,6	9,28	36	5,6	33,8
8	Com CSC + 70%	22,95	9,86	37,5	6,1	35,2
9	Com CSC + 80%	24,3	10,44	38,8	6,4	36,4
10	Com CSC + 90%	25,65	11,02	40,2	6,9	37,8
11	Com CSC + 100%	27	11,6	41,6	7,4	39,1

12	Com CSC + 200%	40,5	17,4	55,6	12,1	52,3
13	Com CSC + 300%	54	23,2	69,9	17,5	65,8

Fonte: Autoria própria (2015).

Com os dados obtidos na Tabela 16, elaborou-se o gráfico 2.

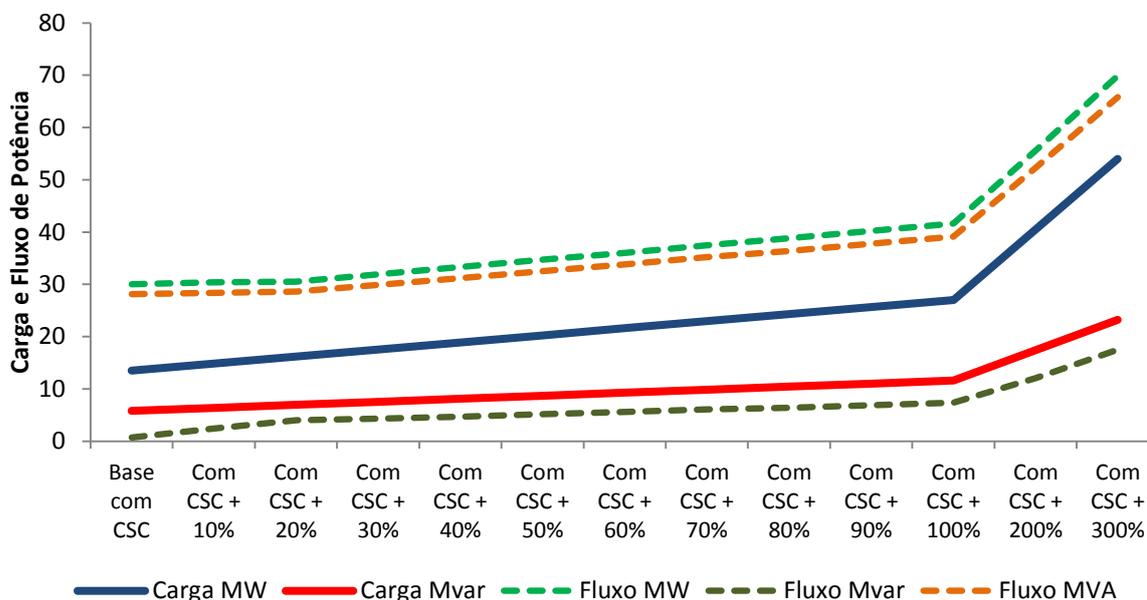


Gráfico 2: Elevação Linear da Carga na BARRA-13 x Alteração do Fluxo de Potência - Com CSC

Fonte: Autoria própria (2015).

Diante dos dados apresentados no Gráfico 2, pôde-se notar a linearidade do aumento no fluxo de potência (ativa e reativa) levando-se em conta o incremento de carga realizado. Nota-se que o fluxo de potência ativa durante todas as variações de carga manteve-se com valores superiores ao valor demandado de carga ativa, enquanto o fluxo de potência reativa manteve-se abaixo dos valores da carga reativa demandada.

Também foi possível observar um incremento constante nos valores de fluxos de potência (ativa e reativa) conforme a variação da carga, matendo uma mesma taxa de crescimento que o valor da carga.

