



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

Campus de Ilha Solteira-SP

**MARCOS JOSÉ GONÇALVES**

**ESTABILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA  
EM REGIME TRANSITÓRIO NA PRESENÇA DE  
DISPOSITIVOS FACTS**

Ilha Solteira

2017

**MARCOS JOSÉ GONÇALVES**

**ESTABILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA  
EM REGIME TRANSITÓRIO NA PRESENÇA DE  
DISPOSITIVOS FACTS.**

Tese apresentada à faculdade de engenharia de engenharia elétrica do campus de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação

Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara

Orientador

Ilha Solteira

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G635e      Gonçalves, Marcos José.  
Estabilização de sistemas de energia elétrica em regime transitório na presença de dispositivos FACTS / Marcos José Gonçalves. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017  
115 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: Laurence Duarte Colvara  
Inclui bibliografia

1. Estabilidade transitória. 2. Sistema de energia elétrica. 3. FACTS. 4. SVC. 5. TCSC. 6. RSP.

*Raiane da Silva Santos*  
Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: Estabilização de sistemas de energia elétrica em regime transitório na presença de dispositivos FACTS.

**AUTOR: MARCOS JOSÉ GONÇALVES**

**ORIENTADOR: LAURENCE DUARTE COLVARA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Professor Adjunto LUIS FILOMENO DE JESUS FERNANDES  
Departamento Faculdade do Gama / UNIVERSIDADE DE BRASILIA

Prof. Dr. GEORGE LAURO RIBEIRO DE BRITO  
Departamento de Ciência da Computação / Universidade Federal do Tocantins - UFT - Palmas/TO

Ilha Solteira, 28 de novembro de 2017

## **DEDICATÓRIA**

Dedico essa tese à minha filha Yasmin Untar Gonçalves razão da minha vida, aos meus pais Geraldo e Carminda e aos meus irmãos e sobrinhos.

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao nosso Deus por tudo que tem me permitido alcançar.
- Ao professor Dr. Laurence Duarte Colvara pela oportunidade, orientação, paciência e por todo conhecimento compartilhado, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.
- À minha filha Yasmin Untar Gonçalves pelo incentivo, carinho e compreensão.
- Aos Meus pais Geraldo e Carminda, pelas orações em favor da realização desse trabalho.
- Aos meus irmãos, Ednilson, Edilene, Sônia e Willian pelo incentivo.
- Aos meus sobrinhos, Gustavo, Vinícius, Guilherme, Letícia, Ricardo e em especial ao Rômulo pela contribuição na formatação desse trabalho.
- A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo apoio financeiro.
- Aos meus colegas do GAESSE, João, Naryane e em especial Eptácio Pedro da Silva Júnior pela “Coorientação” muito valiosa para realização desse trabalho.
- Aos meus amigos do grupo “Cuiabá Forte em Ilha”, Odilon, Ivo e em especial Edgar, que me ajudou muito na parte de programação.
- Aos Professores do ensino médio Hélio Maluf e Maria Arlete pelo incentivo para iniciar na carreira de professor.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o controle de Sistema de Energia Elétrica (SEE) com vistas à melhoria da estabilidade transitória por meio da atuação de dispositivos FACTS, neste momento considerando os compensadores em derivação (SVC) e em série (TCSC). Propõe-se a inclusão, em dispositivos pré-existentes, a incorporação de um controle adicional visando atuação em face de transitórios eletromecânicos. A influência dos dispositivos sobre a capacidade de sincronização entre os pares de máquinas, avaliada por meio do fator de efeito é inserida na atuação dinâmica/transitória do sistema. A evolução da trajetória pós-falta do sistema é considerada em relação às fronteiras da chamada Região de Sincronização Positiva (RSP) e simulações foram realizadas usando os sistemas-teste Simétrico de duas áreas e New England para Lei de Controle proposta e conclui-se que esta é efetiva na melhoria da estabilidade transitória do Sistema de Energia Elétrica e, com aprimoramentos, poderá ser incluída em procedimentos de operação em tempo real.

**Palavras Chaves:** Estabilidade transitória. Sistema de energia elétrica. FACTS. SVC. TCSC. RSP.

## **ABSTRACT**

The power system transient stability control is approached by means of FACTS devices, and at this first step the SVC and TCSC devices are considered. A certain device acts upon each pair of machines by means of their synchronization capability which is affected by the corresponding transfer admittance as repeated by the FACTS device. This influence is taken into account by means of a parameter named Effect Factor. The boundaries of a region surrounding the stable equilibrium point named Positive Stability Region are used as reference for critical trajectories and the control action intend to reverse the tendency of the trajectory of leaving this region. In view of the shown tested cases the results are very promising since the proposed control has conduced to improvements in fault critical clearing times and so it has potential to be included in online operation procedures.

**Keywords:** Transient stability. Electric power systems. FACTS. SVC. TCSC. RSP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Fasorial da Máquina Síncrona.	27
Figura 2 - Diagrama de blocos do RAT.	29
Figura 3 - Diagrama unifilar do sistema MBI.	30
Figura 4 - Diagrama Fasorial do sistema MBI.	31
Figura 5 – Sistemas Multimáquinas.	33
Figura 6 – Sistemas Multimáquinas com barras internas e cargas.	34
Figura 7 – Esquema básico de um SVC.	42
Figura 8 – Esquema básico de um TCSC.	43
Figura 9 - RSP e suas fronteiras.	53
Figura 10 - Aproximação da Distância de um ponto à CTN	55
Figura 11 - Inclusão do SVC.	60
Figura 12 – Matriz admitância adicionada o SVC.	60
Figura 13 - Matriz de admitância reduzida às barras de interesse.	61
Figura 14 – Variação da admitância de transferência entre as máquinas devida as variações originadas pelo SVC.	63
Figura 15 – Sistema Multimáquinas com um TCSC instalado entre as barras na forma de admitância.	64
Figura 16 – Sistema Multimáquinas reduzido às barras internas dos geradores e terminais da linha compensada.	65
Figura 17– Variação da admitância de transferência entre as máquinas devido às variações de reatância do TCSC.	67
Figura 18 – Diagrama fasorial para máquina i.	69
Figura 19 – Ângulos das admitâncias de transferência.	69
Figura 20 – Superfície de energia potencial em função das defasagens angulares 1-2 e 1-3	73
Figura 21 – RSP definida no plano das tensões e defasagens angulares.	78
Figura 22 - mostra o traço da STN no plano $(\Delta y_{FACTS}, \sigma_K)$ obtida para valores do par (10,5) do sistema New England, apresentado no capítulo 6.	79
Figura 23 - Traço da STN no plano $(e_i, K_{FACTS} \Delta y_{FACTS})$	80
Figura 24 - Região de Sincronização Positiva com variação de $\Delta y_{FACTS}$ .	86
Figura 25 – Diagrama Sistema Multimáquinas Simétrico de duas áreas e quatro máquinas.	88

Figura 26 – Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta sob a ação estática do dispositivo SVC instalado na Barra 6 no (plano $\sigma \times e$ ), para uma contingência na barra 9.	89
Figura 27 – Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta sob a ação e do dispositivo instalado na Barra 6 e com Lei de controle no (plano $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 9.	90
Figura 28 - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação estática do dispositivo SVC instalado na Barra 8 no (plano $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 9.	91
Figura 29 - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação do dispositivo instalado na Barra 8 com Controle adicional no (plano $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 9.	92
Figura 30 - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação estática do dispositivo instalado na Barra 9 no (plano $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 10.	93
Figura 31- Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação do dispositivo instalado na Barra 9 com Controle adicional no (plano $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 10.	94
Figura 32 - Diagrama unifilar do Sistema New England.	95
Figura 33 - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação dos dispositivos SVC instalados nas Barras 15 e 36 e TCSC instalado na LT (30-31) com de Controle adicional no (plano $\sigma \times e$ ).	98
Figura 34 - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação dos dispositivos SVC instalado na Barra 19 e TCSC instalado na LT (05-20) com	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dispositivos FACTS alocados, pares de máquinas mais afetados e valor do tempo de duração da falta ( $tch$ ), para cada curto-circuito.	96
Tabela 2 – Tempo de eliminação da falta do Sistema New England.	97
Tabela 3 – Curto em barras próximas as barras de geração.	99
Tabela 4 – Dados de linha do sistema Kundur.	109
Tabela 5 – Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do sistema Kundur.	110
Tabela 6 – Parâmetros das máquinas do Sistema Kundur.	110
Tabela 7 – Tensões internas (atrás de $X'd$ ) do sistema Kundur em regime permanente.	111
Tabela 8 – Dados de linhas do Sistema New England.	112
Tabela 9 – Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do Sistema New England.	113
Tabela 10 – Parâmetros das máquinas do Sistema New England.	115

## LISTA DE ABREVIATURAS

CSC	Controlled Series Compensator (Compensador Série Controlado)
CTN	Curva de Torque Nulo
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System (Sistema de Transmissão Flexível em Corrente Alternada).
IPFC	Interline Power Flow Controller (Controlado de Fluxo de Potência Interlinha)
MBI	Máquina versus Barra Infinita
MTI	Mínima Tensão Interna
PEBS	Potential Energy Boundary Surface
RAT	Regulador Automático de Tensão
RSP	Região de Sincronização Positiva
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SLEP	Superfície Limite de Energia Potencial
SM	Sistema Multimáquinas
SSSC	Static Synchronous Series Compensator (Compensador Série Estático Síncrono)
STATCOM	Static Synchronous Shunt Compensator (Compensador Estático Síncrono)
STN	Superfície de Torque Nulo
SVC	Static Var Compensator (Compensador Estático de Reativos)
TCSC	Thyristor Controlled Series Compensator (Compensador Série Controlado a Tiristores)
UPFC	Unified Power Flow Controller (Controlador de Fluxo de Potência Unificado)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I$	Vetor injeções de correntes de barra
$Y$	Matriz de admitância de barras
$E$	Vetor das tensões de barra
$G$	Matriz de condutância
$B$	Matriz de susceptância
$Y_{kk}$	Elemento da matriz admitância de barras
$y_{kl}$	Admitância da linha $ij$
$\delta$	Posição angular da máquina síncrona
$\omega$	Velocidade angular da máquina síncrona
$M$	Constante de inércia da máquina síncrona [ $s^2$ ]
$D$	Constante de amortecimento [ $s$ ]
$P_m$	Potência mecânica de entrada (fornecida à máquina síncrona)
$P_e$	Potência elétrica entregue pela máquina síncrona
$T_{d0}$	Constante de tempo de circuito aberto de eixo direto
$E'_q$	Tensão proporcional ao enlace de fluxo de enrolamento amortecedor de eixo em quadratura
$x_d$	Reatância de eixo direto
$x'_d$	Reatância transitória de eixo direto
$i_d$	Componente de eixo direto da corrente terminal da máquina
$E_{fd}$	Tensão de excitação
$T_{q0}$	Constante de tempo de circuito aberto de eixo em quadratura

$\hat{E}_d$	Tensão proporcional ao enlace de fluxo do campo (eixo direto)
$x_q$	Reatância de eixo em quadratura
$i_q$	Componente de eixo em quadratura da corrente terminal da máquina
$v_d$	Componente de tensão terminal no eixo direto da máquina síncrona
$v_q$	Componente de tensão terminal no eixo em quadratura da máquina síncrona
$x'_q$	Reatância transitória do eixo em quadratura da máquina síncrona
$K_R$	Ganho Transitório (modelo reduzido RAT)
$T_R$	Constante de tempo do RAT
$V_T$	Tensão terminal da máquina
$V_T^0$	Tensão terminal no ponto de equilíbrio
$V(x)$	Função de Lyapunov (FL)
$\sigma$	Variação da posição angular em relação ao equilíbrio
$e$	Variação da tensão interna da máquina síncrona
$\mathcal{E}$	Variação da tensão de excitação
$g(\sigma)$	Parte (não linear) de variações da corrente de eixo direto
$f(\sigma, e)$	Potência ativa (ou torque) líquida nos terminais da máquina
$Y_{ij}$	Elemento da matriz admitância de barras
$G_{ij}$	Condutância de transferência entre os barramentos $i$ e $j$
$G_{ii}$	Condutância própria do barramento $i$
$B_{ij}$	Susceptância de transferência entre os barramentos $i$ e $j$
$P_{eij}$	Potência elétrica transferida entre as máquinas $i$ e $j$
$\Delta P_{ei}$	Variação da potência elétrica da $i$ -ésima máquina

$Ep(x_i)$	Função energia potencial do sistema
$E_c$	Energia cinética
$E_p$	Energia potencial
$d$	Distancia de um ponto a uma CTN
$\dot{d}_k$	Velocidade de aproximação da trajetória a uma STN <sub>k</sub> $Y_{int}$
$Y_{bus}$	Matriz admitância da rede aumentada as barras terminais e internas dos geradores
$Y_{red}^{int}$	Matriz admitância da rede reduzida às barras de interesse
$Y_{red}$	Matriz admitância da rede reduzida às barras internas dos geradores
$Y_{gg}$	Matriz admitância entre as barra internas dos geradores
$Y_{gr}$	Matriz admitância entre as barra internas dos geradores e as barras da rede
$Y_{rg}$	Matriz transposta de $Y_{gr}$
$Y_{rr}$	Matriz admitância entre as barras da rede
$Y_{gg}^{red}$	Matriz admitância da rede reduzida as barra internas dos geradores
$Y_{FACTS}$	Matriz admitância própria da barra do dispositivo FACTS na rede reduzida
$Det$	Determinante da matriz $Y_{FACTS}$
$n$	Número de geradores da rede
$m$	Número de barras da rede
$K$	Matriz de incidência
$e^*$	Mínima Tensão Interna
$\bar{K}_{FACTSij}$	Coefficiente de sensibilidade da ação do dispositivo entre as máquinas $i$ e $j$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
<b>2</b>	<b>REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	25
2.1	INTRODUÇÃO .....	25
2.2	REDE .....	25
2.3	MAQUINA SÍNCRONA .....	26
2.4	REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO .....	28
2.5	MÁQUINA CONTRA BARRA INFINITA (MBI).....	30
2.6	SISTEMA MULTIMÁQUINAS (SM).....	33
2.7	DISPOSITIVOS FACTS .....	38
2.7.1	<i>CONTROLADORES SÉRIE</i> .....	39
2.7.2	<i>CONTROLADORES EM DERIVAÇÃO</i> .....	40
2.7.3	<i>CONTROLADORES COMBINADOS SÉRIE-SÉRIE</i> .....	40
2.7.4	<i>CONTROLADORES COMBINADOS SÉRIE-DERIVAÇÃO</i> .....	41
2.8	MODELO DINÂMICO DO SVC.....	41
2.9	MODELO DINÂMICO DO TCSC .....	42
2.10	CONCLUSÃO .....	43
<b>3</b>	<b>ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	44
3.1	ESTABILIDADE TRANSITÓRIA .....	45
3.2	MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA .....	46
3.3	MÉTODO TRADICIONAL (PASSO-A-PASSO) .....	47
3.4	MÉTODO DE LYAPUNOV .....	47
3.4.1	<i>A FUNÇÃO ENERGIA</i> .....	48
3.5	MÉTODOS DE ANÁLISE.....	48

3.5.1 PUNTO DE EQUILÍBRIO INSTÁVEL DE MENOR ENERGIA POTENCIAL .....	48
3.5.2 SUPERFÍCIE LIMITE DE ENERGIA POTENCIAL (SLEP) .....	49
3.5.3 PUNTO DE EQUILÍBRIO INSTÁVEL DE INTERESSE (DE CONTROLE).....	49
3.5.4 REFINAMENTOS DE BUSCA DO VALOR CRÍTICO DA ENERGIA.....	50
3.5.5 DIFICULDADE DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DA ENERGIA EM SISTEMA NÃO CONSERVATIVO. ....	50
3.6 MÉTODO DA REGIÃO DE SINCRONIZAÇÃO POSITIVA (RSP).....	51
3.6.1 CASO MÁQUINA CONTRA BARRA INFINITA (MBI) .....	51
3.6.2 EVOLUÇÃO DA TRAJETÓRIA PÓS- FALTA EM RELAÇÃO À RSP.....	53
3.6.3 TESTE DE ESTABILIDADE.....	55
3.7 O CASO DE SISTEMA MULTIMÁQUINAS (SM).....	56
3.7.1 A RSP E SUAS FRONTEIRAS.....	56
3.7.2 EVOLUÇÃO DA TRAJETÓRIA EM RELAÇÃO ÀS FRONTEIRAS DA RSP. ....	58
3.8 CONCLUSÃO .....	58
<b>4 INTRODUÇÃO DOS DISPOSITIVOS FACTS NO SEE E SUA CONSIDERAÇÃO NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....</b>	<b>59</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	59
4.2 INTRODUÇÃO DOS DISPOSITIVOS FACTS NO SISTEMA E SEUS EFEITOS NAS INTERAÇÕES ENTRE MÁQUINAS .....	59
4.3 INCLUSÃO DE UM SVC NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS.....	59
4.4 INCLUSÃO DE UM TCSC EM SISTEMAS MULTIMÁQUINAS .....	63
4.5 FATOR DE EFEITO .....	67
4.6 EFEITOS DOS DISPOSITIVOS FACTS NA ENERGIA TRANSITÓRIA DO SEE. .	68
4.7 DEPRESSÃO ENERGÉTICA, EXTREMOS DA ENERGIA POTENCIAL E EFEITOS DE FACTS. ....	72
4.8 CONCLUSÃO .....	73

<b>5</b>	<b>INCLUSÃO DOS EFEITOS DE DISPOSITIVOS FACTS NAS FRONTEIRAS DA REGIÃO DE SINCRONIZAÇÃO POSITIVA.....</b>	<b>75</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	75
5.2	REGIÃO DE SINCRONIZAÇÃO POSITIVA EM SISTEMAS MULTIMÁQUINAS COM DISPOSITIVOS FACTS.....	75
5.3	EVOLUÇÃO DA TRAJETÓRIA EM RELAÇÃO ÀS FRONTEIRAS DA RSP .....	81
5.4	UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE .....	83
5.5	CONCLUSÃO .....	86
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>87</b>
6.1	INTRODUÇÃO .....	87
6.2	SISTEMA DE 4 MÁQUINAS E 11 BARRAS .....	87
6.3	DISPOSITIVO FACTS INSTALADO NA BARRA 6 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA.....	88
6.3.1	<i>DISPOSITIVO FACTS INSTALADO NA BARRA 6 COM A COMPENSAÇÃO ESTÁTICA E ACRESCENTANDO O CONTROLE ADICIONAL.....</i>	<i>89</i>
6.3.2	<i>DISPOSITIVO SVC INSTALADO NA BARRA 8 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA..</i>	<i>90</i>
6.3.3	<i>DISPOSITIVO SVC INSTALADO NA BARRA 8 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA E CONTROLE ADICIONAL.....</i>	<i>91</i>
6.3.4	<i>DISPOSITIVO SVC INSTALADO NA BARRA 9 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA..</i>	<i>92</i>
6.3.5	<i>DISPOSITIVO SVC INSTALADO NA BARRA 9 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA E COM CONTROLE ADICIONAL.....</i>	<i>93</i>
6.4	SISTEMA NEW ENGLAND: 10 MÁQUINAS E 39 BARRAS .....	94
6.4.1	<i>CURTO-CIRCUITO NA BARRA 1.....</i>	<i>96</i>
6.4.2	<i>CURTO- CIRCUITO NAS BARRAS DE GERAÇÃO.....</i>	<i>97</i>
6.4.3	<i>CURTO-CIRCUITO EM BARRAS PROXIMAS AS BARRAS DE GERAÇÃO .....</i>	<i>99</i>
6.4.4	<i>CURTO-CIRCUITO NA BARRA 20.....</i>	<i>99</i>
6.5	CONCLUSÃO .....	100

<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>101</b>
<b>8</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>
	<b>ANEXO A – DADOS DO SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS .....</b>	<b>109</b>
	<b>ANEXO B – DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND .....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) são projetados para atender a demanda exigida pelos seus consumidores em todos os segmentos (domiciliar, comercial e industrial), com elevados padrões de qualidade e confiabilidade, ou seja, operando dentro de limites especificados de tensão e frequência e com o mínimo possível de interrupções. Além dos sistemas de potência serem capazes de operar satisfatoriamente, eles devem ser flexíveis na presença de defeitos ou perturbações de forma a garantir a continuidade da prestação de serviço quando sujeitos a defeitos (ALBERTO; BRETAS, 2000). Estas perturbações podem ser ocasionadas por curtos-circuitos, rompimento de linhas de transmissão, descargas atmosféricas, entrada ou saída de cargas de grande porte. Por outro lado, o crescimento contínuo da demanda de energia elétrica e as dificuldades para instalação de novas linhas de transmissão e novas unidades geradoras, devido às restrições econômicas e ambientais tem levado os SEE existentes a operarem em níveis cada vez mais próximos de seus limites de capacidade de transmissão.

