

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

DENNYS DELEON LIMA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS DE CONTROLADORES FACTS EM UM
PROGRAMA DE FLUXO DE CARGA: Capacitor Série Controlado a Tiristor e
Compensador Síncrono Estático**

São Luís

2018

DENNYS DELEON LIMA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS DE CONTROLADORES FACTS EM UM
PROGRAMA DE FLUXO DE CARGA: Capacitor Série Controlado a Tiristor e
Compensador Síncrono Estático**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha.

São Luís

2018

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Silva, Dennys Deleon Lima.

Implementação de modelos de Controladores FACTS em um programa de fluxo de carga: Capacitor Série Controlado a Tiristor e Compensador Síncrono Estático / Dennys Deleon Lima Silva. - 2018.

94 f.

Orientador(a): José Eduardo Onoda Pessanha.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Capacitor Série Controlado a Tiristor. 2. Compensador Síncrono Estático. 3. Controladores FACTS. 4. Fluxo de carga. I. Pessanha, José Eduardo Onoda. II. Título.

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS DE CONTROLADORES FACTS EM UM
PROGRAMA DE FLUXO DE CARGA: Capacitor Série Controlado a Tiristor e
Compensador Síncrono Estático**

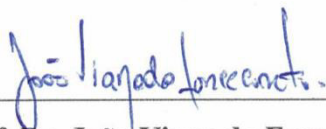
Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 / 07 / 2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão



Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto
Universidade Federal do Maranhão



Prof. Dra. Silvângela Lilian da Silva Lima Barcelos
Universidade Federal do Maranhão

A Deus e Seu único filho Jesus Cristo.

À minha família.

Aos amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus e Seu único filho Jesus Cristo, fonte de amor, bondade, justiça e sabedoria.

À Virgem Santíssima, mãe de Nosso Senhor, refúgio dos pecadores, intercessora.

À minha família, em especial ao meu pai Orlando Gomes da Silva e à minha mãe Silvânia Lima Silva, exemplos que procuro seguir todos os dias. Às minhas irmãs Klycia Lima Silva e Lethicia Lima Silva por sempre estarem comigo.

Aos amigos que conheci ao longo dos anos, nos colégios Rui Barbosa e Upaon-Açu, na UFMA e ao meu amigo Clóvis Júnior que foi praticamente um professor durante esses anos de Engenharia Elétrica.

“Existem três professores para qualquer pessoa que queira empregá-los: os sentidos, os companheiros inteligentes e os livros”.

Henry War Beecher.

“A menor livraria ainda contém mais ideias de valor do que as que têm sido apresentadas em toda a história da televisão”.

Andrew Ross.

“Gratidão é quando a memória é armazenada no coração e não na mente”.

Lionel Hampton.

RESUMO

Esta monografia apresenta a implementação de dois controladores FACTS, o Capacitor Série Controlado a Tiristor e o Compensador Síncrono Estático, no programa computacional MATPOWER para análise do fluxo de carga. O Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC) é um dispositivo conectado em série com a linha de transmissão para controlar o fluxo de potência entre duas barras. É um controlador que apresenta reatância variável. O Compensador Síncrono Estático (STATCOM) é formado por um conversor fonte de tensão conectado em derivação o qual pode ser representado por uma fonte de tensão em série com uma admitância. O objetivo deste controlador é a regulação de tensão através da injeção de potência reativa à barra à qual está conectado. O algoritmo desenvolvido no programa incorpora estes dois controladores FACTS permitindo que se possa analisar a regulação de tensão, o controle do fluxo de potência, como as perdas são afetadas, entre outros.

Palavras-chave: Fluxo de potência. Regulação de tensão. Controladores FACTS. Capacitor Série Controlado a Tiristor. Compensador Síncrono Estático.

ABSTRACT

The monography presents implementation of two FACTS controllers, Thyristor-controlled Series Capacitor and Static Synchronous Compensator, in computational tool named MATPOWER for load flow analysis. Thyristor-controlled Series Capacitor (TCSC) is a device connected in series with transmission line to control power flow. It is a device that presents variable reactance. Static Synchronous Compensator (STATCOM) is formed by a voltage source converter connected in shunt which can be represented by a voltage source in series with an admittance. This controller's goal is voltage regulation by injecting reactive power to bus to which is connected. The algorithm developed on computational tool incorporates those two FACTS controllers allowing one to study voltage regulation, power flow control, how losses are affected, among others.

Key-words: Load flow. Voltage regulation. FACTS controllers. Thyristor-controlled Series Capacitor. Static Synchronous Compensator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Convenção de sinais para fluxos e injeções de correntes.....	25
Figura 2	– Modelo equivalente π de uma linha de transmissão.....	26
Figura 3	– Transformador em fase.....	27
Figura 4	– Circuito equivalente π do transformador em fase.....	28
Figura 5	– Defasador puro.....	29
Figura 6	– Representação geral dos transformadores.....	30
Figura 7	– Compensação reativa <i>shunt</i> tipo fonte de tensão e tipo impedância variável.....	40
Figura 8	– Compensação série do tipo impedância variável.....	41
Figura 9	– Circuito básico do RCT (a), forma de ondada corrente com ângulos de disparo α diferentes (b).....	42
Figura 10	– Leiaute de um módulo de TCSC monofásico.....	43
Figura 11	– Característica da impedância em função do ângulo de disparo α de um TCSC.....	44
Figura 12	– TCSC entre as barras k e m de uma rede.....	44
Figura 13	– Modelo duas máquinas com compensação capacitiva série.....	45
Figura 14	– Potência transmitida com diferentes graus de compensação.....	46
Figura 15	– Circuito genérico de três linhas de transmissão.....	47
Figura 16	– CFT conectado a uma barra do sistema.....	48
Figura 17	– Diagrama fasorial do CFT: (a) em operação indutiva e (b) em operação capacitiva.....	49
Figura 18	– Circuito equivalente do STATCOM.....	50
Figura 19	– Gráfico $V_x I$ do STATCOM e do CER.....	50
Figura 20	– Matriz Jacobiana sem e com controladores FACTS.....	52
Figura 21	– Circuito equivalente do TCSC operando na região (a) indutiva e (b) capacitiva.....	53
Figura 22	– Fluxograma do método de Newton-Raphson com TCSC.....	55
Figura 23	– Fluxograma do método de Newton-Raphson com STATCOM.....	58
Figura 24	– Funções de leitura do caso e verificação da existência de controladores FACTS.....	63
Figura 25	– O caso newtonpf na função runpf.....	63

Figura 26	– As entradas e saídas da função newtonpf.....	63
Figura 27	– Carregamento do controlador atuante caso exista e separação da matriz Ybus.....	64
Figura 28	– Acréscimo das contribuições e <i>mismatches</i> dos controladores FACTS.....	64
Figura 29	– Comandos e rotinas para a montagem da matriz Jacobiana e sua modificação.....	65
Figura 30	– Atualização das variáveis de estado do sistema e do controlador.....	66
Figura 31	– Atualização das variáveis de estado e dos parâmetros dos controladores.....	66
Figura 32	– Cálculo dos mismatches para o teste de tolerância.....	67
Figura 33	– Impressão dos resultados.....	67
Figura 34	– Sistema de 5 barras.....	69
Figura 35	– Inclusão do TCSC no sistema de 5 barras.....	70
Figura 36	– Inclusão do STATCOM no sistema de 5 barras.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Colunas da matriz do TCSC na <i>struct</i>	61
Tabela 2	–	Colunas da matriz do STATCOM na <i>struct</i>	62
Tabela 3	–	Informações das barras do caso-base.....	69
Tabela 4	–	Fluxos de potência do caso-base.....	69
Tabela 5	–	Informações das barras do sistema de 5 barras com TCSC.....	71
Tabela 6	–	Informações dos ramos do sistema de 5 barras com TCSC.....	71
Tabela 7	–	Parâmetros do TCSC após a convergência.....	72
Tabela 8	–	Informações das barras do sistema de 5 barras com STATCOM.....	73
Tabela 9	–	Informações dos ramos do sistema de 5 barras com STATCOM.....	73
Tabela 10	–	Parâmetros do STATCOM após a convergência.....	74
Tabela 11	–	Parâmetros de entrada do TCSC para o sistema de 30 barras.....	74
Tabela 12	–	Valores das barras do sistema de 30 barras após a convergência com e sem TCSC.....	75
Tabela 13	–	Valores dos ramos do sistema de 30 barras após a convergência com e sem TCSC.....	75
Tabela 14	–	Parâmetros do TCSC do sistema de 30 barras após a convergência.....	75
Tabela 15	–	Parâmetros de entrada do STATCOM no sistema de 30 barras.....	76
Tabela 16	–	Valores das barras do sistema de 30 barras após a convergência com e sem STATCOM.....	77
Tabela 17	–	Valores dos ramos do sistema de 30 barras após a convergência com e sem STATCOM.....	77
Tabela 18	–	Parâmetros do STATCOM no sistema de 30 barras após a convergência.....	77
Tabela 19	–	Parâmetros de entrada do STATCOM no sistema de 57 barras.....	78
Tabela 20	–	Valores das barras do sistema de 57 barras após a convergência com e sem STATCOM.....	79
Tabela 21	–	Valores dos ramos do sistema de 57 barras após a convergência com e sem STATCOM.....	79
Tabela 22	–	Parâmetros do STATCOM no sistema de 57 barras após a convergência.....	79
Tabela 23	–	Parâmetros de entrada do TCSC para o sistema de 118 barras.....	80

Tabela 24	–	Valores das barras do sistema de 118 barras após a convergência com e sem TCSC.....	81
Tabela 25	–	Valores dos ramos do sistema de 118 barras após a convergência com e sem TCSC.....	81
Tabela 26	–	Parâmetros do TCSC do sistema de 118 barras após a convergência....	81
Tabela 27	–	Parâmetros de entrada do TCSC para o sistema de 300 barras.....	82
Tabela 28	–	Valores das barras do sistema de 300 barras após a convergência com e sem TCSC.....	83
Tabela 29	–	Valores dos ramos do sistema de 300 barras após a convergência com e sem TCSC.....	83
Tabela 30	–	Parâmetros do TCSC do sistema de 300 barras após a convergência.....	83
Tabela 31	–	Parâmetros de entrada do STATCOM fornecendo potência reativa no sistema de 24 barras.....	84
Tabela 32	–	Valores das barras do sistema de 24 barras após a convergência com e sem STATCOM fornecendo potência reativa.....	85
Tabela 33	–	Valores dos ramos do sistema de 24 barras após a convergência com e sem STATCOM fornecendo potência reativa.....	85
Tabela 34	–	Parâmetros do STATCOM fornecendo potência reativa no sistema de 24 barras após a convergência.....	85
Tabela 35	–	Parâmetros de entrada do STATCOM absorvendo potência reativa no sistema de 24 barras.....	86
Tabela 36	–	Parâmetros de entrada do STATCOM absorvendo potência reativa no sistema de 24 barras.....	87
Tabela 37	–	Valores dos ramos do sistema de 24 barras após a convergência com e sem STATCOM absorvendo potência reativa.....	87
Tabela 38	–	Parâmetros do STATCOM absorvendo potência reativa no sistema de 24 barras após a convergência.....	87
Tabela 39	–	Informações do cálculo de <i>mismatch</i> e do número de iterações não-lineares.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente alternada
IGBT	Transistor bipolar de porta isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
RCT	Reator controlado a tiristor
NR	Método de Newton-Raphson
MATPOWER	MATLAB <i>Power System Simulation Package</i>
TCSC	Capacitor Série Controlado a Tiristor (<i>Thyristor-controlled series Capacitor</i>)
CER	Compensador Estático de Potência Reativa
CFT	Conversor fonte de tensão (<i>Voltage Source Converter</i>)
STATCOM	Compensador Síncrono Estático (<i>Static Synchronous Compensator</i>)
FACTS	Sistemas Flexíveis de Transmissão de Corrente Alternada (<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

V_k	Magnitude da tensão nodal na barra k
V_m	Magnitude da tensão nodal na barra m
θ_k	Ângulo da tensão nodal k
θ_m	Ângulo da tensão nodal m
P_k	Injeção de potência ativa na barra k
Q_k	Injeção de potência reativa na barra k
NB	Número de barras da rede
Ω_k	Conjunto de todas as barras vizinhas à barra k
P_{km}	Fluxo de potência ativa da barra k à barra m
Q_{km}	Fluxo de potência reativa da barra k à barra m
Q_{km}^{sh}	Injeção de potência reativo devido aos elementos <i>shunt</i> da barra k
r_{km}	Resistência série da linha de transmissão
x_{km}	Reatância série da linha de transmissão
b_{km}^{sh}	Susceptância <i>shunt</i> da linha de transmissão
z_{km}	Impedância série da linha de transmissão
g_{km}	Condutância série da linha de transmissão
b_{km}	Susceptância série da linha de transmissão
I_{km}	Corrente circulante da barra k para a barra m
I_{mk}	Corrente circulante da barra m para a barra k
E_k	Notação fasorial da tensão na barra k
E_m	Notação fasorial da tensão na barra m
E_p	Notação fasorial da tensão no nó intermediário da linha
V_p	Magnitude da tensão no nó intermediário da linha
a	Relação de transformação
t	Relação do <i>tap</i> do transformador
A	Admitância do ramo série da linha de transmissão
B	Admitância <i>shunt</i> da linha de transmissão associada à barra k
C	Admitância <i>shunt</i> da linha de transmissão associada à barra m
φ	Relação de fase do defasador
I_k	Injeção de corrente na barra k
Y	Matriz de admitâncias

G	Matriz de condutâncias
B	Matriz de susceptâncias
Y_{km}	Valor da admitância entre os nós $k-m$
Y_{kk}	Somatório de todas as admitâncias conectadas à barra k
S_k	Injeção de potência complexa na barra k
K	Conjunto de todas as barras conectadas à barra k , incluindo a barra k
G_{km}	Valor da condutância entre os nós $k-m$
B_{km}	Valor da susceptância entre os nós $k-m$
θ_{km}	Diferença angular entre as tensões das barras $k-m$
J	Matriz jacobiana
ΔP	Vetor de <i>mismatches</i> de potência ativa
ΔQ	Vetor de <i>mismatches</i> de potência reativa
Δx	Vetor de correção das variáveis de estado
P_k^{esp}	Potência ativa especificada
Q_k^{esp}	Potência reativa especificada
α	Ângulo de disparo dos tiristores
σ	Ângulo de condução
X_C	Reatância capacitiva
X_L	Reatância indutiva
X_{TCSC}	Reatância do TCSC
X_{km}, X_{LT}, X	Reatância da linha de transmissão
X_{ef}	Reatância efetiva da linha de transmissão
k	Grau de compensação série
δ_{vR}	Ângulo de fase da tensão do STATCOM
V_{vR}	Magnitude da tensão nodal do STATCOM
Z_{vR}	Admitância do STATCOM
G_{vR}	Condutância do STATCOM
B_{vR}	Susceptância do STATCOM
E_{vR}	Notação fasorial da tensão do STATCOM
$V_{vR,min}$	Magnitude de tensão mínima do STATCOM
$V_{vR,max}$	Magnitude de tensão máxima do STATCOM
I_{vR}	Corrente do STATCOM
$\delta_{vR,min}$	Ângulo mínimo de tensão do STATCOM

$\delta_{vR,max}$	Ângulo máximo de tensão do STATCOM
$X_{TCSC,min}$	Reatância mínima do TCSC
$X_{TCSC,max}$	Reatância máxima do TCSC

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Noções gerais.....	20
1.2	Motivação.....	20
1.3	Metodologia.....	21
1.4	Objetivos.....	21
1.5	Estrutura do trabalho.....	21
2	NOÇÕES DE FLUXO DE CARGA.....	22
2.1	Introdução.....	22
2.2	Generalidades.....	22
2.3	Formulação básica do problema do fluxo de carga.....	22
2.4	Modelagem dos componentes.....	25
2.4.1	Linhas de transmissão.....	25
2.4.2	Transformadores em fase.....	27
2.4.3	Transformadores defasadores.....	29
2.5	Fluxos de potência ativa e reativa.....	30
2.5.1	Expressões gerais dos fluxos de potência.....	31
2.5.2	Formulação das matrizes.....	31
2.6	Método de Newton-Raphson.....	33
2.6.1	Formulação do problema básico através do fluxo de carga.....	33
2.6.2	O caso multivariáveis e sua aplicação na solução do fluxo de potência.....	34
2.7	Conclusões.....	37
3	CONTROLADORES FACTS.....	38
3.1	Introdução.....	38
3.2	Noções gerais.....	38
3.3	O TCSC e a compensação série.....	41
3.3.1	Reator controlado a tiristor.....	41
3.3.2	Capacitor Série Controlado a Tiristor.....	43
3.3.3	Grau de compensação série e aumento da transmissão de potência.....	45
3.4	A compensação <i>shunt</i> e o STATCOM.....	47
3.4.1	Regulação de tensão.....	47
3.4.2	Princípios do Conversor fonte de tensão (CFT).....	48

3.4.3	Compensador Síncrono Estático.....	49
3.5	O método de Newton-Raphson com controladores FACTS.....	51
3.5.1	Noções gerais.....	51
3.5.2	Modelagem do Capacitor Série Controlado a Tiristor.....	52
3.5.3	Modelagem do Compensador Síncrono Estático.....	56
3.6	Conclusões.....	59
4	IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES TCSC E STATCOM NO AMBIENTE COMPUTACIONAL MATPOWER.....	60
4.1	Introdução.....	60
4.2	Dados do TCSC e do STATCOM.....	60
4.2.1	Inserção de dados do TCSC.....	61
4.2.2	Inserção dos dados do STATCOM.....	62
4.2.3	Leitura dos dados dos controladores.....	62
4.3	Função associada ao método de Newton-Raphson.....	63
4.3.1	Definição e carregamento dos dados do controlador FACTS.....	63
4.3.2	Cálculo dos mismatches.....	64
4.3.3	Matriz Jacobiana.....	65
4.3.4	Resolução do sistema linear.....	65
4.3.5	Atualização das variáveis de estado do sistema e dos parâmetros dos controladores.....	66
4.3.6	Cálculo dos <i>mismatches</i> ao final da iteração.....	66
4.3.7	Impressão dos resultados.....	67
4.4	Experimentos numéricos.....	68
4.4.1	Introdução.....	68
4.4.2	Sistema de 5 barras.....	68
4.4.2.1	<i>Caso-base</i>	68
4.4.2.2	<i>Sistema de 5 barras: Inclusão do TCSC</i>	70
4.4.2.3	<i>Sistema de 5 barras: Inclusão do STATCOM</i>	72
4.4.3	Sistema de 30 barras.....	74
4.4.3.1	<i>Sistema de 30 barras: Inclusão do TCSC</i>	74
4.4.3.2	<i>Sistema de 30 barras: Inclusão do STATCOM</i>	76
4.4.4	Sistema de 57 barras: STATCOM.....	78
4.4.5	Sistema de 118 barras: TCSC.....	80

4.4.6	Sistema de 300 barras: TCSC.....	82
4.4.7	O sistema de 24 barras: STATCOM.....	84
4.4.7.1	<i>STATCOM fornecendo potência reativa</i>	84
4.4.7.2	<i>STATCOM absorvendo potência reativa</i>	84
4.4.8	Outras informações obtidas das simulações.....	88
4.5	Conclusões	89
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	90
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 Noções gerais

Os sistemas elétricos de potência vêm crescendo em dimensão e complexidade desde que a primeira cidade foi suprida. Entretanto, nas últimas décadas, questões econômicas, ambientais e legislativas demandaram uma mudança na forma de utilizar todo o potencial das empresas de geração e transmissão sem comprometer a confiabilidade e segurança do sistema de energia. Várias estratégias e ferramentas são utilizadas pelas concessionárias para cumprir essas exigências. Os controladores FACTS (do acrônimo em inglês Flexible AC Transmission System) destacaram-se nesse cenário devido à velocidade de resposta e margem de controle. As modelagens e simulações desses equipamentos têm mostrado a interação desses dispositivos e a rede de energia elétrica (BHOWMICK, 2016).

