

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**BRUNO EDUARDO SOUZA SILVA**

**ESTUDO DO DISPOSITIVO FACTS TCSC PARA CONTROLE DE FLUXO DE  
POTÊNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Varginha**  
**2016**

**BRUNO EDUARDO SOUZA SILVA**

**ESTUDO DO DISPOSITIVO FACTS TCSC PARA CONTROLE DE FLUXO DE  
POTÊNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Dr. Vinicius Miranda Pacheco.

**Varginha  
2016**

**BRUNO EDUARDO SOUZA SILVA**

**ESTUDO DO DISPOSITIVO FACTS TCSC PARA CONTROLE DE FLUXO DE  
POTÊNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof. Dr. Vinicius Miranda Pacheco

---

Prof. Me. Josué Alexandre Aquino

---

Prof<sup>ª</sup>. Me. Ivana Prado de Vasconcelos

OBS.:

Dedico este trabalho a Deus, que durante todos esses anos de estudos me acompanhou e não me deixou desamparado em nenhum momento e também a minha mamãe que está no céu, sendo meu anjo da guarda.

“Ser feliz é deixar de ser vítima dos problemas e se tornar um autor da própria história. É atravessar desertos fora de si, mas ser capaz de encontrar um oásis no recôndito da sua alma. É agradecer a Deus a cada manhã pelo milagre da vida”.

Augusto Cury

## RESUMO

Atualmente existe um interesse crescente pela obtenção de metodologias que quantifiquem os benefícios dos Controladores FACTS em um SEE (Sistema de Energia Elétrica). Para agentes de geração e distribuição, na fase de planejamento, é necessária uma estimativa do investimento econômico, verificando se é ou não conveniente instalar estes controladores ou novas linhas de transmissão e avaliando o impacto técnico futuro dessa decisão. Os Dispositivos FACTS, através de sua ação sobre parâmetros do sistema, possibilitam uma melhoria na capacidade de transmissão da rede elétrica, maior controle sobre os fluxos de potência ativa e reativa e das magnitudes de tensão das barras. Neste trabalho são apresentados os aspectos técnicos da aplicação dos Controladores FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) na operação dos sistemas de energia elétrica (SEE). Foi abordado um levantamento técnico do fluxo de potência. Os FACTS são utilizados nos SEE para aumentar o limite da transferência de potência nas linhas de transmissão e para melhorar a estabilidade eletromecânica e de tensão. O modelo dos Controladores FACTS considerado para estudo aprofundado nesta pesquisa é o TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator). A análise das pesquisas realizadas indica que a operação de um SEE que possui FACTS é mais flexível com vantagens, tais como: aumento da transferência de potência nas linhas, um melhor controle de tensão nos barramentos remotos, podendo fixar tanto as tensões em barras quanto os fluxos de potência nas linhas. O objetivo principal será estudar a utilização do dispositivo FACTS TCSC para controle do fluxo de potência no sistema de transmissão de energia elétrica, obtendo como resultado final que o dispositivo TCSC, pode ser controlado continuamente através do disparo adequado dos tiristores. Com efeito, a compensação série de uma linha de transmissão pode ser realizada de forma dinâmica com esse dispositivo. A compensação série de linhas de transmissão se faz para aumentar a capacidade de transferência de potência. Como consequência deste aumento, é provável o aumento das perdas na linha compensada, como também na sensibilidade de resposta, em termos de fluxo de potência, quando da saída de outras linhas do sistema. Contudo, dos fatos apresentados no trabalho, fica comprovada a boa atuação do dispositivo TCSC na melhoria do fluxo de potência dos sistemas elétricos de potência.

**Palavras-chave:** Sistema de Energia Elétrica. FACTS. Fluxo de Potência. TCSC.

## ABSTRACT

Currently there is a growing interest in obtaining methodologies to quantify the benefits of FACTS controllers in an ESS (Electrical Power System). For agents of generation and distribution, in the planning stage, and required an estimate of the economic investment, and checking whether or not convenient to install these drivers or new transmission lines and evaluating the technical impact future this decision. The FACTS devices, through its action on system parameters, allow an improvement in transmission capacity of the grid, greater control over the active and reactive power flows and voltage magnitudes of the bars. This paper presents the technical aspects of the application of FACTS Controllers (flexible AC transmission systems) in the operation of power systems (ESS). a technical survey of power flow was approached. FACTS are used in the ESS to increase the power transfer limits of the transmission lines and to improve the electro and voltage stability. The model of FACTS Controllers considered for further study in this research is the TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator). The analysis of the research conducted indicates that the operation of an ESS having FACTS is more flexible with advantages such as increased power transfer lines, a better voltage control on the remote buses, and can set both the tension bars as the power flows in the lines. The main objective will be to study the use of FACTS TCSC device for power flow control in electric power transmission system, obtaining the final result that the TCSC device can be controlled continuously through the proper firing of the thyristors. Indeed, the series compensation of a transmission line can be performed dynamically with that device. The series compensation transmission lines is to increase the power transfer capability. As a result of this increase is likely the increased losses in the line offset, as well as the response sensitivity in terms of power flow when the output of the other system lines. However, the facts presented in the study, is proven good performance of the TCSC device to improve the power flow of electric power systems.

**Keywords:** Electric Power System. FACTS. Power Flow. TCSC.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de Malha .....	14
Figura 2 - Transferência Fluxo de Potência Ativa para AC .....	14
Figura 3 - Fluxo de Potência em Caminhos Paralelos.....	15
Figura 4 - Fluxo de Energia CA com caminhos paralelos.....	15
Figura 5 – Controle de fluxo de potência com impedância variável.....	16
Figura 6 - Controle de fluxo de potência com ângulo de fase variável.....	16
Figura 7 - Fluxo de Potência Com e Sem Compensação .....	17
Figura 8 - Conexão Shunt.....	27
Figura 9 - Conexão Série .....	27
Figura 10 - Esquema SVC .....	28
Figura 11 - Esquema TSC .....	29
Figura 12 - Esquema TCR.....	29
Figura 13 - Esquema TSSC .....	30
Figura 14 - Esquema TCSC.....	31
Figura 15 - Esquema SSSC .....	31
Figura 16 - Esquema STATCOM.....	32
Figura 17 - Esquema TSR .....	33
Figura 18 - Esquema TSC .....	33
Figura 19 - Esquema TCSR e TSSR .....	35
Figura 20 - Esquema UPFC.....	36
Figura 21 - Configuração Característica de um TCSC.....	38
Figura 22 - Tiristor Bloqueado .....	39
Figura 23- Tiristor em by-pass .....	39
Figura 24 - Modo Vernier.....	40
Figura 25 - Tensão sobre o capacitor.....	40
Figura 26 - Corrente do TCR.....	41
Figura 27 - TCSC associado a uma linha de transmissão .....	41
Figura 28 - Comportamento da Reatância.....	42
Figura 29 - TCSC a uma linha de Transmissão.....	43
Figura 30 - Gráfico da compensação K.....	44
Figura 31 - Topologia do sistema TCSC .....	45



Figura 32 - Diagrama do Sistema.....	47
Figura 33 - Diagrama do Sistema com todas a variáveis .....	48
Figura 34 - Diagrama com TCSC na linha AC .....	49

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AC - Alternated Current

DC - Direct Current

FACTS - Flexible AC transmission Systems

HVDC - High Voltage Direct Current

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor

IPFC - Interline Power Flow Control

PWM - Pulse Width Modulation

SEE - Sistema Elétrico de Energia

SSSC - Static Synchronous Series Compensator

STATCOM - Static Synchronous Compensator

SVC - Static Var Compensator

TCR - Thyristor Controlled Reactor

TCSC - Thyristor Controlled Series Compensator

TCSR - Thyristor Controlled Series Reactor

TSC - Thyristor Switched Capacitor

TSR - Thyristor Switched Reactor

TSSC - Thyristor Switched Series Capacitor

TSSR - Thyristor Switched Series Reactor

UPFC - Unified Power Flow Control

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

XC - Capacitância

XL - Indutância

## LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1 – Reatância parcial através do TCR.....	42
Fórmula 2 – Reatância parcial através do TCR.....	42
Fórmula 3 – Reatância Indutiva.....	42
Fórmula 4 – Reatância Indutiva.....	42
Fórmula 5 – Reatância equivalente.....	43
Fórmula 6 – Grau de Compensação.....	43
Fórmula 7 – Potência Ativa.....	43
Fórmula 8 – Potência Ativa.....	43
Fórmula 9 – Potência Ativa.....	43
Fórmula 10 – Reatância no TCSC.....	45
Fórmula 11 – Reatância Indutiva.....	45

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2 FLUXO DE POTÊNCIA EM UM SISTEMA AC</b> .....	13
<b>2.1 Fluxo de Potência em caminhos paralelos</b> .....	15
<b>2.2 Exemplo de um ganho no Fluxo de Potência com Compensação Série</b> .....	16
<b>2.3 O que limita a capacidade de carga?</b> .....	17
2.3.1 Capacidade térmica.....	17
2.3.2 Dielétrico .....	18
2.3.3 Estabilidade .....	19
<b>3 TECNOLOGIA FACTS</b> .....	20
<b>3.1 Definição</b> .....	20
<b>3.2 Necessidades de utilização de FACTS</b> .....	21
<b>3.3 Vantagens dos Sistemas Flexíveis</b> .....	23
<b>3.4 Tipos de Controladores FACTS</b> .....	24
3.4.1 Os FACTS podem ser divididos quanto às categorias de controladores.....	24
3.4.2 Outro tipo de classificação é quanto às gerações .....	25
3.4.3 Chaveado, Controlado e Avançado é uma terceira classificação para FACTS.....	26
<b>3.5 Tipos de Conexão da Tecnologia FACTS no sistema de energia</b> .....	26
3.5.1 Conexão Shunt.....	26
3.5.2 Conexão Série.....	27
<b>3.6 Apresentações Básicas dos Dispositivos FACTS</b> .....	27
3.6.1 SVC (Static Var Compensator) .....	27
3.6.2 TSC (Thyristor-Switched Shunt Capacitor) .....	28
3.6.3 TCR (Thyristor-Controlled Shunt Reactor) .....	29
3.6.4 TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor).....	30
3.6.5 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation).....	30
3.6.6 SSSC (Static Synchronous Series Capacitor).....	31
3.6.7 STATCOM (Static Capacitor).....	32
3.6.8 TSR (Thyristor Switched Reactor).....	32
3.6.9 TSC (Thyristor Switched Capacitor).....	33
3.6.10 TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor) e TSSR (Thyristor Switched Series Reactor) .....	34
3.6.11 UPFC (Unified Power Flow Controller) .....	35
<b>3.7 Principais campos de atuação dos principais dispositivos FACTS</b> .....	37
<b>4 O DISPOSITIVO FACTS TCSC</b> .....	38
<b>4.1 Operação do TCSC</b> .....	38
<b>4.2 Fluxo de Potência em uma Linha de Transmissão com um TCSC</b> .....	41
<b>4.3 Utilizações de um TCSC</b> .....	44
<b>4.4 Controle do TCSC</b> .....	44
<b>5 METODOLOGIA E APLICAÇÃO</b> .....	47
<b>5.1 Desenvolvimento de uma Aplicação do dispositivo TCSC em um Sistema Elétrico</b> ..	47
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	50

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>
--------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

A dificuldade do planejamento e operação de um sistema de potência dá-se, na maioria das vezes, devido a defeitos relacionados com a rede de transmissão. As linhas de transmissão estão sujeitas a limites térmicos ou de estabilidade, que limitam o nível de potência que pode ser transmitido com segurança. Tais limites criam pontos de estreitamento da transmissão na rede. Estes pontos são variáveis; eles se movem de acordo com as alterações nos fluxos de potência resultantes do despacho de geração, características da carga e contingências (POMILIO, 2010).

Os estreitamentos na transmissão geram problemas como: pontos de operação não econômicos, pequena capacidade de carregamento, necessidade de redespacho da geração, de capacidade extra de geração ou, sobretudo, a necessidade de importação de energia (MIASAKI, 2006).

Em sistemas de potência de porte pequeno, pouco complexos e com poucas interconexões, os problemas acima podem ser resolvidos parcialmente através de projetos superdimensionados em relação à capacidade de geração e aos limites de transmissão. O aumento dos custos e das restrições ambientais tornou algo não praticável a estratégia do superdimensionamento e, dificultou a construção de novas unidades de geração e linhas de transmissão. Contudo, observa-se um contínuo crescimento da demanda de energia (MIASAKI, 2006).

Com a desregulamentação do setor elétrico, o sistema de transmissão passou a ter a responsabilidade de disponibilizar negociações entre diferentes agentes do mercado de energia, como forma de garantir competitividade. Em função disso, novos requisitos recaíram sobre a rede de transmissão, levando à definição de novos padrões de carregamento, e também a novas exigências sobre o controle e a operação do sistema. Surgiram então, sérias restrições de confiabilidade como resultado de o sistema de transmissão estar sendo adaptado a aplicações para as quais não foi projetado inicialmente (POMILIO, 2010).

Como forma de mitigar esta questão, a implantação/duplicação de linhas de transmissão, geralmente tem sido empregada. No entanto, normalmente essas soluções estão associadas ao dispêndio de elevados custos inerentes às suas construções, ao mesmo tempo em que podem ser inviabilizadas devido a dificuldades de rotas e de problemas ambientais. A redistribuição da carga e a construção/recapitação de usinas são formas que também têm sido utilizadas, mas muitas são inviáveis (TORTELI, 2010).

Para viabilizar esse novo modelo de gestão e operação do sistema elétrico não basta apenas à reestruturação administrativa. Contudo, tornou-se, necessário o desenvolvimento de meios para controlar diretamente os fluxos de potência em determinadas linhas de um sistema. O controle dos fluxos pode direcioná-los para regiões que possuam capacidade ociosa de carregamento, aliviando, assim, as regiões de estreitamento da transmissão (MIOTTO, 2010).

É necessário desenvolver as tecnologias que permitam o controle das variáveis elétricas em jogo, visando monitorar o fluxo de potência através das linhas, otimizar o uso dos equipamentos, garantir a qualidade da energia suprida e aumentar a proteção e segurança do usuário bem como a preservação do meio ambiente (MIOTTO, 2010).