O SEE deve operar em um ponto de equilíbrio estável, em que deve permanecer até que uma perturbação, intencional ou não, o remova desse estado. Quando isso ocorrer, será necessário verificar se o sistema se aproximará de um novo ponto de equilíbrio, ou seja, encontrará uma situação estável ou se tornará instável afastando-se indefinidamente de um possível ponto de operação (PAI, 1981). Após a ocorrência de uma grande perturbação, as máquinas síncronas podem perder o sincronismo e esse problema é tratado na literatura como problema de estabilidade transitória (ALBERTO; BRETAS, 2000; ANDERSON; FOUAD, 2000).

Nos estudos de estabilidade transitória analisa-se o comportamento do sistema após grandes perturbações verificando se o mesmo será capaz de encontrar um novo ponto de operação após a perturbação e quais os procedimentos necessários para que isso aconteça (PAI, 1981).

Uma solução que tem sido considerada para melhorar o desempenho da operação dos sistemas de potência é a utilização de dispositivos que proporcionam uma nova característica ao sistema que é apropriadamente qualificada como flexibilidade e assim estes dispositivos foram designados como FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) e são

definidos como alternativa para flexibilizar o SEE (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999; WATANABE, et. al., 1998).

A utilização dos equipamentos FACTS ampliou graus de liberdade no movimento dos sistemas de potência possibilitando, por meio de adequadas ações de controle, interferir no desempenho dinâmico/transitório. Nos estudos de estabilidade transitória, o fato de estes equipamentos poderem proporcionar o aumento do limite de transferência de grandes blocos de energia como, por exemplo, com o chaveamento de grandes capacitores série em determinadas linhas de transmissão (WATANABE et al., 1998), sugere-se a possibilidade de controlar o movimento do sistema e/ou os limites da estabilidade.

Os desenvolvimentos alcançados na área de eletrônica de potência possibilitaram aos dispositivos FACTS melhorar a capacidade de transferência de potência ativa e também controlar diretamente o fluxo de potência, (HINGORANI; GYUGY, 1999, WATANABE, et al., 1998; SONG; JOHNS, 1999). Adicionalmente, a elevada velocidade de ação destes dispositivos em face das oscilações dinâmicas e transitórias suscitou o estudo e desenvolvimento de técnicas para análise e síntese de controle deles visando melhoria do desempenho do sistema diante de perturbações. Neste sentido foram importantes os desenvolvimentos que focaram a modelagem, os estudos do comportamento dinâmico e transitório e as proposições de estratégias e técnicas de compensação e controle.

A literatura especializada contém um número considerável de publicações, várias delas com resultados relevantes e podem-se citar algumas que proveram subsídios para o desenvolvimento do presente trabalho. A conceituação, modelagem empregada e estudos de desempenho estático, dinâmico e transitório até então desenvolvidos encontram-se bem descritos em (SONG; JOHNS, 1999).

Entre as diferentes frentes envolvidas no estudo do desempenho do Sistema de Energia Elétrica, sem dúvida a modelagem empregada é de grande relevância e esforços tem sido envidados neste sentido, tal como em Gupta e Tripathi (2014), em que se faz um estudo da modelagem dinâmica de um STATCOM baseado em CSC. No entanto, neste trabalho, em que se consideram exclusivamente os SVCs e TCSCs e como em muitos outros da bibliografia, dada a comparativamente alta velocidade de atuação dos dispositivos eletrônicos frente ao desempenho eletromecânico do sistema admite-se uma modelagem bastante simples para representação do desempenho dos dispositivos, ainda que dotados de controles.

A destacada influência dos dispositivos FACTS no comportamento estático (Regime Permanente) por meio da elevação da capacidade de transmissão encontra-se já bem apresentada em (SONG; JOHNS, 1999), porém é de alto interesse incorporar estes dispositivos no tratamento dos fluxos de potência na rede, o que já possibilita a consideração dos seus efeitos. Neste sentido se apresentou em (TORTORELLI, 2010) o desenvolvimento de uma rotina computacional para cálculo de fluxo de potência, incluindo a representação de diversos controladores FACTS, e incorporando uma metodologia para alocação e análise de desempenho dos controladores FACTS e se tratou a questão da otimização dos parâmetros de controle dos compensadores FACTS. Outro aspecto importante a considerar é a posição de dispositivos FACTS na rede de transmissão de energia e neste sentido Nascimento e Gouvêa Junior (2016) propõem um processo automático de alocação de dispositivos TCSC e SVC com base no algoritmo evolutivo. Também em busca de melhor localização e ajuste de parâmetros dos dispositivos SVC e TCSC com objetivo de amortecer as oscilações de pequenos sinais em sistemas multimáquinas Mondal et al (2012) utiliza otimização por enxame de partículas (Particle Swarm Optimization - PSO).

As abordagens de estabilidade dinâmica levando em conta dispositivos FACTS havidas até a edição de (SONG; JOHNS, 1999) encontram-se lá apresentadas, dando conta dos fundamentos envolvidos e dos principais resultados até então alcançados. No entanto, muito havia – e ainda há – a ser considerado e tanto mais haverá quanto mais for necessário aos sistemas operarem próximos de seus limites. Há abordagens de estabilização empregando a teoria clássica de controle de compensação de fase no domínio da frequência, como em (MIOTTO; COVACIC, 2010), onde se considerou simultaneamente TCSC/POD e PSS, e outras abordagens empregando técnicas modernas, tais como algoritmos genéticos (FURINI et al, 2012), utilização de rede neural artificial no ajuste de parâmetros (FURINI, 2011) e emprego de teoria de controle robusto e estruturada na forma de desigualdades matriciais lineares (KUIAVA, 2007).

Adicionalmente, também a estrutura dos controladores foram tratadas na busca de melhoria de desempenho e neste sentido têm-se o trabalho de Chow et al (2000) que propôs o uso de múltiplos sinais de entrada para o projeto de dois tipos de controladores um PSS e um TCSC.

A estabilidade transitória dos SEE de longa data vem recebendo atenção e esforço de desenvolvimento de pesquisadores, primeiramente na representação e metodologias de análise, havendo-se desenvolvidos os métodos indireto, direto e híbrido. O método indireto, o

mais tradicional, ou passo-a-passo, consiste basicamente em simulação digital e análise “off-line” dos resultados, portanto não aplicável em procedimentos em tempo real. Os métodos diretos fundamentam-se em concluir pela estabilidade ou instabilidade mediante análise automática (sem a necessidade de intervenção de um “analista”) de uma condição inerente do sistema, sendo mais usual a consideração de uma função de Lyapunov na forma de energia. Trata-se assim de um método potencial candidato a utilização em procedimento em tempo real. Finalmente, vêm os métodos híbridos, que se valem das virtudes de método indireto e direto, combinados de modo judicioso, sendo também, em princípio, passíveis de emprego em tempo real. Seja antes ou depois do advento dos dispositivos FACTS, os estudos da estabilidade transitória focado nos métodos de análise e, mais ainda, em técnicas de controle estão amplamente abertos a desenvolvimentos, notadamente em face do fato de que os sistemas são solicitados, cada vez mais, a operarem próximos e até (transitoriamente) além dos seus limites.

Os fundamentos clássicos da estabilidade transitória encontram-se em (ANDERSON; FOUAD, 2000), bem como em (KUNDUR, 1994), onde já se tem também introduzidos dispositivos e técnicas modernos. Os princípios fundamentais dos métodos diretos baseados em funções de Lyapunov podem ser encontrados em (PAI, 1981), assim como os princípios que conferem a importância que os dispositivos FACTS de fato têm na estabilidade transitória do SEE são encontrados em (SONG; JOHNS, 1999). A partir destes fundamentos, muito se evoluiu em todos os sentidos, e a seguir trata-se de aspectos que importam mais proximamente ao tema do presente trabalho.

Neste momento, o interesse maior reside em incluir os efeitos dos dispositivos FACTS no desempenho transitório do SEE, o que implica na sua representação e na adequada consideração das implicações em termos de condições de estabilidade do sistema. Neste sentido vem o trabalho de Sam e Arul (2013) que apresenta os efeitos do UPFC e SSSC em um sistema multimáquinas com vistas a melhoria da estabilidade transitória. Ainda na busca da melhoria da estabilidade transitória, vem Nguimfack-Ndongmo et al (2014) que propõem um método não linear simplificado usando Compensador Série Estático Síncrono (SSSC), com algoritmo baseado no método direto de Lyapunov.

Se os dispositivos FACTS, em especial os SVCs e TCSCs, afetam a capacidade de transmissão, então este efeito deve estar presente na energia do sistema, mais particularmente na energia potencial. A este aspecto se dedicam os trabalhos (COLVARA; FESTRAITS; ARAUJO, 2003) em que se mostra como os dispositivos afetam o desempenho dinâmico

(pequenas perturbações) e transitório do sistema de potência e (COLVARA, 2005) em que se apresenta uma formulação para energia transitória de Sistemas de Potência, incluindo a ação do TCSC, mostrando a ação do dispositivo na composição do torque sincronizante pela sua influência na composição da energia potencial.

A influência da atuação de um dispositivo FACTS nas interações intermáquinas é estudada nos trabalhos de (COLVARA; MARQUES, 2009; PERARO, 2010) em que se definiram o fator de efeito e o coeficiente de eficácia como parâmetros de valoração da ação de um certo dispositivo FACTS sobre uma determinada admitância de transferência entre pares de máquina do sistema.

A partir disto, os trabalhos de (CAPELLETE, 2012; MARTINS, 2012) analisam a influência de dispositivos FACTS na função energia potencial do sistema multimáquinas e a compensação dinâmica na trajetória do sistema frente a uma grande perturbação, visando à melhoria da estabilidade transitória.

Também utilizando os conceitos de coeficiente de eficácia e fator de efeito, Silva Junior (2014) apresenta um estudo sobre análise e controle coordenado de múltiplos dispositivos FACTS com vistas à melhoria da estabilidade transitória de SEE.

Neste trabalho propõe-se utilizar controle adicional sobre a compensação do sistema de transmissão considerando múltiplos dispositivos FACTS, neste momento empregando SVC e TCSC, destacando que se visa aproveitar dispositivos já alocados no sistema com objetivo de estabilização do sistema em regime transitório.

Não se encontram na literatura especializada relatos do uso de controle coordenado de múltiplos dispositivos FACTS considerando seus coeficientes de efeitos, o que motivou o esforço no desenvolvimento deste trabalho.

Propõe-se utilizar a metodologia de análise de estabilidade transitória desenvolvida em (COLVARA, 1988). Em um SEE operando em regime permanente, define-se uma região no espaço de estado em torno do ponto de equilíbrio estável tal que, no seu interior, o torque líquido das máquinas síncronas se caracterizam como ação restaurativa do equilíbrio, denominando-a Região de Sincronização Positiva (RSP). Analisa-se então o comportamento da trajetória após uma perturbação em relação às fronteiras desta região, concluindo-se pela estabilidade quando a trajetória evolui no sentido do interior da RSP e pela instabilidade quando uma fronteira é ultrapassada sendo a RSP definitivamente abandonada. O teste de estabilidade da RSP é bastante satisfatório, principalmente no caso do sistema multimáquinas,

quando se observa o comportamento de cada par de máquinas do sistema, e entre eles observam-se os pares mais afetados pela perturbação considerada para o estudo.

## 1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para um melhor entendimento e organização, os demais capítulos deste trabalho estão organizados da seguinte forma:

No capítulo 2, é feita a **Representação do Sistema de Energia Elétrica**. Trata-se inicialmente a representação do sistema máquina versus barra infinita em que os princípios e conceitos empregados são mais facilmente visualizados, e após, o sistema multimáquinas, pois é nesse ambiente que os múltiplos dispositivos FACTS cumprem a finalidade explorada no presente trabalho.

No capítulo 3, **Estabilidade de Sistemas de Energia Elétrica**, são abordados os conceitos de estabilidade em SEE e métodos de análise de estabilidade transitória com vistas ao sincronismo entre as máquinas do sistema.

No capítulo 4, **Métodos de Análise de Estabilidade Transitória** fazem-se os desenvolvimentos para incorporar no método de Região de Sincronização Positiva (RSP) os efeitos da atuação de dispositivos FACTS, obtendo-se as condições para análise da evolução da trajetória pós-falta do sistema.

No capítulo 5, **Introdução dos Dispositivos FACTS no SEE e sua Consideração na Análise de Estabilidade**, apresenta-se um modelo simplificado do SVC e do TCSC e em seguida é feita a introdução dos dispositivos no sistema multimáquinas de modo que a redução para as barras internas dos geradores do sistema mantenha os efeitos da ação dos dispositivos por meio dos coeficientes de eficácia e fator de efeito.

No capítulo 6, **Inclusão dos Efeitos de Dispositivos FACTS nas Fronteiras da Região de Estabilidade**, é analisada a inclusão dos efeitos dos múltiplos dispositivos FACTS nas fronteiras da Região de Estabilidade, e apresentado o desenvolvimento de uma lei de controle com o objetivo de aumentar a área da Região de Sincronização Positiva e consequentemente melhorar a estabilidade do sistema.

No capítulo 7, **Simulações e Resultados**, são apresentados resultados de simulações digitais com o propósito de testar a validade das afirmativas e desenvolvimentos apresentados ao

longo do trabalho, considerando a ação de múltiplos dispositivos FACTS em situações de contingências com potencial ameaça a estabilidade transitória de sistemas multimáquinas. Serão usados dois sistemas para simulações: o sistema “Simétrico de Duas Áreas” composto por 4 máquinas, 11 barras e o sistema “New England” composto por 10 máquinas e 39 barras.

No capítulo 8, são apresentadas as principais **Conclusões** desse trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a representação do equacionamento do Sistema de Energia Elétrica multimáquinas, juntamente com a representação do Regulador Automático de Tensão (RAT). A rede elétrica será representada por matriz de admitância de barras com o objetivo de facilitar a inclusão de dispositivos FACTS no sistema.

Serão apresentados os tipos de dispositivos FACTS e os principais benefícios que essa tecnologia pode trazer.

### 2.2 REDE

O interesse de estudo desse trabalho está no regime transitório relativo ao sincronismo eletromecânico do sistema. Considerando a rede elétrica em regime permanente senoidal, uma vez que suas dinâmicas, de natureza eletromagnética, são muito mais rápidas que as demais dinâmicas consideradas neste estudo, permite-se o tratamento fasorial e a representação das cargas por impedâncias (admitâncias) constantes (ANDERSON; FOUAD 2000). A rede é assim representada pela equação matricial algébrica:

$$I = YE \quad (1)$$

Sendo:

$I$  = Vetor injeções de correntes de barra;

$E$  = Vetor das tensões de barra;

$Y$  = Matriz de admitância de barra;

A matriz de admitância de barra é complexa e pode ser escrita como:

$$Y = G + jB \quad (2)$$

Onde  $G$  e  $B$  são as matrizes de condutância e susceptância das barras respectivamente. São matrizes quadradas de dimensão igual ao número de barras da rede.  $j$  é a unidade imaginária ( $j = \sqrt{-1}$ ).

Se nenhum elemento da rede apresenta acoplamento mútuo com qualquer outro a matriz admitância de barra é construída de modo bastante simples a partir dos elementos primitivos como:

$$\begin{aligned} Y_{kk} &= \sum_{\ell \in \Omega_k} y_{k\ell} \\ Y_{k\ell} &= -y_{k\ell}; \forall \ell \neq k \end{aligned} \quad (3)$$

Onde  $k$  e  $\ell$  designam barras genéricas da rede e as correspondentes linhas e/ou colunas da matriz  $\mathbf{Y}$ ,  $y_{k\ell}$  é a admitância do elemento primitivo (linha de transmissão ou transformador) conectado entre as barras  $k$  e  $\ell$  e  $\Omega_k$  é o conjunto dos elementos adjacentes (conectados a) a barra  $k$ .