Os controladores FACTS baseiam-se em eletrônica de potência e têm como principais objetivos aumentar a capacidade das atuais linhas de transmissão e controlar o fluxo de potência, além de aumentar os limites de estabilidade angular e de tensão e amortecer oscilações transitórias. As consequências desses problemas são minimizadas aumentando-se as margens de operação do sistema (PADIYAR, 2007; PASERBA, 2004; HINGORANI; GYUGYI, 2000).

O foco desta monografia está na modelagem dos controladores FACTS no algoritmo de fluxo de carga para a análise em regime permanente. Os modelos implementados são o Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC) e o Compensador Síncrono Estático (STATCOM – do acrônimo em inglês *Static Synchronous Compensator*).

1.2 Motivação

Neste trabalho optou-se por utilizar o programa computacional MATPOWER – versão 6.0 (ZIMMERMAN et al., 2017; ZIMMERMAN; MURILO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011) que é um programa de distribuição gratuita, desde que observadas as regras impostas pelos seus desenvolvedores. O MATPOWER disponibiliza estrutura para o estudo do fluxo de carga fornecendo o algoritmo pronto em sua *homepage*. O MATPOWER foi desenvolvido na plataforma MATLAB e é bastante aceito nos meios acadêmicos e científicos, além de permitir alterações para a inclusão de controladores FACTS e outros similares.

1.3 Metodologia

A monografia é composta de etapas teóricas e práticas caracterizadas, respectivamente, pelo levantamento de material bibliográfico e pelo desenvolvimento de funções no ambiente computacional para o problema do fluxo de carga com controladores FACTS para que se avalie os parâmetros destes dispositivos e como afetam o perfil da rede elétrica.

1.4 Objetivos

O objetivo desta monografia é implementar dois modelos de controladores FACTS no ambiente computacional MATPOWER para o problema do fluxo de carga. Os objetivos específicos são: escolha do material didático sobre fluxo de carga e controladores FACTS, desenvolvimento de algoritmos para implementação dos controladores no MATPOWER no algoritmo de fluxo de carga já existente do software e realização de simulações computacionais para a corroboração dos modelos.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho é dividido do seguinte modo:

- a) Capítulo 1: Noções gerais, objetivo e estrutura;
- b) Capítulo 2: Apresentação, descrição do problema de fluxo de carga em sistemas de energia e método de Newton-Raphson;
- c) Capítulo 3: Apresentação, descrição das modelagens do STATCOM e do TCSC, descrição da principal função em algoritmo de fluxo de carga, descrição das equações matemáticas dos controladores;
- d) Capítulo 4: Descrição dos algoritmos de modelagem do STATCOM e do TCSC, consolidação de sistemas-teste para realização de simulações computacionais com a presença desses controladores, experimentos numéricos de sistemas com e sem FACTS;
- e) Capítulo 5: Considerações finais e recomendações para futuros trabalhos.

2 NOÇÕES DE FLUXO DE CARGA

2.1 Introdução

Este capítulo aborda o fluxo de carga focando na modelagem de componentes do sistema, formulação básica do problema e métodos de solução. Este tema é importante porque os controladores FACTS serão modelados baseados nos conceitos apresentados neste capítulo.

2.2 Generalidades

Em engenharia, o fluxo de carga (ou fluxo de potência) é uma análise numérica que fornece a solução de uma rede elétrica para determinadas condições de operação de carga e geração sujeitas à restrições e atuação de dispositivos de controle. O estudo usa notações simplificadas, como o sistema por unidade e o diagrama unifilar, para analisar o sistema em uma modelagem estática sendo a rede representada por um conjunto de equações e inequações algébricas. Este tipo de representação é usado em situações nas quais as variações com o tempo são suficientemente lentas para que se possa ignorar os efeitos transitórios na rede. As principais informações obtidas neste estudo são o ângulo e a magnitude da tensão em cada barra assim como os fluxos de potências ativa e reativa em cada linha da rede. As equações básicas do fluxo de carga são obtidas impondo-se a conservação das potências ativa e reativa em cada nó da rede. Ou seja, a potência líquida injetada deve ser igual à soma das potências que saem do nó. Isso equivale à Primeira Lei de Kirchhoff. A Segunda Lei de Kirchhoff é utilizada para expressar os fluxos de potência nos componentes internos como funções das tensões de seus nós terminais (MONTICELLI, 1983). Utilizar o cálculo do fluxo de carga em um sistema real provê o conhecimento das variáveis de estado do sistema para que o operador saiba quais medidas tomar quando os valores variarem ao longo do dia.

2.3 Formulação básica do problema do fluxo de carga

Na formulação básica do fluxo de carga, trabalha-se com quatro variáveis associadas às barras do sistema das quais duas são incógnitas e duas são dados do problema: θ_k (ângulo da tensão nodal na barra k), V_k (magnitude da tensão na barra k em pu), P_k (geração líquida de potência ativa) e Q_k (injeção líquida de potência reativa). Tais variáveis são utilizadas no

sistema de equações e inequações que correspondem às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes.

Para definir quais são consideradas incógnitas e quais entram como dados, três tipos de barras são definidos:

- 1) Barra $V\theta$ ou barra *slack* – Fornece como dados o ângulo de referência do sistema e a magnitude da tensão nodal cuja referência é o próprio nó-terra. P_k e Q_k são incógnitas na barra a qual é utilizada para fechar o balanço de potências do sistema suprindo todas as perdas, pois estas não são representadas nas equações do fluxo de potência;

Dados de entrada: θ_k e V_k .

Calculado nesta barra: P_k e Q_k .

- 2) Barra PV ou barra de tensão controlada – Representa as barras de geração (incluindo-se os compensadores síncronos). Nestas barras, que correspondem a um percentual pequeno do total, geradores e compensadores síncronos, assim como outros dispositivos, permitem manter o módulo da tensão e a injeção de potência ativa nos valores especificados;

Dados de entrada: P_k e V_k .

Calculado nesta barra: θ_k e Q_k .

- 3) Barra PQ ou barra de carga – correspondendo à maior parte das barras do sistema, esse tipo não possui controle de tensão, mas podem haver geradores conectados às barras os quais fornecem P e Q constantes;

Dados de entrada: P_k e Q_k .

Calculado nesta barra: θ_k e V_k (BHOWMICK, 2016).

Esses três tipos de barras são os mais importantes e mais frequentes, mas existem situações particulares nas quais aparecem outros tipos de barras (PQV, P e V) às quais há dispositivos de controle associados que não são consideradas na formulação básica do sistema (MONTICELLI, 1983).

Duas equações para cada barra formam o conjunto de equações do problema do fluxo de carga. Correspondendo à Primeira Lei de Kirchhoff, as injeções de potências ativa e reativa em uma barra são iguais à soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, transformadores, etc. Desta forma, as equações que representam as potências ativa e reativa em determinada barra são (MONTICELLI, 1983):

$$\begin{cases} P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m), & k \in \{PQ, PV\} \\ Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m), & k \in \{PQ\} \end{cases} \quad (2.1)$$

em que:

$k = 1, \dots, NB$, sendo NB o número de barras da rede;

Ω_k - conjunto das barras vizinhas à barra k ;

V_k, V_m - magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k-m$;

θ_k, θ_m - ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k-m$;

P_{km} - fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;

Q_{km} - fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;

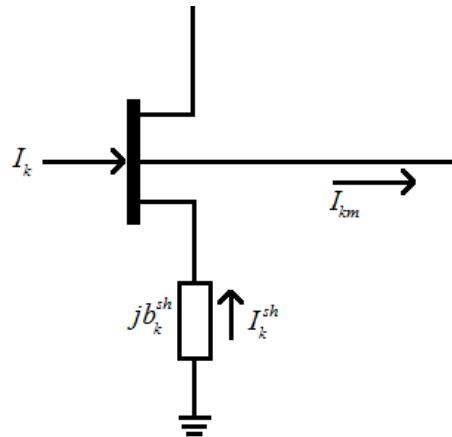
Q_k^{sh} - componente da injeção de potência reativa devido a uma susceptância *shunt* ligada à barra k .

Nas equações de fluxo de potência adota-se as seguintes convenções: os ângulos θ_k e θ_m aparecem sempre na forma $\theta_k - \theta_m$; as injeções líquidas de potência são positivas quando entram na barra (geração) e negativa quando saem (carga); os fluxos de potência são positivos quando saem da barra e negativos quando entram; para os elementos *shunt* adota-se a mesma convenção das injeções líquidas. A Figura 1 indica as convenções de sentidos para as potências ativa e reativa que são as mesmas utilizadas para correntes (MONTICELLI, 1983).

O conjunto de inequações é formado, entre outras, pelas restrições a determinadas variáveis como a tensão nodal nas barras PQ e os limites de injeções de potência reativa nas barras PV:

$$\begin{aligned} V_k^{\min} &\leq V_k \leq V_k^{\max} \\ Q_k^{\min} &\leq Q_k \leq Q_k^{\max} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Figura 1 – Convenção de sinais para fluxos e injeções de correntes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

2.4 Modelagem dos componentes

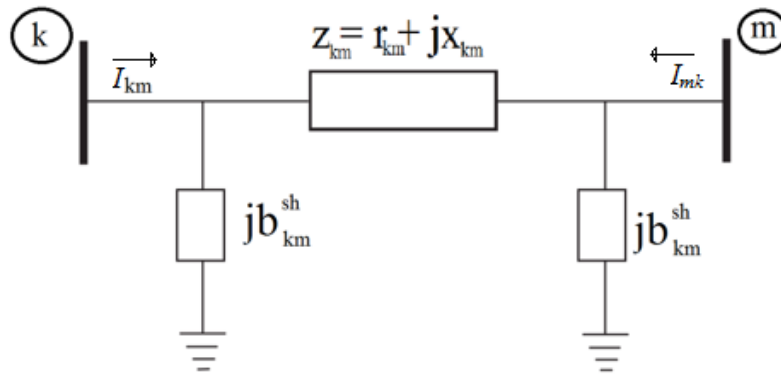
Os componentes do sistema, tais como linhas de transmissão e transformadores, nos quais transitam os fluxos de potência têm seus modelos matemáticos discutidos nesta seção. Os modelos de linhas de transmissão, transformadores em fase e defasadores também são discutidos.

2.4.1 Linhas de transmissão

A linha de transmissão é a componente mais frequente de se encontrar entre duas barras de um sistema de energia elétrica. Sua representação no modelo π é definida por três parâmetros fixos, a saber: a resistência r_{km} ; a reatância série x_{km} ; e a susceptância *shunt* b_{km}^{sh} . Desta forma, entre as barras k e m tem-se a impedância z_{km} que é dada por (MONTICELLI, 1983):

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (2.3)$$

A Figura 2 ilustra o modelo π da linha de transmissão com suas respectivas impedância e susceptância *shunt*:

Figura 2 – Modelo equivalente π de uma linha de transmissão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para os métodos de solução do fluxo de carga é mais fácil e menos custoso usar a admitância em vez da impedância. Assim, a condutância série g_{km} e a susceptância série b_{km} são definidas como:

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = z_{km}^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.4)$$

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2}; b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.5)$$

Como uma linha de transmissão possui reatância indutiva, a condutância e a susceptância são positivas. O elemento *shunt* é capacitivo e, portanto, b_{km}^{sh} é positivo. As correntes I_{km} e I_{mk} são formadas de uma componente série e uma componente *shunt* e são calculadas a partir das tensões terminais e dos parâmetros do modelo π . Sendo E_k e E_m as tensões nas barras k e m respectivamente:

$$I_{km} = y_{km}(E_k - E_m) + jb_{km}^{sh}E_k \quad (2.6)$$

$$I_{mk} = y_{km}(E_m - E_k) + jb_{km}^{sh}E_m \quad (2.7)$$

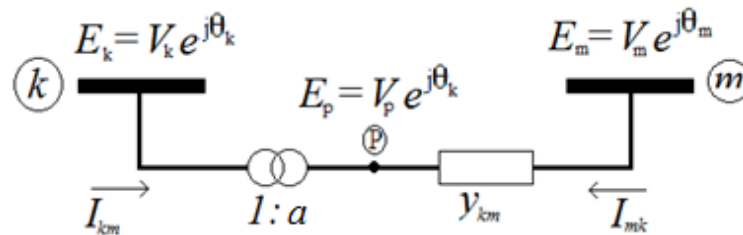
Onde

$$E_k = V_k e^{j\theta_k}; E_m = V_m e^{j\theta_m} \quad (2.8)$$

2.4.2 Transformadores em fase

Transformadores em fase são componentes essenciais dos sistemas de potência. Estes dispositivos fornecem a interface entre duas áreas da rede com valores de tensões diferentes como, por exemplo, a usina e a linha de transmissão. Para este tipo de transformador não há diferença angular entre os nós k e p , mas apenas a diferença de tensão. A Figura 3 ilustra o esquema do transformador em fase:

Figura 3 – Transformador em fase.



Fonte: Adaptado do Monticelli (1983).

Como $\theta_k = \theta_p$, tem-se que a é simplesmente a relação entre as tensões da barra k e do ponto p . Deste modo:

$$\frac{E_p}{E_k} = \frac{V_p e^{j\theta_p}}{V_k e^{j\theta_k}} = a \quad (2.9)$$

Um transformador ideal implica que as potências complexas na entrada e na saída são iguais. Ou seja, não há dissipação de energia entre os nós k e p :

$$E_k I_{km}^* + E_p I_{kp}^* = 0 \quad (2.10)$$

Substituindo os valores de E_p e E_k na relação (2.10) encontra-se a relação entre as correntes I_{km} e I_{mk} :

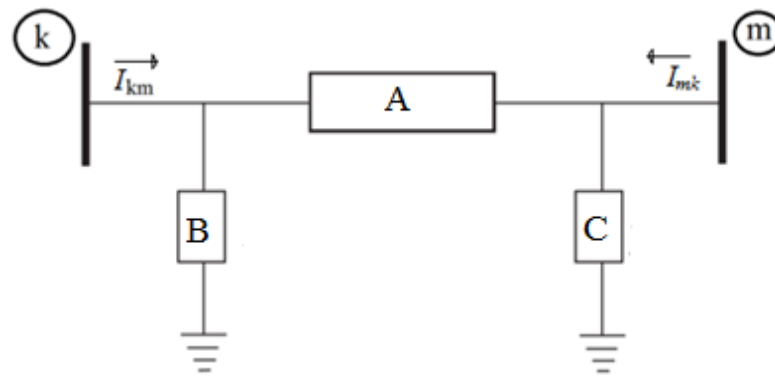
$$\frac{I_{km}}{I_{mk}} = -\frac{|I_{km}|}{|I_{mk}|} = -a \quad (2.11)$$

Tanto nas linhas de transmissão como nos transformadores em fase, as correntes I_{km} e I_{mk} estão defasadas em 180° . Mas nestes últimos suas magnitudes estão na razão $a:1$. Pode-se identificar as correntes I_{km} e I_{mk} com o auxílio da relação (2.9) e do modelo apresentando na Figura 3. Então, tem-se (MONTICELLI, 1983):

$$\begin{aligned} I_{km} &= ay_{km}(E_p - E_m) = ay_{km}(aE_k - E_m) = (a^2 y_{km})E_k - ay_{km}E_m \\ I_{mk} &= y_{km}(E_m - E_p) = y_{km}(E_m - aE_k) = -ay_{km}E_k + y_{km}E_m \end{aligned} \quad (2.12)$$

Se o transformador em fase for representado em um modelo π equivalente como o mostrado na Figura 4, pode-se usar as admitâncias A , B e C do circuito para reescrever as equações das correntes:

Figura 4 – Circuito equivalente π do transformador em fase.



Fonte: Adaptado do Monticelli (1983).

$$\begin{aligned} I_{km} &= A(E_k - E_m) + B \times E_k = (A + B)E_k + (-A)E_m \\ I_{mk} &= A(E_m - E_k) + C \times E_m = (-A)E_k + (A + C)E_m \end{aligned} \quad (2.13)$$

Comparando-se (2.12) e (2.13), obtém-se:

$$\begin{aligned} A &= ay_{km} \\ B &= a(a-1)y_{km} \\ C &= (1-a)y_{km} \end{aligned} \quad (2.14)$$

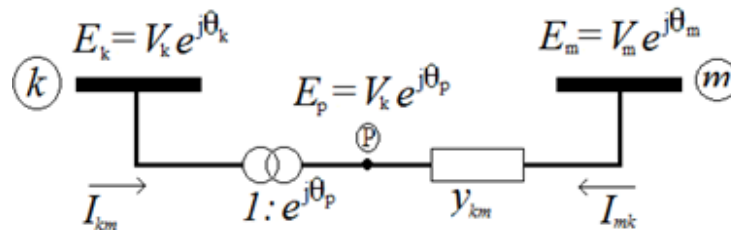
As expressões (2.14) permitem a análise dos efeitos da relação de transformação sobre as magnitudes das tensões nas barras k e m . Com $a = 1$, B e C são iguais a zero, reduzindo o

circuito à admitância série y_{km} . Com $a > 1$, B torna-se positivo tendo o mesmo sinal da admitância a qual é indutiva; C é negativo e, portanto, é capacitivo. Desse modo, a tensão da barra m aumenta enquanto a da barra k diminui. Com $a < 1$, B é capacitivo e V_k tende a aumentar; e C é indutivo e V_m tende a diminuir. Se uma das barras tiver sua tensão controlada, os efeitos recairão sobre o terminal oposto (MONTICELLI, 1983).

2.4.3 Transformadores defasadores

Enquanto os transformadores em fase afetam majoritariamente a potência reativa entre dois nós do sistema, os defasadores também permitem o controle do fluxo de potência ativa do ramo ao qual está conectado (MONTICELLI, 1983). No defasador puro, a magnitude das tensões entre a barra k e o nó p são iguais, mas seus ângulos são diferentes. A Figura 5 ilustra o defasador puro entre as barras k e m :

Figura 5 – Defasador puro.



Fonte: Adaptado de Monticelli (1983).

A relação de transformação para o defasador puro é:

$$\frac{E_p}{E_k} = t = \frac{V_k e^{j(\theta_k + \varphi)}}{V_k e^{j\theta_k}} = e^{j\varphi} \quad (2.15)$$

$$\frac{I_{km}}{I_{mk}} = -t^* = -e^{-j\varphi} \quad (2.16)$$

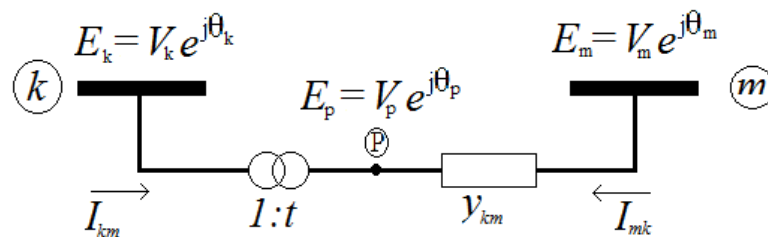
Utilizando as relações (2.10), (2.15) e (2.16), as expressões para as correntes I_{km} e I_{mk} para o defasador puro são:

$$\begin{aligned}
 I_{km} &= -t^* y_{km} (E_m - E_p) = y_{km} E_k - (e^{-j\varphi}) y_{km} E_m \\
 I_{mk} &= y_{km} (E_m - E_p) = -(e^{j\varphi}) y_{km} E_k + y_{km} E_m
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

O termo associado a E_m na expressão de I_{km} é diferente do termo associado a E_k na expressão de I_{mk} tornando impossível obter-se os parâmetros A , B e C do circuito equivalente π para este tipo de transformador (MONTICELLI, 1983).

O transformador defasador afeta tanto o fluxo de potência ativa como o fluxo de potência reativa do ramo ao qual se conecta. Assim, tanto a magnitude como o ângulo das tensões entre o ponto p e a barra k são diferentes. Assim, a Figura 6 ilustra a representação geral para os transformadores e a relação de transformação é representada na expressão (2.18):

Figura 6 – Representação geral dos transformadores.



Fonte: Adaptado do Monticelli (1983).

$$\frac{E_p}{E_k} = t = a e^{j\varphi}
 \tag{2.18}$$

Para o transformador em fase, $\varphi = 0$ e, portanto, $t = a$; para o defasador puro, $a = 1$ e tem-se $t = e^{j\varphi}$. Seguindo o procedimento dos transformadores precedentes, encontra-se as equações das correntes I_{km} e I_{mk} . A única diferença, em relação às expressões (2.17), é que o coeficiente de E_k na equação de I_{km} passa a ser $a^2 y_{km}$ em vez de y_{km} (MONTICELLI, 1983).