Tabela 17: Variação da Carga na BARRA-13 do caso base

Nº	Caso	Carga MW	Carga MVar	Fluxo MW	Fluxo MVar	Fluxo MVA
0	Base	13,5	5,8	17,7	7,2	17,9
1	Sem CSC + 10%	14,85	6,38	18,6	7,7	18,8
2	Sem CSC + 20%	16,2	6,96	19,4	8,3	19,7
3	Sem CSC + 30%	17,55	7,54	20,3	8,7	20,6

(continua)

Tabela 17: Variação da Carga na BARRA-13 do caso base (continuação)

Nº	Caso	Carga MW	Carga MVar	Fluxo MW	Fluxo MVar	Fluxo MVA
4	Sem CSC + 40%	18,9	8,12	21,1	9,3	21,5
5	Sem CSC + 50%	20,25	8,7	22	9,8	22,5
6	Sem CSC + 60%	21,6	9,28	22,8	10,3	23,4
7	Sem CSC + 70%	22,95	9,86	23,6	10,9	24,3
8	Sem CSC + 80%	24,3	10,44	24,5	11,3	25,2
9	Sem CSC + 90%	25,65	11,02	25,3	11,9	26,2
10	Sem CSC + 100%	27	11,6	26,1	12,4	27,1
11	Sem CSC + 200%	40,5	17,4	34,7	17,9	36,5
12	Sem CSC + 300%	54	23,2	43,4	23,8	46,2

Fonte: Autoria própria (2015).

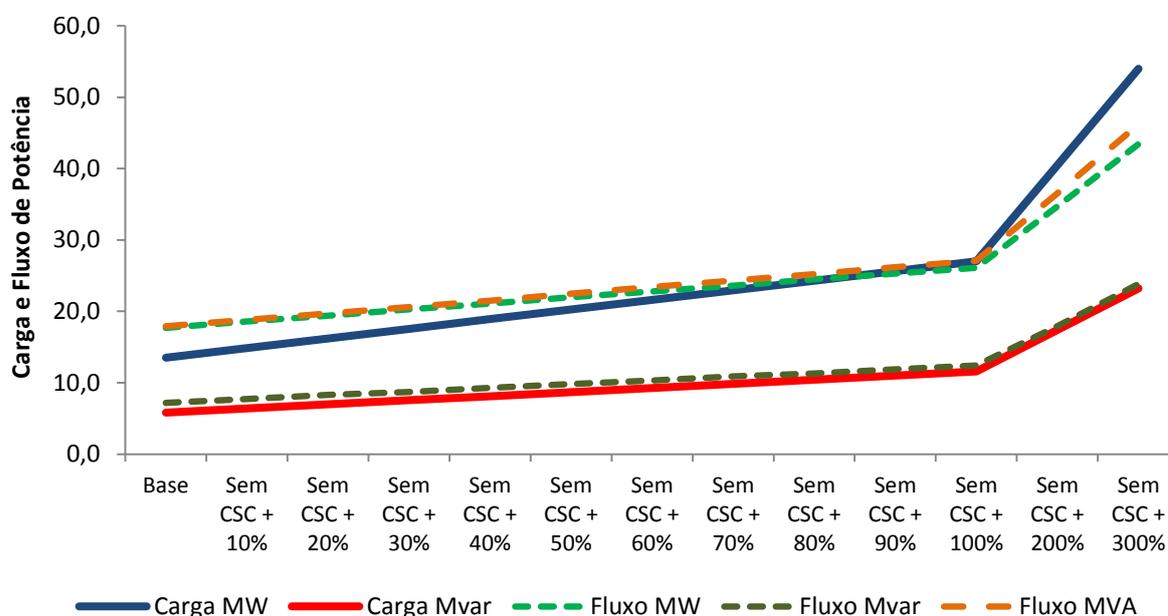


Gráfico 3: Elevação Linear da Carga na BARRA-13 x Alteração do Fluxo de potência - Sem CSC
Fonte: Autoria própria (2015).

Com base no gráfico 3, verifica-se que o fluxo de potência ativa não acompanha os valores de carga ativa demandada em todos os pontos apresentados, visto que, a partir do incremento de 90% os valores de fluxo de potência ativa são inferiores ao valor da carga demandada.

Neste caso não houve incremento constante nos valores de fluxo de potência ativa em relação a carga ativa, porém, no caso do fluxo de potência reativa a taxa de crescimento foi constante.

Portanto, pode-se concluir neste caso que sem o CSC na linha o sistema não possui a mesma flexibilidade no aumento do fluxo de potência ativa, ou seja, o

sistema sem o CSC não teria condições de atender a carga demandada a partir de um determinado incremento de carga, diferentemente do caso com o CSC inserido no sistema, em que, o suprimento à carga demandada é realizado durante todas as situações analisadas.