### 2.3 MAQUINA SÍNCRONA

A máquina síncrona considerada neste estudo é descrita pelo modelo de dois eixos, pois além da dinâmica descrita pela posição angular do rotor da máquina ( $\delta$ ) e o desvio da velocidade do rotor em relação ao valor síncrono, são representadas as dinâmicas do campo (eixo direto) por meio da tensão de eixo em quadratura  $E'_q$  e de um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura por meio da tensão do eixo direto  $E'_d$ , de modo que a máquina fica descrita por:

$$\dot{\delta} = \omega \quad (4)$$

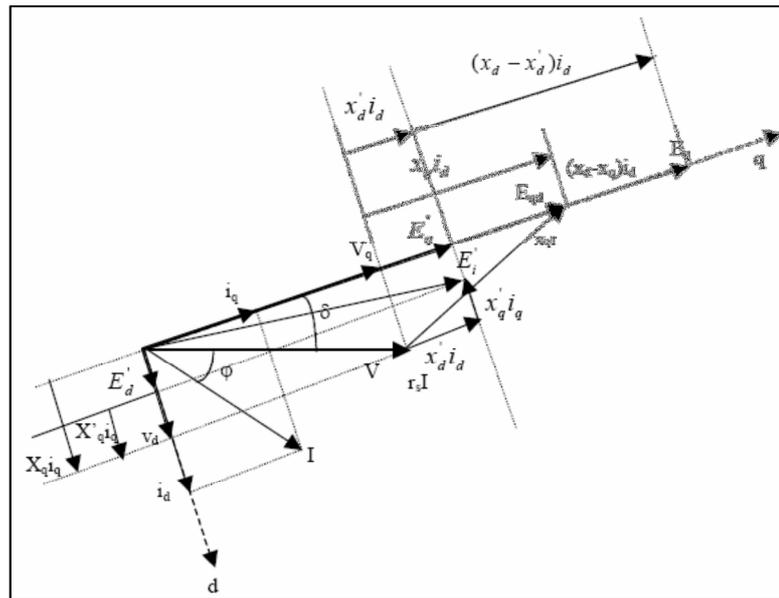
$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (-D\omega + P_m - P_e) \quad (5)$$

$$\tau_{d0} \dot{E}_q = -E_q - (x_d - x'_d) i_d + E_{fd} \quad (6)$$

$$\tau_{q0} \dot{E}_d = -E_d + (x_q - x'_q) i_q \quad (7)$$

Graficamente, têm-se o diagrama fasorial mostrado na Figura 1.

**Figura 1** - Diagrama Fasorial da Máquina Síncrona.



Fonte: Colvara (1988).

onde

$\delta$  = posição angular medida em relação a um eixo que gira à velocidade síncrona;

$\omega$  = desvio de velocidade angular da máquina síncrona com relação a velocidade síncrona;

$D$  = constante de amortecimento [s];

$E'_d$  = tensão proporcional a enlace de fluxo de enrolamento amortecedor de eixo em quadratura;

$E'_q$  = tensão proporcional ao enlace de fluxo do campo (eixo direto);

$E_{fd}$  = tensão de excitação;

$i_d$  = componente de eixo direto da corrente terminal da máquina;

$i_q$  = componente de eixo em quadratura da corrente terminal da máquina;

$M$  = constante de inércia [s<sup>2</sup>];

$P_e$  = potência elétrica entregue pela máquina síncrona;

$P_m$  = potência mecânica de entrada (fornecida à máquina síncrona);

$T'_{d0}$  = constante de tempo de circuito aberto de eixo direto;

$T'_{q0}$  = constante de tempo de circuito aberto de eixo em quadratura;

$x'_d$  = reatância transitória de eixo direto;

$x_d$  = reatância de eixo direto;

$x'_q$  = reatância transitória de eixo em quadratura;

$x_q$  = reatância de eixo em quadratura.

Observa-se que, na representação da máquina segundo seus eixos  $d$  e  $q$ , define-se o eixo  $d$  como real; portanto, todas as grandezas alocadas no eixo  $q$  são, neste referencial, imaginárias.

A potência elétrica ( $P_e$ ) entregue pela máquina é dada por:

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (8)$$

Sendo  $v_d$  e  $v_q$  as componentes de eixo direto e quadratura da tensão terminal da máquina dadas por

$$v_d = E'_d + x'_q i_q \quad (9)$$

$$v_q = E'_q - x'_d i_d \quad (10)$$

Substituindo (9) e (10) em (8) temos:

$$P_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (x'_q - x'_d) i_d i_q \quad (11)$$

se desprezarmos a saliência transitória, ou seja, considerarmos  $x'_q \cong x'_d$ , têm-se a potência elétrica dada por:

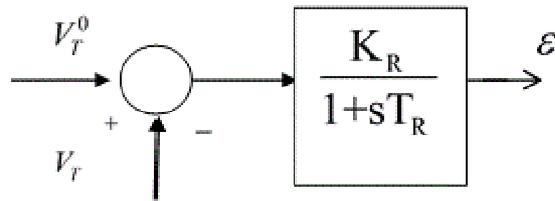
$$P_e \cong E'_d i_d + E'_q i_q \quad (12)$$

## 2.4 REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

Desde que os Reguladores Automáticos de Tensão (RATs) começaram a ser utilizados nos SEE, vários tipos e modelos diferentes destes reguladores foram desenvolvidos ao longo

dos anos e a evolução de tais modelos pode ser acompanhada, por exemplo, em (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2000). O Regulador Automático de Tensão (RAT) pode ser representado por um bloco linear de primeira ordem, definido por um ganho  $K_R$  e constante de tempo  $T_R$ .

**Figura 2** - Diagrama de blocos do RAT.



Fonte: Elgerd (1982).

$$\varepsilon = E_{fd} - E_{fd}^0 \quad (13)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{-\varepsilon - K_R \Delta V_T}{T_R} \quad (14)$$

com

$$\Delta V_T = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} - V_T^0 \quad (15)$$

ou, admitindo-se alguma aproximação

$$\Delta V_T \cong \frac{v_d^0}{V_T^0} \Delta v_d + \frac{v_q^0}{V_T^0} \Delta v_q \quad (16)$$

onde as variações das componentes de eixo direto e quadratura da tensão terminal podem ser não lineares, bem como não são necessariamente “pequenas”.

sendo

$K_R$  = ganho transitório (modelo reduzido RAT);

$T_R$  = constante de tempo do RAT;

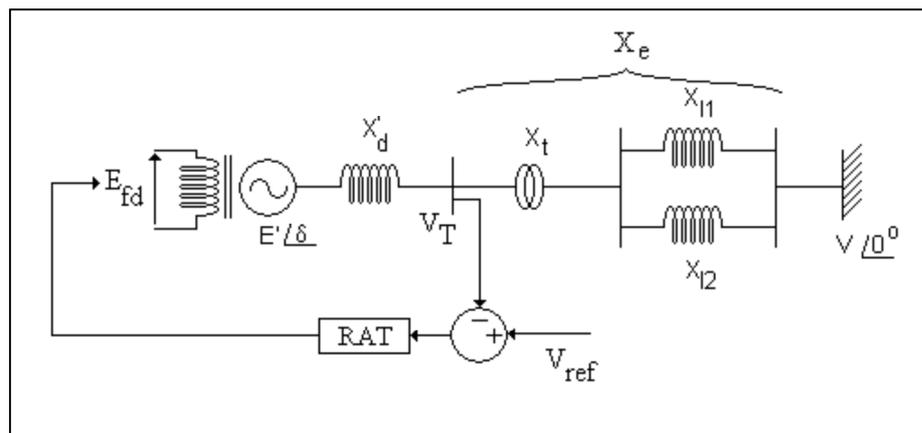
$V_T$  = tensão terminal;

$V_T^0$  = tensão terminal no equilíbrio.

## 2.5 MÁQUINA CONTRA BARRA INFINITA (MBI)

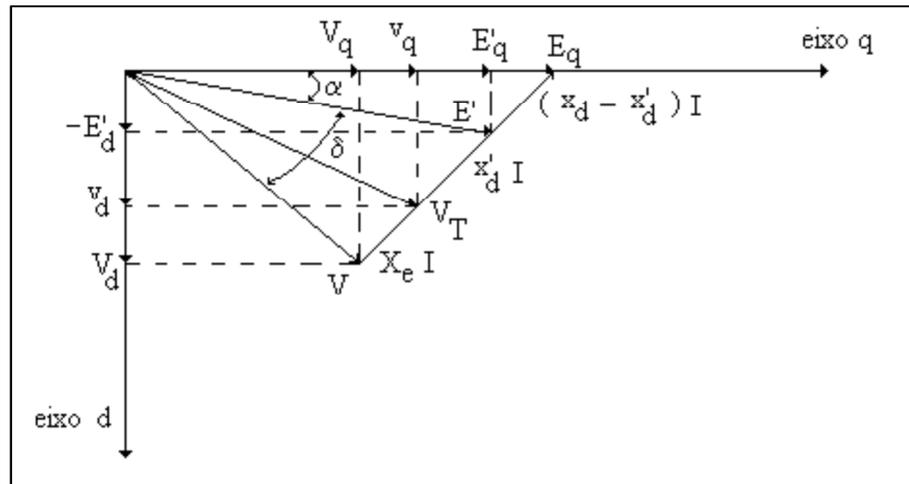
O sistema MBI é composto de um gerador (máquina síncrona) conectado a um barramento infinito, cuja tensão é  $V$ , através de uma linha de transmissão de reatância  $X_e$ , como apresentado no diagrama de impedâncias da Figura 3. O termo barramento infinito corresponde ao modelo de um sistema cujo porte é tão maior que o da máquina sob estudo que se justifica adotar a hipótese de que pode ser representado por uma barra cuja frequência e tensão permanecem substancialmente constantes independentemente da potência que o sistema gera ou absorve ou das perturbações aplicadas.

**Figura 3** - Diagrama unifilar do sistema MBI.



Fonte: Colvara (1988).

**Figura 4** - Diagrama Fasorial do sistema MBI.



**Fonte:** Colvara (1988).

Sendo  $\delta$  a posição angular do rotor em relação à barra infinita, cuja tensão é  $V$ , então pode-se obter:

$$i_q = \frac{V \sin \delta - E'_d}{X_e + X'_q} \quad (17)$$

$$i_d = \frac{-V \cos \delta + E'_q}{X_e + X'_d} \quad (18)$$

Transladando o ponto de equilíbrio para a origem, notando que as variáveis associadas aos blocos lineares já são definidas como desvios em relação ao valor de equilíbrio, e definindo:

$$\sigma = \delta - \delta^0 \quad (19)$$

$$e_d = E'_d - E_d^0 \quad (20)$$

$$e_q = E'_q - E_q^0 \quad (21)$$

e substituindo (16) combinado com (9) e (10) temos:

$$\Delta V_T \cong K_{ed} e_d + K_{eq} e_q + X'_q \frac{v_d^0}{v_T^0} h(\sigma) - X'_d \frac{v_q^0}{v_T^0} g(\sigma) \quad (22)$$

sendo,

$$K_{ed} = \frac{X_e}{X_e + X'_q} \frac{v_d^0}{V_T^0} \quad (23)$$

$$K_{eq} = \frac{X_e}{X_e + X'_d} \frac{v_q^0}{V_T^0} \quad (24)$$

e as funções não lineares,

$$g(\sigma) = \frac{V}{X_e + X'_d} \left[ -\cos(\sigma + \delta^0) + \cos \delta^0 \right] \quad (25)$$

$$h(\sigma) = \frac{V}{X_e + X'_q} \left[ \text{sen}(\sigma + \delta^0) - \text{sen} \delta^0 \right] \quad (26)$$

A potência elétrica fornecida pela máquina, de (12) é dada por:

$$P_e = \frac{E'_q V}{X_e + X'_d} \text{sen} \delta - \frac{E'_d V}{X_e + X'_q} \cos \delta \quad (27)$$

Tomando as grandezas em termos de desvios (não necessariamente pequenos) em relação ao valor de equilíbrio, obtém-se:

$$\begin{aligned} \Delta P_e &= f(\sigma, e_d, e_q) = \\ &= BV \left[ (E_q^0 + e_q) \text{sen} \delta - E_q^0 \text{sen} \delta^0 - (E_d^0 + e_d) \cos \delta + E_d^0 \cos \delta^0 \right] \end{aligned} \quad (28)$$

sendo  $B = (X_e + X'_d)^{-1} = (X_e + X'_q)^{-1}$

O sistema de energia elétrica com o regulador automático de tensão é escrito como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \\ \dot{\varepsilon} \\ \dot{p}_g \\ \dot{p}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\eta_{1d} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\eta_{1q} & \eta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\eta_{5d} & -\eta_{5q} & -\eta_4 & 0 & 0 \\ -\frac{a}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_M} & -\frac{1}{T_M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \\ \varepsilon \\ p_g \\ p_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \eta_{2d} h(\sigma) \\ -\eta_{2q} g(\sigma) \\ \eta_6 g(\sigma) - \eta_7 h(\sigma) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

com os parâmetros definidos como:

$$\eta_{1q} = \left( \frac{x_e + x_d}{x_e + x'_d} \right) \cdot \frac{1}{T'_{d0}}; \quad \eta_{1d} = \left( \frac{x_e + x_q}{x_e + x'_q} \right) \cdot \frac{1}{T'_{q0}}; \quad \eta_{2q} = \left( \frac{x_d - x'_d}{x_e + x'_d} \right) \cdot \frac{1}{T'_{d0}}; \quad \eta_{2d} = \left( \frac{x_q - x'_q}{x_e + x'_d} \right) \cdot \frac{1}{T'_{q0}};$$

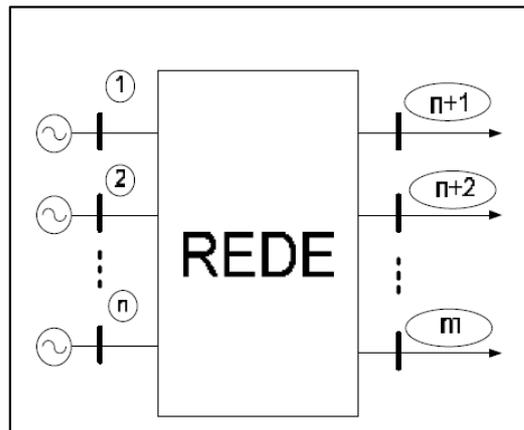
$$\eta_3 = \frac{1}{T'_{d0}}; \eta_4 = \frac{1}{T_R}; \quad \eta_{5q} = \frac{K_R}{T_R} \left( \frac{x_e}{x_e + x'_d} \right) \cdot \frac{v_q^0}{V_T^0}; \quad \eta_{5d} = \frac{K_R}{T_R} \left( \frac{x_e}{x_e + x'_q} \right) \cdot \frac{v_d^0}{V_T^0}; \eta_6 = \frac{K_R}{T_R} X'_d \cdot \frac{v_q^0}{V_T^0};$$

$$\eta_7 = \frac{K_R}{T_R} X'_q \cdot \frac{v_d^0}{V_T^0}.$$

## 2.6 SISTEMA MULTIMÁQUINAS (SM)

A Figura 5 ilustra a interconexão de um sistema composto por  $n$  máquinas síncronas e  $m$  barras e a rede é considerada em regime permanente.

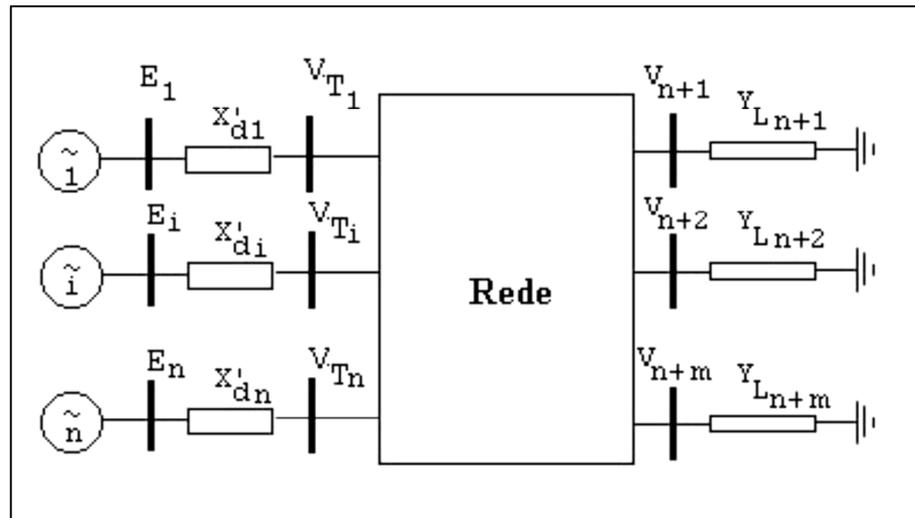
**Figura 5** – Sistemas Multimáquinas.



**Fonte:** Silva (2010).

Considerando as cargas representadas por admitâncias constantes e incorporando-se a rede as barras internas das máquinas, ela terá  $m+n$  barras, e será representada com a preservação da estrutura (ANDERSON; FOUAD, 2000), como pode ser observado na Figura 6 (COLVARA, 2005).

**Figura 6** – Sistemas Multimáquinas com barras internas e cargas.



Fonte: Colvara (2005)

A tensão interna de um gerador genérico  $i$ ,  $E_i'$ , cujas componentes de eixo direto e em quadratura são  $E_{di}'$  e  $E_{qi}'$ , respectivamente, é a tensão atrás de  $X_{di}'$ .