2.5 Fluxos de potência ativa e reativa

Esta seção trata dos modelos matemáticos e matriciais dos fluxos de potência ativa e reativa que são utilizados nos algoritmos de fluxo de carga para encontrar os valores das variáveis que entram como incógnitas na formulação básica do problema.

2.5.1 Expressões gerais dos fluxos de potência

A partir dos modelos apresentados na seção precedente, as expressões gerais dos fluxos de potência ativa e reativa podem ser obtidas. A expressão geral da corrente I_{km} entre duas barras de uma rede é (MONTICELLI, 1983):

$$I_{km} = (a_{km}^2 y_{km} + j b_{km}^{sh}) E_k - (a_{km} e^{-j\varphi_{km}}) y_{km} E_m \quad (2.19)$$

A injeção líquida de potência complexa na barra k em função dos parâmetros da rede e das tensões nas barras é:

$$S_{km} = P_{km} + jQ_{km} = E_k I_{km}^* \quad (2.20)$$

Separando-se as partes reais e imaginárias da relação (2.20) e desenvolvendo a expressão, pode-se encontrar as expressões gerais dos fluxos de potência ativa e reativa para linhas de transmissão, transformadores em fase, defasadores puros e defasadores:

$$\begin{aligned} P_{km} &= (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - (a_{km} V_k) V_m b_{km} \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) \\ Q_{km} &= -(a_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (a_{km} V_k) V_m b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - (a_{km} V_k) V_m g_{km} \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Para linhas de transmissão $a_{km} = 1$ e $\varphi_{km} = 0$. Para transformadores em fase, $\varphi_{km} = 0$ e $b_{km}^{sh} = 0$. Para os defasadores puros, $b_{km}^{sh} = 0$ e $a_{km} = 1$. Finalmente, para os defasadores, tem-se apenas $b_{km}^{sh} = 0$. Os fluxos P_{mk} e Q_{mk} são obtidos de forma análoga.

2.5.2 Formulação das matrizes

Para que se saiba a injeção de corrente e, conseqüentemente, dos fluxos de potência ativa e reativa na barra k , é necessário somar todas as contribuições das barras e das cargas que estão conectadas à barra k para que se obtenha a injeção líquida de potência ativa e reativa. Sendo I_k a injeção na barra k , a relação (2.19) torna-se:

$$I_k = [jb_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (jb_{km}^{sh} + a_{km}^2 y_{km})]E_k + \sum_{m \in \Omega_k} (-a_{km} e^{j\phi_{km}} y_{km} E_m) \quad (2.22)$$

Em algoritmos de fluxo de carga, todas as variáveis envolvidas nos processos iterativos são organizadas de forma matricial. Dessa forma, I_k representaria a k -ésima linha do vetor de injeções de corrente do sistema e E_k a k -ésima linha do vetor de tensões. Se I é o vetor de correntes, Y é a matriz de admitâncias e E o vetor de tensões, tem-se:

$$I = YE \quad (2.23)$$

Os elementos da matriz Y são:

$$\begin{aligned} Y_{km} &= -a_{km} e^{-j\phi_{km}} y_{km} \\ Y_{kk} &= jb_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (jb_{km}^{sh} + a_{km}^2 y_{km}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Se não há conexão entre as barras k e m , ou seja, se não há linhas de transmissão ou transformadores, sua admitância Y_{km} é igual a zero. Por isto a matriz Y tem uma grande quantidade de elementos nulos, sendo esparsa. Se composta por linhas de transmissão e defasadores em fase, a matriz Y é simétrica. Torna-se assimétrica na presença de um elemento defasador, pois $Y_{km} = -a_{km} e^{-j\phi_{km}} y_{km}$ e $Y_{mk} = -a_{km} e^{j\phi_{km}} y_{km}$ (MONTICELLI, 1983). A injeção de corrente I_k pode ser colocada na forma:

$$I_k = Y_{kk} E_k + \sum_{m \in \Omega_k} Y_{km} E_m = \sum_{m \in K} Y_{km} E_m \quad (2.25)$$

Em (2.25) K é o conjunto de todas as barras conectadas à barra k incluindo a própria barra k . Considerando $Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$, $E_m = V_m e^{j\theta_m}$ e $E_k = V_k e^{j\theta_k}$, a injeção de potência complexa, potência ativa e potência reativa são, respectivamente:

$$\begin{aligned}
S_k &= V_k e^{j\theta_k} \sum_{m \in K} (G_{km} + jB_{km})(V_m e^{-j\theta_m}) \\
P_k &= \text{Re}\{S_k\} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\
Q_k &= \text{Im}\{S_k\} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})
\end{aligned} \tag{2.26}$$

2.6 Método de Newton-Raphson

Excelente para a resolução de sistemas do tipo $Ax = b$, o método de Newton-Raphson converge quase sempre e com poucas iterações. O esforço computacional é reduzido, pois utiliza a matriz de admitância Y a qual é mais fácil de ser montada e modificada. É o método de solução de fluxo de carga mais utilizado atualmente.

2.6.1 Formulação do problema básico através do fluxo de carga

O problema do fluxo de carga é dividido em dois subproblemas: o subsistema 1 e o subsistema 2. O primeiro consiste em encontrar V_k e θ_k para as barras PQ e θ_k para as barras PV. O segundo consiste no cálculo da injeção de potência ativa na barra de referência e de potência reativa nas barras PV e de referência. O subsistema 1 possui $2 \text{ NPQ} + \text{NPV}$ equações algébricas não-lineares com o mesmo número de incógnitas, ou seja (MONTICELLI, 1983):

$$P_k^{esp} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) = 0 \tag{2.27}$$

para barras PQ e PV

$$Q_k^{esp} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = 0 \tag{2.28}$$

para barras PQ

Os termos P_k^{esp} e Q_k^{esp} representam as potências ativa e reativa especificadas na barra k , isto é, as potências que entram como dados no problema. Os termos restantes são as potências ativa e reativas calculadas. O processo iterativo terá fim quando a condição de igualdade for satisfeita ou estiver abaixo de uma tolerância informada previamente.

O subsistema 2 consiste em calcular as potências ativa na barra de referência e reativas nas barras de referência e PV, ou seja, trata-se de um sistema de NPV + 2 equações. Aqui, como V_k e θ_k já aparecem de forma explícita, a resolução do subproblema se torna trivial; diferente do subsistema 1 onde as variáveis aparecem de forma implícita.

Quanto às restrições, podem ser intercaladas com a solução das equações básicas resolvendo-as alternadamente ou pode-se alterar as equações para incluir a representação dos dispositivos de controle resolvendo as duas partes simultaneamente (MONTICELLI, 1983).

2.6.2 O caso multivariáveis e sua aplicação na solução do fluxo de potência

Seja F a representação do conjunto de n equações não-lineares e x o vetor de n variáveis de estado desconhecidas, deve-se resolver o sistema:

$$\begin{aligned} F &= [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n]^t \\ x &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^t \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \end{aligned} \right\}, \text{ ou } F(X) = 0 \quad (2.30)$$

A essência do método consiste em determinar o valor das variáveis X através de processos iterativos linearizando a expansão da série de Taylor para $X^{(0)}$. Os termos de maior ordem são ignorados baseando-se na premissa que $X^{(1)}$ é suficientemente próximo da estimativa inicial $X^{(0)}$ (ACHA et al., 2004). Assim:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f_1(X^{(1)}) \\ f_2(X^{(1)}) \\ \vdots \\ f_n(X^{(1)}) \end{bmatrix}}_{F(X^{(1)})} \approx \underbrace{\begin{bmatrix} f_1(X^{(0)}) \\ f_2(X^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(X^{(0)}) \end{bmatrix}}_{F(X^{(0)})} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_n} \end{bmatrix}}_{J(X^{(0)})} \bigg|_{X=X^{(0)}} \underbrace{\begin{bmatrix} X_1^{(1)} - X_1^{(0)} \\ X_2^{(1)} - X_2^{(0)} \\ \vdots \\ X_n^{(1)} - X_n^{(0)} \end{bmatrix}}_{X^{(1)} - X^{(0)}} \quad (2.31)$$

O sistema de equações (2.31) pode ser colocado de uma forma mais geral para i -ésima iteração do algoritmo podendo ser escrita da seguinte forma:

$$F(X^{(i)}) \approx F(X^{(i-1)}) + J(X^{(i-1)})(X^{(i)} - X^{(i-1)}) \quad (2.32)$$

Assumindo $X^{(i)}$ suficientemente próximo à solução $X^{(*)}$ então $F(X^{(i)}) \approx F(X^{(*)}) = 0$. Substituindo $\Delta X^{(i)} = X^{(i)} - X^{(i-1)}$ e resolvendo em função de $F(X^{(i-1)})$ na relação (2.32), encontra-se a equação no formato $Ax = b$:

$$F(X^{(i-1)}) = -J(X^{(i-1)})(\Delta X^{(i)}) \quad (2.33)$$

Os cálculos são repetidos tantas vezes quanto forem necessárias para encontrar o valor das variáveis que satisfaçam a relação (2.30) ou que o valor de F esteja abaixo de um limite estipulado previamente. Costuma-se fixar o número de iterações para que os cálculos não se repitam indefinidamente como em casos nos quais o sistema não converge.

Aplicada ao fluxo de carga, a relação (2.33) pode ser reescrita expressando as variáveis do sistema submetido ao algoritmo. O termo à esquerda do sinal de igualdade representa o vetor de *mismatches*, ou seja, os resíduos de potência os quais são a diferença entre as potências especificadas e as potências calculadas. A relação (2.33) representando o algoritmo Newton-Raphson de fluxo de carga é expresso por:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}}_{F(X^{(i-1)})} = - \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}}_{J(X^{(i-1)})} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}}_{\Delta X^{(i)}} \quad (2.34)$$

A matriz jacobiana consiste em derivadas parciais das potências ativas e reativas de todas as barras (omitindo a barra *slack*) em relação a todos os ângulos e magnitudes de tensão. Ou seja:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m}, \frac{\partial P_k}{\partial V_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m}, \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} \end{array} \right\} \begin{array}{l} k = 1, \dots, m, \dots nb. \\ m = 1, \dots, k, \dots nb. \end{array} \quad (2.35)$$

As colunas e linhas correspondentes à derivada da potência reativa em relação à tensão das barras PV podem ser descartadas. Como dito anteriormente, se não há elemento de transmissão entre duas barras, o elemento jacobiano correspondente será nulo. Como as conexões em sistemas práticos são poucas, a matriz é altamente esparsa.

Com estas informações, o algoritmo da solução do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson é descrito como se segue:

- 1) Após a determinação das variáveis do sistema, dos tipos de barra e seus valores, monta-se a matriz Y_{BARRA} .
- 2) Estipula-se os valores iniciais das magnitudes de tensão nas barras PQ (normalmente 1 p.u.) e dos ângulos de fase nas barras PQ e PV (normalmente zero). Faz-se $i = 0$.
- 3) Calcula-se os *mismatches* ΔP_k e ΔQ_k e verifica-se a convergência. Se seus valores forem menores que uma tolerância estipulada, o processo deve parar.

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= P_k^{esp} - P_k^{cal}, k \in \{PQ, PV\} \\ \Delta Q_k &= Q_k^{esp} - Q_k^{cal}, k \in \{PQ\} \end{aligned} \quad (2.36)$$

- 4) Faz-se $i = i + 1$. Monta-se a matriz jacobiana $J^{(i)}$.
- 5) Soluciona-se o sistema linearizado $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(i)} = -J^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(i)}$.
- 6) Atualiza-se a solução do problema $\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(i)} + \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(i)}$.
- 7) Volta-se ao passo 3.

Para solucionar o sistema linearizado do passo 5, diversos métodos podem ser utilizados, mas neste trabalho é empregado o *backslash* por ser o operador original utilizado no algoritmo do fluxo de carga no MATPOWER.

2.7 Conclusões

O problema do fluxo de carga envolve cálculos cujas variáveis são o ângulo e a magnitude de tensão nas barras e os fluxos de potências nos ramos. Há vários tipos de barras em um sistema de energia sendo a *slack*, a PV e a PQ as mais comuns. A definição do tipo é importante para que se saiba quais variáveis entram como dados e quais como incógnitas naquela barra.

Os componentes mais comuns de um sistema elétrico de potência, linhas de transmissão e transformadores, podem ser representados no modelo π resultando em uma componente em série entre as barras e duas susceptâncias *shunt*, cada uma conectada a uma barra. Graças a isso, fórmulas gerais para os fluxos de potência podem ser obtidas sendo adotadas nos diversos algoritmos de fluxo de carga disponíveis. O método de Newton-Raphson, mais utilizado, é utilizado para encontrar a raiz da equação $f(x)=0$. Um valor aproximado, abaixo do limite de tolerância estabelecido, é aceito como solução da equação.

3 CONTROLADORES FACTS

3.1 Introdução

A indústria de fornecimento de energia elétrica tem se transformado ao longo do tempo. A crescente demanda por eletricidade tem feito as concessionárias pensarem em novas formas de atender aos consumidores de forma contínua, segura e confiável. Entretanto, os programas de expansão convencionais tais como construção de novas linhas de transmissão e de usinas de energia; têm encontrado dificuldade frente a pressões de determinados grupos que impedem a obtenção de licença para a execução da expansão. Tais programas têm sido usados para resolver determinados problemas decorrentes das tentativas operacionais de alcançar uma melhor redistribuição de fluxo nas linhas de transmissão. A perda da estabilidade do sistema, perdas de linhas de transmissão importantes e violação dos limites de tensão são alguns dos problemas que surgem. Devido ao custo de implementação e à oposição de determinados grupos, os planejadores encontraram uma solução nos Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada, ou FACTS (do acrônimo em inglês *Flexible AC Transmission Systems*), que incorporam dispositivos e métodos de eletrônica de potência (ACHA et al., 2004; BHOWMICK, 2016; HINGORANI; GYUGYI, 2000).

O presente capítulo aborda os controladores FACTS com ênfase no Compensador Estático – STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) e o Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC (do acrônimo em inglês *Thyristor-controlled Series Capacitor*) os quais serão implementados no MATPOWER para simulações do fluxo de carga pelo método de Newton-Raphson.

3.2 Noções Gerais

É possível classificar os controladores FACTS de diferentes modos dependendo do critério utilizado. Quanto à forma de conexão à rede, pode-se dividi-los em quatro categorias (DONSIÒN, GÜEMES, RODRIGUEZ 2007):

- Controladores série;
- Controladores *shunt*;
- Controladores série-série;
- Controladores série-*shunt*.

Quanto às características tecnológicas, podem ser divididos em dois grupos:

- Primeira geração: uso de válvula tiristor;
- Segunda geração: uso de semicondutores como o IGBT.

As duas classificações são independentes entre si. Ou seja, é possível encontrar controladores do grupo de uma das classificações que estejam em qualquer grupo da outra. Por exemplo, o STATCOM e o Reator Controlado a Tiristor (RCT) pertencem ao grupo de controladores *shunt* da primeira classificação. Mas na segunda classificação o RCT pertence à primeira geração enquanto o Compensador Estático pertence à segunda. O TCSC pertence à primeira geração e ao grupo de controladores série (DONSIÒN, GÜEMES, RODRIGUEZ 2007).

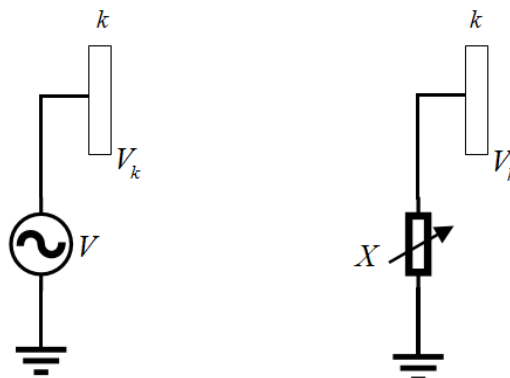
As dificuldades econômicas e ambientais encontradas para a expansão da rede de transmissão impedem que as concessionárias atendam às crescentes demandas. A habilidade de controlar a impedância, a magnitude de tensão e o ângulo de fase em determinado ponto permite que o sistema se adapte às mudanças tornando-se ‘flexível’ (PADIYAR, 2007). Os principais benefícios associados ao uso de controladores FACTS são:

1. Melhoria do desempenho do sistema em regime permanente (através do controle do fluxo de potência e aumentando a capacidade de transmissão);
2. Melhoria da estabilidade transitória e dinâmica (amortecendo oscilações eletromecânicas, limitando correntes de curto-circuito, etc.);
3. Redução dos custos e dos impactos ambientais associados à construção de novas linhas de transmissão;
4. Maior confiabilidade e menor custo de manutenção, pois não utilizam partes mecânicas;
5. Tempo de atuação menor (DONSIÒN, GÜEMES, RODRIGUEZ 2007).

Superar as limitações inerentes à transmissão de energia com o auxílio de dispositivos mecânicos apresenta problemas. O rápido desgaste das peças impedindo que sejam utilizados com frequência e o tempo entre o envio do sinal de controle e a ação tomada pelo dispositivo mecânico fazem com que os controladores FACTS se tornem uma melhor opção. Os principais limites existentes na transmissão de energia são os de fluxo de potência em regime permanente, de estabilidade de tensão, de amortecimento das oscilações, térmicos e de corrente de curto-circuito (PASERBA, 2004; ABIDO, 2009) ficando a cargo do projetista estudar o sistema com o qual trabalha e definir o melhor controlador FACTS para os problemas de limitações que possam ocorrer.

Com compensação *shunt* reativa apropriada, pode-se aumentar a potência transmitida e controlar o perfil de tensão ao longo das linhas. Reatores podem ser usados para minimizar a sobretensão da linha sob carga leve, enquanto que capacitores podem ser aplicados para manter os níveis de tensão sob cargas pesadas. O STATCOM é baseado no conversor tipo fonte de tensão (CFT) que insere corrente reativa na barra para que esta mantenha seu nível de tensão (ACHA et al., 2004). A Figura 7 mostra a barra k tendo as conexões para compensação *shunt*:

Figura 7 – Compensação reativa *shunt* tipo fonte de tensão e tipo impedância variável.



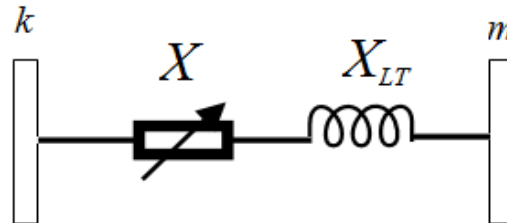
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A compensação de potência reativa é usada em algum ponto específico da rede à qual está conectado. Tal posição do compensador é determinada pelo local onde ocorre a maior variação de tensão: no fim da linha, para uma alimentação radial até à carga; e no ponto intermediário interconectando duas barras, para sistemas interconectados. Os princípios operacionais do STATCOM permitem que o controlador opere como uma fonte de tensão síncrona em derivação, o que lhe dá características superiores como melhor performance e uma gama maior de aplicações, em relação aos controladores baseados em admitância variável (ACHA et al., 2004; HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Entretanto, a compensação shunt é ineficiente em controlar a potência ativa transmitida a qual é determinada pela impedância da linha, bem como os ângulos entre as duas barras na extremidade da linha. Um compensador série, como o TCSC, é aplicado para resolver problemas de fluxo de potência que podem ser resultados do comprimento elétrico da linha ou da estrutura da rede de transmissão assim como é capaz de melhorar a estabilidade de tensão. A redução do comprimento elétrico da linha pode ser feita com uma compensação fixa para que atinja os valores requeridos. Assim, controla-se o fluxo de potência em uma linha mediante o controle da impedância da linha. Como as linhas de transmissão são indutivas, a inserção de um TCSC com reatância equivalente capacitiva reduz a impedância total entre duas barras

(HINGORANI; GYUGYI, 2000). A Figura 8 ilustra um controlador FACTS do tipo impedância variável entre duas barras do sistema:

Figura 8 – Compensação série do tipo impedância variável.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O objetivo da análise do fluxo de carga pelo método de Newton-Raphson com a inclusão dos controladores FACTS presente neste trabalho consiste na verificação dos resultados quanto à regulação de tensão, o aumento da capacidade de transmissão e o aumento da potência transmitida.