4.6 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ENTRE O CASO TSSC 2 E O CASO BASE

Esta análise também tem como objetivo a verificação do ganho de fluxo de potência ativa na linha e conseqüentemente a redução do fluxo de potência reativa. Como já visto no caso TSSC 1, o caso TSSC 2 também compara os dados de fluxo com o caso base. Para essa situação tem-se a comparação do fluxo de potência (ativa e reativa) entre as barras 11 e 15. Pela análise da Figura 17, percebe-se que o fluxo de potência ativa na linha sem o compensador é de 7,4 MW, e 3,6 MVar de fluxo de potência reativa. Após a implantação do compensador entre as barras 6 e 15, em série com a linha que interliga as barras 15 e 11, nota-se que o fluxo de potência reativa tornou-se nulo, além disso, houve um ganho de 125,7 % no fluxo de potência ativa, visto que no caso base tinha-se 7,4 MW e com o compensador 16,7 MW.

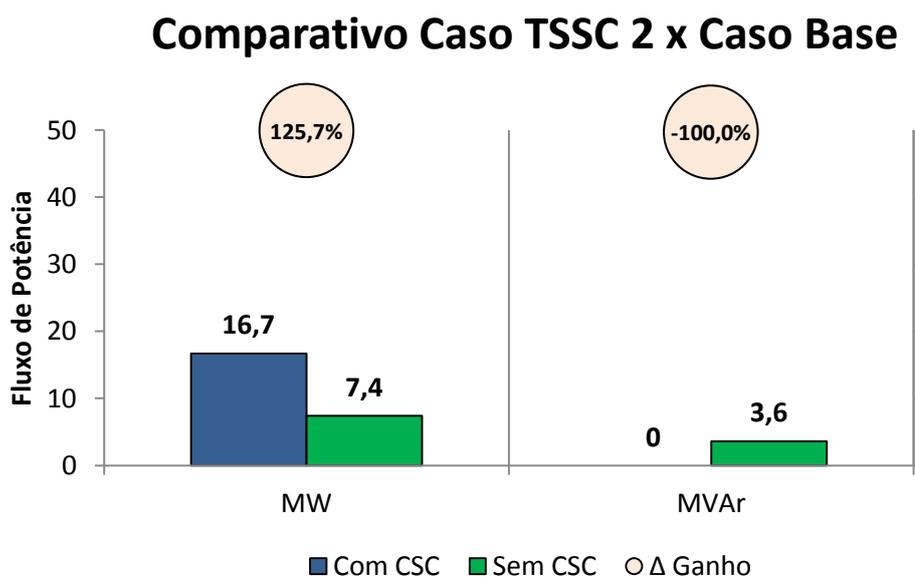


Figura 17: Comparação entre o caso TSSC 2 e o Caso Base
 Fonte: Autoria própria (2015).

4.6.1 Análise com Incremento de Carga

Para essa análise variou-se linearmente as cargas (ativa e reativa) na barra 11 do sistema, de acordo com as Tabelas 18 e 19, com e sem a utilização do CSC, respectivamente. Com intuito de examinar a flexibilidade dos dispositivos FACTS no sistema estudado, investigou-se o comportamento do fluxo de potência na linha com e sem o compensador instalado.

Os valores de fluxo de potência (ativa, reativa e aparente) das Tabelas 18 e 19 foram obtidos através de simulações realizadas no *software* ANAREDE, com os respectivos incrementos nas cargas.

Tabela 18: Variação de Carga na BARRA-11 do caso TSSC 2

Nº	Caso	Carga MW	Carga MVar	Fluxo MW	Fluxo MVar	Fluxo MVA
0	Base com CSC	3,5	1,8	16,7	0	15,6
1	Com CSC + 10%	3,85	1,98	17,2	0,1	16,1
2	Com CSC + 20%	4,2	2,16	17,7	0,2	16,6
3	Com CSC + 30%	4,55	2,34	18,1	0,2	17
4	Com CSC + 40%	4,9	2,52	18,6	0,3	17,4
5	Com CSC + 50%	5,25	2,7	19,2	0,4	17,9
6	Com CSC + 60%	5,6	2,88	19,6	0,6	18,4
7	Com CSC + 70%	5,95	3,06	20,2	0,7	18,9
8	Com CSC + 80%	6,3	3,24	20,5	0,7	19,2
9	Com CSC + 90%	6,65	3,42	21,1	0,8	19,7
10	Com CSC + 100%	7	3,6	21,5	1	20,2
11	Com CSC + 200%	10,5	5,4	26,5	2	24,7
12	Com CSC + 300%	14	7,2	30	5	28,1
13	Com CSC + 400%	17,5	9	31,6	8,9	29,9

Fonte: Autoria própria (2015).