Com base nesta rede reduzida, pode-se calcular a corrente terminal de uma máquina genérica  $i$ , como:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} E_j \quad (30)$$

Colocando em termos de componentes na referência da rede, com os índices  $R$  e  $I$  indicando as partes real e imaginária, respectivamente,  $G_{ij}$  e  $B_{ij}$  sendo a condutância e susceptância de transferência entre as barras  $i$  e  $j$ :

$$\begin{bmatrix} I_{Ri} \\ I_{Ii} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Rj} \\ E_{Ij} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Para obter as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente da  $i$ -ésima máquina, aplica-se a transformação da representação das correntes da referência da rede para a referência da  $i$ -ésima máquina:

$$\begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta_i & -\text{cos} \delta_i \\ \text{cos} \delta_i & \text{sen} \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ri} \\ I_{Ii} \end{bmatrix} \quad (32)$$

levando a

$$\begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \text{sen} \delta_i & -\cos \delta_i \\ \cos \delta_i & \text{sen} \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sen} \delta_i & \cos \delta_i \\ -\cos \delta_i & \text{sen} \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{dj} \\ E_{qj} \end{bmatrix} \right\} \quad (33)$$

que resulta em

$$\begin{aligned} i_{di} &= G_{ii} E_{di} - B_{ii} E_{qi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[ B_{ij} (E_{dj} \text{sen} \delta_{ij} - E_{qj} \cos \delta_{ij}) \right] + \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[ G_{ij} (E_{dj} \cos \delta_{ij} + E_{qj} \text{sen} \delta_{ij}) \right] \end{aligned} \quad (34)$$

e

$$\begin{aligned} i_{qi} &= G_{ii} E_{qi} + B_{ii} E_{di} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[ B_{ij} (E_{dj} \cos \delta_{ij} + E_{qj} \text{sen} \delta_{ij}) \right] + \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[ G_{ij} (-E_{dj} \text{sen} \delta_{ij} + E_{qj} \cos \delta_{ij}) \right] \end{aligned} \quad (35)$$

Combinando (12), (34) e (35) chega-se à

$$\begin{aligned} P_{ei} &= G_{ii} (E_{dj}^2 + E_{qi}^2) + \sum_{j=1}^n \left\{ B_{ij} \left[ (E_{di} E_{dj} + E_{qi} E_{qj}) \text{sen} \delta_{ij} + (-E_{di} E_{qj} + E_{dj} E_{qi}) \cos \delta_{ij} \right] \right\} + \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left\{ G_{ij} \left[ (E_{di} E_{dj} + E_{qi} E_{qj}) \cos \delta_{ij} + (E_{di} E_{qj} - E_{dj} E_{qi}) \text{sen} \delta_{ij} \right] \right\} \end{aligned} \quad (36)$$

onde  $n$  é o número de máquinas. Sendo  $\delta \in R^n$ , há  $m = \frac{n(n-1)}{2}$  pares de máquinas, portanto  $m$  defasagens angulares  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ . Transladando o ponto de equilíbrio para a origem, utilizando-se a matriz de incidência  $K \in R^{n \times m}$  cuja estrutura é bem conhecida (PAI, 1981), temos:

$$\sigma = K (\delta - \delta^0) \quad (37)$$

Com  $\sigma \in R^m$  e  $k = (i, j)$  temos:

$$\sigma_k = \delta_{ij} - \delta_{ij}^0 \quad (38)$$

Definindo as novas variáveis como:

$$e_{di} = E'_{di} - E_{di}^0 \quad (39)$$

$$e_{qi} = E'_{qi} - E_{qi}^0 \quad (40)$$

com  $i = 1, 2, \dots, n$ ; as variações da potência elétrica da  $i$ -ésima máquina podem ser escritas como:

$$\Delta P_{ei} = \sum_{j=1}^n \left\{ B_{ij} \left[ \begin{aligned} & \left( E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj} \right) \text{sen} \left( \sigma_k + \delta_{ij}^0 \right) - \left( E_{di}^0 E_{dj}^0 + E_{qi}^0 E_{qj}^0 \right) \text{sen} \delta_{ij}^0 \\ & + \left( -E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi} \right) \cos \left( \sigma_k + \delta_{ij}^0 \right) - \left( -E_{di}^0 E_{qj}^0 + E_{dj}^0 E_{qi}^0 \right) \cos \delta_{ij}^0 \end{aligned} \right] \right\} \quad (41)$$

e definindo  $f(\sigma, e_d, e_q) \in R^m$  como o vetor cujos componentes são dados por

$$\begin{aligned} f_k(\sigma_k, e_{di}, e_{qi}, e_{dj}, e_{qj}) &= \\ &= B_{ij} \left[ \begin{aligned} & \left( E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj} \right) \text{sen} \left( \sigma_k + \delta_{ij}^0 \right) - \left( E_{di}^0 E_{dj}^0 + E_{qi}^0 E_{qj}^0 \right) \text{sen} \delta_{ij}^0 + \\ & + \left( -E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi} \right) \cos \left( \sigma_k + \delta_{ij}^0 \right) - \left( -E_{di}^0 E_{qj}^0 + E_{dj}^0 E_{qi}^0 \right) \cos \delta_{ij}^0 \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (42)$$

com  $k = 1, 2, \dots, m$ ;

Então, as variações de potência ativa, desconsiderando as condutâncias de transferências, são dadas por:

$$\Delta P_{ei} = K_i^T f(\sigma, e_d, e_q) \quad (43)$$

Sendo  $K_i$  a  $i$ -ésima coluna da matriz de incidência  $K \in R^{n \times m}$ .

As variações de correntes podem ser expressas por:

$$\Delta i_{di} = G_{ii} e_{di} - B_{ii} e_{qi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left\{ B_{ij} \left[ E'_{dj} \left( \text{sen} \left( \sigma_k + \delta_{ij}^0 \right) - \text{sen} \delta_{ij}^0 \right) - E'_{qj} \left( \cos \left( \sigma_k + \delta_{ij}^0 \right) - \cos \delta_{ij}^0 \right) \right] \right\} \quad (44)$$

ou

$$\Delta i_{di} = G_{ii} e_{di} - B_{ii} e_{qi} + g_i(\sigma, e_d, e_q) \quad (45)$$

e

$$\Delta i_{qi} = G_{ii} e_{qi} - B_{ii} e_{di} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left\{ B_{ij} \left[ E'_{dj} \left( \cos \left( \sigma_k + \delta_{ij}^0 \right) - \cos \delta_{ij}^0 \right) + E'_{qj} \left( \text{sen} \left( \sigma_k + \delta_{ij}^0 \right) - \text{sen} \delta_{ij}^0 \right) \right] \right\} \quad (46)$$

ou

$$\Delta i_{qi} = G_{ii} e_{di} - B_{ii} e_{di} + h_i(\sigma, e_d, e_q) \quad (47)$$

Por simplicidade de notação e em consonância com (20) e (21) utiliza-se

$$E'_{qi} = E_{qi}^0 + e_{qi}; E'_{di} = E_{di}^0 + e_{di} \quad (48)$$

Com isto pode-se estabelecer uma expressão para a tensão terminal da  $i$ -ésima máquina, dada por (15) com (8) e (9).

$$\Delta V_{Ti} \cong K_{edi} e_{di} + K_{eqi} e_{qi} - K_{gi} g_i(\sigma, e_d, e_q) + K_{hi} h_i(\sigma, e_d, e_q) \quad (49)$$

Onde

$$K_{edi} = \left(1 + X'_{qi} B_{ii}\right) \frac{V_{di}^0}{V_{Ti}^0} - X'_{di} G_{ii} \frac{V_{qi}^0}{V_{Ti}^0} \quad (50)$$

$$K_{eqi} = \left(1 + X'_{qi} B_{ii}\right) \frac{V_{qi}^0}{V_{Ti}^0} + X'_{qi} G_{ii} \frac{V_{di}^0}{V_{Ti}^0} \quad (51)$$

$$K_{gi} = X'_{di} \frac{V_{qi}^0}{V_{Ti}^0} \quad (52)$$

$$K_{hi} = X'_{qi} \frac{V_{di}^0}{V_{Ti}^0} \quad (53)$$

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ P_m \\ \omega \\ \cdot \\ \sigma \\ \cdot \\ e_d \\ \cdot \\ e_q \\ \cdot \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_M^{-1} & -T_M^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M^{-1} & M^{-1}D & M^{-1}K^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -N_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1q} & N_3 \\ 0 & 0 & 0 & -N'_{5d} & -N'_{5q} & -N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_m \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_{2d}h(\sigma) \\ -N_{2q}g(\sigma) \\ N'_6g(\bullet) - N'_7h(\bullet) \end{bmatrix} \quad (54)$$

onde as matrizes são:

$$M = \text{diag}[M_i]; D = \text{diag}[D_i]; T_M = \text{diag}[T_{Mi}]; N_j = \text{diag}[\eta_{ji}]; T_j = \text{diag}[T_{ji}]$$

E os elementos ainda não definidos são:

$$\eta_{1di} = \left[ 1 - (X_{qi} - X'_{qi}) B_{ii} \right] \frac{1}{T'_{q0i}} \quad (55)$$

$$\eta_{1qi} = \left[ 1 - (X_{di} - X'_{di}) B_{ii} \right] \frac{1}{T'_{d0i}} \quad (56)$$

$$\eta_{2di} = \frac{(X_{qi} - X'_{qi})}{T'_{q0i}} \quad (57)$$

$$\eta_{2qi} = \frac{(X_{di} - X'_{di})}{T'_{d0i}} \quad (58)$$

$$\eta_3 = \frac{1}{T'_{d0}}; \eta_4 = \frac{1}{T_R}; \eta'_{5di} = \frac{K_{Ri}}{T_{Ri}} K_{edi}; \eta'_{5qi} = \frac{K_{Ri}}{T_{Ri}} K_{eqi}; \eta'_{6i} = \frac{K_{Ri}}{T_{Ri}} K_{gi}; \eta'_{7i} = \frac{K_{Ri}}{T_{Ri}} K_{hi} \quad (59)$$

## 2.7 DISPOSITIVOS FACTS

Em 1991, N.G. Hingorani lançou o conceito básico de FACTS – “Flexible Alternating Current Transmission Systems”, no qual a noção de flexibilização do sistema estava claramente associada à capacidade do controle direto do fluxo de potência no nível de transmissão de energia elétrica. A incorporação de dispositivos FACTS na operação de sistemas elétricos, além de abrir um enorme campo para aplicação da tecnologia de controle de alta potência, ao mesmo tempo permite utilizar melhor a infra-estrutura de transmissão já disponível (ERCHE, et al, 1992; HINGORANI, 1991; MIHALIC, et al. 1993).

Os principais benefícios que a tecnologia FACTS pode trazer são os seguintes:

- Ampliar a capacidade de transmissão das linhas já existentes;
- Operar linhas em paralelo, mesmo que tenham diferentes capacidades;
- Direcionar o fluxo de potência por caminhos mais adequados;
- Ajustar rapidamente o suporte de reativos durante a operação;
- Estabilizar eficientemente oscilações de tensão e ângulo;

Evidentemente, por trás dos inúmeros benefícios que podem ser obtidos com esses dispositivos, existem tipos específicos que atendem de maneira mais efetiva cada uma das

necessidades do sistema elétrico. Além disto, em cada projeto, o dispositivo FACTS escolhido normalmente atende ainda a condições sistêmicas particulares, perfazendo que cada projeto seja essencialmente singular.

Dispositivos FACTS possibilitam a obtenção de variações contínuas e rápidas de grandezas tais como tensão, corrente e reatância, proporcionando, desta forma, um rápido controle dos fluxos de potência na rede de transmissão, mantendo os mesmos em rotas estabelecidas, bem como um aumento da capacidade de transmissão. Embora esses sejam os objetivos básicos da aplicação de dispositivos FACTS, uma melhora significativa da estabilidade do sistema também pode ser obtida através da compensação dinâmica de reativos realizada por esses dispositivos, particularmente no que diz respeito à estabilidade de oscilações. Um amortecimento consistente e rápido das oscilações pode ser obtido através da compensação em derivação (modulação da tensão nodal na rede) ou série (modulação das reatâncias série das linhas) (SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 2000).

### **Tipos de dispositivos FACTS**

Os dispositivos FACTS estão divididos em quatro categorias, segundo (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

- Controladores série;
- Controladores em derivação;
- Controladores combinados série-série;
- Controladores combinados série-paralelo.

#### *2.7.1 CONTROLADORES SÉRIE*

Os controladores em série atuam como fontes de tensão conectadas em série a linha de transmissão. Se a tensão estiver em quadratura com a corrente da linha, o controlador série apenas fornece ou consome potência reativa. Dessa maneira, é possível controlar diretamente o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão e, também, aumentar a capacidade de

transferência de potência por uma linha de transmissão (já que o fluxo de potência é inversamente proporcional a reatância indutiva da linha) (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Pode ser citados nessa categoria CSC (Controlled Series Compensator), o TCSC Thyristor Controlled Series Compensator) e o SSSC (Static Synchronous Series Compensator).

### *2.7.2 CONTROLADORES EM DERIVAÇÃO*

Os controladores em derivação atuam como fontes de correntes ou de tensão conectadas em derivação a linha de transmissão se a corrente injetada estiver em quadratura com a tensão da linha, o controlador opera como uma reatância capacitiva (ou indutiva), de valor variável, conectada em derivação á linha fornecendo (ou consumindo) potência reativa ao sistema. usualmente, os controladores em derivação controlam a tensão da barra ao qual se conectam. o controlador operando como uma reatância indutiva variável pode minimizar uma eventual sobretensão da linha de transmissão que ocorre, principalmente, nas situações onde cargas leves são predominantes no sistema e, com o controlador operando como uma reatância capacitiva variável, a tensão ao longo da linha pode ser mantida em valores aceitáveis nos casos de alta demanda de energia elétrica (HINGORANI; GYUGYI, 2000)

### *2.7.3 CONTROLADORES COMBINADOS SÉRIE-SÉRIE*

Os controladores combinados série-série podem combinar dois dispositivos FACTS independentes, que são controlados de uma maneira coordenada em um sistema de transmissão com muitas linhas, ou podem ser controladores unificados, nos quais controladores conectados em série fornecem compensação reativa independentemente um do outro, e também transferem potência ativa entre linhas via uma conexão de potência entre eles. Essa categoria inclui o Controlador Interlinha de Fluxo de Potência (IPFC – Interline Power Flow Controller), que incorpora dois ou mais SSSCs, acoplados via um link de corrente contínua para facilitar fluxo bidirecional de potência ativa entre os terminais de corrente alternada dos SSSCs, e são controlados de maneira a realizar compensação reativa independente para o ajuste de fluxo de potência ativa em cada linha e manter a distribuição de reativos desejada entre as linhas (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

#### 2.7.4 CONTROLADORES COMBINADOS SÉRIE-DERIVAÇÃO.

Os controladores série e derivação podem ser combinados e com isso, modificar todos os parâmetros que determinam o fluxo de potência. Em princípio, essa combinação operada de forma coordenada injeta corrente no sistema através do elemento em derivação e tensão em série através do elemento série. A principal vantagem destes dispositivos é oferecer um caminho para o fluxo de potência ativa entre os controladores, atuando sobre as potências ativa e reativa. Pode-se mencionar nessa categoria o Controlador de Fluxo de Potência Unificado (UPFC- Unified Power Flow Controller), que utiliza combinação unificada de um STATCOM e um SSSC, acoplados por um link de corrente contínua para permitir fluxo de potência ativa entre eles (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

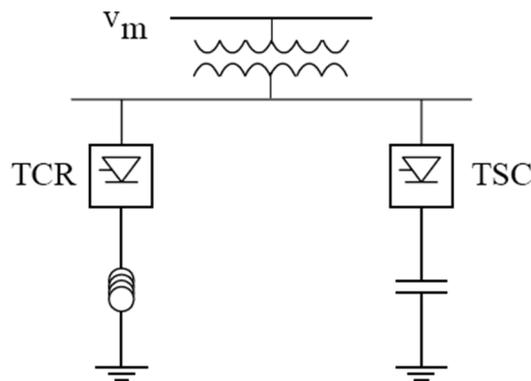
### 2.8 MODELO DINÂMICO DO SVC

Pode-se dizer que os compensadores estáticos de reativos (SVC) foram os precursores dos controladores FACTS existentes atualmente. Desenvolvidos no final da década de 1960 para a compensação reativa de grandes cargas industriais, tal como fornos a arcos, mas depois foram adaptados para aumentar a capacidade e melhorar a transmissão de potência em SEE.

Este compensador é descrito em Hingorani e Gyugyi (2000) e Mathur e Varma (2002) como um gerador estático de reativos shunt cuja saída é ajustada para injetar corrente capacitiva ou indutiva de forma a manter ou controlar parâmetros específicos do SEE.

O SVC mais difundido atualmente emprega reatores controlados a tiristores (TCR – Thyristor Controlled Reactor) e capacitores chaveados a tiristores (TSC – Thyristor-Switched Capacitor) como ilustrado na Figura 10.

**Figura 7** – Esquema básico de um SVC.



**Fonte:** Song e Johns (1999).

Através de uma coordenação adequada do chaveamento dos capacitores e do controle do reator, a potência reativa injetada ou absorvida pelo SVC na barra em que é conectado pode variar continuamente para o controle da tensão, de forma a manter o fluxo de potência desejado na rede de transmissão, sob condições normais de operação, bem como sob condições de perturbações ou contingências (MARTINS, 2012; SONG; JOHNS, 1999;).

Para o estudo de estabilidade transitória, o modelo dinâmico do SVC será representado por uma função de transferência de primeira ordem similar aos modelos existentes na maioria dos programas de estabilidade (ANDERSON; FOUAD, 2000):

$$\Delta B_{SVC}(s) = \frac{K_{SVC}}{1 + s.T_{SVC}} u(s) \quad (60)$$

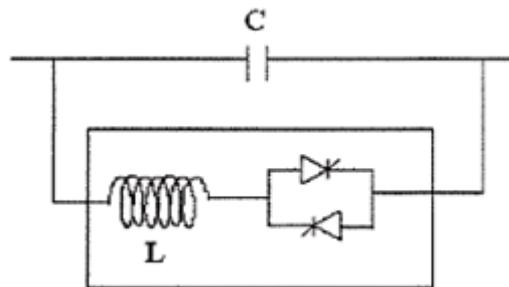
A variação da susceptância do SVC  $\Delta B_{SVC}$  depende do ganho  $K_{SVC}$ , da constante de tempo  $T_{SVC}$  que representa o atraso do circuito de disparo dos tiristores, geralmente este muito pequeno (WANG, 2000), e do sinal de entrada  $u$  que será definido pela lei de controle.

## 2.9 MODELO DINÂMICO DO TCSC

Os dispositivos FACTS são definidos pelo IEEE como: sistemas de transmissão em corrente alternada que utilizam controladores de eletrônica de potência e também outros controladores estáticos com o objetivo de aumentar a controlabilidade e a capacidade de transferência de potência de um sistema elétrico (MACHADO, 2003).

O TCSC pode oferecer vários benefícios para o sistema, como o controle rápido e contínuo para vários níveis de transmissão, controle do fluxo de potência em linhas de transmissão específica permitindo a utilização ótima da rede, melhoria nos limites de estabilidade (MATHUR; VARMA, 2002).

**Figura 8** – Esquema básico de um TCSC.



**Fonte:** Song e Jonhs (1999).

O TCSC é um controlador que é instalado em série com a linha de transmissão, compensando parte de sua reatância indutiva e inserindo uma reatância capacitiva, ou seja, em uma visão simples, a reatância do capacitor conectado em série com a linha de transmissão é reduzida, como se a linha de transmissão tivesse sido encurtada (JOHNS; SONG, 1999).

Para o estudo de estabilidade transitória, o modelo dinâmico do TCSC será representado por uma função de transferência de primeira ordem (JOHNS; SONG, 199):

$$\Delta X_{CSC}(s) = \frac{K_{CSC}}{1 + s.T_{CSC}} u(s) \quad (61)$$

## 2.10 CONCLUSÃO

Neste capítulo apresentada a representação do SEE, por meio de equações que descrevem o funcionamento das máquinas síncronas de um sistema multimáquinas e as suas interligações por meio da rede de transmissão fundamentais para aplicação da metodologia de análise e controle da estabilidade transitória desenvolvida nos próximos capítulos. Foram apresentados também os principais modelos de dispositivos FACTS, tipos e características, classificando-os de acordo com a forma como estão conectados à rede de transmissão.