3.3 O TCSC e a compensação série

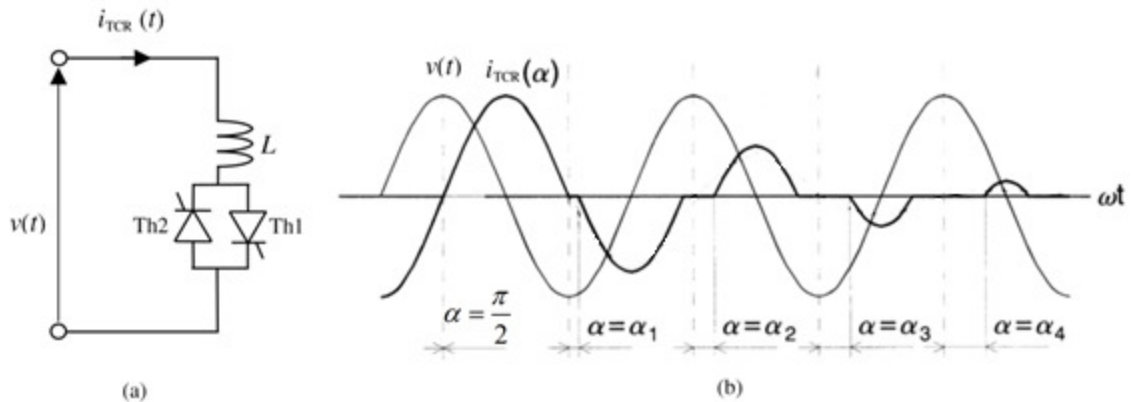
3.3.1 Reator controlado a tiristor

O estudo do reator controlado a tiristor se faz necessário, pois é um dos componentes do Compensador Série Controlado a Tiristor. Por definição, capacitores geram e reatores (indutores) absorvem potência reativa quando conectados a uma fonte de tensão CA. Diferente de sua versão chaveada a qual possui susceptância fixa, o RCT permite o controle da admitância e, portanto, de uma área maior e contínua para se controlar a absorção de reativos. Ou seja, enquanto que com o Reator chaveado a tiristor a absorção de potência reativa depende exclusivamente da tensão sobre o reator, no RCT a absorção depende também do valor da sua admitância (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Os tiristores podem ser levados à condução em momento específico com o uso do controle do ângulo de disparo. No ramo correspondente ao RCT, há dois tiristores conectados em antiparalelo, cada um responsável por um semiciclo de corrente. Na condição de condução total, a forma da onda da corrente do reator é senoidal. O primeiro tiristor conduz no primeiro semiciclo e abre na passagem da corrente por zero. Então, cabe ao segundo conduzir a corrente pelo outro semiciclo. Caso haja um aumento do ângulo de disparo α , a condução é atrasada e, por isso, tem a corrente um valor menor resultando em uma impedância maior vista pelo sistema

(HINGORANI; GYUGYI, 2000). Entretanto, o aumento do ângulo dispara tem como consequência a geração de harmônicas as quais tem suas componentes mais significativas suprimidas por filtros e outros arranjos que as impedem de afetar o lado de alta tensão da rede (ACHA et al., 2004). A Figura 9 mostra o esquema do RCT e sua onda de corrente com diferentes ângulos de disparo.

Figura 9 – Circuito básico do RCT (a), forma de ondada corrente com ângulos de disparo α diferentes (b).



Fonte: (a) ACHA et al., (2004); (b) adaptado de HINGORANI, GYUGYI, (2000).

Da Figura 9, percebe-se que o semiciclo com ângulo de disparo $\alpha = 90^\circ$ está em condução total, ou seja, cada tiristor conduz completamente um semiciclo da corrente que passa por aquele ramo. À medida que o ângulo aumenta, a magnitude da onda e seu intervalo de condução diminuem. A relação entre o ângulo de disparo α e o ângulo de condução σ é dada por:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (3.1)$$

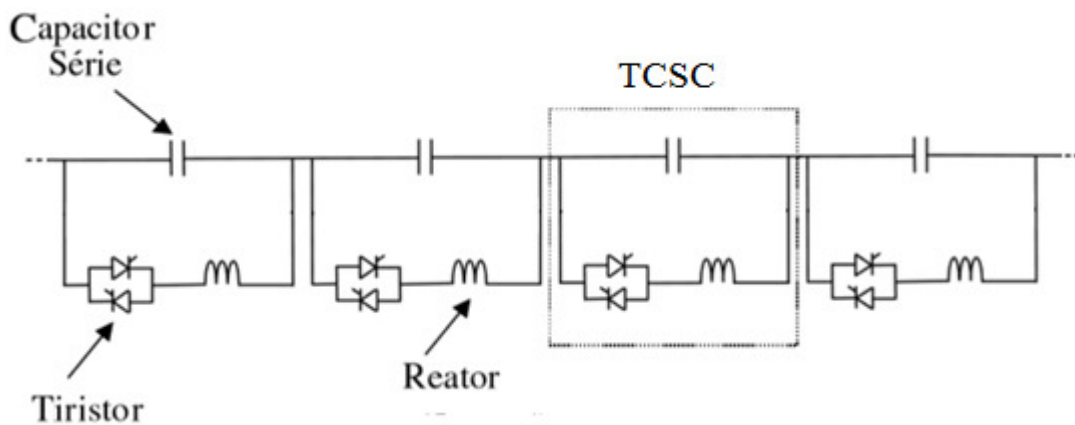
Da relação (3.1), percebe-se que para $\alpha = \pi$, $\sigma = 0$. Ou seja, os dois extremos são $\alpha = \pi/2$ e $\alpha = \pi$ onde o primeiro corresponde à condução total, $\sigma = 180^\circ$, ou um semiciclo completo; e o segundo ao bloqueio total da corrente no ramo no qual a impedância torna-se infinita. Assim varia-se o ângulo de disparo no intervalo $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ (ACHA et al., 2004).

A atuação conjunta do Reator controlado a tiristor com capacitores permite o controle da impedância nas regiões indutivas e capacitivas. É exatamente dessa combinação que se origina o Compensador Série Controlado a Tiristor que é conectado em série com a linha de transmissão.

3.3.2 Capacitor Série Controlado a Tiristor

O módulo básico do TCSC é composto pela associação de capacitor em paralelo com Reator Controlado a Tiristor a qual está em série com a linha de transmissão de alguma parte do sistema para o controle do fluxo de potência. Na prática, vários módulos de TCSC são conectados em série para obter os valores de tensão e as características operacionais desejadas (HINGORANI; GYUGYI, 2000; ACHA et al., 2004). A reatância do dispositivo pode ser controlada continuamente dentro da sua faixa de operação. Sua frequência de chaveamento é baixa e seu armazenamento de energia é insignificante (MARUF, 2010). A Figura 10 mostra o leiaute de uma fase do TCSC.

Figura 10 – Leiaute de um módulo de TCSC monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

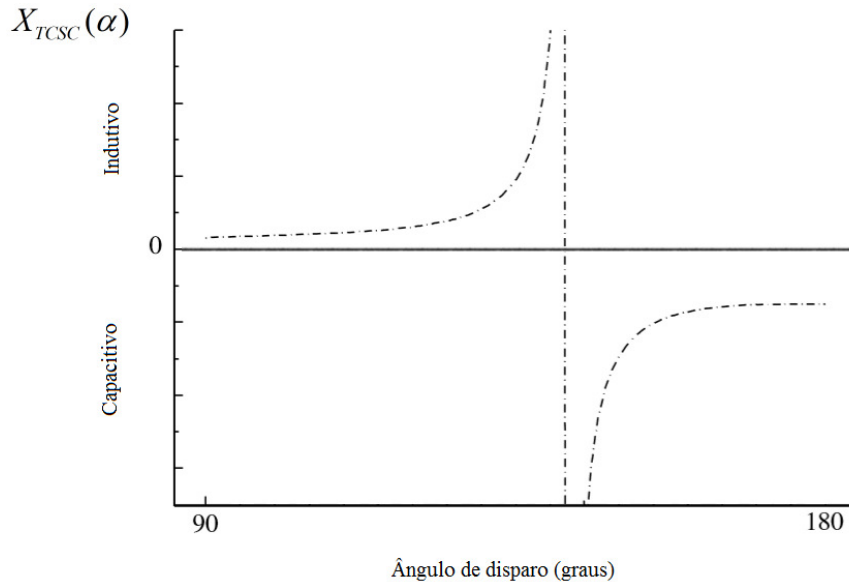
Os valores do reator e do capacitor são escolhidos de tal forma que a reatância do ramo indutivo seja muito menor que a reatância capacitiva. Desse modo, pode-se controlar a reatância do tipo capacitivo, diminuindo a reatância total do ramo ao qual está conectado, até o tipo indutivo, aumentando muito pouco o valor da reatância da linha de transmissão. A reatância equivalente do Capacitor Série Controlado a Tiristor e do ramo do reator em função do ângulo de disparo são expressos nas relações (3.2) e (3.3) respectivamente:

$$X_{TCSC} = \frac{X_c X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_c} \quad (3.2)$$

$$X_L(\alpha) = \frac{\omega L \pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (3.3)$$

Entre as duas faixas operacionais do TCSC, encontra-se uma região na qual o ângulo de disparo é tal que as impedâncias ativa e reativa são iguais para a frequência de operação provocando os efeitos da ressonância. A Figura 11 a característica da impedância em função do ângulo de disparo α :

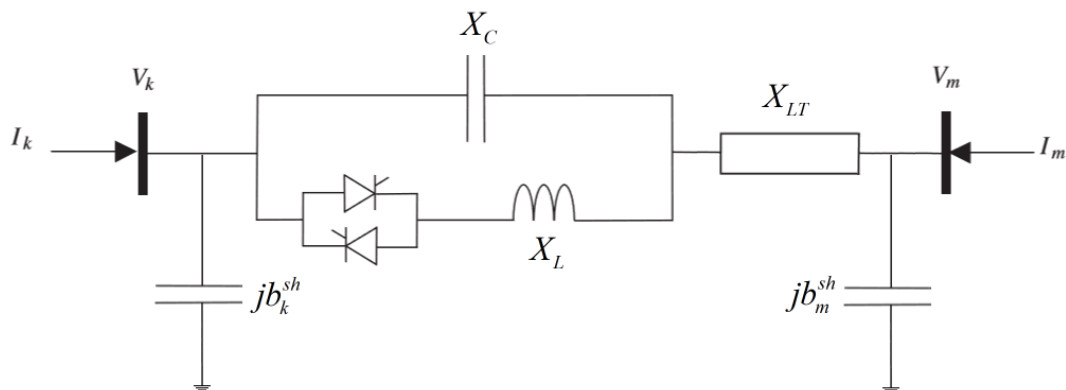
Figura 11 – Característica da impedância em função do ângulo de disparo α de um TCSC.



Fonte: Adaptado de ACHA et al., (2004).

Os valores das reatâncias indutiva e capacitivas devem ser escolhidos com cuidado para que seja assegurado apenas um ponto ressonante presente no intervalo de 90 a 180° (ACHA et al., 2004). Com a inserção do TCSC, tem-se, entre as barras k e m , o esquema representado pela Figura 12:

Figura 12 – TCSC entre as barras k e m de uma rede.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.3.3 Grau de compensação série e aumento da transmissão de potência

Quando se expõe os resultados obtidos graças à compensação capacitiva série do TCSC, costuma-se apresentar também o grau de compensação série do controlador FACTS. A razão disto é que o grau de compensação fornece mais informações ao leitor, pois com esta informação sabe-se a porção da linha que foi cancelada com a atuação do TCSC. Sendo X_{ef} a impedância de transmissão *efetiva* (aquela vista pelo sistema) e o TCSC está fornecendo compensação capacitiva, tem-se:

$$X_{ef} = X - X_C \quad (3.4)$$

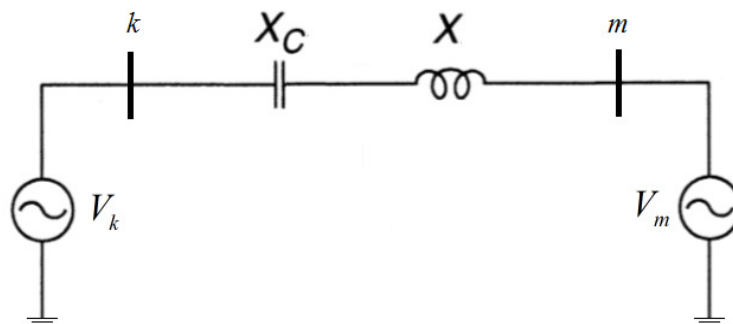
Modificando-se (3.4) para incluir a variável que representa o grau de compensação série, tem-se uma equação que permite uma análise mais direta da atuação deste controlador FACTS. Assim:

$$X_{ef} = (1 - k)X \quad (3.5)$$

$$k = X_C / X \quad 0 \leq k < 1 \quad (3.6)$$

Considerando-se o modelo duas máquinas simples da Figura 13, X é a impedância da linha de transmissão e X_C a reatância do TCSC quando este está operando na região capacitiva:

Figura 13 – Modelo duas máquinas com compensação capacitiva série.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Supondo $V_k = V_m = V$, a transmissão de potência entre as barras k e m da Figura 13 é:

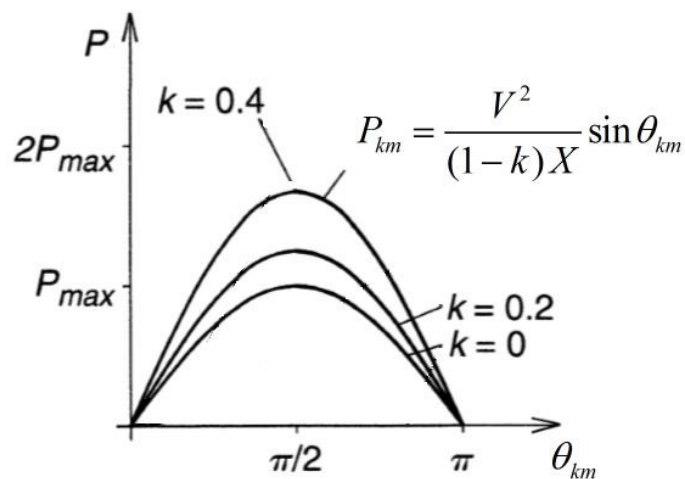
$$P_{km} = \frac{V^2}{X} \sin \theta_{km} \quad (3.7)$$

Substituindo X por X_{ef} , tem-se:

$$P_{km} = \frac{V^2}{(1-k)X} \sin \theta_{km} \quad (3.8)$$

O denominador da relação (3.8) demonstra que a presença do TCSC aumenta o fluxo de potência no ramo ao qual está conectado. Para uma compensação de 50% ou $k = 0.5$, a potência P_{km} dobra. A Figura 14 mostra o gráfico da curva de potência com diferentes graus de compensação ((HINGORANI; GYUGYI, 2000):

Figura 14 – Potência transmitida com diferentes graus de compensação.



Fonte: Adaptado de HINGORANI, GYUGYI, (2000).

Entretanto, deve-se ter conhecimento que as curvas representam o grau de compensação em um modelo de duas máquinas, uma linha de transmissão. Para sistemas de centenas de barras, há outros fatores como a resistência dos condutores que influenciam na magnitude do fluxo. Normalmente, o valor do grau de compensação série não excede 0.7 (PADDIYAR, 2007). Portanto, em sistemas reais a compensação de 50% citada anteriormente aumenta, mas não dobra o fluxo de potência naquele ramo ao qual o controlador FACTS está conectado.

3.4 A compensação *shunt* e o STATCOM

3.4.1 Regulação de tensão

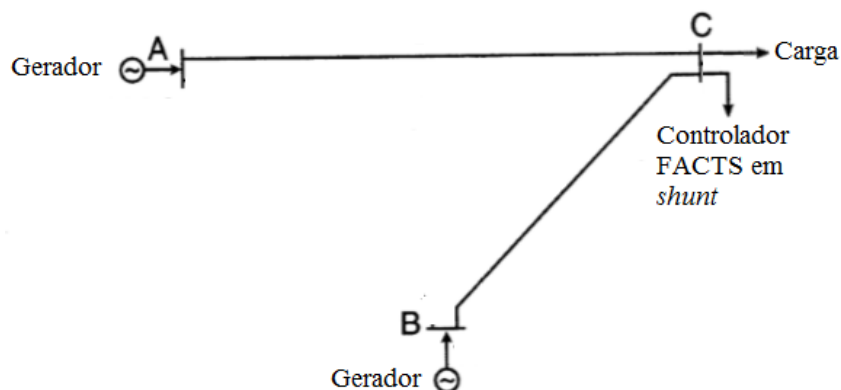
Fornecer potência reativa em determinado ponto do sistema não é uma ação que surgiu com os controladores FACTS. Bancos de capacitores são usados para manter a tensão sob condições pesadas de carga e reatores são usados para minimizar a sobre-tensão em condições leves de carga.

Compensação reativa é aplicada no ponto em que ocorre a maior variação de tensão para prevenir a instabilidade do sistema. Não apenas aumenta-se a estabilidade naquele ponto, mas os geradores do sistema fornecem menos potência reativa, pois parte da demanda é suprida justamente pelo compensador (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Usando dispositivos apropriados, pode-se controlar a potência reativa de saída devido à variação da reatância do controlador FACTS. A combinação de bancos de capacitores com reatores controlados a tiristores deu origem ao Compensador Estático de Reativo que é conectado em *shunt* com determinada barra do sistema para sintetizar potência reativa regulando a tensão naquele ponto. Este tipo de controlador tem sua saída variada para controlar determinados parâmetros, no caso a regulação de tensão.

A compensação *shunt* também pode ser útil reduzindo a potência transmitida por geradores conectados à carga através da síntese local. Para fins de entendimento quanto ao funcionamento de um controlador FACTS *shunt*, considere-se o circuito da Figura 15:

Figura 15 – Circuito genérico de três linhas de transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Supondo que este circuito esteja operando normalmente, os geradores conectados às barras A e B fornecem potência nominal à carga que encontra-se conectada à barra C. Se a linha

que interliga as barras B e C for interrompida, restará apenas o gerador A para suprir a carga adequadamente. A demanda exigida desse gerador aumenta causando uma severa queda de tensão podendo resultar na interrupção de fornecimento de energia. O controlador FACTS em *shunt* proverá uma parte da potência reativa exigida pela carga evitando a sobrecarga do gerador restante e evitando a ocorrência de uma queda de energia.

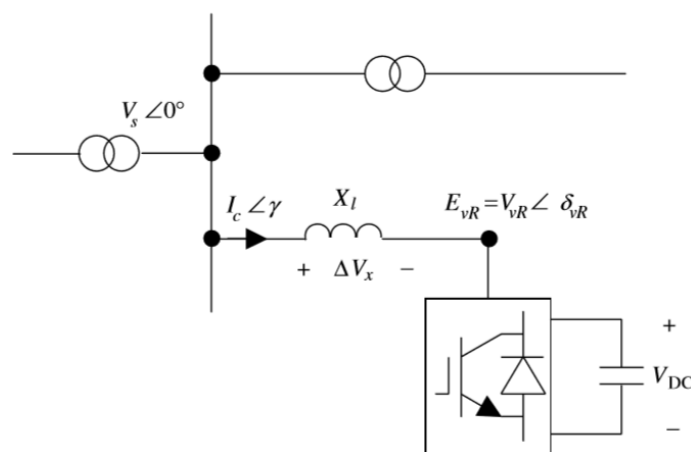
A compensação representada na Figura 15 pode ser feita pelo CER com sua impedância variável, porém o Compensador Estático não tem como base uma impedância variável, mas é visto pelo sistema como uma fonte de tensão graças ao Conversor fonte de tensão utilizado em sua construção (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

3.4.2 Princípios do conversor fonte de tensão

O STATCIN é composto por um CFT em *shunt* conectado à barra. O CFT é baseado na combinação de capacitor CC e dispositivos semicondutores chaveados em alta frequência como o IGBT, GTO e outros. Este conversor é a parte principal de muitos controladores da segunda geração (SINGH, 2009). O comportamento do CFT é, de certa forma, similar ao da máquina síncrona. Enquanto esta tem sua potência reativa manipulada através do controle da corrente de excitação, aquela através da amplitude da tensão produzida (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

A interação entre o CFT e a rede elétrica pode ser explicando considerando-se o CFT conectado a uma das barras da rede através de uma indutância de acoplamento, como no diagrama unifilar da Figura 16. O princípio do funcionamento é que a amplitude e o ângulo da queda de tensão na indutância de acoplamento pode ser controlada, controlando os fluxos de potência ativa e reativa:

Figura 16 – CFT conectado a uma barra do sistema.