A partir dos dados obtidos na Tabela 18, elaborou-se o Gráfico 4.

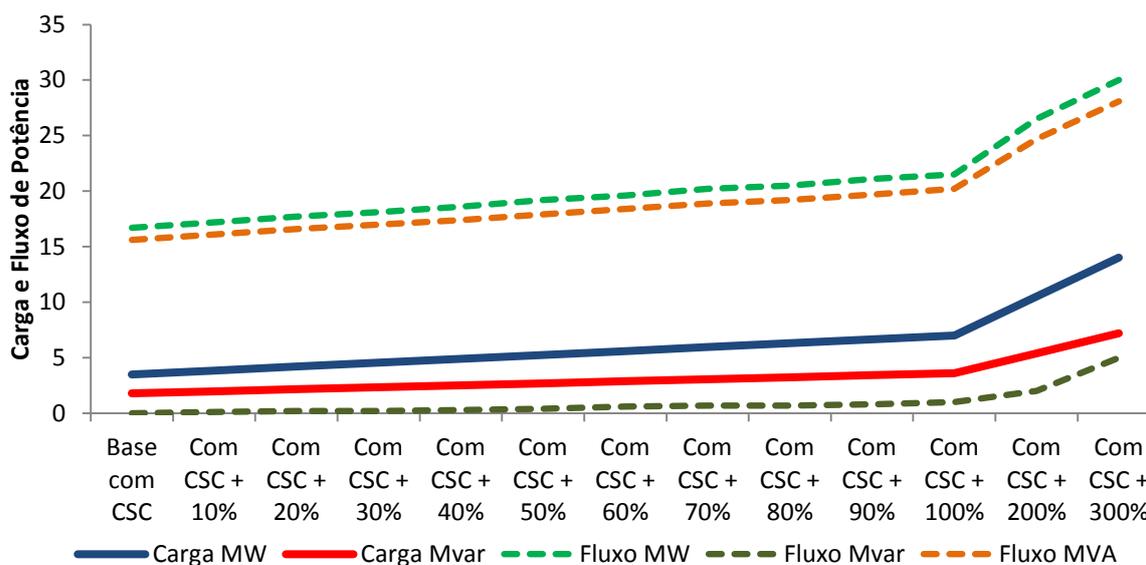


Gráfico 4: Elevação Linear da Carga na BARRA-11 x Alteração do Fluxo de Potência - Com CSC

Fonte: Autoria própria (2015).

Como já visto na análise realizada no tópico 4.5.1, percebe-se que o fluxo de potência ativa e reativa eleva-se de maneira linear conforme incrementos na carga (ativa e reativa). Agora, para este caso, os valores de fluxo de potência ativa também mantiveram-se acima dos valores demandados de carga. Já para o fluxo de potência reativa os valores demandados de carga mantiveram-se superiores no intervalo verificado na simulação, notando-se a flexibilidade dos compensadores nas variações de carga do sistema.

Assim como no tópico 4.5.1 é possível observar um incremento constante nos valores de fluxos de potência (ativa e reativa) conforme a variação da carga, matendo também uma mesma taxa de crescimento que o valor da carga.

Tabela 19: Variação de carga da BARRA-11 do caso base

Nº	Caso	Carga MW	Carga MVar	Fluxo MW	Fluxo MVar	Fluxo MVA
0	Base	3,5	1,8	7,4	3,6	7,6
1	Sem CSC + 10%	3,85	1,98	7,6	3,7	7,9
2	Sem CSC + 20%	4,2	2,16	7,7	3,9	8,1
3	Sem CSC + 30%	4,55	2,34	8	3,9	8,3
4	Sem CSC + 40%	4,9	2,52	8,1	4,1	8,5
5	Sem CSC + 50%	5,25	2,7	8,4	4,2	8,8
6	Sem CSC + 60%	5,6	2,88	8,5	4,4	9

(continua)

Tabela 19: Variação de carga da BARRA-11 do caso base (continuação)