Os FACTS são divididos em quatro categorias de acordo com sua instalação nas linhas de transmissão. Segundo estas classificações, existem os Controladores série, os Controladores em derivação, os Controladores combinados série-série e os Controladores combinados série derivação. Podem ainda ser classificados de acordo com a tecnologia da chave eletrônica utilizada (GAZZI, 2012).

No que se refere à utilização dos dispositivos FACTS no controle de fluxo de potência, este trabalho possui como foco o TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator).

O TCSC utiliza como princípio fundamental a injeção de uma reatância capacitiva variável, de forma a diminuir a queda de tensão indutiva da linha de transmissão e assim, aumentar a capacidade do sistema de transmissão e controlar o fluxo de potência. De maneira geral, trata-se de um compensador série composto por uma capacitância fixa em paralelo com um reator controlado a tiristores (EDINEI, 2010).

O motivo da escolha deste dispositivo é devido a ter maior número de aplicações comerciais, sendo muito utilizado pelos sistemas de potência para fornecer amortecimento às oscilações e controle de fluxo de potência. Alguns exemplos de aplicações deste dispositivo são elencados a seguir (FOGAÇA, 2006):

- a) No Brasil existem dois TCSCs em operação na interligação dos sistemas elétricos Norte e Sul, um em cada extremidade da linha, para amortecer um modo interárea de baixa frequência (0,2 Hz) presente entre os sistemas (GAMA, 1999). São 1.276 quilômetros de linhas de transmissão em 500 kV ligando a subestação de Imperatriz, no Maranhão, à de Samambaia, no Distrito Federal. O Linhão, como foi apelidado o projeto, tem capacidade de transmitir até 1.300 MW em ambos os sentidos. Quando entrou em operação, a Linha Norte - Sul diminuiu o risco de corte de fornecimento no Brasil devido à sua capacidade de

transmitir potência entre dois extremos do País, permitindo com isto um remanejamento na geração de acordo com os índices de chuvas em cada região. (GAMA, 1999).

- b) Até o final de 2004, três TCSCs entraram em operação na Ásia, sendo dois na China e um na Índia com a finalidade de melhorar a estabilidade das oscilações inter área de tais sistemas (JIANBO, et al, 2005; YUE; BAILU, 2005).
- c) Estudos dos impactos no amortecimento que poderiam ser alcançados com a instalação de dispositivos FACTS série e *shunt* no sistema europeu (o qual apresenta vários modos interárea) são apresentados em *Handschin, Schnurr e Wellssow* (2003).
- d) Estudos sobre o uso de TCSCs no sistema radial da Argentina é apresentado em *Del Rosso, et al* (2000).

Mostra-nos o quão importante é para um país e para que possamos viver em uma sociedade sem caos, que a energia seja fornecida de forma estável e contínua sem interrupções ou blecautes (POMILIO, 2010).

Neste trabalho será feito um estudo sobre o uso de TCSC, utilizando para tal a gama de conhecimentos da engenharia obtidos durante o curso de graduação. No Brasil, existe a necessidade de se ter um sistema de energia controlável, um sistema de controle e estabilidade adequado e capacitado, para que possa suplantar as adversidades de um sistema a nível continental e com uma característica de grandes intercâmbios de carga (FOGAÇA, 2006).

Os FACTS melhoram a eficiência das linhas de transmissão reduzindo as perdas térmicas e melhorando o fluxo das mesmas. Essa tecnologia vem sendo amplamente utilizada e difundida, nos sistemas de potência espalhados pelo mundo (GERBEX, 2003).

Dos fatos apresentados acima, fica comprovada a boa atuação do dispositivo TCSC na estabilidade dos sistemas elétricos de potência, o que torna imperativo a utilização de um modelo para se estudar a sua influência na implantação do sistema elétrico (TORTELI, 2010).

Devido ao progresso tecnológico, têm-se hoje chaves eletrônicas com capacidade de disparo aplicadas as tensões e correntes elevadas. Dessa forma, torna-se viável o desenvolvimento de compensadores mais robustos e eficientes. Porém, há a necessidade de equipamentos simples, funcionais e de baixo custo. Partindo deste princípio, este trabalho é motivado a fim de buscar uma base teórica para estudos da melhoria dos sistemas de transmissão, através da manipulação e aprimoramento dos seus controles.

Com relação aos interesses de natureza econômica, busca-se, através do emprego de Controladores FACTS, tornar mais eficiente a utilização da rede elétrica, bem como o aproveitamento de novas fontes de energia, por meio de uma atuação sobre os fluxos e perdas de potência do sistema.



Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo estudar tecnicamente os dispositivos FACTS, dando ênfase ao dispositivo FACTS TCSC, que é utilizado para otimização de fluxo de potência e amortecimento de oscilações. Os objetivos específicos deste trabalho são estudar o fluxo de potência; familiarização com dispositivos FACTS em geral, dando ênfase ao TCSC; apresentar a aplicação do TCSC para controle de fluxo de potência; exemplificar o controle de fluxo de potência de um sistema de malha com TCSC.

O texto deste trabalho está estruturado em seis capítulos, organizados da seguinte forma: no capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, a motivação e objetivo do mesmo; no capítulo 2 é realizado um estudo do fluxo de potência em um sistema de Corrente Alternada (AC); no capítulo 3 é estudada a Tecnologia FACTS, demonstrando as divisões dos dispositivos, bem como uma apresentação básica de cada um destes; no capítulo 4 é mostrada uma revisão bibliográfica do dispositivo FACTS TCSC, demonstrando aplicação e controle; o capítulo 5 apresenta um exemplo de um dispositivo TCSC para controle do fluxo de potência de um sistema de energia elétrica; o capítulo 6 apresenta a material e método que foi utilizada para o estudo teórico do trabalho como um todo; o capítulo 7 apresentam as considerações finais após a elaboração do trabalho de conclusão de curso.

## 2 FLUXO DE POTÊNCIA EM UM SISTEMA AC

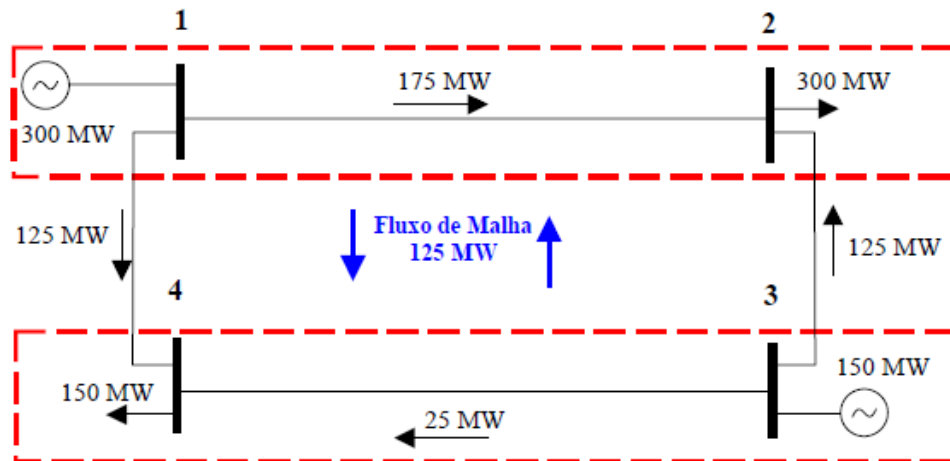
Atualmente, muitas instalações de transmissão enfrentam um ou mais limitantes parâmetros de rede, além da incapacidade para direcionar o fluxo de energia. Em sistemas de energia de corrente alternada, dado o armazenamento elétrico insignificante, a geração elétrica deve equilibrar em todos os momentos. Em certa medida, o sistema elétrico é autorregulado (POMILIO, 2009).

Os controladores estáticos abrangem um conjunto de equipamentos cuja ideia principal é atuar sobre os parâmetros da rede para controlar: o nível de tensão e o fluxo de potência (ativa e/ou reativa), eliminando os problemas causados por fluxo em malha e pelo fluxo paralelo, ambos não desejáveis. Isto é feito através de alterações nas características da rede como a impedância aparente, as amplitudes e os ângulos de defasagem entre as tensões terminais das redes de transmissão (GERBEX, 2003).

O fluxo de potência em rede CA segue as leis de *Kirchhoff*, também conhecido como fluxo livre. A diferença entre o fluxo livre e o fluxo desejado é chamada de fluxo de malha. Em outras palavras, os fluxos de malha são aqueles que se formam entre dois sistemas interligados por uma malha fechada, mesmo que sejam capazes de suprir sua própria carga, fazem com que o sistema seja subutilizado (GERBEX, 2003).

Na figura 1 tem-se um exemplo de problema de fluxo de malha. O gerador de 300MW na barra 1 fornece 175MW de carga para a barra 2 e 125MW de carga para a barra 4. Algo semelhante ocorre com o gerador da barra 3. Se o gerador da barra 1 e a demanda na barra 2 forem de uma mesma empresa, percebe-se que a empresa não pode transmitir os 300 MW gerados diretamente para a demanda na barra 2. Assim, aparece uma maior dependência entre as empresas, como mostra a figura (MIASAKI, 2006).

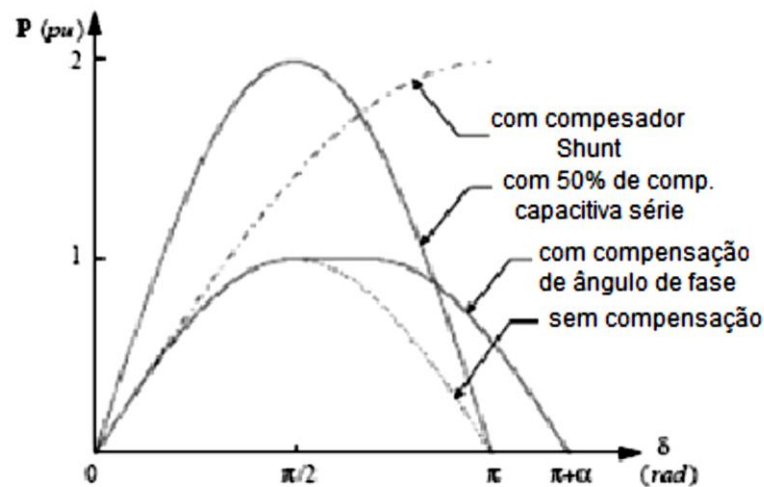
Figura 1 - Fluxo de Malha



Fonte: (MIASAKI, 2006)

A Figura 2 demonstra características de transferência de potência ativa para um sistema AC com compensação em derivação e sem compensação, em série e do ângulo de fase. A compensação através do defasador, que é mostrada na figura 2, foi obtida assumindo que as tensões  $V_S$ ,  $V_{S1}$  e  $V_R$  têm a mesma amplitude. É nítido que, observando a figura 2, dependendo do nível de compensação, a compensação série aumenta a capacidade de transferência de potência ativa. O compensador defasador é primordial quando se deseja conectar dois sistemas distintos que possuem ângulo de transmissão grande ou de controle difícil (MIASAKI, 2006).

Figura 2 - Transferência Fluxo de Potência Ativa para AC



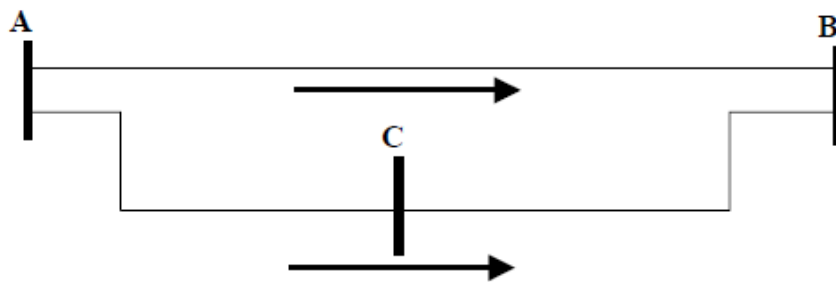
Fonte: (JUSTINO, 2010)

## 2.1 Fluxo de Potência em caminhos paralelos

Fluxos paralelos são aqueles que, mesmo fazendo parte da transmissão normal de potência entre duas companhias, afetam regiões não desejáveis do sistema interligado (WATANABE et al., 1998).

Na figura 3, o fluxo de potência entre as barras A e B caminha por duas rotas, uma direta e outra passando por C. (MIASAKI, 2006).

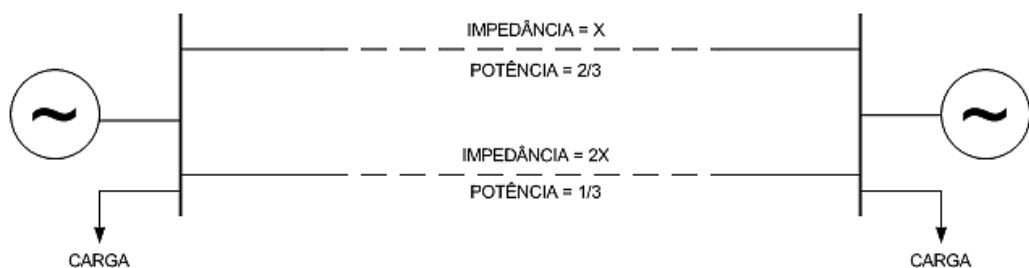
Figura 3 - Fluxo de Potência em Caminhos Paralelos



Fonte: (MIASAKI, 2006)

Considere um caso muito simples de fluxo de potência na figura 4, através de duas linhas paralelas, caminhos (possivelmente corredores de várias linhas) de uma área de geração de excedente, como mostrado um gerador equivalente à esquerda, para a área de geração de um déficit da direita. Sem qualquer controle, o fluxo de potência é baseado no inverso da linha de transmissão de diferentes impedâncias (HINGORANI, 2000).