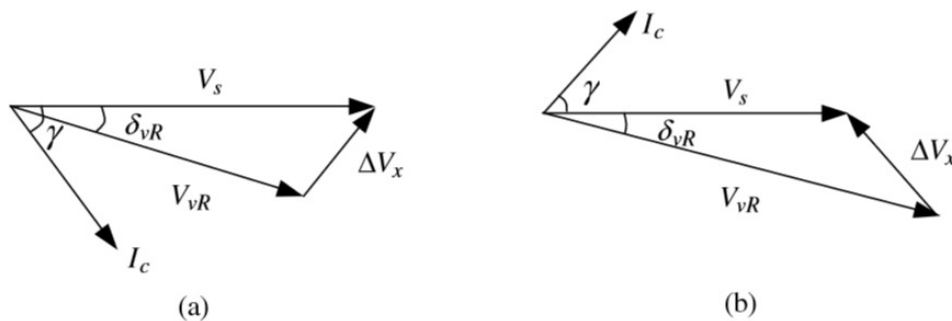
Fonte: ACHA et al., (2004).

Para simplificação dos cálculos, o ângulo da barra à qual o CFT está conectado é assumido como sendo zero (ACHA et al., 2004). Há síntese de potência reativa quando há diferença entre os valores da tensão da barra e o da tensão do conversor. A troca de potência ativa depende da diferença angular. Isso pode ser evidenciado na relação (3.9):

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{V_s V_{vR}}{X_l} \text{sen } \delta_{vR}, \\ Q &= \frac{V_s^2}{X_l} - \frac{V_s V_{vR}}{X_l} \text{cos } \delta_{vR}. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Quando a tensão V_{vR} (do CFT) é menor do que a tensão V_s (da barra) o CFT atua como uma carga indutiva absorvendo potência reativa fornecida pela rede elétrica. Se a tensão da barra é menor do que a tensão do CFT o conversor se comporta como uma carga capacitiva fornecendo potência reativa ao sistema como apresentado pela Figura 17 (HINGORANI; GYUGYI, 2000):

Figura 17 – Diagrama fasorial do CFT: (a) em operação indutiva e (b) em operação capacitiva.



Fonte: ACHA et al., (2004).

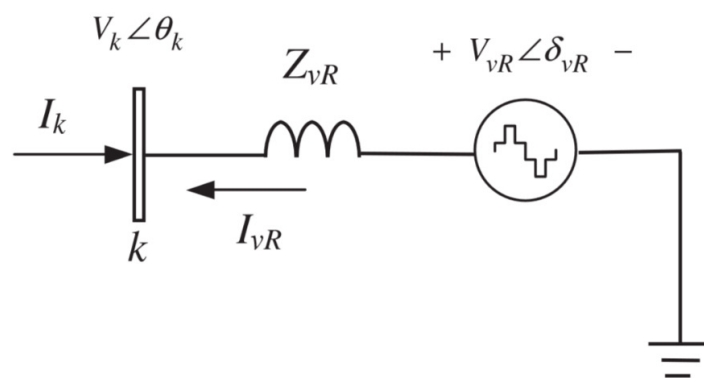
Durante operação normal, uma pequena quantidade de potência ativa flui para o CFT para compensar as perdas internas e δ_{vR} é mantido ligeiramente maior do que zero. O conversor fonte de tensão é parte essencial na construção de vários controladores como o Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC) e o Compensador Estático (SINGH, 2009).

3.4.3 Compensador Síncrono Estático

Empregado para controlar a tensão em determinada barra do sistema da mesma forma que o CER, o STATCOM o faz de uma maneira mais robusta, pois seu desempenho não é

afetado por valores baixos de tensão na barra. Por não haver partes móveis, gera e absorve potência reativa rapidamente (ACHA et al., 2004). Essencialmente, é uma fonte de tensão CA conectada à rede elétrica através de um transformador de acoplamento. Esta diferença operacional básica (fonte de tensão em vez de admitância controlável como no CER) fornece características superiores ao Compensador Estático, melhor desempenho e uma gama maior de aplicações (HINGORANI; GYUGYI, 2000; PADIYAR, 1997; KAMARPOSHTI, 2008). O circuito equivalente do STATCOM representado como uma fonte de tensão síncrona é mostrado na Figura 18:

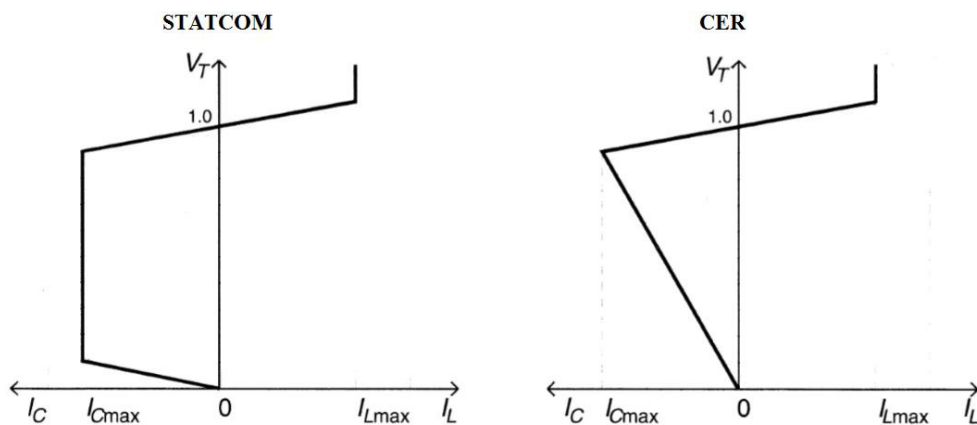
Figura 18 – Circuito equivalente do STATCOM.



Fonte: ACHA et al., (2004).

Enquanto controladores FACTS do tipo impedância variável dependem da magnitude da tensão terminal para que possam sintetizar potência reativa, o Compensador Estático, por ser baseado no uso de CFT, não tem seu desempenho afetado por variações de tensão da barra do sistema (PADIYAR, 2007). A Figura 19 mostra a relação entre corrente e tensão para o STATCOM e para o CER:

Figura 19 – Gráfico $V_x I$ do STATCOM e do CER.



Fonte: Adaptado de HINGORANI, GYUGYI, (2000).

Conforme pode ser observado, o STATCOM apresenta uma faixa de operação maior em termos de corrente para um mesmo nível de tensão. Desde que o STATCOM esteja sintetizando apenas potência reativa, a tensão de saída deste controlador e a tensão do sistema CA naquela barra têm a mesma fase, desde que sejam ignoradas as perdas. Nessas condições, a corrente, em relação à tensão do sistema CA, está defasada em 90° e pode estar atrasada (indutiva) ou adiantada (capacitiva) (TANEJA, 2013).

Para aplicações práticas, o Compensador Estático pode ser usado para controlar os seguintes parâmetros: a magnitude da tensão na barra à qual está conectado, a injeção de potência reativa, a impedância equivalente, a magnitude da corrente que flui entre a barra e o STATCOM entre outros (ZHANG, 2004; NOOROZIAN, 2003). Neste trabalho, apenas o primeiro parâmetro é verificado.

Para a análise do fluxo de carga utilizando o STATCOM incorporado ao método de Newton-Raphson, considera-se no circuito equivalente da Figura 18 a tensão da fonte sendo a componente da frequência fundamental da tensão de saída do CFT. Assume-se que filtros foram utilizados para suprimir as harmônicas mais prejudiciais (ACHA et al., 2004).

3.5 O método de Newton-Raphson com controladores FACTS

3.5.1 Noções gerais

Os controladores FACTS foram desenvolvidos para otimizar o sistema elétrico de potência atual, evitando, desta forma, a construção de novas linhas de transmissão ou subestações. Ao fornecer uma liberdade maior no controle dos fluxos de potência e tensões em pontos específicos da rede, os controladores FACTS diminuíram a quantidade de não-controláveis (ACHA et al., 2004).

Determinar a efetividade desta nova geração de controladores em toda a rede tornou necessária a atualização de muitas ferramentas de análise. Para avaliar o sistema em regime permanente com o uso de controladores FACTS, os métodos baseados em Newton-Raphson continuam a ser os mais populares algoritmos pelos engenheiros devido à sua rápida convergência (ACHA et al., 2004).

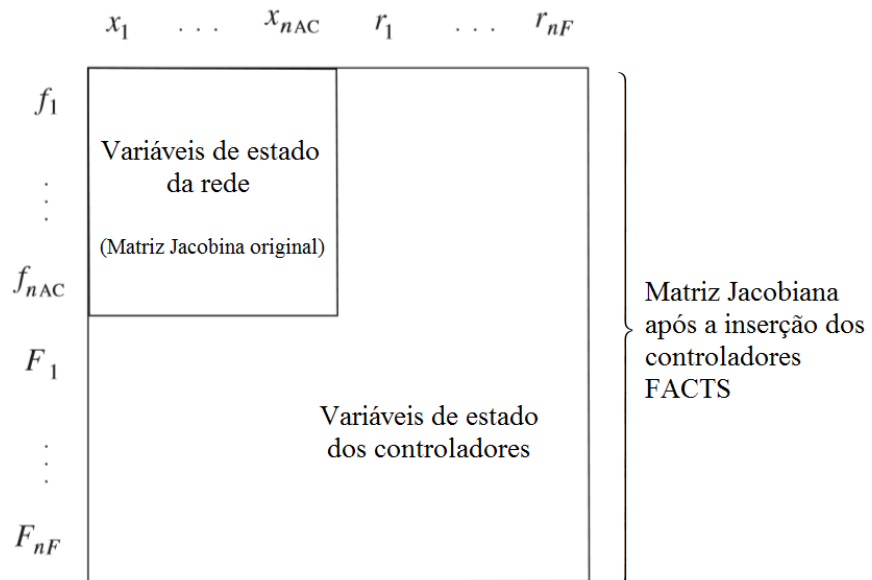
A inclusão dos controladores FACTS aumenta a complexidade da rede e adiciona novas variáveis, linhas e colunas à matriz Jacobiana do sistema de forma proporcional. Ou seja, o tipo e o número de controladores indicam quantas variáveis, linhas e colunas serão adicionadas aos

cálculos matemáticos. O sistema e os controladores FACTS podem ser representados através do seguinte modelo matemático:

$$\begin{aligned} f(X_{nAC}, R_{nF}) &= 0, \\ g(X_{nAC}, R_{nF}) &= 0, \end{aligned} \quad (3.10)$$

Na relação (3.10), f representa as funções do sistema CA e g representa as funções dos controladores adicionados. X_{nAC} simboliza as variáveis de estado da rede (ângulo e magnitude da tensão em cada barra) e R_{nF} representa as variáveis de estado do controlador FACTS. A Figura 20 mostra uma comparação entre as dimensões da matriz Jacobiana original e aquela modificada após a inserção de controladores FACTS.

Figura 20 – Matriz Jacobiana sem e com controladores FACTS.



Fonte: Adaptado de ACHA et al., (2004).

3.5.2 Modelagem do Capacitor Série Controlado a Tiristor

Há dois tipos de modelagem usados em análise de fluxo de carga para representar o TCSC no algoritmo. O primeiro modelo utiliza o conceito de reatância variável a qual é ajustada dentro de seus limites para permitir a passagem de uma quantidade específica de fluxo de potência. O segundo modelo, mais complexo, adiciona a variável de estado do ângulo de disparo às equações do algoritmo de fluxo de carga. Além do mais, como as informações do ângulo estão explícitas, é possível verificar se o TCSC está operando nas regiões de ressonância (FUERTE-ESQUIVEL, ACHA E AMBRIZ-PÉRES, 2000; SAHOO, 2010).

Este trabalho utiliza o primeiro modelo, o da reatância variável, para analisar como a presença do TCSC afeta o fluxo de potência em determinada linha de transmissão do sistema de energia. A modelagem do TCSC usando o ângulo de disparo como variável de estado pode ser verificada em Fuerte-Esquivel, Acha e Ambriz-Péres (2000); Sahoo (2010) e Acha et al. (2004).

O primeiro modelo do Capacitor Série Controlado a Tiristor restringe o fluxo de potência através de uma linha ajustando sua reatância a qual é determinada utilizando o método de Newton-Raphson. A reatância X_{TCSC} representa o valor equivalente de todos os módulos conectados em série que compõe o TCSC, estando este operando na região capacitiva ou na região indutiva como mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Circuito equivalente do TCSC operando na região (a) indutiva e (b) capacitiva.



Fonte: ACHA et al., (2004).

A matriz admitância das variáveis do Capacitor Série Controlado a Tiristor da Figura 20 é dada por:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jB_{kk} & jB_{km} \\ jB_{mk} & jB_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Para operação indutiva, tem-se:

$$\left. \begin{aligned} B_{kk} = B_{mm} &= -\frac{1}{X_{TCSC}}, \\ B_{km} = B_{mk} &= \frac{1}{X_{TCSC}}, \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

E para a operação capacitiva as admitâncias possuem sinais opostos. E as equações para potências ativa e reativa na barra k são:

$$P_k = V_k V_m B_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) \quad (3.13)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (3.14)$$

Para as equações da barra m os subscritos são modificados nas relações (3.13) e (3.14). À matriz Jacobiana no método de Newton-Raphson são adicionadas uma nova linha e uma nova coluna para cada novo TCSC incorporado ao algoritmo. Baseada na Figura 21, onde a reatância regula o fluxo de potência ativa da barra k à barra m , a matriz Jacobiana modificada torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km}^{X_{TCSC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \frac{\Delta X_{TCSC}}{X_{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

O *mismatch* $\Delta P_{km}^{X_{TCSC}}$ obedece à mesma regra dos outros valores do vetor-coluna. Assim, é a diferença entre a potência especificada e a potência calculada no ramo do controlador. Já ΔX_{TCSC} é o valor de correção que se adiciona à reatância do TCSC a cada iteração. O *mismatch*, o incremento e a variável de estado relacionados ao Capacitor Série Controlado a Tiristor são, respectivamente (ACHA et al., 2004):

$$\Delta P_{km}^{X_{TCSC}} = P_{km}^{X_{TCSC}, esp} - P_{km}^{X_{TCSC}, cal} \quad (3.16)$$

$$\Delta X_{TCSC} = X_{TCSC}^{(i)} - X_{TCSC}^{(i-1)} \quad (3.17)$$

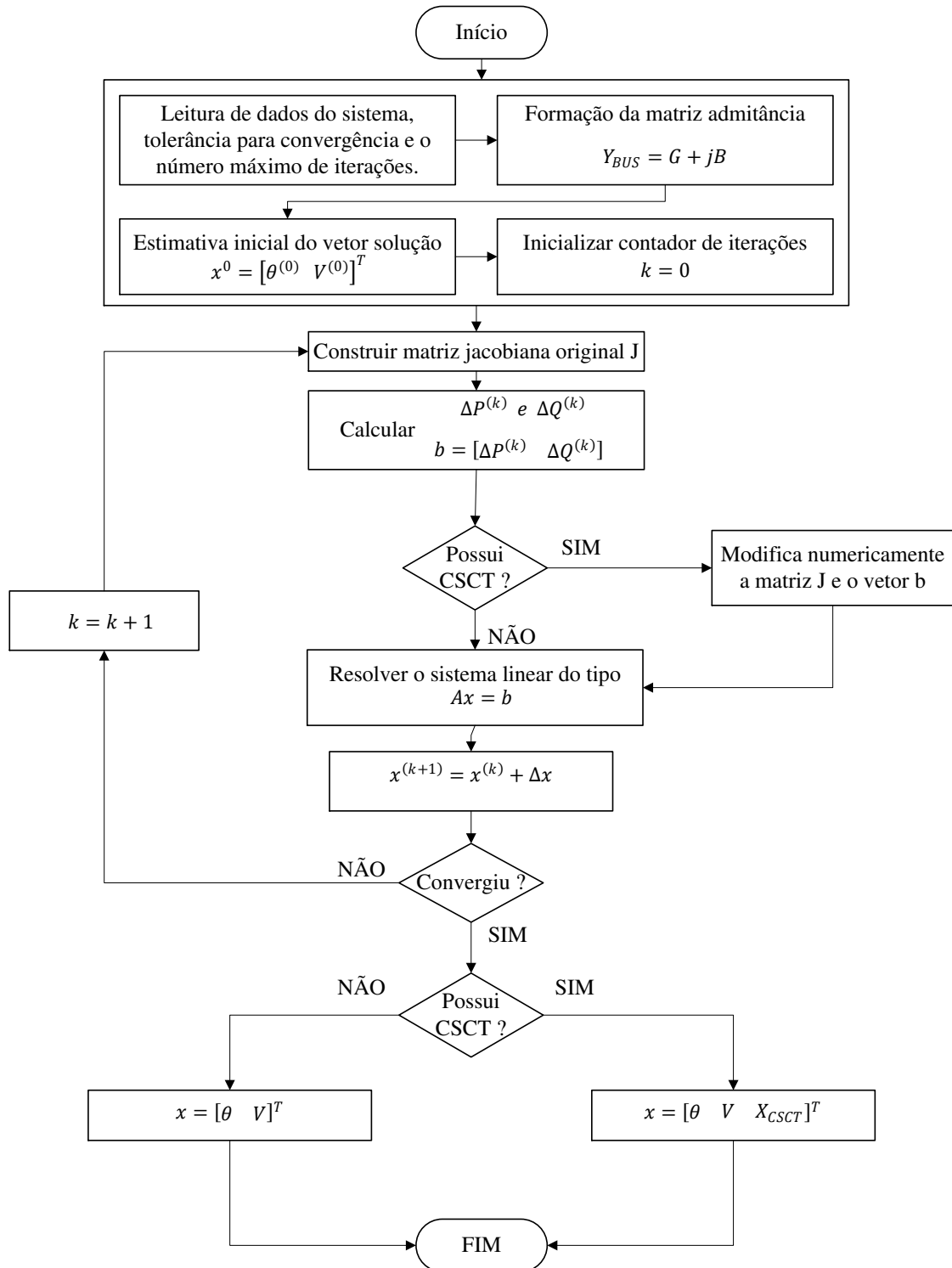
$$X_{TCSC}^{(i)} = X_{TCSC}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta X_{TCSC}}{X_{TCSC}} \right)^{(i)} X_{TCSC}^{(i-1)} \quad (3.18)$$

Os valores de correção ΔV_k , ΔV_m e ΔX_{TCSC} são divididos por V_k , V_m , X_{TCSC} ; para compensar o fato de que alguns termos da matriz Jacobiana estão multiplicados por esses divisores. A razão deste artifício é a simplificação dos cálculos (ACHA et al., 2004). A reatância

do TCSC possui limites máximo e mínimo especificados. O fluxograma do algoritmo de Newton-Raphson com a inclusão do controlador FACTS é apresentado na Figura 22.

$$X_{TCSC,\min} \leq X_{TCSC} \leq X_{TCSC,\max} \quad (3.19)$$

Figura 22 – Fluxograma do método de Newton-Raphson com TCSC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.5.3 Modelagem do Compensador Síncrono Estático

Para o cálculo do fluxo de carga, o STATCOM é adequadamente representado por uma fonte de tensão síncrona com limites máximo e mínimo de tensão. No circuito equivalente, considera-se que a fonte de tensão representa a componente fundamental da série Fourier da forma de tensão chaveada no terminal CA do conversor do Compensador Síncrono Estático (SONG, JOHNS, 1999).

A barra em que o STATCOM é conectado transforma-se de uma barra PQ para uma barra do tipo PVS (barra PV controlada por STATCOM), pois a tensão é especificada. A barra pode voltar a ser do tipo PQ caso os limites sejam violados. Nesse caso, a potência reativa gerada ou absorvida corresponderia ao limite violado. A representação como fonte de tensão é válida para toda a faixa operacional do STATCOM (ACHA et al., 2004).