### 3 ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

A estabilidade de SEE pode ser entendida como a capacidade do sistema de encontrar um novo ponto de operação em regime permanente após a ocorrência de uma perturbação. (KUNDUR, 1994). A estabilidade, ou instabilidade, de um SEE é estudada usualmente em duas abordagens: estabilidade de ângulo e estabilidade de tensão: Entretanto, destaca-se que muitas vezes as instabilidades podem ocorrer juntas, isto é, uma instabilidade de tensão pode levar a uma instabilidade de ângulo e vice-versa. Ocorre que nem sempre é fácil distingui-las, mas essa distinção é de suma importância para projetar controladores adequados. Uma definição simples para esses dois tipos de estabilidade, bem como para regime permanente e transitório, é (KUNDUR, 1994):

- **Estabilidade de ângulo:** é a capacidade dos geradores síncronos que compõem o sistema de permanecerem em sincronismo após a ocorrência de distúrbios na rede. A estabilidade angular pode ser analisada sob dois aspectos:
- **Estabilidade de regime permanente:** A estabilidade de regime permanente diz respeito à resposta do sistema frente a pequenas perturbações. As perturbações podem ser consideradas suficientemente pequenas para permitir o uso de modelos linearizados.
- **Estabilidade de regime transitório:** Esta forma de estabilidade relaciona-se ao comportamento do sistema elétrico e de um ou mais geradores frente a grandes perturbações. A instabilidade, na forma de perda de sincronismo, é caracterizada pelo crescimento aperiódico dos ângulos dos rotores.
- **Estabilidade de tensão:** é a capacidade de o sistema manter as tensões em todas as barras dentro de valores aceitáveis durante a operação normal ou após a ocorrência de distúrbios na rede.

Outra forma de classificar é utilizando o tipo de perturbação: grande perturbação ou pequena perturbação. Como exemplo de grandes perturbações tem-se: Curto-circuito em linhas de transmissão, saída de operação de um grande gerador, perda de uma linha de transmissão importante, etc. Entende-se por pequenas perturbações os distúrbios que podem ser estudados através da linearização das equações que representam o sistema para análise, como por exemplo, a variação gradual da carga que ocorre continuamente.

Uma definição baseada em princípios mais próximos do modelo físico do sistema para o que seria a estabilidade de tensão é proposta em (IEEE/CIGRE, 2004), onde a estabilidade de

tensão se refere à capacidade do sistema de potência de manter valores adequados de tensão em regime permanente em todas as barras do sistema após o mesmo ser submetido a uma perturbação, considerando uma dada condição inicial de operação.

### 3.1 ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Estabilidade transitória é definida como a capacidade do SEE manter o sincronismo quando é sujeito a uma perturbação transitória severa (KUNDUR 1994). A resposta do sistema resultante envolve grandes variações dos ângulos dos rotores dos geradores e é influenciada pela relação não linear potência – ângulo ( $P-\delta$ ). Neste caso, a estabilidade depende tanto da condição inicial do estado quanto da severidade da perturbação.

Pode-se entender a estabilidade estática de um sistema como uma condição de equilíbrio entre forças opostas. Quando operando em ponto de equilíbrio estável, as máquinas síncronas interconectadas mantêm-se sincronizadas por ação de forças que são então qualificadas como “forças restauradoras”. No estado de regime permanente existe um equilíbrio entre o torque mecânico motriz e o torque de carga elétrica em cada máquina, fazendo com que a velocidade do rotor permaneça constante. Se o sistema é perturbado, esse equilíbrio se desfaz, resultando em aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas.

Considere-se um sistema de potência operando em regime permanente com as velocidades das máquinas constantes e iguais a  $\omega_0$  (velocidade síncrona) e com os ângulos das forças eletromotrizes das máquinas  $\delta_0$ 's. Nessas condições, a potência mecânica fornecida a cada um dos geradores pela respectiva máquina primária é exatamente igual à somas das potências ativas consumida nas cargas acrescida da potência perdida na transmissão e outras perdas. Suponha-se que em determinado tempo  $t = t_0$  ocorra uma grande perturbação, como a perda de uma linha ou um curto-circuito em alguma barra ou linha. Devido à mudança topológica, o distúrbio causará um desequilíbrio de potência. Surge como consequência um excesso ou déficit de torque nas máquinas, que ocasionará a aceleração ou desaceleração de seus rotores, de modo não uniforme.

Os ângulos das máquinas irão se alterar no tempo, com consequentes variações das defasagens relativas, podendo-se, ao final, estabelecer um novo equilíbrio da potência com

preservação do sincronismo ou os rotores das máquinas afastarem-se indefinidamente, neste caso caracterizando a perda de sincronismo.

### 3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Um dos parâmetros mais comuns para análise da estabilidade transitória de um SEE em relação à robustez de resistir a uma dada contingência é o tempo crítico de abertura “ $t_{cr}$ ”, definido como o tempo máximo de duração que um distúrbio pode permanecer no sistema elétrico e este seja capaz de evoluir para um estado de equilíbrio (PAVELLA et al., 1998). Existem diversos métodos para obtenção do tempo crítico para o estudo da estabilidade transitória. Entre esses métodos, destacam-se três categorias: métodos indiretos, métodos diretos e métodos híbridos.

Os métodos indiretos, que utilizam simulações com métodos numéricos e análise de resultados *off-line*, são os mais tradicionais e fornecem resultados apurados para o tempo crítico, sem qualquer restrição quanto a modelagem empregada para representação do sistema. A grande desvantagem é que, dependendo da dimensão e complexidade de modelos do sistema, o esforço computacional e o tempo necessário para conclusão da análise podem ser muito grandes impedindo a aplicação em tempo real.

Os métodos diretos têm como princípio substituir os cálculos do segundo passo dos métodos indiretos (cálculos pós-falta) e suas repetições por um critério de estabilidade baseado em condições obtidas de análise da evolução da energia de afastamento do ponto de equilíbrio, originalmente obtida como função de Lyapunov. Então estima-se o domínio de estabilidade em torno de um ponto de equilíbrio estável no sistema pós-falta. O critério de Lyapunov visa definir no espaço de estados uma região de estabilidade para o ponto de equilíbrio pós-falta e determinar a intersecção da trajetória do sistema com os limites desta região (PAVELA; MURTHY, 1994). Todos os métodos diretos fundamentam-se em determinar uma energia crítica e a comparar com a energia transitória no instante da eliminação da falta, no caso da análise do transitório decorrente de curto-circuito.

Os métodos híbridos combinam características de diversos métodos entre si, tanto métodos diretos quanto indiretos.

### 3.3 MÉTODO TRADICIONAL (PASSO-A-PASSO)

A dinâmica de sistemas elétricos é descrita por dois sistemas de equações, um composto por equações algébricas não-lineares que descrevem o fluxo de potência na rede elétrica, e outro composto por equações diferenciais que descrevem a dinâmica dos geradores, elementos dinâmicos na rede tais como os capacitores série controlados a tiristor e outros tipos de controle, como os estabilizadores de sistemas de potência (PAVELLA et al., 1998).

O método clássico trata de resolver estes sistemas de equações pela integração numérica do sistema diferencial e pela solução iterativa do fluxo de potência na rede, e também é conhecido como método da solução no domínio do tempo.

### 3.4 MÉTODO DE LYAPUNOV

Estudos de estabilidade transitória, através de simulações no domínio do tempo, calculam a resposta no tempo de todas as variáveis de estado de um SEE. Esses métodos produzem resultados eficazes, porém são apresentadas respostas do tipo instável/estável, não fornecendo informações qualitativas sobre o comportamento do sistema. Conseqüentemente, a necessidade de se determinar o grau de estabilidade de um sistema não linear é um objetivo de grande importância para os pesquisadores. Neste sentido, o método de Lyapunov é bastante usado para lidar com o problema de estabilidade em sistemas não-lineares e assim também alcançando os sistemas de energia elétrica, como descrito em PAI (1981). A estabilidade do sistema é determinada usando funções ditas de Lyapunov definidas no espaço de estado considerando seu sinal e o de sua derivada temporal.

A seguir, apresenta-se o teorema de Lyapunov para sistemas autônomos. A estabilidade da origem é estudada sem perda de generalidade, uma vez que uma translação pode transformar o problema de um ponto de equilíbrio qualquer em um problema em que o ponto de equilíbrio esteja na origem.

Teorema: Considere-se um sistema dinâmico

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0 \quad (62)$$

Se existe uma função positiva definida (negativa definida), isto é,  $V(x) > 0$  ( $< 0$ ) com derivada temporal  $\dot{V}(x) < 0$  ( $> 0$ ) nas trajetórias do sistema dinâmico então o sistema é assintoticamente estável em uma região fechada em torno de  $x = 0$ . Se existe  $V(x) > 0$  com  $\dot{V}(x) \leq 0$ , a origem é ponto de equilíbrio estável (no sentido de Lyapunov). A função  $V(x)$  é conhecida como FL (Função de Lyapunov) (PAI, 1981). Embora não existam procedimentos sistemáticos para encontrar funções de Lyapunov para o sistema, as funções energia (CHIANG; CHU; CAULEY, 1995) provenientes dos conceitos físicos em geral são boas tentativas para se encontrar uma função de Lyapunov. Na maior parte das abordagens a FL considerada é a chamada energia transitória do sistema e é composta por duas parcelas caracterizadas como energia cinética ( $E_c$ ) e energia potencial ( $E_p$ ).

### 3.4.1 A FUNÇÃO ENERGIA

A maior dificuldade na aplicação prática deste método resulta da não existência de uma forma sistemática para a construção da referida função de Lyapunov. No entanto, para os sistemas dinâmicos físicos, observa-se que a energia do movimento apresenta desempenho que em muitos casos pode ser provado de decaimento monótono, ou seja, derivada temporal negativa. A partir daí, o sistema será estável se a energia total é continuamente dissipada, quer seja linear ou não linear, e tende a convergir para um ponto de equilíbrio.

## 3.5 MÉTODOS DE ANÁLISE

### 3.5.1 PONTO DE EQUILÍBRIO INSTÁVEL DE MENOR ENERGIA POTENCIAL

Inicialmente as ideias de Lyapunov eram utilizadas para estimar a região de atração dos sistemas de potência, tomando dentre todos os pontos de equilíbrio instáveis em torno do ponto de equilíbrio estável em estudo, ou seja, o ponto de equilíbrio estável pós-falta  $\delta^s$  (CHIANG; THORP, 1989). Sendo  $x_i$ s os pontos de equilíbrio. Calculam-se as energias potenciais  $E_p(x_i)$  em todos os pontos de equilíbrio instáveis e a energia crítica é definida como sendo a energia do ponto de equilíbrio que tiver a menor energia entre eles.

$$E_{cr} = \min Ep(x_i) \quad (63)$$

O ponto de equilíbrio instável que possui a menor energia é o ponto que está mais próximo energeticamente do ponto de equilíbrio estável em estudo. Dada uma condição inicial tal que  $-\pi - \delta_{ij} < \delta_{ij} < \pi - \delta_{ij}$ , se  $V(\delta, \varpi) \leq E_{cr}$ , então o sistema evolui para estabilidade. Se  $V(\delta, \varpi) > E_{cr}$ , nada se afirma, mas assume-se instabilidade.

Este método produz resultados muito conservadores, ou seja, pode conduzir a conclusões de instabilidade quando o sistema na verdade apresenta comportamento estável. Isto se deve ao fato de que a trajetória criticamente estável tangenciar a fronteira do domínio de estabilidade sem abandoná-lo, porém esta tangência não ocorre necessariamente no ponto de equilíbrio instável de mínima energia potencial. Esta verificação levou à necessidade de se desenvolver outros métodos de análise de modo a considerar não apenas a fronteira da região de atração, mas também a trajetória do sistema.

### 3.5.2 SUPERFÍCIE LIMITE DE ENERGIA POTENCIAL (SLEP)

A grande maioria dos métodos diretos como PEBS (Potencial Energy Boundary Surface) (KAKIMOTO et al., 1978), (ATHAY et al., 1979) ou Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) (DECKER, 1984) evita o cálculo dos pontos de equilíbrio instável de controle e requer somente uma rápida integração do sistema durante a falta para o cálculo de  $V_c$  (energia crítica do sistema). Por este motivo, é um método bastante rápido, podendo efetuar estimativas menos conservativas do ponto de vista da estabilidade.

A ideia do método é bem simples, estima-se o ponto de equilíbrio de controle, depois integra-se numericamente a equação diferencial do sistema de falta mantida até que a projeção da trajetória do sistema em falta nos eixos dos ângulos  $\delta$  cruze a PEBS.

### 3.5.3 PONTO DE EQUILÍBRIO INSTÁVEL DE INTERESSE (DE CONTROLE)

Para melhorar a estimativa do tempo crítico de abertura, foi criado o conceito do ponto de equilíbrio de controle. (KAKIMOTO et al., 1978) e (ATHAY et al., 1979). Com este

conceito, em vez de utilizar-se o ponto de equilíbrio instável de menor energia, passa-se a utilizar o ponto de equilíbrio que está mais próximo da trajetória do sistema em falta. Muitas técnicas de determinação do ponto de equilíbrio de controle foram propostas e os estudos nesta direção culminaram com o desenvolvimento do método BCU.

O método BCU surgiu após vários estudos teóricos que foram feitos por Chiang et al. (1987), fundamentado em conceitos matemáticos, o método mostrou-se muito eficiente, para determinação do ponto de equilíbrio nas mais diversas situações.

#### *3.5.4 REFINAMENTOS DE BUSCA DO VALOR CRÍTICO DA ENERGIA.*

O modelo clássico apresenta resultados satisfatórios nas abordagens, mas naturalmente limitados pelas imprecisões do modelo, e devem ser tidos como estimativas do comportamento real do sistema. O refinamento ou verificação mais precisa deve então ser realizados através de simulações do sistema empregando modelos mais elaborados.

#### *3.5.5 DIFICULDADE DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DA ENERGIA EM SISTEMA NÃO CONSERVATIVO.*

A aplicação do método direto de Lyapunov em sistemas de potência é feita do seguinte modo:

Dado um vetor representando um sistema dinâmico, este deverá ter uma função adequada  $V(x)$  (referida como Função de Lyapunov ou Função de Energia quando é decomposta em suas partes de energia cinética e de energia potencial) que satisfaça as condições de vizinhança de um ponto de equilíbrio estável (JARDIM, 1994), ou seja, se existe  $V(x) > 0$  com  $\dot{V}(x) \leq 0$ , se estas condições são satisfeitas, o ponto de equilíbrio é dito estável do ponto de vista de Lyapunov. Para um SEE real isto só é possível se forem feitas algumas simplificações, como por exemplo, desconsiderar as condutâncias de transferência nas equações da rede. Então é utilizada a Função de Energia Transitória como função de Lyapunov. Considerada as condutâncias de transferência, a Função de Energia Transitória não satisfaz explicitamente as condições de Lyapunov, pois parte da energia potencial é dependente da trajetória e é considerada mediante cômputo numérico ao longo da trajetória do

sistema. Entretanto, resultados numéricos apresentados na literatura têm mostrado as propriedades necessárias para a Função de Energia Transitória avaliar a estabilidade transitória de um sistema de potência (JARDIM, 1994).

Uma das maneiras de se obter uma função energia é baseada na combinação linear das primeiras integrais do sistema. A existência da primeira integral pode ser considerada como sendo a própria definição de um sistema conservativo (ALBERTO; BRETAS, 2000). Por sua vez, a primeira integral baseia-se na ideia original de Lyapunov de que a energia total, no caso de um sistema conservativo, define a estabilidade de um ponto de equilíbrio.

Considerando o sistema  $\dot{x} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , ou seja,

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) \\ f(0) &= 0\end{aligned}\tag{64}$$

Define-se como primeira integral desse sistema uma função diferenciável  $G(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , de tal modo que, se os valores de  $x_i$  formarem uma solução,  $G(x_1, x_2, \dots, x_n)$  é igual a uma constante C. Uma condição necessária e suficiente para a existência da primeira integral do sistema definido pela equação (65) é dada por:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_i} = 0\tag{65}$$

A aplicação da primeira integral para encontrar uma função de energia para SEE é encontrado em (PAI, 1981).

### 3.6 MÉTODO DA REGIÃO DE SINCRONIZAÇÃO POSITIVA (RSP)

#### 3.6.1 CASO MÁQUINA CONTRA BARRA INFINITA (MBI)

A RSP é a região definida no plano da defasagem angular e tensão interna da máquina em torno do ponto de equilíbrio estável onde as forças (generalizadas) que atuam no sistema se caracterizam como ações restaurativas do equilíbrio em torno de um ponto de equilíbrio (suposto) estável. O torque líquido no eixo da máquina é dado por: (COLVARA, 1995).

$$f(\sigma, e) = BV \left[ (E^0 + e) \text{sen}(\sigma + \delta^0) - E^0 \text{sen} \delta^0 \right]\tag{66}$$

Para efeito de definição da RSP, consideram-se valores fixos da variável  $e$ . Para diferentes valores de  $e$  tem-se diferentes pontos de equilíbrio estável  $\sigma_e(e)$ , ao longo da curva que passa pela origem na Figura 8.  $\sigma_e(e)$ , o torque líquido  $f(\sigma, e)$  é ação restaurativa para o ponto de equilíbrio  $\sigma_e(e)$  na região em que :

$$[\sigma - \sigma_e(e)] f(\sigma, e) > 0 (\sigma \neq \sigma_e(e)) \quad (67)$$

de modo que:

$$RSP = \{(\sigma, e) \mid \exists \sigma_e(e) \text{ e } [\sigma - \sigma_e(e)] f(\sigma, e) > 0 \text{ para } (\sigma \neq \sigma_e(e))\} \quad (68)$$

A RSP está limitada por curvas definidas como Curvas de Torque Nulo (CTN's) através de  $f(\sigma, e) = 0$ . De (69) as curvas são dadas por:

$$(E^{i0} + e) \text{sen}(\sigma + \delta^0) - E^{i0} \text{sen}\delta^0 = 0 \quad (69)$$

As CTNs são curvas que passam uma por  $(\sigma, e) = (\pi - 2\delta^0, 0)$  e outra por  $(\sigma, e) = (-\pi - 2\delta^0, 0)$  (figura 8).

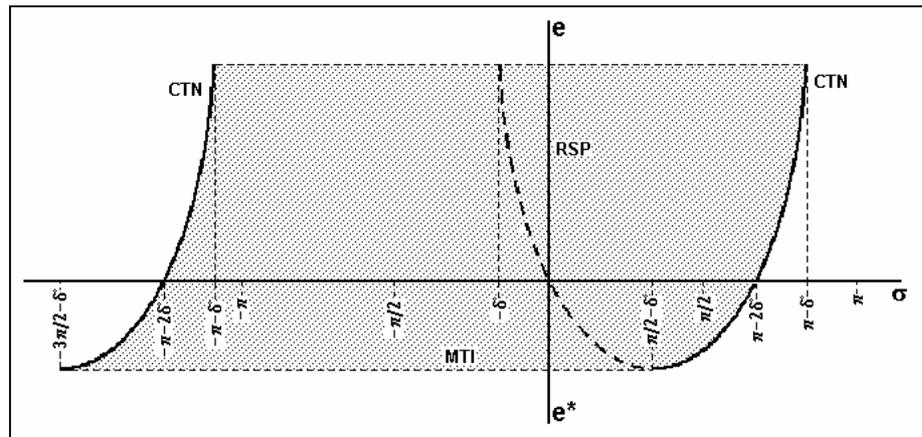
Há ainda outra fronteira a considerar, está associada à existência de  $\sigma_e(e)$ , para o que é necessário  $f(\pi/2 - \delta^0, e) > 0$ , conduzindo a

$$e > E^{i0} (\text{sen}\delta^0 - 1) \quad (70)$$

Define-se então a linha de Mínima Tensão Interna (MTI) por:

$$e^* = E^{i0} (\text{sen}\delta^0 - 1) \quad (71)$$

**Figura 9** - RSP e suas fronteiras.



Fonte: Colvara (1988).