Figura 4 - Fluxo de Energia CA com caminhos paralelos



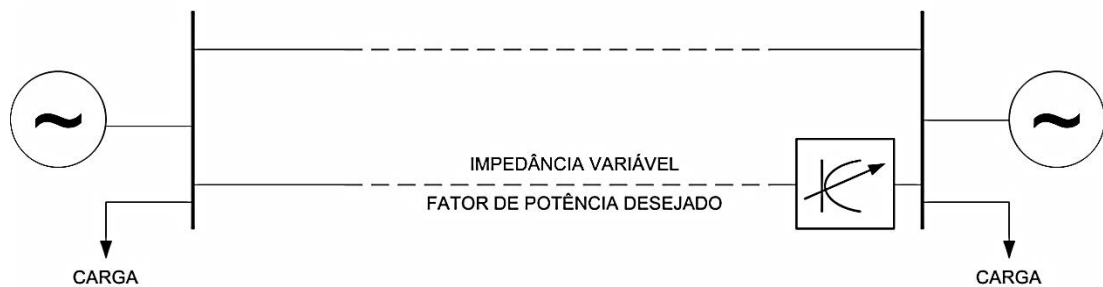
Fonte: (HINGORANI, 2000)

Além de questões de propriedade e contratuais sobre os quais carregam linhas como muita força, é provável que a linha de baixa impedância possa tornar-se sobrecarregada e

assim, limitar a carga em ambos os caminhos, mesmo que o caminho de impedância mais elevada não seja totalmente carregado. Não haveria um incentivo para atualizar a capacidade de corrente do caminho sobrecarregado, porque isso iria diminuir ainda mais a impedância e o investimento seria autodestrutivo especialmente se o caminho de impedância mais elevada já tem capacidade suficiente. (HINGORANI, 2000)

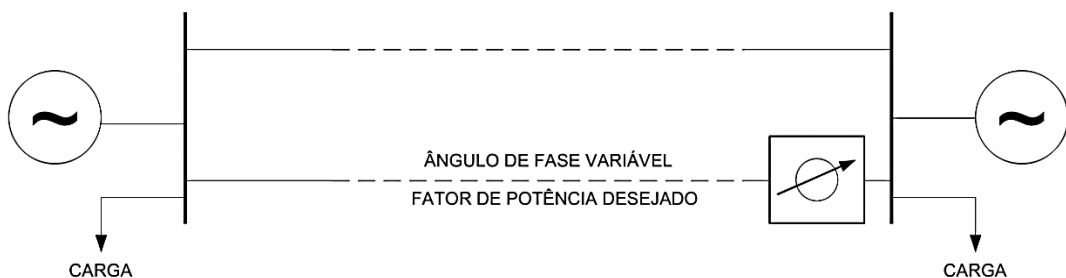
As Figuras 5 e 6 mostram as linhas de transmissão com diferentes tipos de controladores FACTS. Controlam a impedância ou do ângulo de fase, ou uma injeção de tensão adequada (não mostrada) um controlador FACTS pode controlar o fluxo de potência, conforme necessário. Fluxo máximo de energia possível, de fato, pode ser limitada ao seu limite nominal sob condições de contingência quando é esperado que esta linha transporte mais energia devido à perda de uma linha paralela (HINGORANI, 2000).

Figura 5 – Controle de fluxo de potência com impedância variável



Fonte: (HINGORANI, 2000)

Figura 6 - Controle de fluxo de potência com ângulo de fase variável



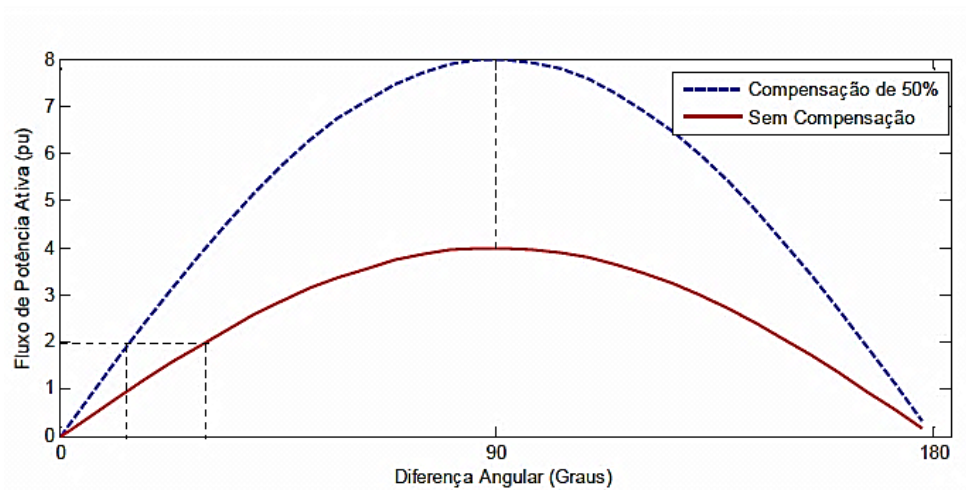
Fonte: (HINGORANI, 2000)

## 2.2 Exemplo de um ganho no Fluxo de Potência com Compensação Série

Na figura 7, é descrito o comportamento do fluxo de potência ativa na linha de transmissão. Seus efeitos para uma faixa de diferença angular de 0 a 180 graus para o sistema

sem compensação e com uma compensação de 50% do valor da reatância da linha original (C. MIYASAKI, 2006).

Figura 7 - Fluxo de Potência Com e Sem Compensação



Fonte: (VERMA, 2004)

### 2.3 O que limita a capacidade de carga?

Partindo do princípio de que a propriedade não é um problema, e o objetivo é fazer o melhor uso da transmissão, e para maximizar a capacidade de carga (tendo em conta condições de contingência), o que limita a capacidade de carga, e que pode ser feito sobre isso? Basicamente, existem três tipos de limitações:

- a) Térmica;
- b) Dielétrica; e
- c) Estabilidade

#### 2.3.1 Capacidade térmica

É uma função da temperatura ambiente, condições de vento, estado do condutor e distância ao solo. Isto talvez varie por um fator de 2 para 1, devido ao ambiente variável e o carregamento histórico. O valor nominal de uma linha geralmente é decidido de forma conservadora, vislumbrando um cenário de pior caso de ambiente estatisticamente. Há também programas off-line de computador que podem calcular a capacidade de carga de uma linha com base no ambiente disponível e histórico recente de carga (PADDIYAR, 2007).

Depois, há os dispositivos de monitoramento on-line que proporcionam uma base para a capacidade de carga em tempo real em linha. Estes métodos têm evoluído ao longo de um período de muitos anos, e, tendo em conta a idade de automação (tipificados por Sistemas de GPS e sofisticados serviços de comunicação de baixo custo), ele certamente faz sentido considerar razoável, dia a dia, hora a hora, ou até mesmo a capacidade em tempo real. Às vezes, as condições ambientais podem realmente ser piores do que o previsto, tendo os meios para determinar a classificação da linha real poderia ser útil (PADIYAR, 2007).

Durante os estágios de planejamento / projeto, o carregamento normal das linhas é decidido frequentemente em uma base de avaliação de perda com base em hipóteses que podem ter mudado para uma variedade de razões. No entanto, as perdas podem ser tidas em conta na base do valor em tempo real da capacidade de carga extra (HINGORANI, 2000).

Claro, aumentando a classificação de um circuito de transmissão, envolve a consideração das notas em tempo real dos transformadores e outros equipamentos, bem como, alguns dos que também pode ter que ser modificado de modo a aumentar a carga sobre as linhas. Capacidade de carga de um transformador é também uma função da temperatura ambiente, envelhecimento do transformador e história recente de carregamento. Monitores off-line e on-line de capacidade de carregamento também podem ser usados para obter a capacidade de carga em tempo real de transformadores. Além disso, o transformador também se presta a uma melhor refrigeração (HINGORANI, 2000).

Depois, há a possibilidade de atualizar uma linha, alterando o condutor para a de uma corrente mais alta, o que pode por sua vez, exigir a atualização estrutural. Finalmente, há a possibilidade de conversão de um único circuito de uma linha de circuito duplo. Uma vez a maior capacidade de corrente está disponível, em seguida, surge à questão de como deve ser usada. Será que a potência extra realmente fluirá e será controlável? Será que as condições de tensão serão aceitáveis com subida de carga súbita, etc.? A tecnologia FACTS pode ajudar fazendo uma utilização efetiva desta capacidade recém-descoberta (FOGAÇA, 2006).

### 2.3.2 Dielétrico

Do ponto de vista do isolamento, muitas linhas são projetadas de forma muito conservadora. Para uma dada tensão nominal, muitas vezes é possível aumentar a operação normal por tensão + 10% (ou seja, 500 kV-550 kV) ou mesmo superior. O cuidado é necessário, em seguida, para garantir que a dinâmica e sobretensões transitórias estão dentro dos limites (FOGAÇA, 2006).

Para-raios, ou isoladores de linha com para-raios internos, ou poderosos tiristores controlado-supressores de sobretensão nas subestações podem permitir aumento significativo a capacidade de tensão de linha e subestação. A tecnologia FACTS pode ser usada para garantir condições de sobretensão e fluxos de potência aceitáveis (FOGAÇA, 2006).

### 2.3.3 Estabilidade

Há um número de problemas de estabilidade, que limitam a capacidade de transmissão. Esses incluem:

- a) Estabilidade transitória;
- b) A estabilidade dinâmica;
- c) Estabilidade em estado estacionário;
- d) Colapso de frequência;
- e) Colapso de tensão;
- f) Ressonância subsíncrona.



## 3 TECNOLOGIA FACTS

### 3.1 Definição

O IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) em conjunto com o CIGRE (Conseil International des Grands Reseaux Electriques) definem os controladores FACTS como “sistemas de transmissão de corrente alternada que incorporam controladores baseados em eletrônica de potência e mais outros controladores estáticos, para melhorar a controlabilidade e aumentar a capacidade de transferência de potência”. Existem vários tipos de Controladores FACTS os quais serão detalhados no decorrer deste trabalho (IEEE, 1981).

Este conceito FACTS nasceu em 1988 quando Hingorani (1988) publicou o artigo “*Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems*” propondo o uso extensivo de Eletrônica de Potência ou, como ele chamou, “Eletrônica de Mega-Watt” para o controle de sistemas de potência CA. A ideia básica de Hingorani era obter, no futuro, sistemas CA com alto nível de flexibilidade como no caso de sistemas de transmissão HVDC (“High Voltage Direct Current”). Estas ideias foram baseadas no uso de tiristores de potência, bem como, no desenvolvimento de novos dispositivos semicondutores auto-comutados (disparo e corte controlados) tais como: GTO (“Gate Turn-off Thyristor”), MCT (“MOS Controlled Thyristor”) e IGBT (“Insulated Gate Bipolar Transistor”) (MACHADO, 2003).

Dispositivos baseados em componentes eletrônicos permitem um controle mais rápido das tensões no caso da ocorrência de transitórios, permitido através de uma combinação de ajustes na potência reativa de geradores, compensadores em derivação fixos ou controláveis mecanicamente, e transformadores de tensão, também controláveis mecanicamente. (FOGAÇA, 2006).

Atualmente, o projeto de conversores eletrônicos auto-comutados de alta potência (dezenas a centenas de MVA) tem sido feito com dispositivo tipo GTO. Como a conexão série destes dispositivos é mais complexa do que no caso de tiristores convencionais, conversores para aplicações nestas altas potências têm sido, normalmente, obtidos através da conexão de vários conversores, cada qual com poucas chaves em série (MIOTTO, 2010).

A estabilidade dos sistemas de potência passou a ter mais graus de liberdade com a utilização dos equipamentos FACTS. Nos estudos de estabilidade transitória, ou seja, frente a grandes perturbações, estes equipamentos podem propiciar o aumento do limite de

transferência de grandes blocos de energia como, por exemplo, com o chaveamento de grandes capacitores série em determinadas linhas de transmissão. (PIN, 2004)

Os equipamentos FACTS também são de grande valia nos estudos de estabilidade dinâmica (frente a pequenas perturbações). Neste caso, por exemplo, o amortecimento das oscilações do sistema pode ser aumentado através da modulação de pequenos capacitores em série com as linhas de transmissão (MACHADO, 2003).

O uso destes dispositivos FACTS deve ser cuidadosamente estudado do ponto de vista de controle. Deve-se levar vantagem do grau de flexibilidade que os sistemas FACTS nos permitem, e não deixar que o aumento da complexidade desses novos sistemas não venha a degradar a operação hoje existente. Para isso, os conceitos de controle robusto e coordenado devem ser levados em consideração (MACHADO, 2003).

O controlador FACTS tem a vantagem de poder ser aplicado em série ou em paralelo, individualmente ou em conjunto com outros controladores, devido sua flexibilidade; possui uma rápida resposta e permite um inter-relacionamento de parâmetros no sistema de operação, tais como: impedância série, shunt, corrente, tensão, ângulo de fase e a oscilação de diversas frequências (PIN, 2004).

O conceito de sistemas com fluxos de potência controláveis, ou “Flexible AC Transmission Systems” (FACTS), tem recebido muita atenção recentemente, resultando na concepção de vários novos dispositivos para o controle dos fluxos nas redes de energia elétrica (POMILIO, 2013).

### **3.2 Necessidades de utilização de FACTS**

O que é mais interessante para os planejadores de transmissão é que FACTS abre novas oportunidades para controlar a potência e melhorando a capacidade utilizável de linhas presentes, bem como novos e atualizados. A possibilidade de que a corrente através de uma linha pode ser controlada a um custo razoável, permite um grande potencial de aumentar a capacidade das linhas existentes com condutores maiores, e a utilização de um dos controladores FACTS para permitir que a potência correspondente flua através destas linhas em condições normais e condições de contingência (ARAÚJO, 2014).

Estas oportunidades surgem através da capacidade de controladores FACTS controlarem os parâmetros inter-relacionados que regem o funcionamento dos sistemas de transporte, incluindo a impedância série, impedância shunt, corrente, tensão, ângulo de fase, e o amortecimento de oscilações em diferentes frequências abaixo da frequência nominal. Ao

proporcionar uma maior flexibilidade, controladores FACTS podem habilitar uma linha para levar energia mais próxima de sua classificação térmica. Comutação mecânica precisa ser complementada por eletrônica de potência de resposta rápida. Deve ser enfatizado que FACTS é uma tecnologia capacitadora, e não um dispositivo para substituir interruptores mecânicos (HINGORANI, 2000).

A tecnologia FACTS não é um controlador de alta potência, mas sim um controlador que pode ser aplicado individualmente ou em coordenação com outros para controlar um ou mais parâmetros do sistema. O Controlador FACTS bem escolhido pode superar as limitações específicas de uma designada linha de transmissão ou um corredor.

Da mesma forma que o transistor é o elemento básico de toda uma variedade de chips de circuitos microeletrônicos, o transistor também é o elemento básico para uma variedade de controladores eletrônicos de alta potência (HINGORANI, 2000).

Tecnologia FACTS também se presta a estender os limites de transmissão utilizáveis em uma maneira passo-a-passo com investimentos incrementais como e quando necessário. Um planejador poderia prever um cenário gradual de meios de comutação mecânicos e FACTS que permitem que os controladores de tais linhas de transmissão irão envolver uma combinação de controladores mecânicos e FACTS para atingir o objetivo de uma forma adequada (MIOTTO, 2010).