Para calcular a síntese de potência na barra à qual o STATCOM está conectado, utiliza-se os mesmos métodos e convenções descritos no Capítulo 2. Assim, para a conexão *shunt* da Figura 18, tem-se:

$$E_{vR} = V_{vR} (\cos \delta_{vR} + j \sen \delta_{vR}) \quad (3.20)$$

$$S_{vR} = V_{vR} I_{vR}^* = V_{vR} Y_{vR}^* (V_{vR}^* - V_k^*) \quad (3.21)$$

Após realizar algumas operações e separar a parte real da imaginária, as seguintes equações são obtidas:

$$P_{vR} = V_{vR}^2 G_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sen(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (3.22)$$

$$Q_{vR} = -V_{vR}^2 B_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \sen(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (3.23)$$

Para obter as injeções de potência P_k e Q_k , basta trocar os termos da relação (3.20):

$$S_k = V_k I_k^* = V_k Y_{vR}^* (V_k^* - V_{vR}^*) \quad (3.24)$$

$$P_k = V_k^2 G_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \sen(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (3.25)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \sen(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (3.26)$$

Estas são as equações que serão derivadas para encontrar os valores que compõe a matriz Jacobiana a qual possui a forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{vR} \\ \Delta Q_{vR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial P_{vR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{vR}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{vR}}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial P_{vR}}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_{vR}} V_{vR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \Delta \delta_{vR} \\ \frac{\Delta V_{vR}}{V_{vR}} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

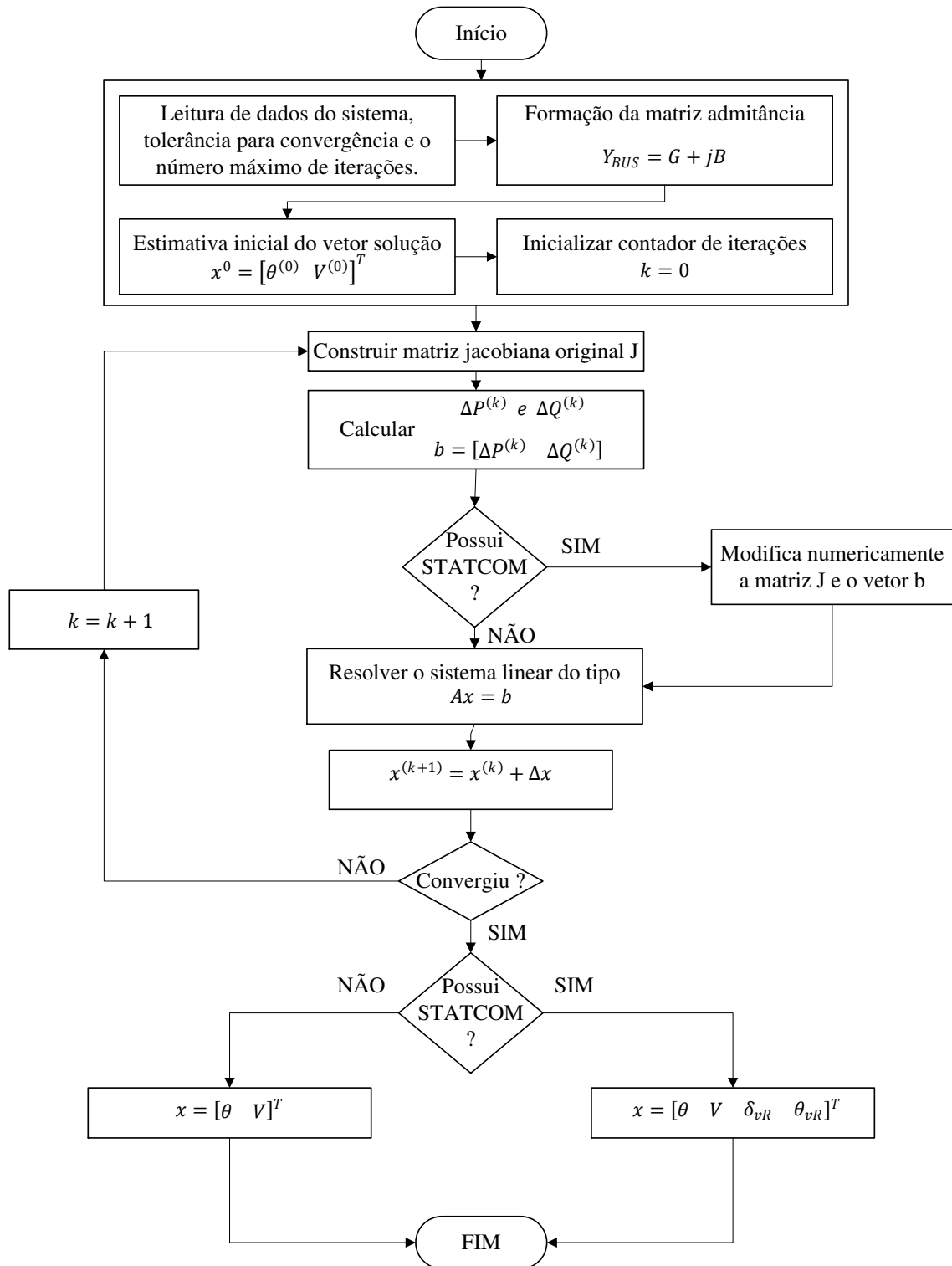
Onde as V_{vR} e δ_{vR} são a magnitude de tensão e o ângulo assim como as variáveis de estado do Compensador Estático (ACHA et al., 2004). O STATCOM possui duas variáveis que possuem limites a serem observados durante a solução do problema do fluxo de carga.

$$V_{vR,\min} \leq V_{vR} \leq V_{vR,\max} \quad (3.28)$$

$$\delta_{vR,\min} \leq \delta_{vR} \leq \delta_{vR,\max} \quad (3.29)$$

O fluxograma do algoritmo do método de Newton-Raphson com a inclusão do Compensador Estático é apresentado na Figura 23:

Figura 23 - Fluxograma do método de Newton-Raphson com STATCOM.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.6 Conclusões

Os controladores FACTS têm sido utilizados com diversos propósitos nos sistemas de energia. Regulação de tensão, controle dos fluxos de potência ativa e reativa, melhoria da qualidade de energia, entre outros. Há controladores cuja compensação é *shunt*, série e outros que utilizam ambas.

O TCSC utiliza a compensação série para modificar a impedância efetiva de uma linha de transmissão e, assim, manter o fluxo de potência ativa em determinado valor especificado. O STATCOM é conectado em *shunt* para que injete ou absorva potência reativa na barra à qual está conectada para que a magnitude da tensão seja mantida em determinado valor especificado.

A inserção de ambos os controladores FACTS na rede resulta em uma modificação da matriz jacobiana, do vetor de *mismatches* e do vetor de correções. Novas variáveis são acrescentadas representando os parâmetros a serem controlados. O método de Newton-Raphson, então, resolve o sistema $Ax = b$.

4 IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES TCSC E STATCOM NO AMBIENTE COMPUTACIONAL MATPOWER

4.1 Introdução

Os capítulos anteriores abordaram a base teórica sobre a formulação do problema do fluxo de carga e sobre noções gerais dos controladores assim como seus modelos para implementação. O presente capítulo apresenta e descreve rotinas utilizadas no ambiente computacional MATPOWER testando-as em diversos sistemas. Informações sobre o software podem ser encontradas em (ZIMMERMAN, MURILLO-SÁNCHEZ, THOMAS, 2011; AKOREDE, 2009).

4.2 Dados do TCSC e do STATCOM

Para a leitura de dados do TCSC e do STATCOM, utiliza-se o mesmo procedimento do MATPOWER para as informações dos geradores, barras e cargas do sistema elétrico de potência. As informações são disponibilizadas em forma de matriz na qual cada coluna representa um parâmetro; a quantidade de linhas representa a quantidade de itens daquele tipo. Por exemplo, a matriz que representa as barras do sistema tem uma coluna com o nome (número), outra coluna para as cargas (se existirem); outra para o tipo de barra e assim até que todas as informações importantes tenham sido fornecidas. Se essa matriz referente às barras do sistema tiver cinco linhas, significa que há cinco barras existentes para o caso utilizado. Entretanto a *struct* de um determinado caso não possui apenas as informações da barra. Há vários campos (dados agrupados em uma *struct*: barras, ramos, geradores, etc.) armazenados dentro do arquivo caso. A *struct* possui o nome de *mpc* e acessa-se seus campos através do modelo *mpc.nome_do_campo*. Assim, para acessar o campo referente às barras do caso, deve-se escrever *mpc.bus*; para os ramos do sistema, deve-se escrever *mpc.branch*, etc. As informações referentes ao Capacitor Série Controlado a Tiristor e ao Compensador Síncrono Estático possuem a mesma forma sendo *mpc.TCSC* e *mpc.STATCOM*, respectivamente.

É importante destacar a coluna no campo do controlador FACTS referente ao *status* do dispositivo no sistema em questão. Esta informação é indispensável, pois seu conhecimento permite saber se o controlador FACTS está desligado ou ligado enquanto o algoritmo do fluxo de carga está sendo executado. Utilizando a lógica binária, o valor 0 significa *status* OFF indicando que o controlador está desligado mesmo com todos os seus dados sendo informados;

e o valor 1 significa *status* ON indicando que o controlador está ligado e, portanto, atuando no sistema sendo incluído nos cálculos do fluxo de carga.

4.2.1 Inserção de dados do TCSC

O campo da *struct* referente às informações do TCSC é formado por uma matriz de onze colunas e é detalhado na Tabela 1. A quantidade de linhas da matriz indica a quantidade de TCSCs presentes no sistema.

Tabela 1 – Colunas da matriz do TCSC na *struct*.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
NTCSC	TCSCNI	TCSCNF	X	Xmin	Xmax	Psp	Flow	ON/ OFF	Nlin	TCSCrec

Em que:

NTCSC	Número de TCSCs;	Psp	Potência ativa a ser especificada
TCSCNI	Barra inicial à qual o TCSC está conectado;	Flow	Direção do fluxo de potência. 1 = da barra de origem à barra receptora; -1 = direção oposta;
TCSCNF	Barra final à qual o TCSC está conectado;	ON/OFF	Status do TCSC. 1 = ON e 0 = OFF;
X	Valor inicial da reatância do TCSC;	Nlin	Indica o ramo ao qual o TCSC está conectado;
Xmin	Limite mínimo da reatância do TCSC;	TCSCrec	Variável para a inserção da nova barra.
Xmax	Limite máximo da reatância do TCSC;		

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.2.2 Inserção dos dados do STATCOM

Assim como os dados do TCSC, as informações do STATCOM também são apresentadas em uma matriz de onze colunas. A Tabela 2 apresenta as informações contidas na *struct* referentes ao STATCOM.

Tabela 2 – Colunas da matriz do STATCOM na *struct*.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
BARRSTA	Vsp	Vsh	Thst	Gsh	Bsh	Vshmax	Vshmin	Thstmax	Thstmin	ON/OFF

Em que:

BARRSTA	Barra à qual o STATCOM está conectado;	Vshmax	Limite máximo de tensão do STATCOM;
Vsp	Tensão nodal controlada (pu);	Vshmin	Limite mínimo de tensão do STATCOM;
Vsh	Tensão inicial do STATCOM;	Thstmax	Limite máximo de ângulo do STATCOM;
Thst	Ângulo inicial do STATCOM;	Thstmin	Limite mínimo de ângulo do STATCOM;
Gsh	Condutância do STATCOM;	ON/OFF	Status do STATCOM. 1 = ON e 0 = OFF.
Bsh	Susceptância do STATCOM;		

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.2.3 Leitura dos dados dos controladores

Antes da aplicação do método de Newton-Raphson, uma função implementada na principal função do MATPOWER (*runpf*) verifica a existência de STATCOMs ou TCSCs. A Figura 24 apresenta a função que carrega os dados do caso e a que verifica a presença dos controladores FACTS,

Figura 24 – Funções de leitura do caso e verificação da existência de controladores FACTS.

```

%% Leitura de dados do arquivo
mpc = loadcase(casedata);

%%VERIFICAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE STATCOM OU TCSC
[facts,vectorTCSC,date_STATCOM]=STATCOM_TCSC_Test(mpc);

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3 Função associada ao método de Newton-Raphson

A função `runpf` é responsável por acionar a função `newtonpf` que contém as funções e rotinas que solucionam o problema do fluxo de carga pelo método de Newton-Raphson. Uma nova variável de entrada, denominada `facts`, foi incluída para representar a presença ou ausência de controladores FACTS. A função descrita na seção 4.2 fornece os valores de saídas de três variáveis que são utilizadas na função `newtonpf`. Com base no valor de saída da variável `facts`, 0 ou 1, o programa segue comandos específicos executando funções e rotinas que operam, ou não, com a presença do TCSC ou do STATCOM. A Figura 25 ilustra a condição para que a função `newtonpf` seja escolhida. A Figura 26 apresenta a função `newtonpf` com suas variáveis de entrada e saída.

Figura 25 – O caso `newtonpf` na função `runpf`.

```

%% run the power flow
switch alg
    case 'NR'
        [V, success, iterations] = newtonpf(Ybus, Sbus, V0, ref, pv, pq, ...
            mpopt,date_STATCOM,vectorTCSC, facts);

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 26 – As entradas e saídas da função `newtonpf`.

```

function [V, converged, i] = newtonpf(Ybus, Sbus, V0, ref, pv, pq, ...
    mpopt,date_STATCOM,vectorTCSC, facts)
%%NEWTONPF Solves the power flow using a full Newton's method.

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.1 Definição e carregamento dos dados do controlador FACTS

O primeiro comando lógico da função do método de Newton-Raphson utiliza o *flag* da variável `facts`. Caso o valor seja 1, indicando que há controlador(es) ativo(s) no arquivo teste, a função `newtonpf` executa a rotina `Exist_Load_TCSC_STATCOM` dentro do trecho

condicional que verifica qual controlador está atuando no sistema (TCSC ou STATCOM) e realiza o carregamento dos respectivos dados acessando a *struct*. Caso o *flag* tenha valor igual a 0, então a função *newtonpf* não executa o que há dentro do trecho condicional. A Figura 27 apresenta a rotina e a matriz *Ybus* sendo separada em partes real e imaginária.

Figura 27 – Carregamento do controlador atuante caso exista e separação da matriz *Ybus*.

```

%%Verificação de controladores FACTS no sistema. Carregar os dados daquele
%%que existir e estiver com status ON
if facts
    Exist_Load_TCSC_STATCOM;
end
%Separação da matriz Ybus em matriz de condutâncias e matriz de
%susceptâncias
YR=real(Ybus);      %Matriz de condutâncias
YI=imag(Ybus);     %Matriz de susceptâncias

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.2 Cálculo dos mismatches

Após o cálculo do valor inicial do *mismatch* na primeira linha de comando da Figura 28, as contribuições iniciais dos controladores FACTS são adicionadas às potências das barras através das rotinas *STATCOM_Mismatches_Fx0* e *TCSC_Mismatches_Fx0*. Estas rotinas também adicionam ao vetor de *mismatches* os termos ΔP_{vR} e ΔQ_{vR} caso o controlador FACTS em estado ON seja um STATCOM; e ΔP_{km}^{XTCSC} caso seja um TCSC.

Figura 28 – Acréscimo das contribuições e *mismatches* dos controladores FACTS.

```

%% CALCULAR F(x0)
%%CÁLCULO DO MISMATCH DE POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS - CASO CONVENCIONAL
mis = V .* conj(Ybus * V) - Sbus(Vm);
%CONTRIBUIÇÃO DO CONTROLADOR FACTS AO MISMATCH
if facts
    STATCOM_Mismatches_Fx0;
    TCSC_Mismatches_Fx0;
else
    F = [ real(mis([pv; pq]));
         imag(mis(pq)) ];
end

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.3 Matriz Jacobiana

Após o cálculo dos *mismatches* e o acréscimo das contribuições do controlador FACTS com status ON, há um laço *while* que é executado enquanto não ocorrer a convergência e o número de iterações estiver abaixo do limite máximo. A matriz Jacobiana é calculada e as rotinas específicas *Jacobian_TCSC* e *Jacobian_STATCOM* a modificam com base no controlador FACTS ativo. A Figura 29 mostra os comandos e rotinas executados nessa parte da função *newtonpf*.

Figura 29 – Comandos e rotinas para a montagem da matriz Jacobiana e sua modificação.

```

while (~converged && i < max_it)
    %% Atualização do número de iterações
    i = i + 1;

    %% Criação da matriz Jacobiana
    [dSbus_dVm, dSbus_dVa] = dSbus_dV(Ybus, V);

    j11 = real(dSbus_dVa([pv; pq], [pv; pq]));
    j12 = real(dSbus_dVm([pv; pq], pq));
    j21 = imag(dSbus_dVa(pq, [pv; pq]));
    j22 = imag(dSbus_dVm(pq, pq));

    J = [    j11 j12;
          j21 j22;    ];

    %% Modificação da matriz Jacobiana com a inclusão de FACTS
    if facts
        Jacobian_TCSC;
        Jacobian_STATCOM;
    end

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.4 Resolução do sistema linear

Definidos a matriz Jacobiana e o vetor de *mismatches*, calcula-se o vetor de correção, ou seja, resolve-se o sistema $Ax=b$. Utiliza-se o *backslash* que resolve o sistema de forma direta e é representado pelo operador “\”. Devido à inserção dos controladores FACTS no sistema, desenvolveu-se a rotina *FACTS_Ax_b*, mostrada na Figura 30, que também utiliza o solucionador do programa original do MATPOWER.

Figura 30 – Atualização das variáveis de estado do sistema e do controlador.

```

%% Resolução de Ax=b
dx = -(J \ F);
if facts
    FACTS_Ax_b;
end

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.5 Atualização das variáveis de estado do sistema e dos parâmetros dos controladores

Após a solução do sistema linear, os parâmetros dos controladores e as variáveis de estado do sistema são atualizados. As rotinas `updating_TCSC` e `updating_STATCOM` apresentadas na Figura 31 atualizam os parâmetros na presença do TCSC e do STATCOM, respectivamente. Dentro das rotinas há sub-rotinas específicas que verificam os limites dos parâmetros do controlador FACTS ao qual estão associadas.

Figura 31 – Atualização das variáveis de estado e dos parâmetros dos controladores.

```

%% Atualização das variáveis do sistema, do TCSC e do STATCOM
if facts
    updating_TCSC;
    updating_STATCOM;
else
    if npv
        Va(pv) = Va(pv) + dx(j1:j2);
    end
    if npq
        Va(pq) = Va(pq) + dx(j3:j4);
        Vm(pq) = Vm(pq) + dx(j5:j6);
    end
end

end

%%
V = Vm .* exp(1j * Va);
format long
Vm = abs(V);           %% atualiza Vm e Va de novo no caso
Va = angle(V);        %%we wrapped around with a negative Vm
format short

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.6 Cálculo dos *mismatches* ao final da iteração

Após a atualização das variáveis e dos parâmetros dos controladores, os *mismatches* são novamente calculados ao final da iteração para que o teste de tolerância seja feito. As rotinas

STATCOM_Mismatches_Fx e TCSC_Mismatches_Fx (Figura 32) foram desenvolvidas para realizar esta operação.

Figura 32 – Cálculo dos mismatches para o teste de tolerância.

```

%% Calcular F(x)
mis = V .* conj(Ybus * V) - Sbus(Vm);

%% CÁLCULO DO MISMATCH COM O CONTROLADOR FACTS
if facts
    STATCOM_Mismatches_Fx;
    TCSC_Mismatches_Fx;
else
    F = [ real(mis([pv; pq]));
         imag(mis(pq)) ];
end

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.7 Impressão dos resultados

Calculados os *mismatches*, verifica-se a convergência do sistema. Atingida a convergência ou ultrapassado o limite de iterações, as informações dos controladores FACTS são impressas através das funções `print_STATCOM` e `print_TCSC` apresentadas na Figura 33.

Figura 33 – Impressão dos resultados.