A RSP não tem fronteira na direção de  $e$  positivo. De fato, os valores elevados da tensão interna não representam restrições de estabilidade, ao contrário, reforçam o torque sincronizante (COLVARA, 1988).

Enquanto no interior da RSP o torque líquido no eixo da máquina atua como restaurador do equilíbrio, no exterior atua no sentido de afastar o sistema do ponto de equilíbrio estável.

O princípio básico do método consiste em verificar se a trajetória do sistema abandona a RSP (concluindo pela instabilidade) ou não (concluindo pela estabilidade). Para isto, é necessário avaliar o comportamento da trajetória em relação às fronteiras da RSP.

### 3.6.2 EVOLUÇÃO DA TRAJETÓRIA PÓS-FALTA EM RELAÇÃO À RSP

A falta considerada é do tipo curto-circuito. Por ação do RAT, durante a falta a tensão interna da máquina evolui de modo crescente e ao final deste período a variável  $e$  tem valor significativamente distante de  $e^*$  (74). O objetivo do estudo é a análise de primeira oscilação (duração de cerca de  $\frac{1}{4}$  do período da oscilação) durante a qual a variável  $e$  não sofre variações tão acentuadas que a aproximem de  $e^*$ .

Com isto, podem-se fazer as seguintes suposições:

1. No caso de instabilidade de, a RSP é abandonada através da CTN, e não da MTI.
2. Na faixa de valores de  $e$  da primeira oscilação, a curvatura da CTN não é acentuada.

Como consequência da (1), o critério de estabilidade pode ser formulado com base na observação da trajetória do sistema no plano  $\sigma \times e$  considerando seu comportamento em relação à CTN. De (2), a distância de um ponto  $(\sigma, e)$  da trajetória à CTN é aproximada pela distância deste ponto à reta tangente (t) à CTN no ponto  $(\sigma_{CTN}, e)$ , como ilustrado na (Figura 10).

Para os propósitos deste trabalho basta avaliar as variações de  $d$  ao longo do tempo, de modo que se considera sua derivada temporal dada por:

$$\dot{d} = \begin{bmatrix} \dot{\sigma} & \dot{e} \end{bmatrix} \text{grad}f(\sigma_{CTN}, e) \quad (72)$$

No ponto  $(\sigma_{CTN}, e)$  a equação do torque líquido da máquina é dada por

$$f(\sigma_{CTN}, e) = BV \left[ (E^0 + e) \text{sen}(\sigma_{CTN} + \delta^0) - E^0 \text{sen}\delta^0 \right] = 0 \quad (73)$$

assim

$$\sigma_{CTN} = \arcsen \frac{E^0 \text{sen}\delta^0}{E^0 + e} - \delta^0 \quad (74)$$

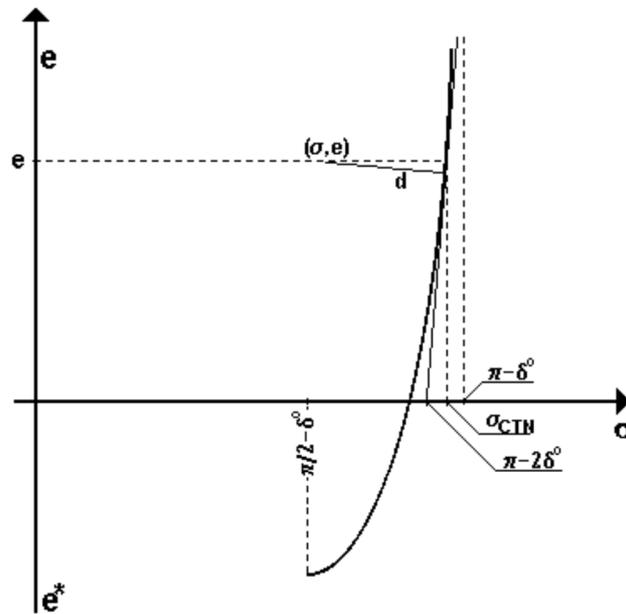
Substituindo as expressões, chega-se a:

$$\dot{d} = BV \left[ -\omega(E^0 + e) \sqrt{1 - \mu^2(e)} + \dot{e} \mu(e) \right] \quad (75)$$

com

$$\mu(e) = \frac{E^0 + \text{sen}\delta^0}{E^0 + e} \quad (76)$$

**Figura 10** - Aproximação da Distância de um ponto à CTN



Fonte: Colvara (1988).

### 3.6.3 TESTE DE ESTABILIDADE

O teste descrito a seguir é baseado na função potencial do sistema e nos conceitos de RSP e CTN. Parte-se do princípio que, considerada uma falta do tipo curto-circuito, o regime pós-falta inicia com  $V_p(\sigma, e)$  crescente, passando por um máximo em certo instante. Este, ou um instante próximo posterior, é o momento em que a trajetória do sistema mostrará a tendência definitiva da estabilidade ou instabilidade. A seguir, apresenta-se um algoritmo para efetuar o teste de estabilidade:

- Passo 1 – Se o regime pós-falta inicia no interior da RSP, monitorar a trajetória até  $E_p(\sigma, e)$  atingir um máximo sem deixar a RSP; ir ao passo 2.

Caso o regime pós-falta inicie no exterior da RSP, ou o máximo de  $E_p(\sigma, e)$  ocorra fora da RSP, considera-se o sistema instável.

- Passo 2- Se  $\dot{d} > 0$ , concluir pela estabilidade.

Se  $\dot{d} < 0$ , continuar monitorando a trajetória; ir ao passo 3.

- Passo 3- Se a CTN é atingida com  $\dot{d} < 0$ , concluir pela instabilidade.

Se  $\dot{d}$  inverter o sinal, concluir pela estabilidade.

### 3.7 O CASO DE SISTEMA MULTIMÁQUINAS (SM)

O método de análise para o SM é análogo ao MBI, já detalhado anteriormente, seguindo os princípios apresentados em trabalhos anteriores (COLVARA, 1988; COLVARA E HSU, 1990; COLVARA, 1992; COLVARA 1995), a análise do comportamento do sistema é feito através da observação dos seus m pares de máquinas.

#### 3.7.1 A RSP E SUAS FRONTEIRAS.

A dinâmica de uma máquina genérica  $i$  é dada por:

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} \left[ p_{mi} - f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - D_i \omega_i \right] - \frac{1}{M_i} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^m f_l(\sigma_l, e_d, e_q) \quad (77)$$

e, considerando um par de máquinas  $k = (i, j)$  desacoplado do restante do sistema, têm-se

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} \left[ p_{mi} - f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - D_i \omega_i \right] \quad (78)$$

e

$$\dot{\omega}_j = \frac{1}{M_j} \left[ p_{mj} - f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - D_j \omega_j \right] \quad (79)$$

Onde a aceleração relativa entre o par de máquina k é dado por:

$$\dot{\omega}_k = \dot{\omega}_i - \dot{\omega}_j = \frac{1}{M_i} p_{mi} - \frac{1}{M_j} p_{mj} - \left( \frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right) f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - \frac{D_i}{M_i} \omega_i + \frac{D_j}{M_j} \omega_j \quad (80)$$

E de (83) identifica-se o torque líquido sincronizante:

$$f'_k = \frac{1}{M_i M_j} \left[ (M_i + M_j) f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - M_j p_{mi} + M_i p_{mj} \right] \quad (81)$$

Onde a RSP é definida como

$$RSP = \left\{ (\sigma_k, e_d, e_q, p_m) \mid \exists \sigma_{ke}; (\sigma_k - \sigma_{ke}) f'_k(\sigma_k, e_d, e_q, p_m) > 0, \sigma_k \neq \sigma_{ke}; k = 1, 2, \dots, m \right\} \quad (82)$$

Análogo ao caso MBI existem dois tipos de fronteiras a serem consideradas:

- I. Existência de equilíbrio;
- II. Superfícies de torque nulo (STN's)

definidas como  $f'_k = 0$ , com  $f_k$  dado por (42)

$$\begin{aligned} & B_{ij} \left[ (E'_{qi} E'_{qj} + E'_{di} E'_{dj}) \text{sen} \delta_{ij} + (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}) \text{cos} \delta_{ij} \right] + \\ & + G_{ij} \left[ (E'_{qi} E'_{qj} + E'_{di} E'_{dj}) \text{cos} \delta_{ij} + (E'_{di} E'_{qj} - E'_{dj} E'_{qi}) \text{sen} \delta_{ij} \right] \\ & - P_{ek}^0 + \frac{1}{M_i + M_j} [M_i p_{mj} - M_j p_{mi}] = 0 \end{aligned} \quad (83)$$

Para obter uma simplificação da expressão analítica (86), são feitas as seguintes considerações:

- i.  $B_{ij} \gg G_{ij}$ ;
- ii.  $|E'_{qi} E'_{qj} + E'_{di} E'_{dj}| \gg |-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}|$ .

com a restrição:

$$B_{ij} (E'_{qi} E'_{qj} + E'_{di} E'_{dj}) > \left| P_{ek}^0 + \frac{M_j p_{mi} - M_i p_{mj}}{M_i + M_j} \right| \quad (84)$$

que determina uma fronteira da RSP<sub>k</sub> a Restrição de Tensões e Potencias Mecânicas. Note-se que na ausência do enrolamento amortecedor e do Regulador de Velocidade, a equação (83) reduz-se à restrição denominada Mínimas Tensões Internas (MTI) (COLVARA, 1988), (COLVARA E HSU, 1990, 1992).

### 3.7.2 EVOLUÇÃO DA TRAJETÓRIA EM RELAÇÃO ÀS FRONTEIRAS DA RSP.

Analogamente ao caso MBI, a distância de um ponto  $p = (\sigma_p, e_p)$  do espaço  $\sigma \times e$  à uma  $STN_k$  é aproximada pela distância do ponto  $p$  a um plano tangente à  $STN_k$  em um ponto de coordenadas  $e = e_p$  (O ponto de tangência é a projeção do ponto  $p$  na  $STN_k$ , segundo a direção do eixo  $\sigma_k$ ) (COLVARA, 1988). Como o interesse da análise reside nas variações  $(\dot{d}_k)$  desta distancia, determina-se:

$$\dot{d}_k = \frac{\sigma_k}{|\sigma_k|} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_k & \dot{e}_i & \dot{e}_j \end{bmatrix} \text{gradf}_k(\sigma_{STN_k}, e_i, e_j) \quad (85)$$

sendo  $\sigma_{STN_k}$  a coordenada  $\sigma_k$  correspondente a  $e_i$  e  $e_j$  na  $STN_k$ . Efetuando os cálculos indicados, chega-se a

$$\dot{d}_k = \frac{\sigma_k}{|\sigma_k|} B_{ij} \left\{ -(\omega_i - \omega_j)(E_i^0 + e_i)(E_j^0 + e_j) \sqrt{1 - \mu_k^2} + \mu_k \left[ \dot{e}_i (E_j^0 + e_j) + \dot{e}_j (E_i^0 + e_i) \right] \right\} \quad (86)$$

onde

$$\mu_k = \mu_k(e_i, e_j) = \frac{E_i^0 E_j^0 \text{sen} \delta_{ij}^0}{(E_i^0 + e_i)(E_j^0 + e_j)} \quad (87)$$

## 3.8 CONCLUSÃO

O método da RSP foi desenvolvido originalmente para análise de estabilidade e aqui simplesmente apresentado, com o propósito de incorporar seus princípios a uma metodologia que visa o controle do sistema durante a vigência de um regime transitório, pela ação de dispositivos FACTS sobre a trajetória, bem como sobre as fronteiras da RSP.

## 4 INTRODUÇÃO DOS DISPOSITIVOS FACTS NO SEE E SUA CONSIDERAÇÃO NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a introdução da influência de dispositivos FACTS sobre o desempenho transitório do sistema, para, na sequência, explorar a possibilidade de empregar dispositivos existentes na rede para promover melhoria do desempenho transitória em face de perturbações.

Os desenvolvimentos que levaram a proposição do método da RSP de análise de estabilidade transitória são frutos de estudos anteriores e são aqui simplesmente apresentados nos aspectos que interessam a este estudo, para, na sequência, serem aplicados a uma estratégia de controle para monitoramento da trajetória transitória do sistema com vistas ao controle do sistema em regime transitório.

### 4.2 INTRODUÇÃO DOS DISPOSITIVOS FACTS NO SISTEMA E SEUS EFEITOS NAS INTERAÇÕES ENTRE MÁQUINAS

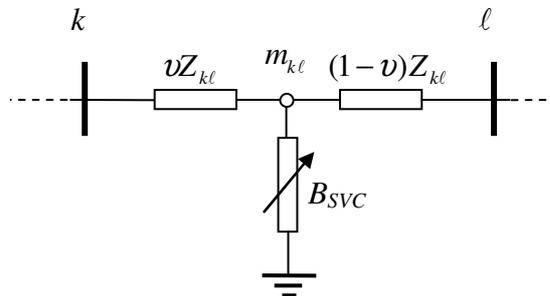
Considera-se um SEE composto por  $n$  máquinas conectadas a uma rede de  $m$  barras. A instalação de um dispositivo FACTS entre as barras genéricas  $k$  e  $l$  como desenvolvido em (MARQUES, 2009; PERARO, 2010; SILVA, 2010).

### 4.3 INCLUSÃO DE UM SVC NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS

O desenvolvimento dessa seção está baseado em estudos desenvolvidos (COLVARA; MARQUES, 2009; MARQUES, 2009).

Seja um SEE em cuja rede de  $m$  nós tenha-se instalado um SVC em uma linha conectando as barras genéricas  $k$  e  $l$ . Para representar essa instalação, cria-se o nó denominado  $m_{kl}$  como ilustrado na Figura 11.

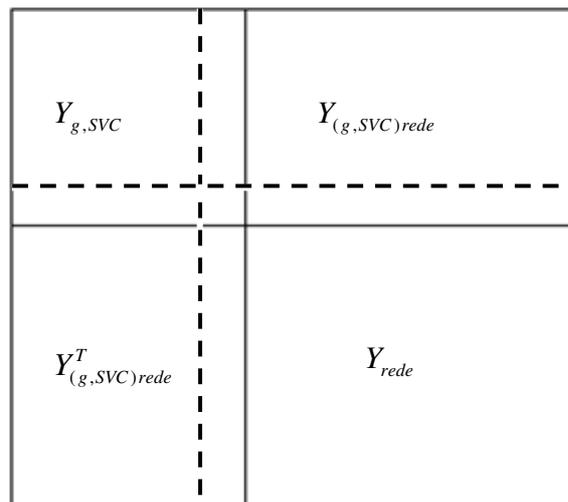
**Figura 11** - Inclusão do SVC.



**Fonte:** Marques (2009)

O SVC será instalado em uma barra genérica  $m_k$  de um sistema multimáquinas composto de  $n$  máquinas e  $m$  barras. Faz-se então, uma reordenação de barras, de modo que a  $(n+1)$ -ésima linha e coluna seja as correspondentes ao nó  $m_{kl}$  que representa a barra de alocação do SVC conforme a Figura 12.

**Figura 12** – Matriz admitância adicionada o SVC.



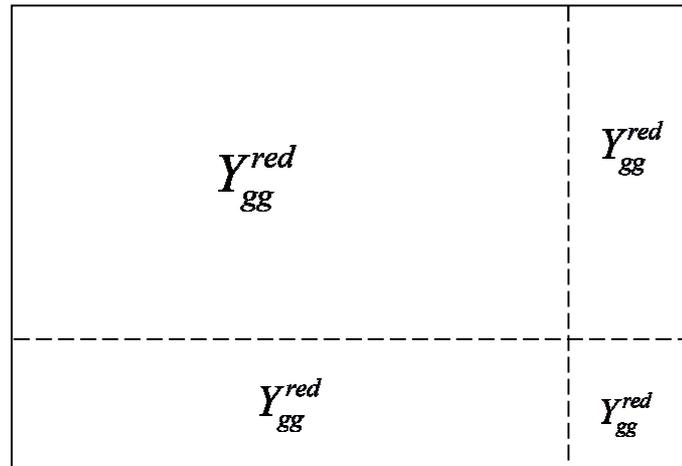
**Fonte:** Kundur (1994).

Fazendo a redução da matriz admitância aumentada para a matriz admitância reduzida às barras de interesse de ordem  $n+1$  desenvolvida por (MARQUES, 2009):

$$Y_{red}^{int} = Y_{g,SVC} - Y_{(g,SVC)rede} Y_{rede}^{-1} Y_{rede(g,SVC)} \quad (88)$$

e a matriz reduzida às barras de interesse mostrada na figura 13.

**Figura 13** - Matriz de admitância reduzida às barras de interesse.



**Fonte:** Colvara e Marques (2009).

Em que  $Y_{SVC}$  é a admitância própria da barra onde o SVC é instalado na rede reduzida às barras de interesse.

A equação da rede reduzida às barras de interesse, então, pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} I_g \\ I_{SVC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{g,SVC} \\ Y_{g,SVC}^T & Y_{SVC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ V_{SVC} \end{bmatrix} \quad (89)$$

Observa-se que o elemento  $Y_{SVC}$  é a admitância própria da barra onde o SVC está instalado, o vetor  $Y_{g,SVC}$  tem dimensão  $n$ .

Considerando que a admitância equivalente do SVC foi incorporada a rede, a corrente que circula na barra é interna à rede e conseqüentemente a injeção de corrente na respectiva barra é nula, ou seja,  $I_{SVC} = 0$ , de modo que a matriz reduzida às barras internas dos geradores é obtida como:

$$Y_{red} = Y_{g,SVC}^{red} - Y_{g,SVC} Y_{SVC}^{-1} Y_{SVC,g} \quad (90)$$

Consideradas as variações da admitância do SVC, estabelecidas de uma lei de controle, pode-se determinar como são afetadas as admitâncias de transferência entre as barra internas dos geradores  $i$  e  $j$  como:

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij} \quad (91)$$

A matriz reduzida final, relacionadas às barras internas dos geradores será dada por:

$$Y_{redf} = Y_{red}^0 + \Delta Y_{SVC} \quad (92)$$

sendo

$$Y_{red}^0 = \left[ Y_{gg}^{red} + \Delta Y_{SVC}^0 \right] \quad (93)$$

Com

$$\Delta Y_{SVC}^0 = -Z_{SVC}^0 \left[ Y_{g,SVC} Y_{g,SVC}^T \right] \quad (94)$$

A matriz admitância de barra da rede reduzida às barras internas dos geradores é  $Y_{red}^0$ , incorporando a admitância equivalente do SVC em regime permanente e a variação da matriz admitância  $\Delta Y_{SVC}$  é dada pela parcela de admitância variante.