Alguns dos controladores de Eletrônica de Potência, agora dobrados no conceito FACTS são anteriores à introdução do conceito FACTS pelo coautor Hingorani para a comunidade técnica. Dentre elas está a conexão à derivação estática, Compensador VAR (SVC) para controle de tensão que foi demonstrado pela primeira vez em Nebraska e comercializado pela GE em 1974 e pela *Westinghouse* em Minnesota, em 1975 (HINGORANI, 2000).

O primeiro *Séries Connected Controller*, esquema *Damping NGH-SSR*, inventado por coautor Hingorani, uma série de potência, esquema de controle de capacitor de baixa impedância, foi demonstrada na Califórnia pela Siemens em 1984. Ela mostrou que com um controlador ativo, não há limite para compensação série capacitor. Mesmo antes de SVCs, havia duas versões de reatores saturados estáticos para limitar sobretensões e também poderosos para-raios de óxido de metal sem falhas para limitar sobretensões dinâmicas (PIN, 2004).

A pesquisa também havia sido realizada em comutadores de estado sólido e transformadores de fase. No entanto, o aspecto original de tecnologia FACTS é que este conceito guarda-chuva revelou a grande oportunidade potencial para o poder da tecnologia

eletrônica para aumentar consideravelmente o valor dos sistemas de energia e, assim, desencadeou uma série de ideias novas e avançadas para torná-lo uma realidade. Coautor Gyugyi tem estado na vanguarda dessas ideias avançadas. Tecnologia FACTS também forneceu um impulso e emoção percebida pela geração mais jovem de engenheiros, que vai repensar e reengenharia dos sistemas de energia futuros em todo o mundo.

Também é importante ressaltar que, na aplicação da tecnologia FACTS, estamos lidando com uma tecnologia base, comprovada através de HVDC e unidades industriais de alta potência. No entanto, como dispositivos semicondutores de potência continuam a melhorar, em particular os dispositivos com capacidade de desligar, e como conceitos FATCS de antecedência, o custo de controladores FACTS continuará a diminuir. Utilização em larga escala da tecnologia FACTS é um cenário garantido. (HINGORANI, 2000)

### **3.3 Vantagens dos Sistemas Flexíveis**

Existe um grande número de controladores FACTS que podem ser aplicados a diferentes necessidades nos sistemas elétricos de transmissão. Através do uso da eletrônica de potência, estes controladores superam algumas limitações inerentes aos controladores mecanicamente controlados, como no caso da velocidade de operação, confiabilidade, controlabilidade, etc. A utilização dos controladores FACTS proporciona (ALMADA, 2012):

- a) Controle de fluxo de potência como solicitado. O uso de controle do fluxo de potência pode ser a de seguir um contrato, atender necessidades próprias dos serviços públicos, garantir um ótimo poder de fluir, passeio pelas condições de emergência, ou uma combinação destes;
- b) Aumento da capacidade de carga das linhas de suas capacidades térmicas, incluindo curto prazo e sazonal. Isto pode ser conseguido por ultrapassar outras limitações, e divisão de potência entre linhas de acordo com sua capacidade. Também importante notar que a capacidade térmica de uma linha varia de acordo com uma margem muito grande com base nas condições ambientais e história de carregamento;
- c) Aumento da segurança do sistema por meio de aumento do limite de estabilidade transitória, limitando correntes e sobrecargas de curto-circuito, gestão de blecautes em cascata e melhora no amortecimento de oscilações eletromecânicas de sistemas de energia e máquinas.
- d) Fornecer conexões de linhas seguras para utilitários e regiões vizinhas, assim, diminuindo os requisitos gerais de reserva de geração de ambos os lados;

- e) Proporcionar uma maior flexibilidade na instalação de nova geração;
- f) Atualização de linhas;
- g) Reduzir os fluxos de potência reativa, permitindo assim que as linhas levem energia mais ativa;
- h) Reduzir os fluxos de laço;
- i) Aumento da utilização da geração de menor custo. Uma das principais razões para interconexões de transmissão é utilizar geração de menor custo. Quando esta não pode ser feito, segue-se que não há transmissão de baixo custo.

### 3.4 Tipos de Controladores FACTS

#### 3.4.1 Os FACTS podem ser divididos quanto às categorias de controladores

Controladores Série:

- a) Compensador série síncrono estático (*Static Synchronous Series Compensator - SSSC*);
- b) Capacitor série controlado a tiristor (*Thyristor Controlled Series Capacitor - TCSC*);
- c) Reator série controlado a tiristor (*Thyristor Controlled Series Reactor - TCSR*);
- d) Capacitor série chaveado a tiristor (*Thyristor Switched Series Capacitor - TSSC*);
- e) Reator série chaveado a tiristor (*Thyristor Switched Series Reactor - TSSR*).

Controladores Shunt:

- a) Compensador síncrono estático (*Static Synchronous Compensator - STATCOM*) ou condensador estático (*Static Condenser - STATCON*);
- b) Compensador estático de reativo (*Static var compensator - SVC*);
- c) Reator controlado a tiristor (*Thyristor Controlled Reactor - TCR*);
- d) Reator chaveado a tiristor (*Thyristor Switched Reactor - TSR*);
- e) Capacitor chaveado a tiristor (*Thyristor Switched Capacitor - TSC*);

Controladores Série e Shunt:

- a) Controlador Unificado de Fluxo de Potência (*Unified Power Flow Controller*) – UPFC.

### 3.4.2 Outro tipo de classificação é quanto às gerações

Na primeira geração estão os equipamentos FACTS utilizando tiristores. Equipamentos que são conectados em paralelo à rede são:

- a) SVC (*Static Var Compensator*);
- b) TCR (*Thyristor Controlled Reactors*);
- c) TSC (*Thyristor Switched Compensator*);
- d) TSR (*Thyristor Switched Reactor*);
- e) TSSR (*Thyristor Switched Series Reactor*).

Equipamentos que são conectados em série à rede são:

- a) TSSC (*Thyristor Switched Series Compensator*),
- b) TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*).

A segunda geração é composta por equipamentos que utilizam transistores tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Equipamentos dessa geração são os compensadores estáticos paralelos:

- a) STATCOM (*Static Synchronous Compensator*).

E série:

- a) SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*).
- b) TCSR (*Thyristor Controlled Series Reactor*);

A terceira geração de equipamentos FACTS é composta pela integração de equipamentos série e paralelo numa mesma linha de transmissão, tal como faz:

- a) UPFC (*Unified Power Flow Controller*). O UPFC é o resultado de uma combinação do STATCOM com o SSSC.

Pode-se considerar a existência de uma *quarta geração* de equipamentos FACTS, em que a integração dos equipamentos série e paralelo é feita em linhas diferentes. Isso resulta em equipamentos com os nomes IPFC (*Interline Power Flow Controller*), CSC (*Convertible Static Compensator*) e outras possibilidades.

### 3.4.3 Chaveado, Controlado e Avançado é uma terceira classificação para FACTS

Controladores FACTS chaveados

- b) Capacitor série chaveado a tiristor (TSSC);
- c) Capacitor shunt chaveado a tiristor (TSC);
- d) Reator série chaveado a tiristor (TSSR).
- e) Reator chaveado a tiristor (TSR);

Controladores FACTS Controlados:

- a) Compensador estático de reativos (SVC);
- b) Capacitor série controlado a tiristor (TCSC);
- c) Reator controlado a tiristor (TCR).
- d) Reator série controlado a tiristor (TCSR);
- e) Compensador série síncrono estático (SSSC);

Controladores FACTS Controlados Avançados

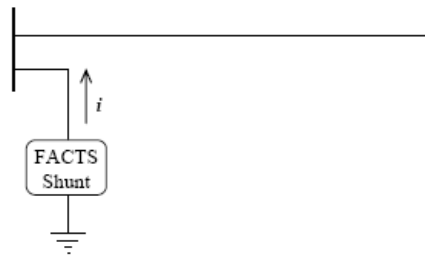
- a) Compensador avançado de reativos (STATCOM);
- b) Controlador unificado de fluxo de potência (UPFC).

## 3.5 Tipos de Conexão da Tecnologia FACTS no sistema de energia

### 3.5.1 Conexão Shunt

Os controladores de conexão shunt podem ser impedâncias variáveis, fontes variáveis, ou uma combinação destas. Os controladores shunt injetam corrente no ponto de conexão e por ser uma impedância variável num ponto de tensão de linhas, a injeção de corrente também é variável. Na Figura 8 mostra-se a configuração de controlador shunt (ALMADA, 2012).

Figura 8 - Conexão Shunt



Fonte: (HINGORANI, 2010)

### 3.5.2 Conexão Série

Os controladores de conexão série podem ser modelados como impedâncias variáveis, capacitor, reator, etc., ou como fontes variáveis baseadas em eletrônica de potência. A princípio, os controladores série resultam em uma queda de tensão na linha de transmissão. A figura 9 mostra a configuração de Controlador FACTS em conexão serie (ALMADA, 2012).

Figura 9 - Conexão Série



Fonte: (HINGORANI, 2010)

## 3.6 Apresentações Básicas dos Dispositivos FACTS

### 3.6.1 SVC (Static Var Compensator)

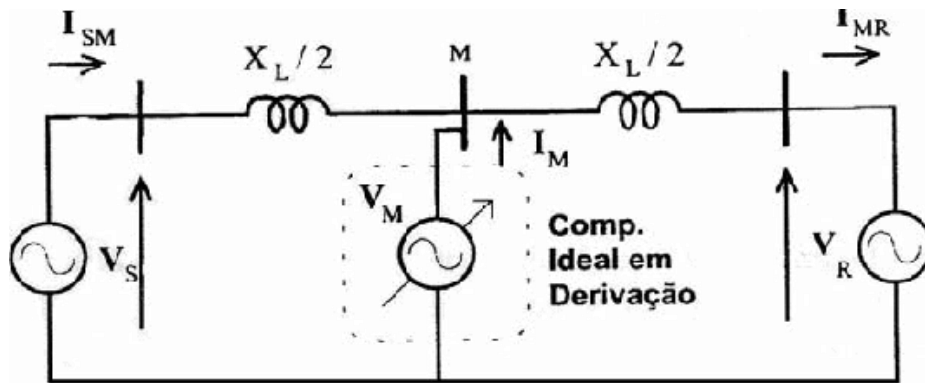
Basicamente um SVC converte tensão DC em tensão AC. Os SVCs permitem compensação de potência reativa em derivação cuja corrente de controle é independente da tensão na barra e compensação série provendo tensão independente da corrente na linha. Podem também trocar potência ativa com o sistema enquanto proveem independentemente compensação reativa (PIN, 2004).

Ideal ligado em paralelo em um ponto médio da linha de transmissão. A fonte  $V_s$  é constantemente controlada para controlar o fluxo de potência nesta linha, considerando que as duas tensões  $V_r$  e  $V_s$  tem a mesma amplitude, mas estão defasadas um ângulo de  $\delta$  (PIN, 2004).



A especificação do SVC depende principalmente dos limites para as modalidades de operação capacitiva e indutiva e a inclinação da curva característica depende do nível de curto circuito e condições operativas do sistema no ponto de conexão (PIN, 2004).

Figura 10 - Esquema SVC



Fonte: (MIASAKI, 2006)

O SVC é análogo a uma máquina síncrona que produz três tensões senoidais com amplitude e fase controláveis. Nesta analogia, seria a implementação de uma máquina sem inércia com resposta praticamente instantânea, sem afetar significativamente as impedâncias do sistema, podendo fornecer ou absorver potência reativa. Pode ainda intercambiar potência ativa com o sistema desde que acoplada a uma fonte que possa fornecer ou absorver energia. Nos FACTS, o fator determinante da estrutura do circuito de potência é o método utilizado para sintetizar a forma de onda da tensão de saída que deve se aproximar de uma senóide.

O SVC pode aplicar uma tensão específica de modo a estabelecer a corrente desejada pela linha ou a tensão desejada numa certa barra. Como a compensação através do VSC é independente das variáveis da rede, ela pode ser mantida independentemente, inclusive em distúrbios do sistema (PIN, 2004).

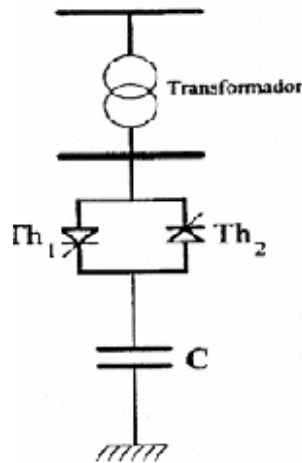
O SVC permite o fluxo bidirecional entre seus módulos AC e DC. Daí ser possível acoplar o terminal DC de dois ou mais VSC e estabelecer transferência de potência entre barras e linhas pré-selecionadas (NOROOZIAN, 1993).

### 3.6.2 TSC (Thyristor-Switched Shunt Capacitor)

Quando a tensão de sistema é baixa, o SVC gera potência reativa capacitiva. Quando a tensão de sistema é elevada, absorve potência reativa indutiva. A potência reativa é mudada ligando os bancos trifásicos capacitivos e reativos conectados ao lado secundário do

transformador. Cada banco capacitivo é ligado ou desligado por válvulas tiristorizadas, sendo o TSC. A figura 11 mostra o esquema do TCSC (TORTTELI, 2010).

Figura 11 - Esquema TSC

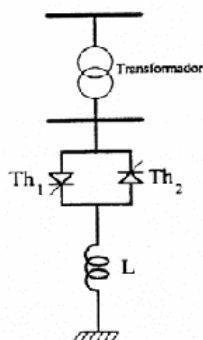


Fonte: (RODRIGUES,2010)

### 3.6.3 TCR (Thyristor-Controlled Shunt Reactor)

A Figura 12 mostra a topologia básica de um Reator Controlado a Tiristor (*TCR – Thyristor Controlled Reactor*), o qual, através do controle dos ângulos de disparo dos tiristores, produz uma reatância indutiva equivalente, continuamente variável. O TCR é a base do compensador de potência reativa estático convencional (*SVC - Static Var Compensator*).