```

%% check for convergence
normF = norm(F, inf); %A função norm calcula a raiz quadrada da soma dos quadrados.
if mpopt.verbose > 1
    fprintf('\n%3d      %10.3e', i, normF);
end
if normF < tol
    converged = 1;
    if mpopt.verbose
        fprintf('\nNewton's method power flow converged in %d iterations.\n', i);
    end
end
end

if mpopt.verbose
    if ~converged
        fprintf('\nNewton's method power flow did not converge in %d iterations.\n', i);
    end
end

%% Impressão de dados
if facts
    print_STATCOM;
    print_TCSC;
end

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.4 Experimentos numéricos

4.4.1 Introdução

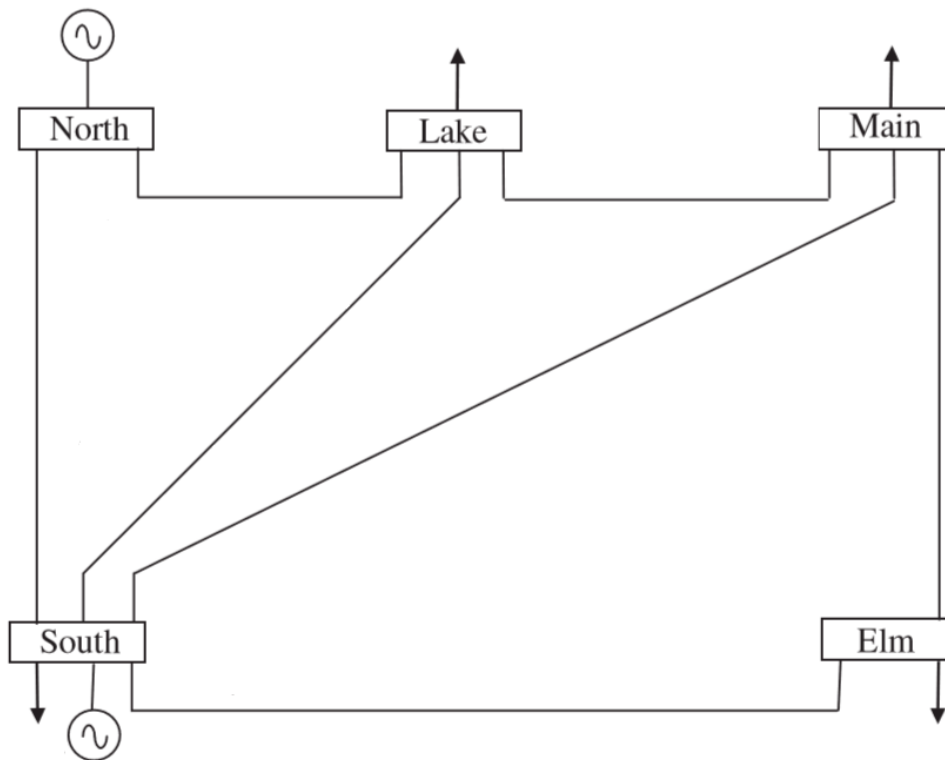
Esta seção apresenta os resultados dos experimentos numéricos dos estudos do fluxo de carga no programa computacional MATPOWER para os casos convencionais (sem TCSC ou STATCOM) e para os casos com os controladores FACTS abordados anteriormente. O limite de tolerância dos *mismatches* (ΔP e ΔQ) e número máximo de iterações são estabelecidos em 10^{-5} e 20, respectivamente. É importante salientar que a alocação e ajustes ótimos dos parâmetros de controladores FACTS não se configuram como uma tarefa fácil, não sendo objetivos deste trabalho. O escopo da monografia é avaliar o controle do fluxo de potência ativa com a inclusão do TCSC e a regulação de tensão com o uso do STATCOM.

4.4.2 Sistema de 5 barras

4.4.2.1 Caso-base

O objetivo deste experimento é corroborar os modelos de TCSC e STATCOM implementados no MATPOWER para o fluxo de carga. Para essa finalidade, utiliza-se o sistema de 5 barras disponível em (ACHA et al., 2004), o qual é apresentado na Figura 34. A barra *North* é classificada como *slack*, a barra *South* é como PV e as outras como barras PQ. A tolerância dos limites de tensão é de $\pm 6\%$. O fluxo de carga do caso-base é executado e o resultado está exposto nas Tabelas 3 e 4. Percebe-se que as tensões nodais permanecem dentro dos limites estabelecidos. O maior fluxo de potência ocorre na linha de transmissão entre a barra *slack* e a barra PV onde 89,33 MW e 74 MVar saem de *North*; e 86,85 MW e 72,91 MVar chegam a *South* mostrando que o gerador da barra PV absorve uma grande quantidade de potência reativa da rede.

Figura 34 – Sistema de 5 barras.



Fonte: Acha et al. (2004).

Tabela 3 – Informações das barras do caso-base.

Barra	Tensão		Geração		Carga	
	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
<i>North</i>	1,060	0,000	131,12	90,82	-	-
<i>South</i>	1,000	-2,061	40,00	-61,59	20,00	10,00
<i>Lake</i>	0,987	-4,637	-	-	45,00	15,00
<i>Main</i>	0,984	-4,957	-	-	40,00	5,00
<i>Elm</i>	0,972	-5,765	-	-	60,00	10,00
Total			171,12	29,22	165,00	40,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 4 – Fluxos de potência do caso-base.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)		Injeção de potência (barra receptora)		Perdas	
			P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	<i>North</i>	<i>South</i>	89,33	74,00	-86,85	-72,91	2,486	7,46

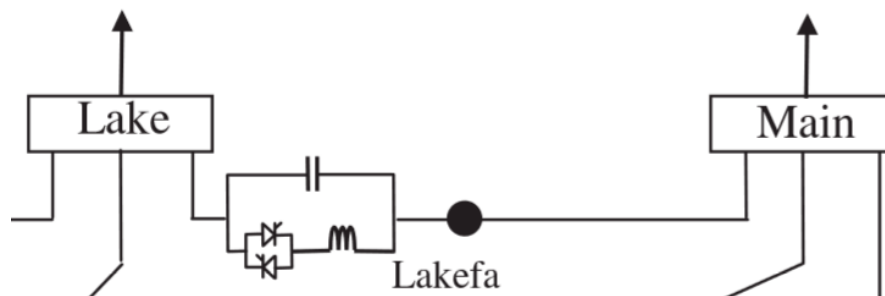
2	<i>North</i>	<i>Lake</i>	41,79	16,82	-42,27	-17,51	1,518	4,55	
3	<i>South</i>	<i>Lake</i>	24,47	-2,52	-24,11	-0,35	0,360	1,08	
4	<i>South</i>	<i>Main</i>	27,71	-1,72	-27,25	-0,83	0,461	1,38	
5	<i>South</i>	<i>Elm</i>	54,66	5,56	-53,44	-4,83	1,215	3,65	
6	<i>Lake</i>	<i>Main</i>	19,39	2,86	-19,35	-4,69	0,040	0,12	
7	<i>Main</i>	<i>Elm</i>	6,60	0,52	-6,56	-5,17	0,043	0,13	
							-	-	
							Total	6.122	18.37

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.4.2.2 Sistema de 5 barras: Inclusão do TCSC

Um controlador TCSC é inserido entre as barras *Lake* e *Main* para manter o fluxo de potência ativa em 21 MW na linha de transmissão. Uma barra extra *Lakefa* é criada para que se conecte o TCSC ao sistema como mostrado na Figura 35. As Tabelas 5 e 6 expõem os valores das barras e dos ramos do sistema, respectivamente. A Tabela 7 apresenta os parâmetros do TCSC após a convergência. Os dados fornecidos por (ACHA et al., 2004) são apresentados nas colunas e linha em branco e os dados obtidos no MATPOWER nas colunas e linha em cinza.

Figura 35 – Inclusão do TCSC no sistema de 5 barras.



Fonte: ACHA et al. (2004)

Tabela 5 – Informações das barras do sistema de 5 barras com TCSC.

Barra	Tensão				Geração				Carga			
	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
<i>North</i>	1,060	1,060	0,000	0,000	131,12	131,13	90,93	90,94	-	-	-	-
<i>South</i>	1,000	1,000	-2,040	-2,038	40,00	40,00	-61,80	-61,80	20,00	20,00	10,00	10,00
<i>Lake</i>	0,987	0,987	-4,720	-4,727	-	-	-	-	45,00	45,00	15,00	15,00
<i>Main</i>	0,984	0,984	-4,810	-4,811	-	-	-	-	40,00	40,00	5,00	5,00
<i>Elm</i>	0,972	0,972	-5,700	-5,701	-	-	-	-	60,00	60,00	10,00	10,00
<i>Lakefa</i>	0,988	0,988	-4,460	-4,461	-	-	-	-	-	-	-	-
Total:					171,12	171,13	29,13	29,14	165,00	165,00	40,00	40,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 6 – Informações dos ramos do sistema de 5 barras com TCSC.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)				Injeção de potência (barra receptora)				Perdas (ZI ²)			
			P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
1	<i>North</i>	<i>South</i>	88,68	88,68	74,20	74,19	-86,21	-86,21	-73,20	-73,15	2,470	2,470	7,46	7,41
2	<i>North</i>	<i>Lake</i>	42,40	42,45	16,70	16,75	-40,90	-40,89	-17,30	-17,33	1,500	1,555	4,55	4,67
3	<i>South</i>	<i>Lake</i>	25,50	25,50	-2,70	-2,69	-25,10	-25,11	-0,08	-0,08	0,400	0,390	1,08	1,17
4	<i>South</i>	<i>Main</i>	26,60	26,61	-1,56	-1,57	-26,20	-26,18	-1,09	-1,10	0,400	0,425	1,38	1,27
5	<i>South</i>	<i>Elm</i>	54,10	54,11	5,60	5,61	-52,92	-52,91	-4,90	-4,95	1,180	1,191	3,65	3,57
6	<i>Lakefa</i>	<i>Main</i>	21,00	21,00	2,51	2,51	-20,90	-20,95	-4,31	-4,32	0,100	0,046	0,12	0,14
7	<i>Main</i>	<i>Elm</i>	7,13	7,13	0,41	0,41	-7,08	-7,09	-5,05	-5,05	0,050	0,049	0,13	0,15
Total:											6,110	6,127	18,37	18,38

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Parâmetros do TCSC após a convergência.

Barra inicial	Barra final	X_{TCSC} (pu)	α (°)	k (%)
<i>Lake</i>	<i>Main</i>	-0,0216	148,66	72%
<i>Lake</i>	<i>Main</i>	-0,0216	148,4295	72%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando-se as Tabelas 5, 6 e 7, percebe-se que a magnitude das tensões e os fluxos de potência reativa não têm mudanças significativas comparando o caso convencional e o caso com TCSC. Além do mais, verifica-se que para aumentar o fluxo de potência que sai da barra *Lake* de 19,39 MW para 21 MW o TCSC atinge 72% de grau de compensação. Ou seja, k possui um valor consideravelmente alto para aumentar em apenas 8,2% o fluxo de potência ativa naquela linha de transmissão.

4.4.2.3 Sistema de 5 barras: Inclusão do STATCOM

Um STATCOM é conectado à barra *Lake* para a regulação de tensão como mostrado na Figura 36. Os resultados obtidos são evidenciados nas Tabelas 8 e 9. Os parâmetros do STATCOM após a convergência são apresentados na Tabela 10.

Figura 36 – Inclusão do STATCOM no sistema de 5 barras.



Fonte: ACHA et al. (2004).

Tabela 8 – Informações das barras do sistema de 5 barras com STATCOM.

Barra	Tensão				Geração				Carga			
	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
<i>North</i>	1,060	1,060	0,000	0,000	131,12	131,06	85,40	85,34	-	-	-	-
<i>South</i>	1,000	1,000	-2,050	-2,053	40,00	40,00	-78,10	-77,07	20,00	20,00	10,00	10,00
<i>Lake</i>	1,000	1,000	-4,830	-4,838	-	-	-	-	45,00	45,00	15,00	15,00
<i>Main</i>	0,994	0,984	-5,110	-5,107	-	-	-	-	40,00	40,00	5,00	5,00
<i>Elm</i>	0,975	0,975	-5,800	-5,797	-	-	-	-	60,00	60,00	10,00	10,00
Total:					171,12	171,06	7,30	8,27	165,00	165,00	40,00	40,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Informações dos ramos do sistema de 5 barras com STATCOM.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)				Injeção de potência (barra receptora)				Perdas (ZI^2)			
			P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
1	<i>North</i>	<i>South</i>	89,20	89,11	74,10	74,06	-86,60	-86,63	-74,00	-72,99	2,600	2,481	7,46	7,44
2	<i>North</i>	<i>Lake</i>	41,92	41,95	11,30	11,28	-40,54	-40,55	-12,40	-12,41	1,380	1,394	4,25	4,18
3	<i>South</i>	<i>Lake</i>	24,50	24,49	-9,50	-9,51	-24,10	-24,09	6,70	6,69	0,400	0,394	1,15	1,18
4	<i>South</i>	<i>Main</i>	27,60	27,66	-7,30	-7,32	-27,20	-27,18	4,70	4,77	0,400	0,476	1,42	1,43
5	<i>South</i>	<i>Elm</i>	54,50	54,48	2,70	2,75	-53,30	-53,29	-2,10	-2,09	1,200	1,195	3,61	3,58
6	<i>Lake</i>	<i>Main</i>	19,64	19,65	11,20	11,19	-19,60	-19,59	-14,00	-13,02	0,040	0,053	0,14	0,16
7	<i>Main</i>	<i>Elm</i>	6,80	6,78	4,3	3,25	-6,78	-6,71	-7,90	-7,91	0,020	0,064	0,16	0,19
Total:											6,040	6,056	18,19	18,17

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 10 – Parâmetros do STATCOM após a convergência.

Barra do STATCOM	Vsh (p.u.)	Thst (°)	Vsp (p.u.)	Q (MVAr)
<i>Lake</i>	1,0205	-4,8300	1,000	-20,5
<i>Lake</i>	1,0205	-4,8379	1,000	-20,47

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O STATCOM implementado no MATPOWER é capaz de manter a tensão em 1 pu com resultados do fluxo de carga apresentando concordância com os encontrados em (ACHA et al., 2004).

4.4.3 Sistema de 30 barras

Esta simulação tem como objetivo analisar o comportamento do TCSC e do STATCOM comparando o resultado do caso convencional com aquele onde há operação do TCSC e do STATCOM. Dados deste sistema podem ser encontrados na *homepage* do programa do MATPOWER (<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>) (ZIMMERMAN et al., 2017; ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011).

4.4.3.1 Sistema de 30 barras: Inclusão do TCSC

O sistema de 30 barras possui 5 barras PV, 24 barras PQ, 6 geradores e 41 ramos. Um TCSC é alocado entre as barras 10 e 20 para manter o fluxo de potência ativa entre ambas em 7,50 MW. O valor inicial da reatância do controlador é $X_{TCSC} = -0,015$ pu e a do ramo é $X_{km} = 0,21$ pu. A Tabela 11 apresenta os parâmetros de entrada do TCSC. As Tabelas 11 e 12 mostram as informações das barras e dos ramos às quais o controlador está conectado, respectivamente. As colunas e linha em cinza indicam os valores das barras e ramos com o TCSC e as colunas e linha em branco apresentam os valores sem controlador FACTS. Finalmente, a Tabela 14 mostra os parâmetros do TCSC após a convergência.

Tabela 11 – Parâmetros de entrada do TCSC para o sistema de 30 barras.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
NTCSC	TCSCNI	TCSCNF	X (pu.)	Xmin (pu)	Xmax (pu)	Psp (pu)	Flow	ON/OFF	Nlin	TCSCrec
1	10	20	-0,015	-0,12	0,12	0,075	1	1	25	31

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 12 – Valores das barras do sistema de 30 barras após a convergência com e sem TCSC.

Barra	Tensão				Geração				Carga			
	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
10	0,984	0,985	-3,375	-2,929	-	-	-	-	5,80	5,84	2,00	2,01
20	0,969	0,973	-3,871	-3,156	-	-	-	-	2,20	2,22	0,70	0,70
31	-	0,989	-	-2,471	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 13 – Valores dos ramos do sistema de 30 barras após a convergência com e sem TCSC.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)		Injeção de potência (barra receptora)		Perdas	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
25	10	20	5,92	4,62	-5,86	-4,50	0,052	0,120
25	31	20	7,50	4,70	-7,43	-4,54	0,072	0,170

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 14 – Parâmetros do TCSC do sistema de 30 barras após a convergência.

Barra inicial	Barra final	X_{TCSC} (pu)	α (°)	k (%)
10	20	-0,1040	143,6086	49,52%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com TCSC Sem TCSC

O fluxo de potência ativa do ramo 25 atingiu a magnitude de 7,50 MW (aumento de 26,7%) com quase 50% de grau de compensação. O TCSC pouco afetou a magnitude das tensões nas barras às quais está conectado. As perdas totais pouco se alteraram, pois o TCSC tem apenas a função de controlar o fluxo de potência ativa.

4.4.3.2 Sistema de 30 barras: Inclusão do STATCOM

Desconecta-se o TCSC do sistema de 30 barras, e conecta-se o STATCOM para a análise. A Tabela 15 apresenta os dados de entrada do STATCOM no algoritmo de fluxo de carga. Percebe-se que os limites do ângulo do controlador permitem a operação em qualquer quadrante. A magnitude de tensão tem tolerância de $\pm 5\%$. Os resultados do caso-convencional mostram que seis barras apresentam nível de tensão abaixo de 0,97 pu sendo a barra 8 a que apresenta o pior perfil. Um STATCOM é conectado à barra 8 para manter o nível de tensão em 1 pu. Após a convergência, as informações das barras e dos ramos diretamente influenciados pela presença do controlador são fornecidas nas Tabelas 16 e 17. A Tabela 18 exhibe os parâmetros do STATCOM ao fim do fluxo de carga. As colunas em branco apresentam as informações na ausência do controlador e as colunas em cinza quando o STATCOM está operando.

Tabela 15 – Parâmetros de entrada do STATCOM no sistema de 30 barras.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
BARRSTA	V _{sp} (pu)	V _{sh} (pu)	Th _{st} (°)	G _{sh} (pu)	B _{sh} (pu)	V _{shmax} (pu)	V _{shmin} (pu)	Th _{stmax} (°)	Th _{stmin} (°)	ON/ OFF
8	1	1	0	0	-10	1,05	0,95	180	-180	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 16 - Valores das barras do sistema de 30 barras após a convergência com e sem STATCOM.

Barra	Tensão				Geração				Carga			
	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
8	0,961	1	-2,726	-3,271	-	-	-	-	30,00	30,00	30,00	30,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 17 - Valores dos ramos do sistema de 30 barras após a convergência com e sem STATCOM.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)				Injeção de potência (barra receptora)				Perdas (ZI^2)			
			P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
10	6	8	24,82	24,99	24,43	-17,70	-24,69	-24,90	-23,92	18,07	0,128	0,095	0,51	0,38
40	8	28	-5,31	-5,10	-6,08	1,48	5,34	5,12	4,33	-3,42	0,036	0,019	0,12	0,06

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 18 – Parâmetros do STATCOM no sistema de 30 barras após a convergência.

Barra do STATCOM	Vsh (pu)	Thst (°)	Vsp (pu)	Q (MVar)
8	1,0496	-3,271	1	-52,01

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com STATCOM Sem STATCOM

O STATCOM fornece 52,01 MVar à barra 8. O fluxo de potência reativa da barra 6 à barra 8 não só diminuiu como teve seu sentido invertido. Na presença do STATCOM, a barra 8 fornece potência reativa à barra 6 e à barra 28. O controlador mantém a tensão em 1 pu no ponto desejado e os ângulos da barra e do STATCOM são iguais, pois não há fluxo de potência ativa entre ambos. As perdas ativas totais de 2,444 MW do caso-convencional têm uma queda de 10,5% com a inclusão do STATCOM enquanto as perdas reativas totais de 8,99 MVar do caso-convencional caem 11,34%.

4.4.4 Sistema de 57 barras: STATCOM

Esta simulação tem como objetivo avaliar a operação do STATCOM em um sistema-teste com 6 barras PV, 50 barras PQ, 7 geradores e 80 ramos disponível na *homepage* do programa do MATPOWER (<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>) (ZIMMERMAN et al., 2017; ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011). O caso-convencional é modificado para incluir um STATCOM conectado à barra 31, que possui a menor tensão, com o objetivo de manter a tensão em 1 pu naquele ponto. A Tabela 19 apresenta os dados de entrada do STATCOM. As Tabelas 20 e 21 evidenciam as barras e ramos diretamente afetados pela presença do controlador com o mesmo atuando ou não. As colunas em branco informam os valores sem a compensação *shunt* e as colunas em cinza os fornecem com STATCOM em operação. A Tabela 22 apresenta os parâmetros de saída do controlador.