Nº	Caso	Carga MW	Carga MVar	Fluxo MW	Fluxo MVar	Fluxo MVA
7	Sem CSC + 70%	5,95	3,06	8,8	4,5	9,2
8	Sem CSC + 80%	6,3	3,24	8,9	4,6	9,4
9	Sem CSC + 90%	6,65	3,42	9,1	4,8	9,6
10	Sem CSC + 100%	7	3,6	9,3	4,9	9,8
11	Sem CSC + 200%	10,5	5,4	11,3	6,3	12,1
12	Sem CSC + 300%	14	7,2	13,3	7,7	14,3
13	Sem CSC + 400%	17,5	9	15,3	9,1	16,6

Fonte: Autoria própria (2015).

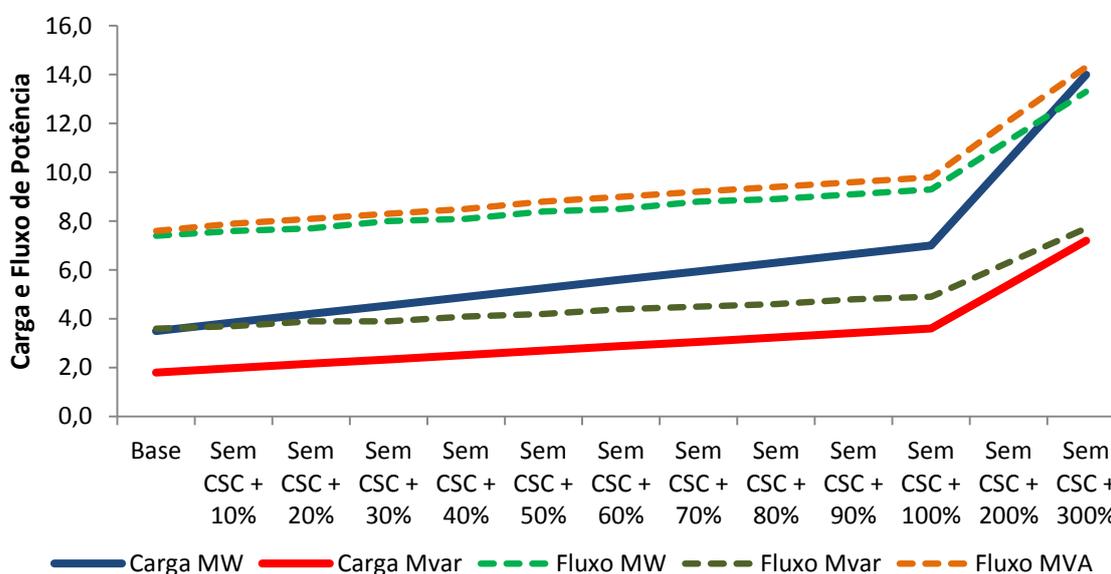


Gráfico 5: Elevação Linear da Carga na BARRA-11 x Alteração do Fluxo de Potência - Sem CSC
Fonte: Autoria própria (2015).

Para esta situação, sem o compensador, percebe-se que o fluxo de potência ativa consegue suprir a demanda até um incremento de aproximadamente 250% da carga, a partir deste ponto, o valor da carga demandada supera o fluxo de potência ativa. Já para o fluxo de potência reativa, têm-se valores superiores que a carga reativa demandada para qualquer ponto do intervalo analisado durante o estudo.

Nesta situação, observa-se que as taxas de incremento de fluxo de potência em comparação com a variação de carga não são lineares, já que as retas de fluxo de potência e carga demandada, como visto no gráfico 5, não possuem a mesma taxa de crescimento para todos os pontos analisados.

Portanto, sem o compensador na linha, o sistema não possui a mesma flexibilidade, visto que, não consegue suprir o acréscimo de carga em alguns intervalos do caso estudado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo sobre a implantação dos dispositivos FACTS, mais especificamente o TSSC no sistema elétrico de potência. Além disso, o trabalho analisa a redução do fluxo de potência reativa no sistema através da compensação série, e conseqüente aumento do fluxo de potência ativa disponível. O estudo foi feito com a análise dos dados obtidos na simulação dos FACTS, com o auxílio dos relatórios e informações disponibilizado pelo *software* Anarede.