Figura 12 - Esquema TCR



Fonte: (RODRIGUES, 2010)

Devido ao controle de fase usado para chavear os tiristores, correntes harmônicas de baixa ordem são geradas pelo TCR. Transformadores ligados em delta-estrela, bem como a

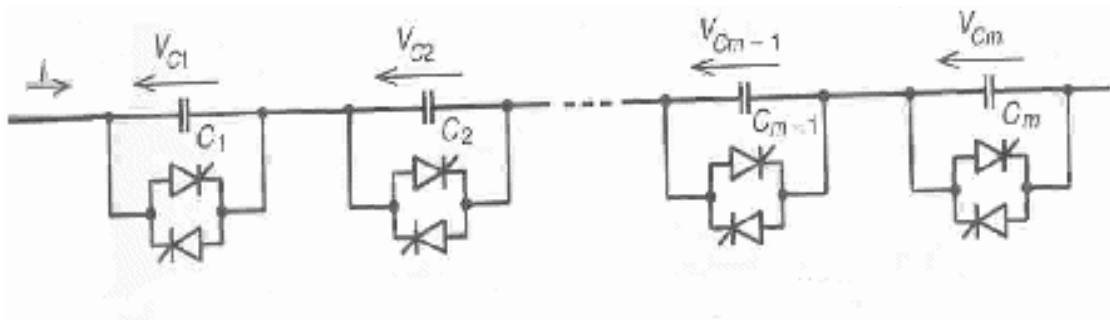
conexão de filtros passivos são, então, necessários para reduzir estes harmônicos a níveis aceitáveis (NOROOZIAN, 1993).

### 3.6.4 TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

O *Thyristor Switched Series Condensador* (TSSC) consiste num número de condensadores em série, cada um ligado por um conector by-pass composto por dois tiristores em paralelo (NOROOZIAN, 1993).

O nível de atuação deste compensador é controlado pelo número de condensadores que estão ligados em série. Estes entram em condução pelo ligamento da porta do tiristor. Esta comuta sempre que a corrente vai à zero. Veja a figura 13:

Figura 13 - Esquema TSSC



Fonte: (HINGORANI, 2010)

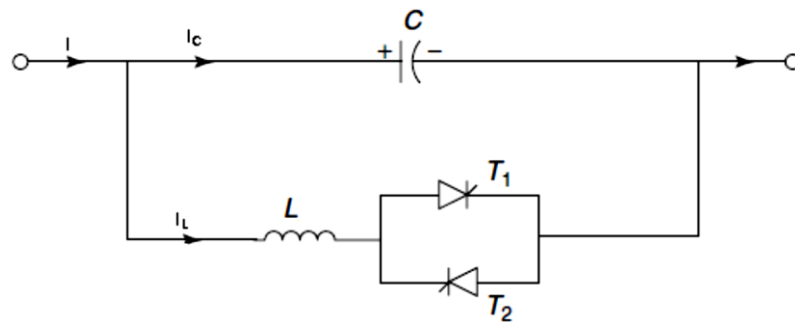
### 3.6.5 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)

O TCSC é um membro importante da família dos FACTS também designado como Advance Series Compensation (ASC). Os benefícios técnicos deste componente incluem o controle da reatância equivalente da linha. (NOROOZIAN, 1993)

A compensação série de linhas de transmissão se faz para aumentar a capacidade de transferência de potência. Como consequência deste aumento, é provável o aumento das perdas na linha compensada, como também na sensibilidade de resposta, em termos de fluxo de potência, quando da saída de outras linhas do sistema. Para contornar estes efeitos emprega-se a compensação variável. O TCSC usa tiristores como meio de controle da compensação série.

A figura 14 apresenta o esquema básico de um TCSC.

Figura 14 - Esquema TCSC

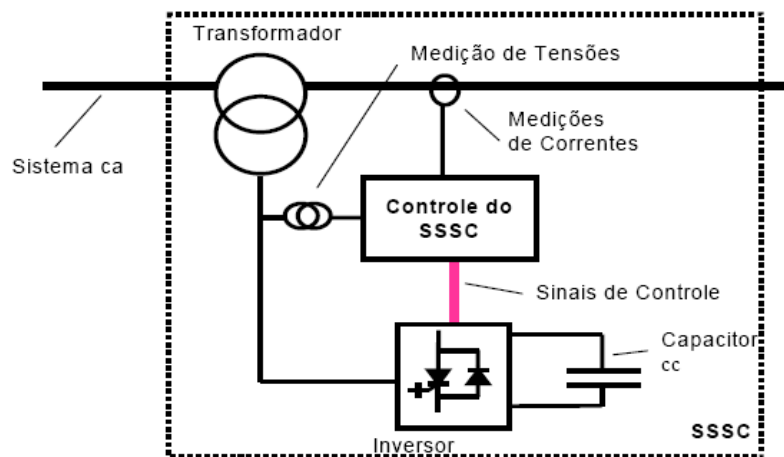


Fonte: (MACHADO, 2004)

### 3.6.6 SSSC (Static Synchronous Series Capacitor)

O compensador deve gerar tensões em quadratura, em avanço ou atraso de fase, em relação à corrente da linha, correspondendo, com isto, à síntese de um capacitor ou indutor, respectivamente. Para gerar estas tensões, a corrente de linha é medida e o bloco do controlador do SSSC calcula a tensão de compensação. Na figura 15 está o esquema do SSSC para melhor visualização (SOUZA, 2010).

Figura 15 - Esquema SSSC



Fonte: (PEREIRA, 2008)

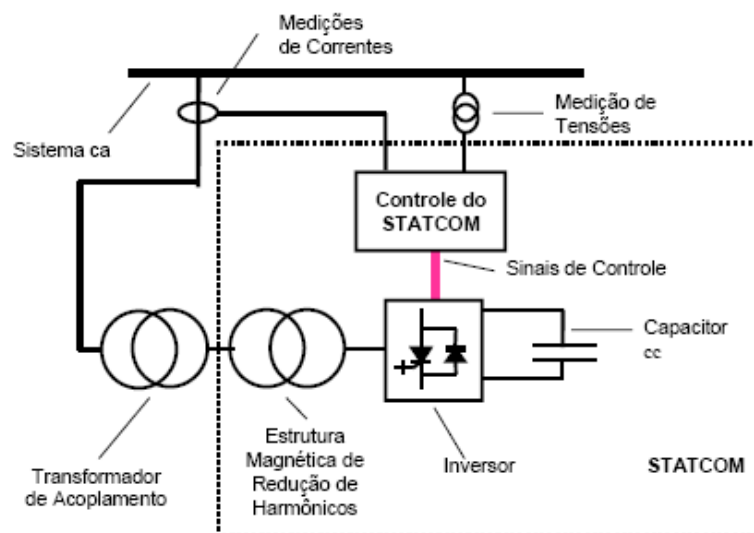
A amplitude desta tensão está relacionada com o nível de potência reativa que se deseja gerar ou absorver. O sistema de controle é responsável pelos instantes de disparo e bloqueio das chaves de potência do conversor que, então, gera as tensões que serão entregues ao sistema de transmissão através de transformadores. (SOUZA, 2010)

### 3.6.7 STATCOM (Static Capacitor)

Na sua forma mais simples, o STATCOM é constituído de um transformador de acoplamento, um VSC e um dispositivo acumulador de energia, usualmente um capacitor DC. Dessa forma, é capaz de gerar ou absorver apenas potência reativa (MIASAKI, 2006).

Se no lugar do capacitor forem utilizadas baterias ou outra fonte de tensão DC, o controlador poderá também trocar potência ativa com o sistema, estendendo sua região de operação de dois para quatro quadrantes. A estrutura básica de um STATCOM é apresentada na figura 16.

Figura 16 - Esquema STATCOM



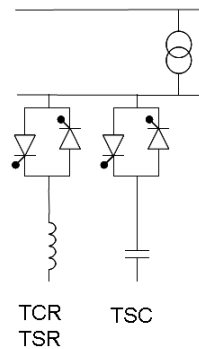
Fonte: (TEIVE, 1997)

### 3.6.8 TSR (*Thyristor Switched Reactor*)

É um indutor chaveado a tiristor, conectado em shunt, cuja reatância é variada em degraus pelo bloqueio completo ou pela plena condução da válvula tiristorizada. O TSR é outro subconjunto do SVC, e é formado por diversos indutores conectados em shunt que são chaveados ou não por chaves tiristorizadas (sem controle do ângulo de disparo) de modo a encontrar a adequada potência reativa consumida pelo sistema. Esquema apresentado na figura 17 (HINGORANI, 2000).

O uso de chaves tiristorizadas sem o controle do ângulo de disparo resulta em menores custos e perdas, mas apresenta a desvantagem de não possuir um controle contínuo.

Figura 17 - Esquema TSR



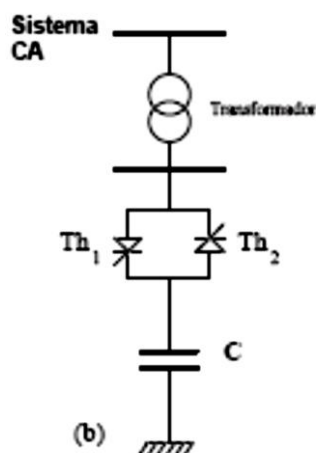
Fonte: (HINGORANI, 2010)

### 3.6.9 TSC (*Thyristor Switched Capacitor*)

A figura 18 mostra o capacitor chaveado a tiristor (*TSC – Thyristor Switched Capacitor*). Neste circuito, os tiristores são disparados apenas quando uma condição de chaveamento com tensão zero e alcançada para a chave semicondutora (*ZVS - zero voltage switching*). (SONG, 1999).

Portanto, devido a sua característica de chaveamento, os tiristores mostrados na figura 18 podem apenas conectar ou desconectar o banco de capacitores ao sistema de potência. Conseqüentemente, o controle da potência reativa gerada pelo banco chaveado é feito de forma descontínua. Outra característica importante é que, como o chaveamento é feito em uma frequência muito baixa, os harmônicos não são geralmente um problema sério nestes compensadores (SOUZA, 2010).

Figura 18 - Esquema TSC



Fonte (WATANABE, 1998)

### 3.6.10 TCSR (*Thyristor Controlled Series Reactor*) e TSSR (*Thyristor Switched Series Reactor*)

TCSR é um compensador que consiste de um reator em série com a linha que contém um reator controlado a tiristor em paralelo, de modo a prover uma reatância indutiva série continuamente variável. Quando o ângulo de disparo do tiristor for  $180^\circ$ , ele deixa de conduzir e o reator não controlado se comporta como um limitador de corrente de falta. (SONG, 1999)

À medida que o ângulo decresce de  $180^\circ$ , a impedância nominal decresce até o ângulo de disparo de  $90^\circ$ , quando a indutância nominal passa a ser a combinação dos dois reatores em paralelo. Assim como para o TCSC, o TCSR pode ser grande e único, como também pode ser constituído de muitas unidades menores. (MIASAKI, 2006).

Já o TSSR é um compensador que consiste de um reator em série com a linha e que contém um reator chaveado a tiristor em paralelo, de modo a prover um controle da reatância indutiva série em degraus (MIASAKI, 2006).

O TSSR é um complemento do TCSR, mas diferencia-se pelo uso de chaves a tiristores (sem controle do ângulo de disparo) que permanecem completamente ligadas ou desligadas, resultando em uma indutância série escalonado (WATANABE, 1998).

O TCSR e o TSSR são compensadores série constituídos por uma indutância colocada em série na linha e pelo respectivo TCR ou TSR, colocado em paralelo com a indutância colocada na linha, como está exemplificado na figura 19. Estes dispositivos conseguem providenciar uma reatância indutiva variável inserida em série na linha. (WATANABE, 1998).

O TCSR consegue controlar a reatância indutiva da linha de modo contínuo através do controle do ângulo de disparo dos tiristores do TCR, enquanto o TSSR varia a reatância da linha de modo discreto através do controle do TSR, em que cada módulo simples funciona numa lógica de “tudo ou nada”. Devido à estrutura de controle menos complexa, o TSSR pode ser uma solução economicamente mais em conta, embora não ofereça os níveis de controle do TCSR (SOUZA, 2010).

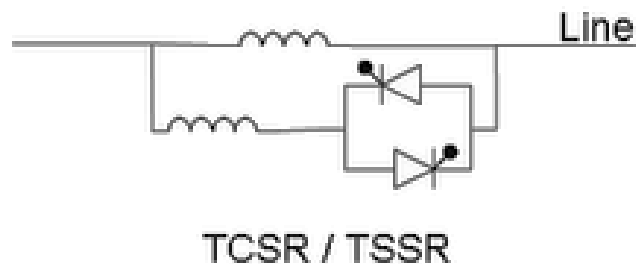
Outro aspecto importante é a geração de componentes harmônicas por parte do TCSR devido ao princípio de funcionamento do TCR incorporado no dispositivo. Para obter uma redução de harmônicos e um dispositivo mais barato, pode ser interessante conjugar o TCSR e o TSSR num único dispositivo. A ideia passa por substituir um dispositivo TCSR por vários

dispositivos TSSR e um TCSR (perfazendo em conjunto a potência da unidade a substituir), todos de menor capacidade, mas de igual capacidade entre si. (WATANABE, 1998).

A entrada sequencial dos TSSR providencia a compensação reativa indutiva desejada por defeito, sendo esta complementada pelo TCSR até ao valor pretendido, conseguindo-se assim a variação contínua da reatância da linha em todo o raio de ação do conjunto. Os componentes harmônicos seriam produzidos apenas pela unidade TCSR, que sendo agora de menor dimensão, produz componentes harmônicas menos significativas (SONG, 1999).

Como o TCSR e o TSSR não oferecem compensação reativa capacitiva são incapazes de aumentar a capacidade de transmissão de uma linha. No entanto, oferecem a possibilidade de limitar as correntes de curto-circuito aumentando a impedância total da linha, de condicionar os fluxos de potência ativa e reativa na linha, bem como alguma capacidade de aumentar a estabilidade transitória e dinâmica do sistema e de amortecer oscilações de potência na linha em que está inserido. (HINGORANI, 2000)

Figura 19 - Esquema TCSR e TSSR



Fonte (Castro, 2001)

### 3.6.11 UPFC (*Unified Power Flow Controller*)

O UPFC foi projetado para o controle em tempo real e compensação dinâmica de sistemas de transmissão proporcionando flexibilidade para resolver muitos problemas que estes sistemas enfrentam em sua operação. O UPFC pode controlar simultaneamente ou seletivamente todos os parâmetros que afetam o fluxo de potência em uma linha de transmissão, isto é tensão, impedância e fase. Ele pode, independentemente, controlar o fluxo de potência ativa e reativa pela linha (GOTHAM, 1998).