Tabela 19 – Parâmetros de entrada do STATCOM no sistema de 57 barras.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
BARRSTA	Vsp (pu)	Vsh (pu)	Thst (°)	Gsh (pu)	Bsh (pu)	Vshmax (pu)	Vshmin (pu)	Thstmax (°)	Thstmin (°)	ON/ OFF
31	1	1,0004	-16,7884	0	-10	1,1	0,9	180	-180	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 20 - Valores das barras do sistema de 57 barras após a convergência com e sem STATCOM.

Barra	Tensão				Geração				Carga				
	#	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
31		0,936	1,000	-19,384	-20,217	-	-	-	-	5,80	5,80	2,90	2,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 21 – Valores dos ramos do sistema de 57 barras após a convergência com e sem STATCOM.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)				Injeção de potência (barra receptora)				Perdas (ZI ²)			
			P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
43	30	31	3,85	3,83	2,66	-0,93	-3,77	-3,78	-2,55	1,01	0,077	0,050	0,12	0,08
44	31	32	-2,03	-2,02	-0,35	2,50	2,05	-2,07	0,39	-2,42	0,025	0,052	0,04	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 22 – Parâmetros do STATCOM no sistema de 57 barras após a convergência.

Barra do STATCOM	Vsh (pu)	Thst (°)	Vsp (pu)	Q (MVar)
8	1,0064	-20,217	1,00	-6,41

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com STATCOM Sem STATCOM

O STATCOM mantém a tensão na barra 31 em 1 pu fornecendo 6,41 MVar de potência reativa. As perdas ativas e reativas totais diminuem de 27,864 MW e 121,67 MVar (sem STATCOM) para 27,526 MW e 120,45 MVar (com o controlador). O fluxo de potência ativa praticamente não é alterado com a presença do STATCOM.

4.4.5 Sistema de 118 barras: TCSC

Esta simulação tem como objetivo avaliar a operação do TCSC em um sistema-teste com 53 barras PV, 64 barras PQ, 54 geradores e 186 ramos disponível na *homepage* do programa do MATPOWER (<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>) (ZIMMERMAN et al., 2017; ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011). O caso-convencional foi modificado para incluir um TCSC entre as barras 5 e 11 para manter o fluxo de potência ativa em 90 MW. O valor de reatância da linha é $X_{km} = 0,0682$ pu. A Tabela 23 evidencia os dados de entrada do TCSC. As Tabelas 24 e 25 mostram as informações das barras e dos ramos antes e depois da inserção do controlador. A Tabela 26 apresenta os parâmetros do TCSC após a convergência do sistema-teste. As colunas e linha em cinza representam os valores com o controlador, as colunas e linha em branco representam os valores do caso-convencional.

Tabela 23 – Parâmetros de entrada do TCSC para o sistema de 118 barras.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
NTCSC	TCSCNI	TCSCNF	X (pu)	Xmin (pu)	Xmax (pu)	Psp (pu)	Flow	ON/OFF	Nlin	TCSCrec
1	5	11	-0,015	-0,07	0,07	0,90	1	1	11	119

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 24 – Valores das barras do sistema de 118 barras após a convergência com e sem TCSC.

Barra	Tensão				Geração				Carga				
	#	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
5	1,002	1,002	16,019	17,051	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	0,985	0,985	13,006	14,114	-	-	-	-	70,00	70,00	23,00	23,00	
119	-	1,002	-	17,659	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 25 – Valores dos ramos do sistema de 118 barras após a convergência com e sem TCSC.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)		Injeção de potência (barra receptora)		Perdas	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
11	5	11	77,22	2,97	-76,02	-0,62	1,209	4,06
11	119	11	90,00	0,72	-88,36	3,06	1,637	5,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 26 – Parâmetros do TCSC do sistema de 118 barras após a convergência.

Barra inicial	Barra final	X_{TCSC} (pu)	α (°)	k (%)
5	11	-0,0118	154,50	17,30%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com TCSC Sem TCSC

Observa-se que o TCSC consegue atender às exigências com um grau de compensação de 17,30% da linha de transmissão à qual foi conectado. O TCSC não altera a magnitude de tensão das barras 5 e 11 como esperado.

4.4.6 Sistema de 300 barras: TCSC

Esta simulação tem como objetivo avaliar a operação do TCSC em um sistema-teste com 68 barras PV, 231 barras PQ, 69 geradores e 411 ramos disponível na *homepage* do programa do MATPOWER (<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>) (ZIMMERMAN et al., 2017; ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011). O caso-convencional é modificado para incluir um TCSC com o objetivo de manter o fluxo de potência em 57 MW o fluxo que sai da barra 148 para a barra 179. O valor da reatância da linha é $X_{km} = 0,3919$ pu. A Tabela 27 evidencia os dados de entrada do TCSC. As Tabelas 28 e 29 mostram as informações das barras e dos ramos antes e depois da inserção do controlador. A Tabela 30 apresenta os parâmetros do TCSC após a convergência do sistema-teste. As colunas e linha em branco representam os valores sem o controlador, as colunas e linha em cinza representam os valores com o TCSC.

Tabela 27 – Parâmetros de entrada do TCSC para o sistema de 300 barras.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
NTCSC	TCSCNI	TCSCNF	X (pu)	Xmin (pu)	Xmax (pu)	Psp (pu)	Flow	ON/OFF	Nlin	TCSCrec
1	148	179	-0,015	-0,25	0,25	0,57	1	1	233	301

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 28 – Valores das barras do sistema de 300 barras após a convergência com e sem TCSC.

Barra #	Tensão				Geração				Carga			
	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
148	1,058	1,060	0,306	3,114	-	-	-	-	63,00	63,00	25,00	25,00
179	0,970	0,969	-9,338	-6,628	-	-	-	-	74,00	74,00	29,00	29,00
301	-	1,063	-	5,029	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 29 – Valores dos ramos do sistema de 300 barras após a convergência com e sem TCSC.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)		Injeção de potência (barra receptora)		Perdas	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
233	148	179	47,61	6,49	-44,69	-5,97	2,919	8,34
233	301	179	57,00	6,81	-52,91	-2,98	4,089	11,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 30 – Parâmetros do TCSC do sistema de 300 barras após a convergência.

Barra inicial	Barra final	X_{TCSC} (pu)	α (°)	k (%)
148	179	-0,0660	144,2578	16,84%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com TCSC Sem TCSC

4.4.7 O sistema de 24 barras: STATCOM

Esta simulação tem como objetivo avaliar a operação do STATCOM em um sistema-teste com 10 barras PV, 13 barras PQ, 33 geradores e 38 ramos fornecendo ou absorvendo potência reativa. Dados deste sistema podem ser encontrados na *homepage* do programa do MATPOWER (<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>) (ZIMMERMAN et al., 2017; ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011).

4.4.7.1 STATCOM fornecendo potência reativa

Devido ao elevado número de geradores, a menor tensão encontrada para o caso-convencional está na barra 24 com 0,978 pu. O caso-convencional é modificado para incluir um STATCOM à barra 24 para manter nível de tensão em 1 pu naquele ponto. A Tabela 31 apresenta os dados de entrada do STATCOM. As Tabelas 32 e 33 evidenciam as barras e ramos diretamente afetados pela presença do controlador. As colunas em branco informam os valores sem a compensação *shunt* e as colunas em cinza com o STATCOM conectado. A Tabela 34 apresenta os parâmetros de saída do controlador.

Tabela 31 – Parâmetros de entrada do STATCOM fornecendo potência reativa no sistema de 24 barras.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
BARRSTA	Vsp (pu)	Vsh (pu)	Thst (°)	Gsh (pu)	Bsh (pu)	Vshmax (pu)	Vshmin (pu)	Thstmax (°)	Thstmin (°)	ON/ OFF
24	1	1	0	0	-10	1,1	0,9	180	-180	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 32 - Valores das barras do sistema de 24 barras após a convergência com e sem STATCOM fornecendo potência reativa.

Barra	Tensão				Geração				Carga				
	#	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
24		0,978	1,000	5,299	5,106	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 33 – Valores dos ramos do sistema de 24 barras após a convergência com e sem STATCOM fornecendo potência reativa.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)				Injeção de potência (barra receptora)				Perdas (ZI ²)			
			P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
7	3	24	-211,21	-214,12	6,12	-6,15	212,32	215,23	34,48	46,86	1,113	1,116	40,60	40,71
27	15	24	215,54	218,35	48,59	5,63	-212,32	-215,23	-34,48	7,43	3,219	3,115	24,93	24,13

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 34 – Parâmetros do STATCOM fornecendo potência reativa no sistema de 24 barras após a convergência.

Barra do STATCOM	Vsh (pu)	Thst (°)	Vsp (pu)	Q (MVar)
24	1,0543	5,106	1,00	-54,72

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com STATCOM Sem STATCOM

Devido à presença de muitos geradores no sistema de 24 barras, há pouca queda de tensão entre as linhas de transmissão. A barra 24, cuja magnitude de tensão é 0,978 pu sem a presença do STATCOM, é o ponto no qual ocorre a maior queda tornando-se a melhor escolha para a inserção do controlador.

4.4.7.2 STATCOM absorvendo potência reativa

O número elevado de geradores presentes torna as tensões elevadas em vários pontos do sistema. Com esta configuração, o sistema-teste torna-se ideal para avaliar a operação do STATCOM no modo indutivo, ou seja, absorvendo potência reativa e reduzindo o nível de tensão das barras. A barra 5 possui um nível de tensão de 1,019 pu. O caso-convencional é modificado para que um STATCOM seja conectado à barra 5 para manter o nível de tensão em 1 pu naquele ponto. A Tabela 35 apresenta os valores de entrada do STATCOM. As Tabelas 36 e 37 mostram os dados das barras e ramos relacionados ao controlador. A Tabela 38 apresenta os parâmetros do STATCOM após a convergência. As colunas em cinza indicam os valores com o controlador conectado e as colunas em branco mostram os valores na ausência do STATCOM.

Tabela 35 – Parâmetros de entrada do STATCOM absorvendo potência reativa no sistema de 24 barras.

1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
BARRSTA	Vsp (pu)	Vsh (pu)	Thst (°)	Gsh (pu)	Bsh (pu)	Vshmax (pu)	Vshmin (pu)	Thstmax (°)	Thstmin (°)	ON/ OFF
5	1	1	0	0	-10	1,1	0,9	180	-180	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 36 - Valores das barras do sistema de 24 barras após a convergência com e sem STATCOM absorvendo potência reativa.

Barra	Tensão				Geração				Carga				
	#	Magnitude (pu)	Magnitude (pu)	Ângulo (°)	Ângulo (°)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
5	1,019	1,000	-9,964	-9,828	-	-	-	-	-	71,00	71,00	14,00	14,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 37 – Valores dos ramos do sistema de 24 barras após a convergência com e sem STATCOM absorvendo potência reativa.

Ramo	De	Para	Injeção de potência (barra de origem)				Injeção de potência (barra receptora)				Perdas (ZI ²)			
			P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
3	1	5	60,03	60,19	4,83	27,26	-59,29	-59,29	-4,37	-26,13	0,741	0,902	2,87	3,50
9	5	10	-11,71	-11,71	-9,63	-23,55	11,76	11,86	7,30	21,66	0,046	0,145	0,18	0,56

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 38 – Parâmetros do STATCOM absorvendo potência reativa no sistema de 24 barras após a convergência.

Barra do STATCOM	Vsh (pu)	Thst (°)	Vsp (pu)	Q (MVar)
5	0,9643	-9,828	1,00	34,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com STATCOM Sem STATCOM

Percebe-se que o STATCOM o fluxo de potência reativa em direção à barra 5 aumenta, devido à atuação indutiva do controlador. A tensão na barra 5 diminui devido à atuação do controlador e os fluxos de potência em direção à barra 5 aumentam em magnitude. 14 MVar é absorvido pela carga conectada à barra 5 e o STATCOM absorve cerca de 35 MVar.

4.4.8 Outras informações obtidas das simulações

A Tabela 39 apresenta o maior *mismatch* obtido após o fim da execução do fluxo de carga e o número de iterações não-lineares necessárias para a convergência na presença e ausência de controlador FACTS. O TCSC e o STATCOM aumentam a complexidade do sistema, dificultando a convergência.

Tabela 39 – Informações do cálculo de *mismatch* e do número de iterações não-lineares.

	Caso	Maior <i>mismatch</i> após a convergência	Número de iterações
SEM FACTS	5 barras	$9,821 \times 10^{-10}$	3
	24 barras	$2,3088 \times 10^{-12}$	4
	30 barras	$9,5700 \times 10^{-10}$	3
	57 barras	$3,4514 \times 10^{-12}$	3
	118 barras	$1,5018 \times 10^{-12}$	3
	300 barras	$1,3786 \times 10^{-12}$	5
COM FACTS	5 barras - TCSC	$6,7177 \times 10^{-7}$	4
	5 barras - STATCOM	$2,5614 \times 10^{-7}$	4
	24 barras – STATCOM operação capacitiva	$7,9138 \times 10^{-7}$	5
	24 barras – STATCOM operação indutiva	$5,6668 \times 10^{-7}$	5
	30 barras - TCSC	$5,7281 \times 10^{-6}$	19
	30 barras - STATCOM	$6,9584 \times 10^{-6}$	4
	57 barras – STATCOM	$4,4395 \times 10^{-6}$	5
	118 barras – TCSC	$7,8769 \times 10^{-7}$	11
	300 barras - TCSC	$2,1486 \times 10^{-6}$	13

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.5 Conclusões

As implementações do STATCOM e do TCSC são corroboradas comparando-se o resultado do sistema-teste de 5 barras fornecido por (ACHA et al., 2004) e o fornecido utilizando o ambiente computacional MATPOWER. Os fluxos de potências nos ramos, a magnitude e o ângulo das tensões nas barras e os parâmetros do controlador utilizado apresentaram valores similares.

Com base na modelagem utilizada nos experimentos numéricos, o STATCOM mostra-se ideal para regular a tensão em determinada barra do sistema, fornecendo ou absorvendo potência reativa. O TCSC não é capaz de alterar a magnitude das tensões, mas é apto a controlar o fluxo de potência ativa na linha de transmissão alterando a própria impedância. Por reduzir a quantidade de fluxo de potência reativa, o STATCOM prova-se uma melhor opção caso deseje-se reduzir as perdas.

A complexidade dos sistemas aumenta com a presença de um controlador FACTS, diminuindo a precisão, pois os *mismatches* tornam-se maiores; e aumentando o número de iterações não-lineares necessárias à convergência.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Foi apresentada neste trabalho a implementação de controladores FACTS no ambiente computacional do MATPOWER para análise do fluxo de carga em regime permanente. Os controladores FACTS considerados nesta monografia foram o TCSC e o STATCOM. O modelo de reatância variável série foi considerado no TCSC. O STATCOM foi modelado como uma fonte de tensão variável em série com uma reatância cujo conjunto está em derivação com algum ponto específico do sistema a ser estudado.

As simulações computacionais realizadas no MATPOWER permitiram avaliar o desempenho e a eficiência dos dois controladores FACTS implementados. A comparação dos resultados oriundos da simulação com aqueles disponíveis na literatura e a simulação de sistemas-teste de pequeno e grande porte permitiram a corroboração dos dois modelos de controladores FACTS implementados.

Este trabalho teve como resultado a disponibilização de dois tipos de controladores FACTS no programa MATPOWER. Isto permitirá que diversos usuários possam realizar estudos sobre as compensações série e *shunt* analisando os resultados obtidos utilizando-se o TCSC e o STATCOM em sistemas-teste de pequeno e grande porte.

Sugestões para futuros trabalhos:

- a) Modelagem de outros controladores FACTS no ambiente computacional MATPOWER;
- b) Desenvolvimento de metodologias para otimizar os parâmetros e a localização dos controladores;
- c) Desenvolver a metodologia do fluxo de potência ótimo considerando a existência de controladores FACTS.

REFERÊNCIAS

ABIDO, M. A. Power system stability enhancement using FACTS controllers: a review. *The Arabian journal for science and engineering*, v. 34, n. 1B, p. 153-172, 2009.

ACHA, Enrique et al. **FACTS: modelling and simulation in power networks**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.

AKOREDE, Mudathir F.; HIZAM, Hashim. Teaching power system analysis courses using MATPOWER. In: **ENGINEERING EDUCATION (ICEED), INTERNATIONAL CONFERENCE ON**, 2009, [S.l.]. **Anal...** [S.l.]: IEEE, 2009. p. 45-51.

BHOWMICK, Suman. **Flexible AC Transmission Systems (FACTS): Newton Power-Flow Modeling of Voltage-Sourced Converter-Based Controllers**. CRC Press, 2016.

BORGES, Carmen Lucia Tancredo. Análise de sistemas de potência. **EE-UFRJ-Departamento de Eletrotécnica**, 2005.

DONSON, Manuel Pérez; GUEMES, J. A.; RODRIGUEZ, J. M. Power Quality. Benefits of Utilizing FACTS Devices in Electrical Power Systems. In: **Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 2007 7th International Symposium on**. IEEE, 2007. p. 26-29.

FUERTE-ESQUIVEL, C. R.; ACHA, E.; AMBRIZ-PEREZ, H. A thyristor controlled series compensator model for the power flow solution of practical power networks. **IEEE transactions on power systems**, v. 15, n. 1, p. 58-64, 2000.

HINGORANI, Narain G.; GYUGYI, Laszlo. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. New York: IEEE press, 2000.

KAMARPOSHTI, Mehrdad Ahmadi et al. Comparison of SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC controllers for static voltage stability evaluated by continuation power flow method. In: **ELECTRIC POWER CONFERENCE**, 2008, Canada. **Anal...** Canada: IEEE, 2008. p. 1-8.

MARUF, N. I. et al. Study of thyristor controlled series capacitor (TCSC) as a useful FACTS device. **International Journal of Engineering science and technology**, v. 2, n. 9, p. 4357-4360, 2010.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. [S.l.]: Ed. Edgard Blucher, 1983.

NOROOZIAN, M. et al. Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, IEEE, p. 1143-1150, 2003.

PADIYAR, K. R. **FACTS controllers in power transmission and distribution**. [S.l.]: New Age International, 2007.

PADIYAR, K. R.; KULKARNI, A. M. Flexible AC transmission systems: A status review. *Sadhana*, v. 22, n. 6, p. 781-796, 1997.

PASERBA, John J. How FACTS controllers benefit AC transmission systems. **Power Engineering Society General Meeting**, IEEE, 2004. p. 1257-1262.

SAHOO, A. K.; DASH, S. S.; THYAGARAJAN, T. Power flow study including FACTS devices. **Journal of Applied Sciences(Faisalabad)**, v. 10, n. 15, p. 1563-1571, 2010.

SINGH, B. et al. Static synchronous compensators (STATCOM): a review. **IET Power Electronics**, v. 2, n. 4, p. 297-324, 2009.

SONG, Yong-Hua; JOHNS, Allan (Ed.). **Flexible ac transmission systems (FACTS)**. IET, 1999.

TANEJA, Parul. Stability improvement of multimachine using STATCOM? **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**, v. 2, n. 8, p. 3889-3894, 2013.

ZHANG, X.-P.; HANDSCHIN, E.; YAO, M. Multi-control functional static synchronous compensator (STATCOM) in power system steady-state operations. **Electric power systems research**, v. 72, n. 3, p. 269-278, 2004.

ZIMMERMAN, Ray Daniel; MURILLO-SÁNCHEZ, Carlos Edmundo; THOMAS, Robert John. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. **IEEE Transactions on power systems**, v. 26, n. 1, p. 12-19, 2011.

_____.; et al. **MATPOWER – A MATLAB Power System Simulation Package**. 2017.
Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>> Acesso em: 29 nov. 2017.

MARTINS JÚNIOR, Clóvis da Conceição Melo. Implementação de Modelos de Controladores FACTS em um programa de fluxo de carga: Compensador Estático e Controlador Unificado de Fluxo de Potência; **EE-UFMA-Departamento de Engenharia de Eletricidade**, 2017.