Colvara e Marques (2009), Marques (2009) mostram que as variações das admitâncias de transferência entre as máquinas do sistema dependem unicamente das variações da susceptância do SVC  $\Delta B_{SVC}$ . Portanto as variações de admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  e a admitância própria das barras da rede são afetadas pelas variações do SVC, esta relação pode ser representada pelo coeficiente de sensibilidade (COLVARA; MARQUES, 2009; MARQUES, 2009).

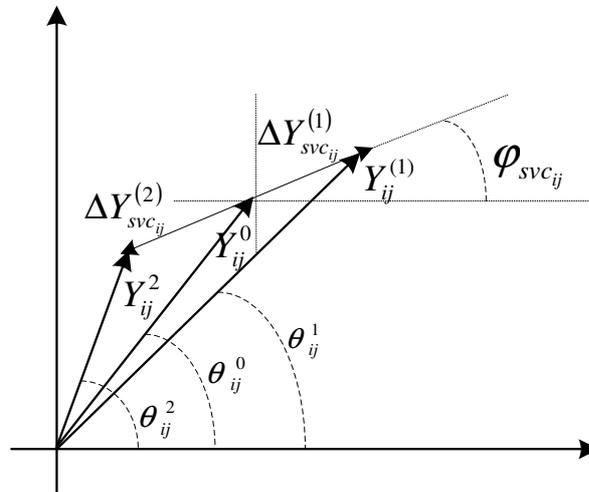
$$K_{svcij} \cong j \frac{Y_{g,SVCi} Y_{g,SVCj}}{\left( Y_{svc}^0 \right)^2} \quad (95)$$

O coeficiente  $K_{svcij}$  tem valor complexo e, portanto pode ser expresso na forma polar pela sua magnitude  $K_{svcij}$  e ângulo  $\varphi_{svcij}$  como:

$$\bar{K}_{svcij} = K_{svcij} \left| \underline{\varphi_{svcij}} \right. \quad (96)$$

Observa-se que as variações da susceptância do SVC  $\Delta B_{SVC}$  afetam a magnitude da variação da admitância de transferência, mas não o seu ângulo, como podemos ver na Figura 14.

**Figura 14** – Variação da admitância de transferência entre as máquinas devida as variações originadas pelo SVC.



Fonte: Marques (2009)

O coeficiente de eficácia do dispositivo FACTS sobre a magnitude da admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  é definido como (MARQUES, 2009; PERARO, 2010; SILVA, 2010).

$$K_{svcij}^{ef} = K_{svcij} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{svcij}^0) \quad (97)$$

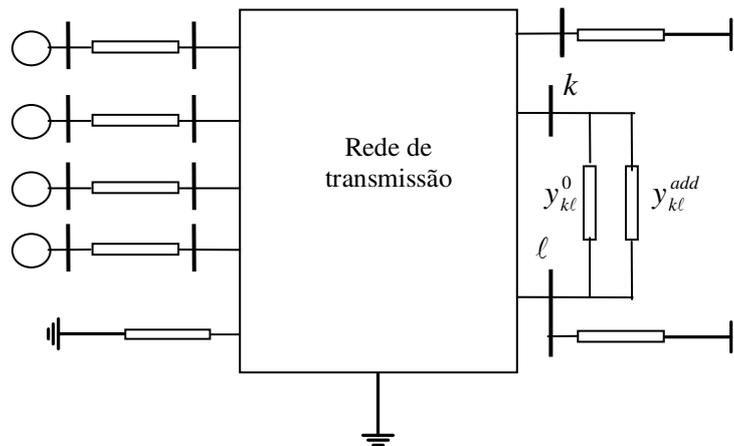
Este coeficiente expressa a participação efetiva das variações da susceptância do dispositivo FACTS na magnitude da admitância da transferência entre as máquinas genéricas  $i$  e  $j$  de um sistema multimáquinas. Este dado é muito significativo, pois mesmo em uma rede de transmissão de grande complexidade é possível analisar a eficácia do dispositivo quanto à interação entre as máquinas consideradas (MARQUES, 2009; PERARO, 2010; SILVA, 2010).

#### 4.4 INCLUSÃO DE UM TCSC EM SISTEMAS MULTIMÁQUINAS

Em estudos realizados por Silva e Colvara (2010) sabe-se que a energia potencial de um sistema de energia elétrica afeta diretamente as admitâncias de transferência entre as máquinas do sistema, que por sua vez, são afetadas pela ação do dispositivo TCSC.

Considera-se que um dispositivo TCSC está instalado em uma linha genérica  $k-l$  como ilustrado na Figura 15 e posteriormente será feita a redução da rede as barras internas dos geradores.

**Figura 15** – Sistema Multimáquinas com um TCSC instalado entre as barras na forma de admitância.



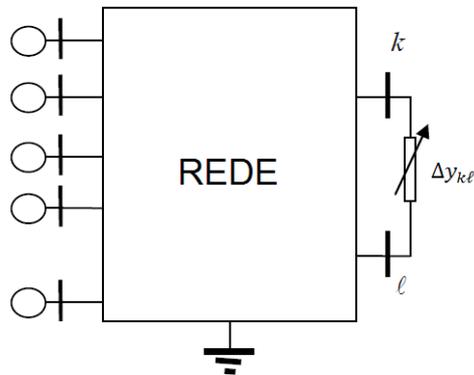
**Fonte:** Colvara (2005)

O dispositivo TCSC acrescenta uma reatância série na linha de transmissão, cancelando parte da reatância própria da linha na qual ele está instalado. A reatância proveniente do TCSC é composta de duas partes, uma parte fixa  $X_{CSC}^0$  e outra parte variável  $\Delta X_{CSC}$ , assim a admitância da linha de transmissão  $k-l$  afetada pela ação do dispositivo TCSC é dada por:

$$y_{kl} = y_{kl}^0 + \Delta y_{CSC} \quad (98)$$

O objetivo desse capítulo é fazer uma análise dos efeitos causados pela ação dos dispositivos FACTS nas interações entre os geradores do sistema, deve-se reduzir as barras internas dos geradores, fazendo a redução para as barras de interesse, que são compostas pelas  $n$  barras internas dos geradores acrescidas das barras entre as quais o TCSC encontra-se instalado, conforme Figura 16..

**Figura 16** – Sistema Multimáquinas reduzido às barras internas dos geradores e terminais da linha compensada.



Fonte: Silva (2010)

Partindo da matriz admitância de barra da rede aumentada, obtém-se a matriz de admitância da rede reduzida as barras de interesse, Silva e Colvara (2009).

$$Y_{red}^{int} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{g,CSC} \\ Y_{CSC,g} & Y_{CSC,CSC} \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} \quad (99)$$

Onde a submatriz  $Y_{gg}$  é uma submatriz quadrada de ordem  $n$ ,  $Y_{g,CSC}$  é uma submatriz de ordem  $n \times 2$ ,  $Y_{CSC,g}$  é a sua transposta.

A submatriz  $Y_{CSC,CSC}$  é uma matriz quadrada de ordem 2 que é dada por:

$$Y_{CSC,CSC} = \begin{bmatrix} y_{kk}^0 + \Delta y_{kl} & y_{kl}^0 - \Delta y_{kl} \\ y_{kl}^0 - \Delta y_{kl} & y_{ll}^0 + \Delta y_{kl} \end{bmatrix} \quad (100)$$

Após fazer a redução para as barras de interesse, será feita a redução para as barras internas dos geradores, que é dada por:

$$Y_{red} = Y_{gg} - Y_{g,CSC} Y_{CSC,CSC}^{-1} Y_{CSC,g} \quad (101)$$

que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Y_{red} = Y_{gg}^{red0} + \Delta Y_{csc} \quad (102)$$

sendo  $Y_{gg}^{red0}$  a matriz da rede reduzida às barras internas dos geradores para a condição de regime permanente, ou seja, sem a atuação do controle do TCSC.

A matriz  $\Delta Y_{\text{csc}}$  corresponde a matriz das variações da admitância devido à ação do TCSC.

Os trabalhos de Silva e Colvara (2009), Silva (2010) que a matriz reduzida depende das variações  $\Delta y_{kl}$  da admitância equivalente do TCSC. Desse modo as variações de admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  e a admitância própria das barras da rede são afetadas pelas variações do TCSC, e esta relação pode ser representada pelo coeficiente de sensibilidade.

$$\overline{K}_{\text{cscij}} = \frac{d\Delta Y_{\text{cscij}}}{d(\Delta x_{\text{csc}})} \quad (103)$$

que é uma grandeza complexa composta de magnitude  $K_{\text{cscij}}$  e ângulo  $\varphi_{\text{cscij}}$  como segue na equação:

$$\overline{K}_{\text{cscij}} = K_{\text{cscij}} \angle \varphi_{\text{cscij}} \quad (104)$$

Nota-se que tanto a magnitude quanto o ângulo do coeficiente de sensibilidade são constantes, pois vêm de um procedimento algébrico envolvendo valores fixos (admitância de transferência da rede e compensação fixa do TCSC), portanto as variações da admitância de transferência  $\Delta y_{ij}$  dependem diretamente das variações da reatância do TCSC  $\Delta X_{\text{csc}}$  e ocorrem sobre a linha de inclinação  $\varphi_{\text{cscij}}$  no plano complexo das admitâncias de transferência, como mostra a Figura 17.

As variações de admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  são dadas por (SILVA, 2010):

$$\Delta y_{\text{cscij}} = \overline{K}_{\text{cscij}} \Delta X_{\text{csc}} \quad (105)$$

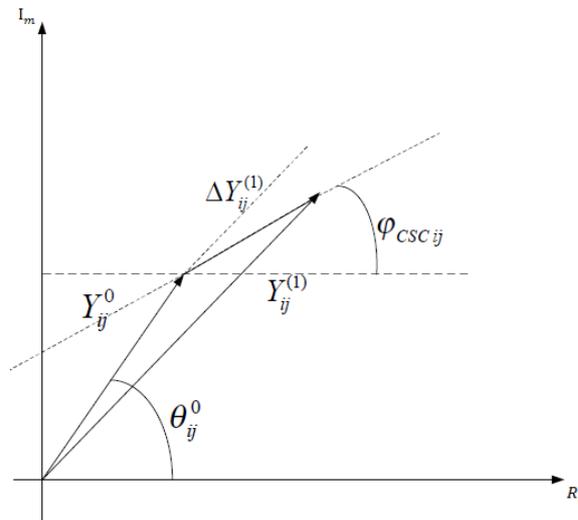
A variação efetiva da magnitude da admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  é definida por (SILVA; COLVARA, 2009):

$$\Delta y_{\text{cscij}}^{ef} = K_{\text{cscij}}^{ef} \Delta X_{\text{csc}} \quad (106)$$

onde  $K_{\text{cscij}}^{ef}$  é o coeficiente de eficácia do TCSC que expressa a eficácia da ação do TCSC na magnitude de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  e é dado por:

$$K_{\text{cscij}}^{ef} = K_{\text{cscij}} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{\text{cscij}}) \quad (107)$$

**Figura 17**– Variação da admitância de transferência entre as máquinas devido às variações de reatância do TCSC.



Fonte: Marques (2009)

Desse modo, a admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  pode ser escrita a partir da equação 108, onde  $y_{ij}^0$  é a admitância correspondente à condição de regime permanente e  $\Delta y_{cscij}$  as variações impostas pela ação do TCSC, de modo que:

$$y_{ij} = y_{ij}^0 + \Delta y_{cscij} = (Y_{ij}^0 + \Delta y_{cscij}^{ef}) \angle (\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{cscij}) \quad (108)$$

onde

$$\Delta \theta_{cscij} = \arctan \left[ \frac{K_{cscij} \Delta X_{csc} \text{sen}(\varphi_{cscij} - \theta_{ij}^0)}{Y_{ij}^0 + K_{cscij} \Delta X_{csc} \text{cos}(\varphi_{csc} - \theta_{ij}^0)} \right] \quad (109)$$

Observa-se que tanto a magnitude (106) quanto o ângulo (107) das variações de admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  dependem exclusivamente das variações da reatância do TCSC  $\Delta X_{csc}$ .

#### 4.5 FATOR DE EFEITO

Por outro lado, há de se considerar que uma determinada variação da admitância de transferência pode ter maior ou menor importância quando comparado com a magnitude

original da mesma. Então a importância relativa da contribuição das variações da susceptância, no caso do SVC, e da reatância, no caso do TCSC, para a admitância de transferência entre as máquinas, é uma informação mais significativa que a eficácia, com isto Colvara e Marques (2009), Colvara e Silva (2010) definiram o fator de efeito que é dado como:

$$F_{SVCij}^{ef} \triangleq \frac{K_{SVCij}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad (110)$$

para o caso SVC e,

$$F_{CSCij}^{ef} \triangleq \frac{K_{CSCij}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad (111)$$

para o caso TCSC.

Este fator pode ser usado para avaliar quais os pares de máquinas serão mais ou menos afetados pela atuação do dispositivo instalado no sistema. O fator de efeito tem influência direta sobre a potência sincronizante entre as máquinas do sistema, que pode ser usado para avaliar quais pares de máquinas são mais ou menos afetados pela atuação do dispositivo e consequentemente, considerando diversas localizações, pode-se identificar qual é a mais efetiva (COLVARA; MARQUES, 2009).

#### 4.6 EFEITOS DOS DISPOSITIVOS FACTS NA ENERGIA TRANSITÓRIA DO SEE.

A presença na rede de um dispositivo FACTS altera a matriz admitância de barra do sistema reduzida às barras internas dos geradores como mostra a equação

$$Y = Y_{red}^0 + \Delta Y_{KFACTS} \quad (112)$$

sendo  $Y_{red}^0$  a matriz reduzida correspondente à condição de regime permanente  $\Delta Y_{KFACTS}$  a variação causada pela ação do dispositivo FACTS.

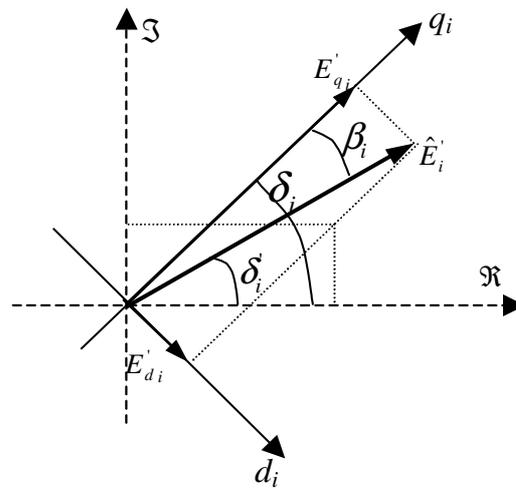
O fator de sensibilidade é determinado com algumas considerações e desenvolvimento matemático, resultando em um valor complexo.

$$K_{FACTSij} = |K_{FACTSij}| \angle \varphi_{FACTSij} \quad (113)$$

com  $\varphi_{FACTSij} = \hat{\text{ângulo}}(K_{FACTSij})$ . Os parâmetros que definem a magnitude e o fator de sensibilidade são constantes.

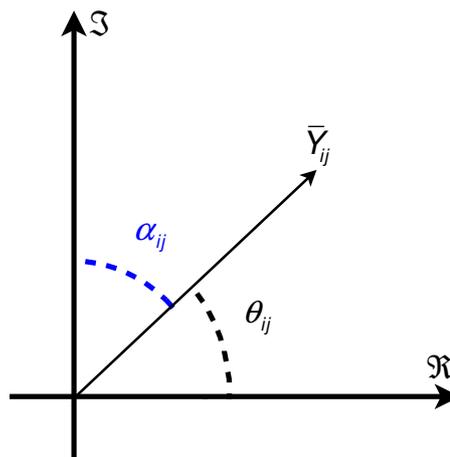
Dado o valor da admitância de transferência complexa entre as barras internas das máquinas  $i$  e  $j$  dado por  $\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij}$  e as tensões internas fasoriais expressas genericamente por  $\dot{E}_i = E_i \angle \delta_i$ , como ilustrado nas figuras a seguir.

**Figura 18** – Diagrama fasorial para máquina  $i$ .



Fonte: Kundur (1994)

**Figura 19** – Ângulos das admitâncias de transferência.



Fonte: Marques (2009)

A potência transferida entre duas máquinas já é conhecida (ANDERSON; FOUAD, 2000; PAI, 1981), que é expressa por:

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \cos(\delta'_{ij} - \theta_{ij}) \quad (114)$$

com  $\theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij}$  temos

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \cos\left(\delta'_{ij} + \alpha_{ij} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (115)$$

que pode ser escrito como

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \text{sen}(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}) \quad (116)$$

Considerando que a admitância de transferência é afetada pela ação do dispositivo FACTS, temos que

$$\bar{Y}_{ij} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}) \left| \theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij} \right. \quad (117)$$

considerando a variação  $Y_{ij}$  devida a ação do dispositivo FACTS

$$\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ij}^0 + \bar{K}_{FACTSij} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}) \left| \theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij} \right. \quad (118)$$

A variação efetiva da magnitude da admitância de transferência pode ser escrita como:

$$\Delta Y_{ij}^{ef} = K_{FACTSij}^{ef} \Delta_{FACTS} \quad (119)$$

o coeficiente de eficácia é definido em (MARQUES, 2009; PERARO, 2010; SILVA, 2010)

$$K_{FACTSij}^{ef} \cong K_{FACTSij} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{FACTSij}) \quad (120)$$

A variação do ângulo da admitância de transferência é dada por

$$\Delta \theta_{ij} = \theta_{ij} - \theta_{ij}^0 = \arctan \left[ \frac{K_{FACTSij} \Delta_{FACTS} \text{sen}(\varphi_{FACTSij} - \theta_{ij}^0)}{Y_{ij}^0 + K_{FACTSij} \Delta_{FACTS} \cos(\varphi_{FACTSij} - \theta_{ij}^0)} \right] \quad (121)$$

ou, sendo

$$\theta_{ij} + \alpha_{ij} = \theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij} = \frac{\pi}{2} \theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - (\alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \quad (122)$$

temos que  $\theta_{ij}^0 = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij}^0$ , assim  $\Delta \alpha_{ij} = -\Delta \theta_{ij}$ , logo

$$\bar{Y}_{ij} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef}) \left| \frac{\pi}{2} - (\alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \right. \quad (123)$$

Temos então a potência transferida entre as máquinas  $i$  e  $j$  que pode ser expressa por

$$P_{eij} = E_i (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef}) E_j \text{sen}(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \quad (124)$$

E utilizando a definição do fator de efeito

$$F_{FACTSij}^{efeito} \Delta_{FACTS} \triangleq \frac{K_{FACTSij}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad (125)$$

temos

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 (1 + F_{FACTSij}^{efeito} \Delta_{FACTS}) \quad (126)$$

e

$$P_{eij} = (1 + F_{FACTSij}^{efeito} \Delta_{FACTS}) E_i Y_{ij}^0 E_j \text{sen}(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \quad (127)$$

Considerando o efeito sobre a magnitude, podemos determinar os desvios da potência transferida como:

$$\Delta P_{eij} = (1 + F_{FACTSij}^{efeito} \Delta_{FACTS}) f_k(\sigma_k) \quad (128)$$

e definindo  $K_{FACTSk} = (1 + F_{FACTSij}^{efeito} \Delta_{FACTS})$  têm-se:

$$\Delta P_{eij} = K_{FACTSk} f_k(\sigma_k) \quad (129)$$

Assim, pode-se determinar a função energia do sistema afetada pela atuação do dispositivo FACTS (CAPELLETE, 2012; MARTINS, 2012).