O UPFC pode controlar o fluxo de potência de múltiplas formas por meio da injeção de tensão com magnitude e ângulo de fase, adequados.

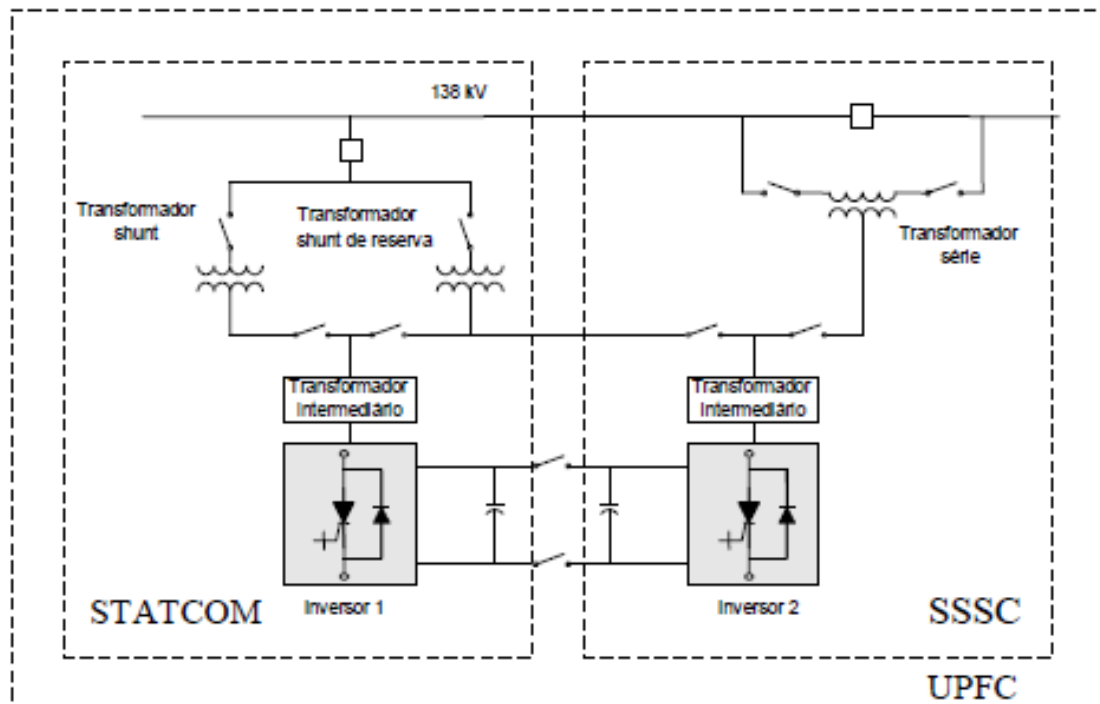


O UPFC pode fazer com que o controle do fluxo de potência seja feito através do ajuste automático de magnitude e fase da tensão aplicada de modo a impor magnitude e fase na corrente da linha da transmissão, resultando nas potências ativa e reativa desejados pela linha (GOTHAM, 1998).

O UPFC, apresentado na figura 20, reúne as características combinadas do SSSC e do STATCOM, podendo operar os dois controladores de forma conjunta ou independente. Ele apresenta as seguintes vantagens em relação aos demais dispositivos FACTS (GOTHAM, 1998):

- É o único que compensa potência ativa e reativa, os demais compensam apenas a parte reativa;
- É capaz de compensar tensão independentemente da magnitude da corrente de linha, os demais possuem uma faixa de controle dependente da corrente de linha;
- É capaz de compensar a impedância da linha; e
- É mais efetivo no amortecimento de oscilações de potência.

Figura 20 - Esquema UPFC



Fonte (Castro, 2001)

### 3.7 Principais campos de atuação dos principais dispositivos FACTS

Quadro1 – Principais Campos de Atuação dos FACTS

<b>Função</b>	<b>Métodos de controle não FACTS</b>	<b>Dispositivos FACTS</b>
<b>Regulação de Tensão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Geradores Síncronos</li> <li>-Condensadores Síncronos</li> <li>-Transformador Convencional com tomadas</li> <li>-Condensadores e indutâncias “shunt” convencionais</li> <li>-Condensadores e indutâncias série convencionais</li> </ul>	SVC, STATCOM, UPFC
<b>Controle do Fluxo de Potência Activa e Reactiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Horários de produção</li> <li>-Comutação de linhas de transmissão</li> <li>-Regulador de Ângulo de Fase</li> <li>-Condensador série (fixo ou comutável)</li> </ul>	TCSC, TCSR, UPFC, SSSC, IPFC
<b>Função</b>	<b>Métodos de controle não FACTS</b>	<b>Dispositivos FACTS</b>
<b>Aumento da Estabilidade Transitória</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Resistência de “Travagem”</li> <li>-Reforço da Excitação</li> <li>-Sistemas de Protecção especiais</li> <li>-Protecções rápidas de pólos independentes</li> <li>-Esquemas rápidos de reengate</li> <li>-Seccionamento de linhas</li> <li>-HVDC</li> </ul>	SVC, STATCOM, TCSC, UPFC, IPFC
<b>Aumento da Estabilidade Dinâmica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-HVDC</li> <li>-Estabilizador de potência</li> </ul>	TCSC, SVC, STATCOM, UPFC, SSSC, SSSC, IPFC
<b>Limitação de correntes de curto-circuito</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Indutâncias comutáveis em série</li> <li>-Arranjos de disjuntores em circuito aberto</li> </ul>	TSSR, TCSC, SSSC, UPFC

Fonte: (MIASAKI, 2010)

## 4 O DISPOSITIVO FACTS TCSC

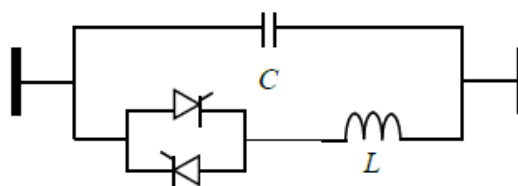
O TCSC é definido pelo IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) como: "Um compensador de reatância capacitiva que consiste de uma série de capacitores desviados por um reator controlado por tiristor, de modo a proporcionar uma suave variável reatância capacitiva série" (IEEE, 1981).

Embora, por essa definição, fique estampada apenas a ação capacitiva do TCSC, ele pode ser comandado a emular também uma reatância equivalente indutiva, e por isso em muitos trabalhos o último "C" da sigla é tratado não como *Capacitor*, mas *Compensator*, ou seja, *Thyristor-Controlled Series Compensator*. (HINGORANI, 2000)

Dessa forma, como permite uma mudança rápida e contínua da impedância da linha de transmissão onde está conectado, pode, por exemplo, manter o fluxo de potência ativa em determinado nível para diferentes condições de operação, o que o torna um dos controladores FACTS mais importantes para o aprimoramento das condições de operação da rede de transmissão e do desempenho geral do sistema elétrico (HINGORANI, 2000).

A figura 21 mostra uma configuração característica de um módulo TCSC, que consiste de um banco de capacitores em paralelo com um reator controlado a tiristor bidirecional (TCR). Numa instalação prática, vários tiristores (de 10 a 40, tipicamente) estariam conectados em série a fim de suportar os níveis de tensão de bloqueio (HINGORANI, 2000).

Figure 21 - Configuração Característica de um TCSC



Fonte (GARCIA, 2001)

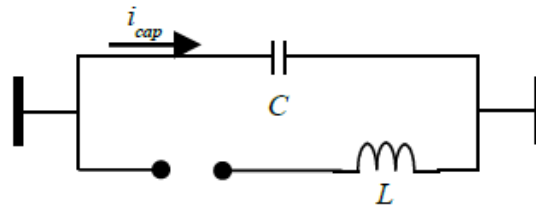
### 4.1 Operação do TCSC

Um módulo TCSC tem três modos básicos de operação: tiristor bloqueado, tiristor em *by-pass* e modo *Vernier*.

a) Tiristor bloqueado: Neste caso, não há aplicação de pulsos de disparo ao tiristor e assim não há passagem de corrente pelo mesmo, fazendo com que a impedância equivalente do

TCSC seja apenas a reatância do capacitor. A figura 22 ilustra essa situação (CASTRO, 2001).

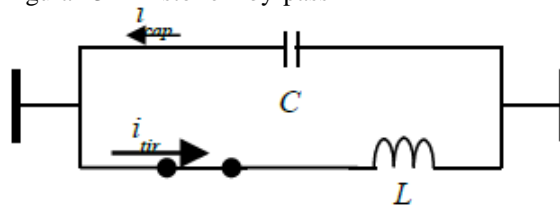
Figure 22 - Tiristor Bloqueado



Fonte (Garcia, 2001)

b) Tiristor em by-pass (em condução completa): Neste modo, o pulso de disparo do tiristor é aplicado de maneira constante, obtendo-se condução completa do tiristor, fazendo com que a maior parte da corrente de linha circule através do indutor e dessa forma proporcionando um comportamento predominantemente indutivo ao TCSC, com uma reatância indutiva equivalente muito próxima da reatância indutiva nominal do TCSC. A figura 23 ilustra essa situação (CASTRO, 2001).

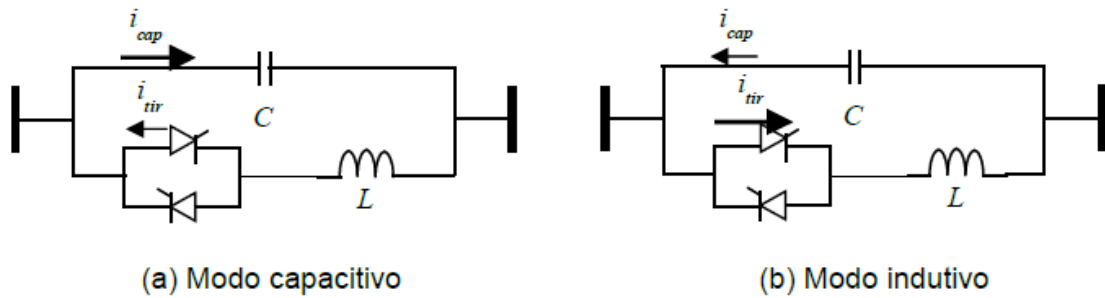
Figura 23- Tiristor em by-pass



Fonte (Garcia, 2001)

c) Modo Vernier: Neste modo, o tiristor é operado com condução parcial, controlada pelo ângulo de disparo. Existem dois tipos de operação possíveis nesse modo, como ilustrado na figura 24. Quando o tiristor é operado de forma a ter um baixo nível de condução, figura 24a, a reatância capacitiva equivalente resultante é maior do que a reatância capacitiva nominal do TCSC, e diz-se que o TCSC opera no modo capacitivo. Por outro lado, quando o nível de condução do tiristor é grande, o TCSC passa a operar no modo indutivo, com uma reatância indutiva equivalente menor do que a reatância indutiva nominal do TCSC, como ilustrado na figura 30b (HINGORANI, 2000).

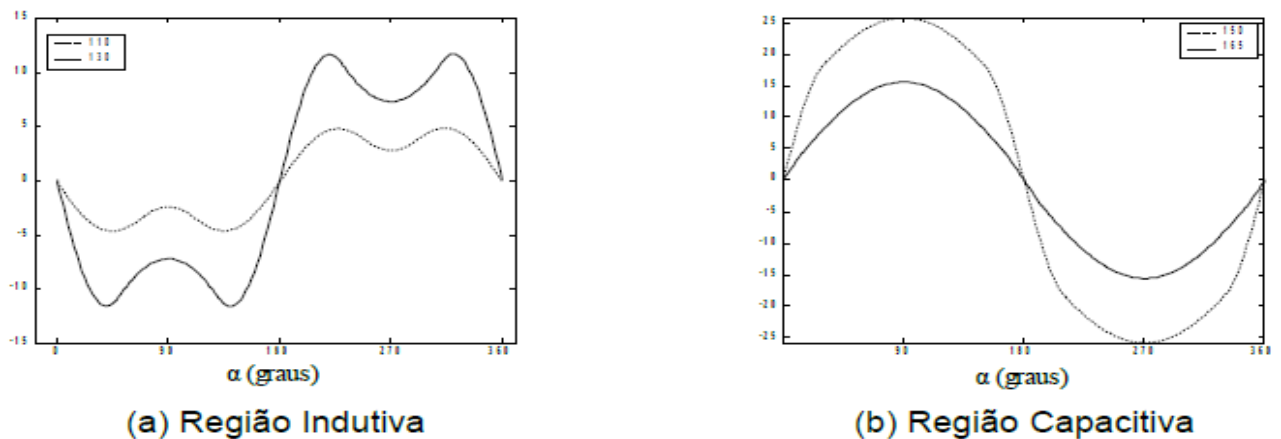
Figura 24 - Modo Vernier



Fonte (Garcia, 2001)

A figura 25 mostra a tensão sobre o capacitor do TCSC para diferentes valores de ângulos de disparo. Pode ser observado que o grau de distorção da forma de onda da tensão é maior quando o TCSC opera na região indutiva. A polaridade desta tensão também depende da região em que o TCSC opera, já que o valor do ângulo de disparo determina a direção da corrente no capacitor. As figuras mostram que a magnitude da tensão aumenta quando o ângulo de disparo se aproxima do ponto de ressonância. Como esperado, a tensão sobre o capacitor é senoidal quando o TCSC é operado tanto no modo de tiristor bloqueado, como no de tiristor em by-pass (HINGORANI, 2000).