Pensando-se no aumento de energia demandada pelo país nos últimos anos e nas projeções realizadas pelos órgãos competentes na área de energia, este estudo torna-se relevante, uma vez que mostra as principais vantagens de implantar o compensador série no sistema.

No intuito de comprovar os estudos teóricos ilustrados no decorrer do trabalho, implantou-se o compensador série entre as barras 6 e 13, como também entre as barras 6 e 11 do sistema IEEE 14 barras, disponibilizado pelo programa. Para o desenvolvimento da pesquisa foram estudados 3 casos. O caso base tem objetivo de apresentar os dados de linha, fluxo de potência e barra do sistema sem a presença do compensador.

Os casos TSSC 1 e TSSC 2 fazem uma comparação com o caso base dos dados de fluxo de potência ativa e o fluxo de potência reativa. É importante notar que o TSSC apresenta uma saída do tipo discreta, ou seja, o estado de compensação é aumentado ou reduzido em degraus. Nestes casos comprovaram-se a diminuição do fluxo de potência reativa e conseqüente aumento do fluxo de potência ativa entre as barras, visto que a função do compensador é anular uma parcela da reatância da linha para diminuir o fluxo de potência reativa.

Através das simulações realizadas pelo *software* ANAREDE, constatou-se que tanto o compensador TCSC quanto o TSSC têm as mesmas respostas nas simulações, já que para o estudo realizado considerou-se a análise em regime estacionário.

Diante das situações sem e com o compensador série, onde houve o incremento de carga ativa e reativa, verificou-se que na presença do dispositivo na linha o sistema respondeu de maneira mais eficaz com as variações demandadas de carga, ou seja, apresentou maior flexibilidade.

Ainda poderiam ser abordadas simulações em regime dinâmico para analisar o comportamento dos compensadores série em suas diferentes formas de operação. Como a simulação possibilita o controle de maneira contínua ou discreta, espera-se obter resultados mais coerentes para cada tipo de compensador (TSSC e TCSC). Ainda mais, estimar os custos reais para cada tipo de operação, e os benefícios em R\$/MWh para um determinado sistema.

Portanto, o estudo apresentou uma maneira eficaz para aumentar o fluxo de potência ativa no sistema, e também mostrou a importância desses dispositivos na área de sistemas elétricos de potência.

6 REFERÊNCIAS

ABB. **SVC for integration of wind power into a 230 kV grid**. Disponível em: < <http://new.abb.com/facts/references/reference-extremoz> > Acessado em 29 de Novembro de 2014.

AFFONSO, Carolina de M ; SILVA, Luciano J.; SILVA, Luis C. P. **Avaliação da estabilidade de tensão do sistema brasileiro - um caso de estudo**. SBA Controle e Automação, Natal, July/Sept. 2008. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592008000300008 > Acesso em 01 de Junho de 2014.

ALAMPI FILHO, S. **Análise de Controladores Eletrônicos em Sistemas de Distribuição de Energia**, 2005, (Mestrado em Engenharia Elétrica), UNESP, Ilha Solteira, SP, 2005.

ANEEL, 2002. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. 2ª edição. Disponível em: < www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 31 de Janeiro de 2015.

BEDIN, D. **Controle Suplementar de Equipamentos FACTS para Melhoria da Estabilidade para Pequenas Perturbações de Sistemas de Potência**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

BORLASE, Stuart. **Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions**. 1ª Edição, Editora CRC Press, 2012.

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.

CEPEL. **Manual do Usuário do ANAREDE**. Brasília: Eletrobras Cepel, 11/2013, versão 10.00.01, 41 p.).

DIXON, R., Morán, L.; RODRÍGUEZ, J.; DOMKE, R., **Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review**, Proceedings of the IEEE, Vol 93, Nº 12, IEEE, Santiago, Chile, 2005, pp. 1-21.

ExxonMobil Corporation, 2013. **2013 – The Outlook for Energy: A View to 2040**. Disponível em: <http://www.exxonmobil.com/corporate/files/news_pub_eo2013.pdf>. Acesso em: 31 de Janeiro de 2015.

GAIGOWAL, S.R.; RENGE, M.M. **Some studies of distributed séries FACTS controller to control active power flow through transmission line**. International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), 2013.