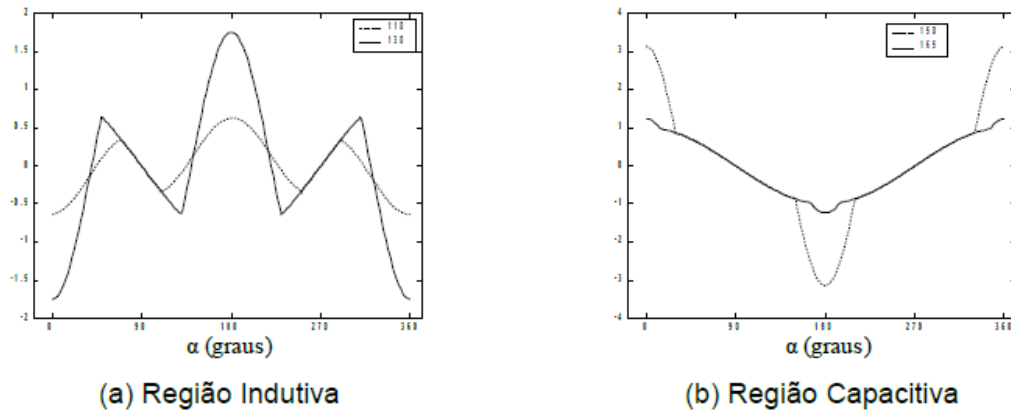
Figura 25 - Tensão sobre o capacitor



Fonte (Garcia, 2001)

A figura 26 mostra a corrente através do TCR e do capacitor, respectivamente, para diferentes valores de ângulos de disparo. O valor do ângulo de disparo determina a direção da corrente através do TCR e do capacitor, que são sempre opostas. Pode-se perceber que a magnitude da corrente aumenta próximo do ponto de ressonância. Quando o TCSC opera na região indutiva, a corrente através do tiristor é maior que a através do capacitor. O oposto acontece quando o TCSC é operado na região capacitiva. (HINGORANI, 2000)

Figura 26 - Corrente do TCR



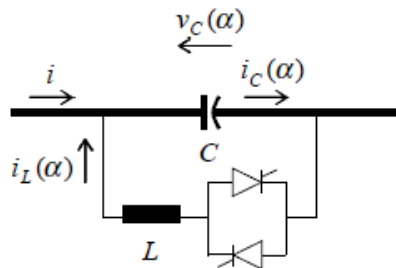
Fonte (Garcia,2001)

O TCSC é também uma poderosa ferramenta para o controle dinâmico do sistema de potência. Entretanto, como pode formar uma ressonância com a reatância da linha de transmissão, sua faixa de variação aplicável, deve estar limitada entre 20 e 70% da reatância da linha (HINGORANI, 2000).

#### 4.2 Fluxo de Potência em uma Linha de Transmissão com um TCSC

O TCSC é modelado em regime permanente por uma reatância conectada entre duas barras que varia entre valores especificados, de modo a manter o fluxo de potência ativa de acordo com uma referência. Na Figura 27 é representado um TCSC associado à uma linha de transmissão (SONG, 1999).

Figura 27 - TCSC associado a uma linha de transmissão



Fonte (Garcia, 2001)

A finalidade básica de um TCSC é de prover uma capacitância continuamente variável por meio do cancelamento parcial da capacitância através do TCR, ou seja:

$$\frac{1}{X_{TCSC}} = \frac{1}{X_L(\alpha)} + \frac{1}{X_C} \quad (1)$$

Ou então:

$$X_{TCSC} = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) + X_C} \quad (2)$$

Tem-se:

$$X_L = \frac{1}{B(\alpha)} = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \text{sen}\alpha}, \quad X_L \leq X_L(\alpha) < \infty \quad (3)$$

Onde:

$$X_L = \omega L$$

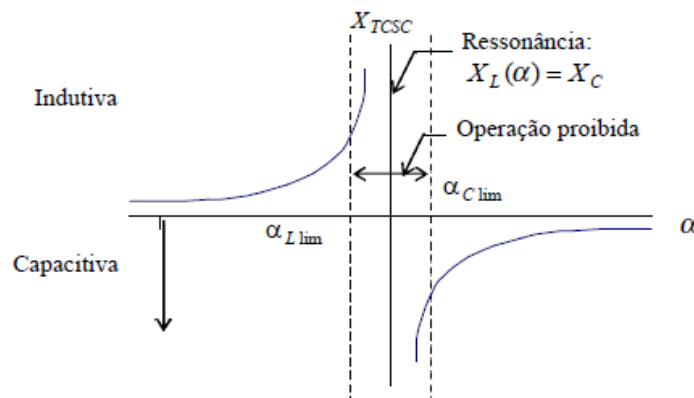
$$X_L(\alpha) = X_L \quad \text{para } \alpha = 0$$

$$X_L(\alpha) \rightarrow \infty \quad \text{para } \alpha \approx \frac{\pi}{2,8} \quad (4)$$

$\alpha$  é o ângulo de atraso medido a partir do pico da tensão no capacitor.

A Figura 28 mostra o comportamento da reatância  $X_{TCSC}$  em função do ângulo  $\alpha$ . O TCSC apresenta um circuito LC ajustável com duas regiões de atuação. (CASTRO, 2001).

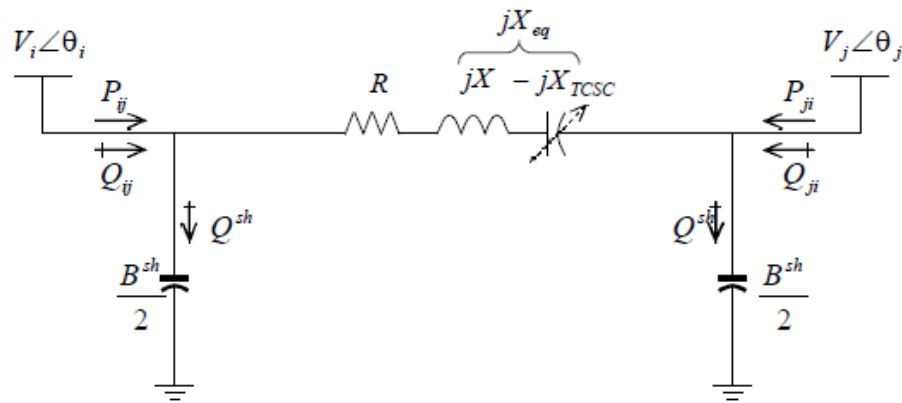
Figura 28 - Comportamento da Reatância



Fonte (Garcia, 2001)

Na Figura 29 é representado um TCSC associado a uma linha de transmissão.

Figura 29 - TCSC a uma linha de Transmissão



Fonte (Miotto, 2010)

O fluxo de potência transferido através da linha é determinado pelas magnitudes e ângulos de fase das tensões terminais e parâmetros da linha.

Da Figura 36 tem-se:

$$X_{eq} = x - X_{TCSC} = (1 - k) \quad (5)$$

sendo  $k$  é o grau de compensação série,

$$k = X_{TCSC}/X \quad 0 \leq k < 1 \quad (6)$$

Da mesma forma que procedido para o SVC, resulta que a potência ativa  $P_{ij}$  é dada por:

$$P_{ij} \frac{1}{R^2 + X_{eq}^2} [RV_i^2 - RV_i V_j \cos \theta_{ij} + X_{eq} V_i V_j \text{sen} \theta_{ij}] \quad (7)$$

Considerando  $R \cong 0$ , e um perfil plano de tensões  $V_i V_k V_j = V$ , então resulta:

$$P_{ij} = \frac{V^2}{X_{eq}} \text{sen} \theta_{ij} \quad (8)$$

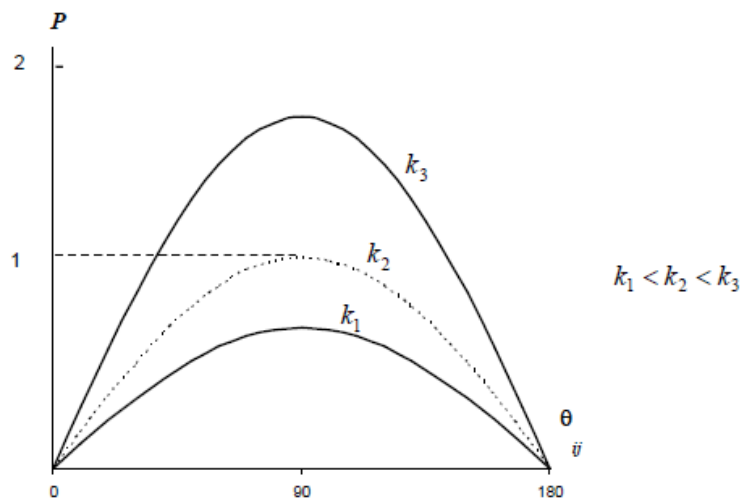
Ou

$$P_{ij} = \frac{1}{1-k} \frac{V^2}{X} \text{sen} \theta_{ij} \quad (9)$$

Da fórmula (9), conclui-se que o grau de compensação série  $k$  está diretamente relacionado ao valor de  $P_{ij}$ , ou seja, o aumento de  $k$  causa um aumento da potência ativa. A sua diminuição, reduz a potência ativa transmitida figura 30 (SONG, 1999).



Figura 30 - Gráfico da compensação K



Fonte (Garcia, 2001)

### 4.3 Utilizações de um TCSC

Além da propriedade que os TCSCs possuem de controlar o fluxo em linhas de transmissão, podem também ser utilizados para (SONG, 1999):

- a) redução da reatância série de modo a também reduzir a variação da tensão terminal, diminuindo assim a possibilidade de colapso de tensão;
- b) aumento da estabilidade transitória através do aumento da capacidade de transmissão de potência;
- c) amortecimento de oscilações de potência pela variação da compensação série,
- d) neutralizando as oscilações de acelerações e desacelerações provenientes de distúrbios de máquinas;
- e) amortecimento de oscilações subtransitórias;
- f) controle do fluxo de potência por caminhos paralelos na rede de transmissão.

### 4.4 Controle do TCSC

A concepção do TCSC é baseada no conceito de sistemas de corrente alternada com fluxos de potência controláveis, ou FACTS. E esses dispositivos FACTS têm como principais objetivos o aumento da capacidade de transmissão de potência e o controle direto do fluxo de potência em rotas específicas de transmissão (SOUZA, 2003).

No TCSC, o equivalente entre o capacitor série e a reatância indutiva pode ser controlado continuamente através do disparo adequado dos tiristores. Com efeito, a compensação série de uma linha de transmissão pode ser realizada de forma dinâmica com esse dispositivo. O TCSC tem provado ser um importante dispositivo para controlar o fluxo de potência e amortecer oscilações eletromecânicas. No Brasil, o TCSC é considerado como elemento fundamental para a conexão dos sistemas elétricos Norte-Sul, sendo suas primordiais funções o amortecimento de oscilações de baixa frequência entre os dois sistemas e a melhoria na capacidade de transmissão da mesma (SOUZA, 2003).

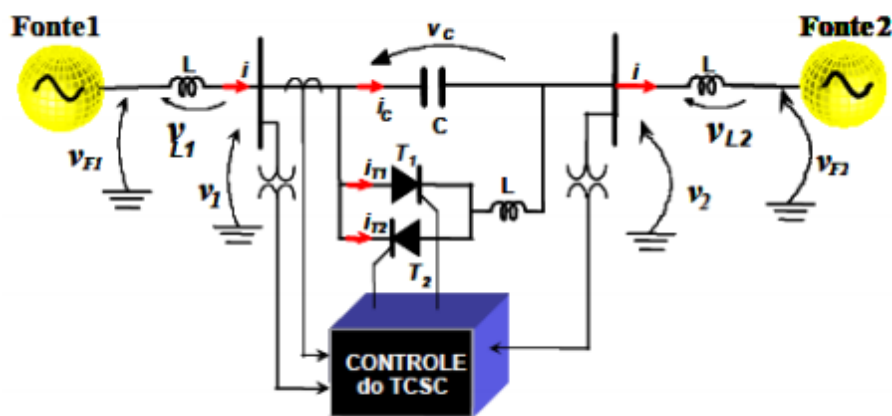
A compensação é viabilizada pela variação da reatância total do sistema. Tal fato é possível a partir do controle da reatância do circuito LC paralelo,  $X_{TCSC}(\alpha)$ , a ser inserido em série, formado por uma capacitância fixa,  $X_C$ , e uma indutância,  $X_L(\alpha)$ , controlada. O controle é realizado a partir de um ângulo  $\alpha$  de atraso, em relação a corrente de linha  $i$ , no disparo dos tiristores, que varia o período de condução do mesmo e, portanto, a corrente no reator. Assim, o equivalente gerado pelo sistema é definido, de forma simplificada, mostrada pela equação (10). Veja a Topologia do sistema TCSC na figura 31 (SOUZA, 2010):

$$X_{TCSC}(\alpha) = -\frac{X_L(\alpha) \cdot X_C}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (10)$$

Onde:

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)} \quad (11)$$

Figura 31 - Topologia do sistema TCSC



Fonte (Souza, 2010)

Sendo,  $X_L = \omega_L$  e o ângulo de atraso medido em relação ao cruzamento pelo zero da corrente da linha (SOUZA, 2003).

Na equação 11, se for considerado, tem-se a compensação mínima do equipamento, ou seja, o RCT (Reator Controlado a Tiristor) está bloqueado e o capacitor completamente inserido na linha.

Na Figura 28, são observados os modos de operação do equipamento, onde se percebe que para ângulos de disparo próximos de zero, suas variações implicam em reatâncias indutivas com valores bem próximos, ou seja, sem variações consideráveis no eixo das ordenadas. Analogamente acontece com ângulos de disparo próximos de 180 graus, oferecendo reatâncias capacitivas que variam muito pouco; com o devido cuidado de forma a nunca trabalhar no ponto de ressonância  $\alpha r$ , onde  $X_L(\alpha r) = X_C$  (MONTICCELI, 1983).

Através dessa característica, torna-se possível, com um conjunto de pares ordenados extraído da referida característica, corresponder a um valor de ordem de reatância desejado com o ângulo de disparo necessário. Cabe destacar os ângulos limites de disparo, que definem a área em que a operação do TCSC deve ser inibida, em função do risco de ressonância (MONTICCELI, 1983).

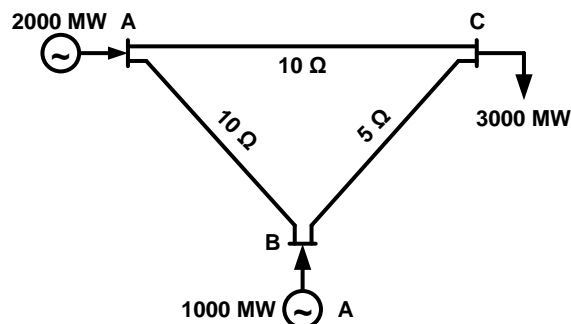
## 5 METODOLOGIA E APLICAÇÃO

O interesse em desenvolver este trabalho se deu pela percepção do crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência devido ao aumento da demanda de energia elétrica e a necessidade de maior confiabilidade dos sistemas, aliado a necessidade de redução de custos, resultou em uma interligação cada vez maior entre os diversos sistemas de geração existentes. Os sistemas interligados são vantajosos na medida em que permitem ganhos. Este trabalho conta com uma revisão bibliográfica feita por meio de livros de Engenharia Elétrica tanto na língua portuguesa como inglesa, artigos, teses de mestrados e doutorados e com o auxílio da busca em sites de pesquisa acadêmica.

### 5.1 Desenvolvimento de uma Aplicação do dispositivo TCSC em um Sistema Elétrico

Para entender melhor o fluxo de potência, considere um caso simples de um sistema elétrico em malha de três barras de energia elétrica em um sistema de malha, conforme a figura 33 (HINGORANI, 2000).

Figura 32 – Diagrama do Sistema



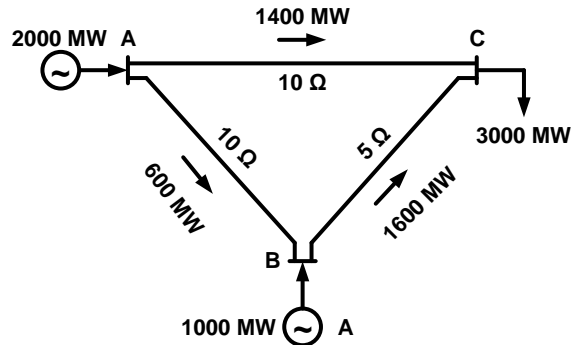
Fonte: (HINGORANI, 2000 – adaptada)

Neste sistema a ser analisado, dois geradores estão conectados, um na barra A (2000 MW de potência) e outro na barra B (1000 MW de potência) e uma carga conectada na barra C, consumindo 3000 MW de potência. As linhas AB, AC e BC possuem uma impedância de 10 Ω, 10 Ω e 5 Ω, respectivamente (HINGORANI, 2000).

As linhas AB, BC e AC têm avaliações contínuas, isto é, limite de potência de 1000 MW, 1250 MW e 2000 MW, respectivamente, e têm classificações de emergência de duas vezes os números para um período suficiente de tempo para permitir que o reescalonamento de energia em caso de perda de uma dessas linhas.

Considerando a configuração do sistema e realizando uma análise de fluxo de potência, as linhas AB, BC e AC estão carregadas com 600 MW, 1600 MW, e 1400 MW, respectivamente, como mostrado na figura 34 (HINGORANI, 2000).

Figura 33 – Diagrama do sistema com todas as variáveis



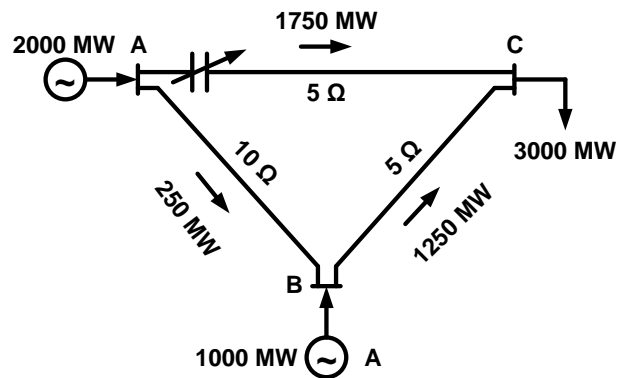
Fonte: (HINGORANI, 2000 – adaptado)

Na situação apresentada na figura 34 e levando-se em consideração os limites de potência de cada linha, verifica-se que a linha BC está sobrecarregada (carregada em 1600 MW para a sua classificação contínua de 1250 MW) e as linhas AB e AC estão subutilizadas (linha AB carregada em 600 MW para a sua classificação contínua de 1000 MW e linha AC carregada em 1400 MW para a sua classificação contínua de 2000 MW) (HINGORANI, 2000).

A fim de redistribuir o fluxo de potência, um dispositivo TCSC, com reatância capacitiva no valor de  $-5 \Omega$  na frequência síncrona, é inserido na linha AC, que reduz a impedância desta linha de  $10 \Omega$  para  $5 \Omega$ , conforme mostrado na figura 35.

Como a nova configuração do sistema, os fluxos de potências através das linhas AB, BC e AC são de 250 MW, 1250 MW, e 1750 MW, respectivamente. Com isso, o fluxo de potência foi diminuído na linha AB e aumentado nas linhas BC e AC. Com isso, a linha BC passou a atender a especificação e ficar no limite de transferência potência (HINGORANI, 2001).

Figura 34 - Diagrama com TCSC na linha AC



Fonte: (HINGORANI, 2000 – adaptado)

É claro que, se o capacitor em série é ajustável, então outros níveis de fluxo de potência podem ser realizados de acordo com a propriedade, contrato, limitações térmicas, as perdas de transmissão, e uma vasta gama de carga e horários de geração. Embora este condensador pudesse ser modular e ligado mecanicamente, o número de operações seria severamente limitado pelo desgaste dos componentes mecânicos porque as cargas em linha variam continuamente com as condições de carga, de geração horária, e linha de interrupções (HINGORANI, 2000).

Se todo ou uma parte do capacitor em série é controlado por tiristores, no entanto, pode ser variada tantas vezes quanto necessário. Ele pode ser modulado para amortecer rapidamente quaisquer condições de ressonância, bem como o amortecimento de oscilações de baixa frequência do fluxo de potência. Isso permitiria que o sistema de transmissão fosse de uma condição de estado estacionário para outra sem o risco de dano a um eixo do gerador e também ajudar a reduzir o risco do colapso do sistema. Em outras palavras, uma condensadora série controlada por tiristores pode aumentar extremamente a estabilidade da rede. Mais frequentemente, porém, é prático para parte da compensação série a ser controlada mecanicamente e parte controlada a tiristor, de modo a contrariar as restrições do sistema ao menor custo (MISAKI, 2006).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A falta de controladores mais ágeis e um dos fatores cruciais que afetaram a maneira como o sistema elétrico tem evoluído. Em sistemas de potência CA não radiais, os fluxos de potência são distribuídos fundamentalmente em função das impedâncias das linhas de transmissão, ou seja, uma linha com baixa impedância terá fluxos de potência maiores do que uma linha com alta impedância.

Este problema está normalmente fora do controle dos engenheiros que operam o sistema ou, na melhor das hipóteses, pode ser contornado com certa dificuldade através do controle de geração, chaveamento de linhas de transmissão e de compensação reativa e regulação de tensão via transformadores de *tap* variável e defasadores.

O desejável aumento da flexibilidade e da robustez dos sistemas elétricos torna-se viável com a utilização de dispositivos de eletrônica de potência, que permitem ações de controle e o chaveamento de grandezas elétricas.

A compensação dinâmica de reativos, shunt – através da modulação de tensão nodal na rede, ou série – através da modulação de reatâncias série da linha, melhora o desempenho dos sistemas elétricos de potência frente a problemas de fluxos de potência.

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

O TCSC é também uma poderosa ferramenta para o controle dinâmico do sistema de potência. Entretanto, como pode formar uma ressonância com a reatância da linha de transmissão, sua faixa de variação aplicável, deve estar limitada entre 20 e 70% da reatância da linha.

A compensação série de linhas de transmissão se faz para aumentar a capacidade de transferência de potência. Como consequência deste aumento, é provável o aumento das perdas na linha compensada, como também na sensibilidade de resposta, em termos de fluxo de potência, quando da saída de outras linhas do sistema. O TCSC usa tiristores como meio de controle da compensação série.

Foi realizado um estudo do controle do dispositivo TCSC, onde este pode ser controlado continuamente através do disparo adequado dos tiristores. Com efeito, a

compensação série de uma linha de transmissão pode ser realizada de forma dinâmica com esse dispositivo.

O TCSC tem provado ser um importante dispositivo para controlar o fluxo de potência. No Brasil, o TCSC é considerado como elemento fundamental para a conexão dos sistemas elétricos Norte-Sul, sendo suas primordiais funções o amortecimento de oscilações de baixa frequência entre os dois sistemas e a melhoria na capacidade de transmissão da mesma.

Dos estudos apresentados no trabalho fica comprovada a boa atuação do dispositivo TCSC na estabilidade dos sistemas elétricos de potência.

### Trabalhos Futuros

A determinação dos custos relativos à implantação dos FACTS é um assunto complexo, e que causa polêmica acerca dos investimentos necessários quando são comparados a alternativas disponíveis. O assunto necessita ser aprofundado, levando em conta principalmente a especificidade de cada projeto e o "valor" agregado ao sistema com sua implantação; Otimização do controle do TCSC; Investigar a influência causada pela indisponibilidade de linhas de transmissão de outros agentes; Avaliação de outros dispositivos FACTS como, por exemplo: o STATCOM, o SSSC e o TCPST; Desenvolver modelo para simulação computacional.



## REFERÊNCIAS

- ABB Group Overview about FACTS. **Applying to your Electric Power System**, 2002. Disponível em: < <http://www.abb.com/facts>>. Acesso em: 09 mar. 2016.
- CAMINHA, A.C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- CASTRO, R. M. G.; BATISTA, F. M. R.; MEDEIROS PINTO, J. M. **Application of FACTS in the Portuguese Transmission System: Investigation on the Use of Phase shift Transformers**, IEEE Porto Power Tech Conference. Lisboa: IEEE, 2001.
- ELGERD, O. **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976.
- FERRARO, A. G.; ARTICO, M.; BIANCO, B. A. **Proteção de sistemas elétricos de potência com ênfase em linhas de transmissão**. Itatiba: Universidade São Francisco, 2013.
- FOGAÇA, A. L. B. **Análise de Controladores FACTS em Sistemas de Energia Elétrica**. Curitiba. Originalmente apresentado como tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2006.
- GALIANA, F. D.; ALMEIDA, K.; TOUSSAINT, M.; GRIFFIN, J.; ATANACKOVIC, D. **Assessment and Control of the Impact of FACTS Devices on Power System Performance**. Montreal: IEEE, 1996.
- GARCIA, Paulo A. N.; PEREIRA, José L. R.; CARNEIRO JUNIOR, Sandoval. **Fluxo de Potência Trifásico por Injeção de Corrente: Parte 2- Controles e Dispositivos FACTS**. Rio de Janeiro: Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 2001.
- GARCIA, D. A. A. ; DUZZI JR, F. E. **Aspectos de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. Rev. O Setor Elétrico, v. 73, n. 1. São Paulo, 2012.
- GERBEX, S.; CHERKAOUI, R.; GERMOND, A. J. **Optimal Location of FACTS Devices to Enhance Power System Security**. Itália: IEEE Bologna Power Tech Conference, 2003.
- GOTHAM, D. J.; HEYDT, G. T. **Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems with FACTS Devices**. USA: IEEE, 1998.
- GRÜMBAUM, R.; PERNOT, J. **Thyristor Controlled Series Compensation: a State of the Art Approach for Optimization of Transmission Over Power Links**. São Paulo: ABB Review, 2001.
- HINGORANI, Narain G.; GYUGYI, Laszlo. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. New York: IEEE Press, 2000.
- IEEE SSR Working Group. **Proposed Terms and Definitions for Subsynchronous Resonance: IEEE Symposium on Countermeasures for Subsynchronous Resonance**. EUA: IEEE Transactions on Power Systems, 1981.

MIASAKI, C. T. **Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Controladores FACTS**. Ilha Solteira. Originalmente apresentado como tese de doutorado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2006.

MIOTTO, L. E.; COVACIC, R. M. **Analysis of Impacts of PSS Controllers and TCSC FACTS Devices at Dynamic Stability of a Multimachine Power System**. Londrina: IEEE, 2010.

MIOTTO, L. E.; COVACIC, R. M. **Análise da Estabilidade Dinâmica de um Sistema Elétrico de Potência Multimáquinas com a Atuação de Dispositivos FACTS TCSC e Controladores Robustos**. São Paulo: IEEE PES, 2010.

MIOTTO, L. E.; COVACIC, R. M. **Study of Stability Dynamic in a Multimachine Power System using Robust Controllers PSS and POD**. Wuhan: IEEE PES, 2011.

MONTICELLI, A.J.: **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1983.

NILSON, G.; BAHRMAN, J. **Power Flow Control: Panel Session on FACTS Changes Power System Control**. Floripa: IEEE/PES Winter Power Meeting, 1994.

NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. **Power Flow Control by Use of Controllable Series Components**. Stockholm: IEEE Transactions on Power Delivery, 1993.

OLIVEIRA E. J.; MARANGON LIMA J. W. **FACTS: Localização Ótima e Impacto no Preço da Transmissão**. Uberlândia: XII Congresso Brasileiro de Automática, 1998.

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

PEREIRA, J. L. R. **Modelagem de Dispositivos de Controle FACTS em Sistemas de Potência para Análise em Regime Permanente**. Florianópolis: XII Congresso Brasileiro de Automática, 2000.

PIN, R. M. **Utilização de Conversores com Fonte de Tensão no Controle de Fluxo de Potência**. Ilha Solteira. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2004.

POMILIO, A. **Eletrônica de Potência no Sistema de Transmissão**. Campinas: UNICAMP, 2013

POVH, D.; MIHALIC, R.; PAPIC, I. **FACTS Equipment for Load Flow Control In High Voltage Systems**. Tokyo: CIGRE, 1995.

SONG, Y.H.; JOHNS, A.T. **Flexible AC Transmission Systems – FACTS**; London: IEE Press, 1999.

SOUZA, L. F. W.; WATANABE, E. H.; ALVES, José. E. R.; Pilotto, L. A. S. **Thyristor and Gate Controlled Series Capacitors: Comparison of Components Rating**. Toronto: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003.

STEVENSON JUNIOR., W. D.; **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2 ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1986.

TARANTO, G. N.; PINTO, L. M.V. G.; PEREIRA, Michel. V. F. **Representation of FACTS Devices in Power System Economic Dispatch**. Rio de Janeiro: IEEE Transactions on Power Systems, 1992.

TEIVE, R. C. G. **Planejamento da Expansão da Transmissão de Sistemas de Energia Elétrica Utilizando Sistemas Especialistas**. Florianópolis. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

TORTELLI, O. D. **Alocação e Operação de Controladores FACTS em Sistemas Elétricos de Potência**. Campinas. Originalmente apresentado como tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2010.

VERMA, A. K.; SRIVIDYA, A.; DEKA, C. **Impact of a FACTS Controller on Reliability of Composite Power Generation and Transmission System**. Assam: Elsevier, 2004.

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