GAMA, C. A. **Utilização de Equipamentos Com Tecnologia FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em Sistemas de Potência – Compensação Série Controlada**. 1995, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), UFSC, Florianópolis, SC, 1995.

GYUGYI, L., **Unified Power-Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems**, IEE-Proceedings-C, Vol. 139, No.4, July 1992.

GYUGYI, L.; SEN, K. K.; SCHAUDER, C. D. **The Interline Power Flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission system**. IEEE Transactions on Power Delivery, 14(3), pág. 1115-1123, 1999.

HU, G.; CHENG, M.; CAI, G. **Relation Between Fundamental Frequency Equivalent Impedance And Resonant Point For Thyristor Controlled Series Compensation**. The 30th annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea, November, 2004.

LARSEN, E.; BOWLER, C.; DAMSKY, B.; NILSON, S. **Benefits of Thyristor Controlled Series Compensation**. CIGRÉ 34 Session, Paris, 1992.

LARSEN, E. V.; CLARK, K.; MISKE Jr, S. A.; URBANEK, J. **Characteristics and Rating Considerations of Thyristor-Controller Series Compensation**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No.2, April 1994.

MAHAJAN, V. **Thyristor Controlled Series Compensator**. Department of Electrical Engineering, M P Christian College Of Engineering and Technology Bhilai, Chattusgarh, India, 2006.

MAHDAD, B.; BOUKTIR, T.; SRAIRI, K. **Strategy of location and control of FACTS devices for enhancing power quality**. Electrotechnical Conference, MELECON 2006. IEEE Mediterranean, 2006.

MALISZEWKI, R. M., PASTERNAK, B. M., SCHERER, H. N., CHAMIA, M., FRANK H., and PAULSOON, L., **Power Flow Control in a Highly Integrated Transmission Network** CIGRE Paper 37-303, Paris, 1990.

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K., **Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, United States of America, 2002.

MEYKANDASIVAM, S.; NEMA, R. K.; SHAIENDRA, K. J. **Selection of TCSC Parameters: Capacitor and Inductor**. Department of Electrical Engineering, NIT, Bhopal, India. 2012.

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.

NARANGI, G.; HINGORANI, L. **Understanding facts: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. Wiley-IEEE Press, Dez. 1999. Research and Markets, Guinness Centre, Taylors Lane, Dublin 8, Ireland.

ONS. **Diretrizes e critérios para estudos elétricos. Submódulo 23.3**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_23/Subm%C3%B3dulo%2023.3_Rev_1.1.pdf > Acessado em 22 de Novembro de 2014.

PADIYAR, K. R., **Analysis of Subsynchronous Resonance in Power Systems**, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.

PADMA, S. A. **Performance Analysis of Thyristor Controlled Series Compensator**. International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, 2014. Sona College of Technology, Salem, India.

PASERBA, J.J. How FACTS controllers-benefit AC transmission systems. **Transmission and Distribution Conference and Exposition**, IEEE PES, vol. 3, 2003, p. 949-956.

PAULILO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus. **Variações de tensão de longa duração. O Setor Elétrico**. Abril, 2007. Disponível em: < http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed87_fasc_qualidade_cap4.pdf> . Acesso em: 01 de Junho de 2014.

SEN, K.K.; STACEY E.J. **UPFC- Unified Power Flow Controller Theory, Modeling, and Applications**. IEEE Transactions on Power Delivery v.13-4 p1453- 1460, Outubro de 1998.

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

TIEPOLO, G.; URBANETZ, J.; CANGIGLERI, O. **Inserção da Energia Fotovoltaica na Matriz Elétrica do Estado do Paraná: Análise do Potencial Produtivo**. Revista SODEBRAS – Volume 8 – Nº87 – março/2013.

UZUNOVIC, E.; FARDANESH, B.; HOPKINS, L.; SHPERLING, B.; ZELINGHER, S.; SCHUFF, A. **NYPA Convertible Static Compensator (CSC) Application Phase I: STATCOM**, IEEE, 2001.

YING XIAO, Y.H.; SUN, Y.Z. Power flow control approach to power systems with embedded FACTS devices. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 17, n. 4, 2002.

WATANABE E. H.; BARBOSA P. G.; ALMEIDA K. C.; TARANTO G. N. **Tecnologia FACTS – Tutorial**, SBA Controle & Automação, Vol. 9, No 1, abril 1998.