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 + \sum_{k=1}^m \left\{ K_{FACTSij} E_i^0 Y_{ij}^0 E_j^0 \left[ -\cos(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}) - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^0) \text{sen}(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}) \right] \right\} \quad (130)$$

Pode-se observar na equação (130) que a função energia modelada considerando a atuação do dispositivo FACTS é possível compreender a sua maior ou menor contribuição nos contornos da superfície potencial (CAPELLETE, 2012; MARTINS, 2012).

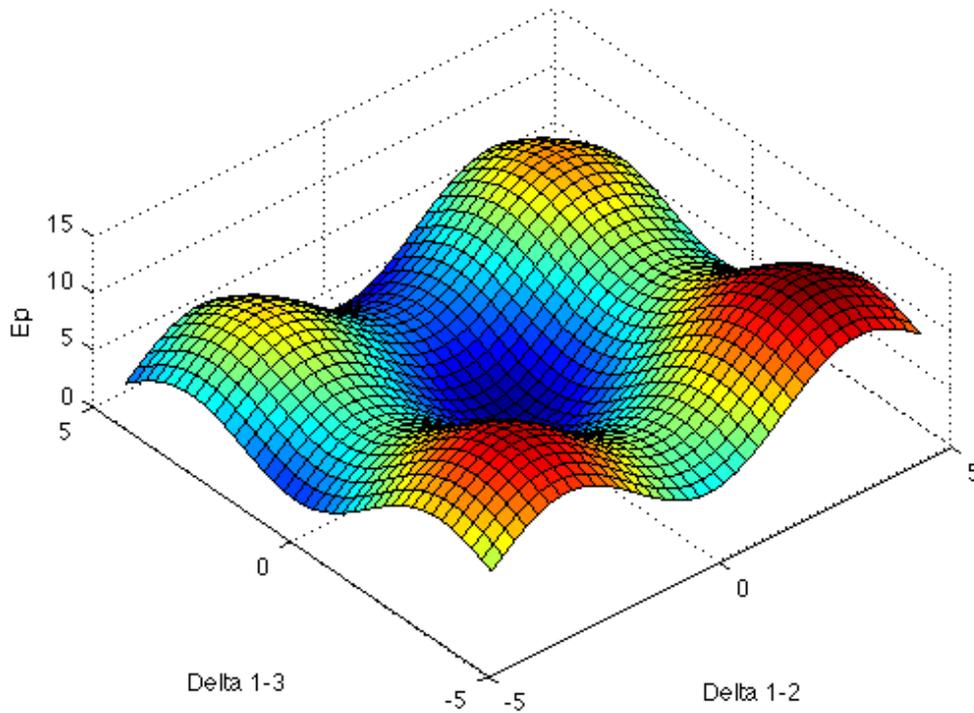
#### 4.7 DEPRESSÃO ENERGÉTICA, EXTREMOS DA ENERGIA POTENCIAL E EFEITOS DE FACTS.

Na busca de metodologias alternativas para simulações de métodos no domínio do tempo, foram propostos métodos diretos, com uso de funções de energia apresentadas no capítulo 3 desse trabalho, ofereceram-se melhores possibilidades de análise de estabilidade transitória de sistemas de potências reais (PAI, 1981; FOUAD; VITTAL, 1992; ATHAY; PODMORE; VIRMANI, 1979).

O comportamento do sistema na superfície energética quando o mesmo sofre uma contingência foi abordado em (CAPELLETTE, 2012; MARTINS, 2012) com o objetivo de proporcionar melhores condições de estabilidade ao SEE atuando no relevo energético, com a atuação de um dispositivo FACTS com adequado controle para modificar as elevações energéticas a fim de dificultar que a trajetória do sistema ultrapasse a cordilheira que circunda o vale energético.

A Figura 20 ilustra a superfície da função energia, onde é possível observar as depressões em tons de azul, denominado vale energético, onde se encontra o ponto de equilíbrio estável e em seu entorno as elevações energéticas em tons de vermelho e amarelo em cujos extremos se localizam os pontos de equilíbrio instável do sistema (MARTINS, 2012).

**Figura 20** – Superfície de energia potencial em função das defasagens angulares 1-2 e 1-3



**Fonte:** Martins (2012)

A contribuição do dispositivo FACTS é capaz de alterar, durante um regime transitório, a configuração dessa superfície montanhosa, tornando o seu vale mais fundo ou mais raso, e/ou seus picos mais ou menos elevados, podendo proporcionar assim melhores condições de estabilidade para o sistema.

A seguir, considera-se a influência de dispositivos FACTS nas fronteiras da Região de Sincronização Positiva (RSP). Visando a utilização de controles adicionais de dispositivos existentes na rede para obter melhoria de desempenho transitório do sistema.

#### 4.8 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados desenvolvimentos realizados em trabalhos anteriores, que formularam a representação dos efeitos de dispositivos FACTS, explicitando SVC e TCSC, no desempenho transitório do sistema de energia elétrica.

Ficou demonstrado nas análises da energia potencial que a ação dos dispositivos pode exercer influência expressiva nos torques sincronizantes das máquinas e, portanto afetar

decisivamente o comportamento transitório do sistema, em especial nas situações de severa criticidade.

Nota-se que, tanto no caso do SVC como no do TCSC, o efeito sobre as admitâncias da rede reduzida às barras internas das máquinas se dá por meio de coeficiente de sensibilidade ou de fator de efeito, de modo que a influência a ser considerada na reformulação do método da RSP para levar em conta os FACTS poderá ser tratada de modo indistinto para estes dois dispositivos.

Uma vez que se introduziram os efeitos dos dispositivos FACTS no desempenho transitório do sistema, inclusive com sua representação na função energia, as metodologias de análise decorrentes das abordagens de métodos diretos fundamentados na energia transitória podem ser aplicados, desde que feita devida adequação, o que leva a outros estudos.

## 5 INCLUSÃO DOS EFEITOS DE DISPOSITIVOS FACTS NAS FRONTEIRAS DA REGIÃO DE SINCRONIZAÇÃO POSITIVA

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, considera-se a metodologia da RSP originalmente criada para análise da estabilidade transitória do sistema, notando que as admitâncias de transferência da rede reduzida às barras internas têm papel importante. De outro lado, têm-se que estas admitâncias são afetadas pelo desempenho de dispositivos FACTS presentes na rede. Da reunião destas observações, vem a possibilidade de exercer um controle sobre a trajetória do sistema e/ou sobre as fronteiras da RSP por atuação controlada dos dispositivos.

Assim, introduz-se a ação dos dispositivos, por meio do fator de efeito na formulação da avaliação das variações da distância da trajetória à fronteira da RSP inicialmente para descrever o movimento e a seguir para propor uma estratégia de controle.

### 5.2 REGIÃO DE SINCRONIZAÇÃO POSITIVA EM SISTEMAS MULTIMÁQUINAS COM DISPOSITIVOS FACTS

Como já apresentado na modelagem do SEE no capítulo 2, a variação da potência fornecida por uma máquina genérica  $i$  em torno do ponto de operação considerado é expressa pela equação (43).

$$\Delta P_{ei} = K_i^T f(\sigma, e_d, e_q)$$

sendo o vetor  $f$  composto dos elementos dados pela equação (42) aqui repetida.

$$\begin{aligned} f_k(\sigma_k, e_{di}, e_{qi}, e_{dj}, e_{qj}) = \\ = B_{ij} \left[ \left( E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj} \right) \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \left( E_{di}^0 E_{dj}^0 + E_{qi}^0 E_{qj}^0 \right) \text{sen} \delta_{ij}^0 + \right. \\ \left. + \left( -E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi} \right) \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \left( -E_{di}^0 E_{qj}^0 + E_{dj}^0 E_{qi}^0 \right) \cos \delta_{ij}^0 \right] \end{aligned}$$

Com  $k = 1, 2, \dots, m$

Tomando, por simplicidade, na apresentação da máquina genérica  $i$ , a tensão interna  $E_i$  e sua variação  $e_i$  ao invés de suas componentes  $e_{di}$  e  $e_{qi}$  determinou-se o comportamento da distância da trajetória a uma STN como na equação (88).

$$\dot{d}_k = \frac{\sigma_k}{|\sigma_k|} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_k & \dot{e}_i & \dot{e}_j \end{bmatrix} \text{grad} f_k(\sigma_{\text{STN}k}, e_i, e_j)$$

conduzindo à equação (87):

$$\dot{d}_k = \frac{\sigma_k}{|\sigma_k|} B_{ij} \left\{ -(\omega_i - \omega_j)(E_i^0 + e_i)(E_j^0 + e_j) \sqrt{1 - \mu_k^2} + \mu_k \left[ \dot{e}_i (E_j^0 + e_j) + \dot{e}_j (E_i^0 + e_i) \right] \right\}$$

onde

$$\mu_k = \mu_k(e_i, e_j) = \frac{E_i^0 E_j^0 \text{sen} \delta_{ij}^0}{(E_i^0 + e_i)(E_j^0 + e_j)}$$

Lembre-se que, introduzido na rede um dispositivo FACTS (SVC ou TCSC), a potência trocada entre duas máquinas  $i$  e  $j$  passa a ser expressa pela equação (130).

$$P_{ej} = \left(1 + F_{\text{FACTS}ij}^{\text{efeito}} \Delta_{\text{FACTS}}\right) E_i Y_{ij}^0 E_j \text{sen}(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij})$$

e suas variações dadas por:

$$\Delta P_{ej} = f_k(\sigma_k, e_i, e_j, \Delta y_{\text{FACTS}}) \quad (131)$$

redefinindo a função  $f(\cdot)$  pela incorporação das variações da admitância de transferência devidas ao dispositivo FACTS:

$$\begin{aligned} f_k(\sigma_k, e_i, e_j, \Delta y_{\text{FACTS}}) &= \\ &= Y_{ij}^0 \left[ \left(1 + F_{\text{FACTS}ij}^{\text{efeito}} \Delta y_{\text{FACTS}}\right) E_i' E_j' \text{sen}(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \right. \\ &\quad \left. - E_i^0 E_j^0 \text{sen}(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0) \right] \end{aligned} \quad (132)$$

Assim, a dinâmica de uma máquina genérica  $i$  sob a atuação de um dispositivo FACTS é dada por:

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} \left[ f_k(\sigma_k, e_d, e_q, \Delta y_{\text{FACTS}}) - \omega_i \right] - \frac{1}{M_i} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^m f_l(\sigma_l, e_d, e_q, \Delta y_{\text{FACTS}}) \quad (133)$$

e, considerando um par de máquinas  $k = (i, j)$  desacoplado do restante do sistema,

têm-se

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} \left[ f_k(\sigma_k, e_d, e_q, \Delta y_{FACTS}) - \omega_i \right] \quad (134)$$

e

$$\dot{\omega}_j = \frac{1}{M_j} \left[ f_k(\sigma_k, e_d, e_q, \Delta y_{FACTS}) - \omega_j \right] \quad (135)$$

A aceleração relativa entre as máquinas do par  $k$  é dado por

$$\dot{\omega}_k = \dot{\omega}_i - \dot{\omega}_j = \left( \frac{1}{M_i} - \frac{1}{M_j} \right) f_k(\sigma_k, e_d, e_q, \Delta y_{FACTS}) - \frac{\omega_i}{M_i} + \frac{\omega_j}{M_j} \quad (136)$$

e de (139) identifica-se o torque líquido sincronizante

$$f'_k = \frac{1}{M_i M_j} \left[ (M_i + M_j) f_k(\sigma_k, e_d, e_q, \Delta y_{FACTS}) \right] \quad (137)$$

A introdução da nova variável associada ao dispositivo FACTS acrescenta uma dimensão ao espaço de estado. Então, seguindo procedimento como o adotado na apresentação original do método da RSP, agora, com a ação dos dispositivos FACTS, a RSP é definida como:

$$RSP = \left\{ (\sigma_k, e_d, e_q, \Delta y_{FACTS}) \exists \sigma_{ke}; (\sigma_k - \sigma_{ke}(\Delta y_{FACTS})) f'_k(\sigma_k, e_d, e_q, \Delta y_{FACTS}) > 0, \right. \\ \left. \sigma_k \neq \sigma_{ke}(\Delta y_{FACTS}); k = 1, 2, \dots, m \right\} \quad (138)$$

As fronteiras da RSP são superfícies definidas no espaço  $(\sigma_k, e_i, e_j, \Delta y_{FACTS})$  descritas por:

$$f_k(\sigma_k, e_i, e_j, \Delta y_{FACTS}) = 0 \quad (139)$$

ou seja

$$(1 + F_{FACTS}^{efeito} \Delta y_{FACTS}) E'_i E'_j \text{sen}(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) - E_i^0 E_j^0 \text{sen}(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0) = 0 \quad (140)$$

Designando o ângulo interno simplesmente por  $\delta$  e desconsiderando, apenas por simplicidade de representação, as condutâncias de transferência, têm-se  $\alpha_{ij} \equiv 0$  e

$$(1 + F_{FACTS}^{efeito} \Delta y_{FACTS}) (E_i^0 + e_i) (E_j^0 + e_j) \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - E_i^0 E_j^0 \text{sen}(\delta_{ij}^0) = 0 \quad (141)$$

Pode-se representar os traços das superfícies nos planos  $(e_i, \sigma_k)$ ,  $(e_j, \sigma_k)$ ,  $(\Delta y_{FACTS}, \sigma_k)$ ,

$(\Delta y_{FACTS}, e_i)$ ,  $(\Delta y_{FACTS}, e_j)$ .

Note-se que nos planos  $(e_i, \sigma_k)$  e  $(e_j, \sigma_k)$  ou simplesmente  $(e, \sigma_k)$  têm-se a já conhecida RSP como definida originalmente para  $(e_i, \sigma_k)$ , representada com  $E_j \equiv 1 pu$ , a partir de

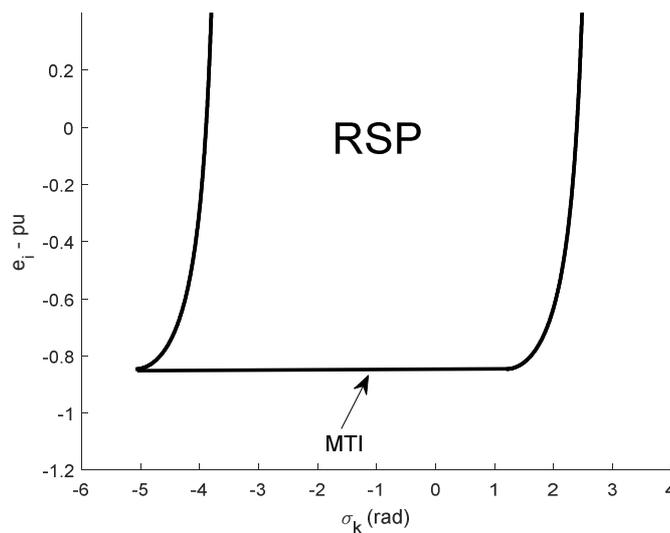
$$(E_i^0 + e_i) \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - E_i^0 \text{sen}(\delta_{ij}^0) = 0 \quad (142)$$

ou

$$e = E_i^0 \frac{\text{sen}(\delta_{ij}^0) - \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0)}{\text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0)} \quad (143)$$

mostrado na Figura 21 onde as curvas foram traçadas para valores do par (10,5) do sistema New England, apresentado no capítulo 6.

**Figura 21** – RSP definida no plano das tensões e defasagens angulares.



**Fonte:** Próprio Autor

Há, neste caso, como já bem conhecido, duas fronteiras a considerar:

- As STNs, descritas pela equação (142), e
- A mínima tensão interna dada por  $e_i^* = [\text{sen}(\delta_{ij}^0) - 1]E_i^0$

Considerando o plano das admitâncias do FACTS e defasagens angulares, têm-se o traço da STN dado por:

$$(1 + F_{FACTS}^{efeito} \Delta y_{FACTS}) \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \text{sen}(\delta_{ij}^0) = 0 \quad (144)$$

Ou

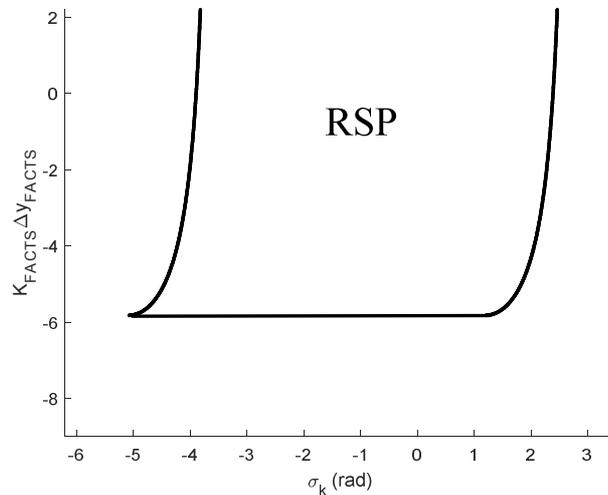
$$F_{FACTS}^{efeito} \Delta y_{FACTS} = \frac{\text{sen}(\delta_{ij}^0) - \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0)}{\text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0)} \quad (145)$$

Observa-se que a equação para o traço da STN no plano  $(\Delta y_{FACTS}, \sigma_k)$  tem forma similar à do traço no plano  $(e_i, \sigma_k)$ , o que é natural, dado que tanto as variações das tensões internas, quanto às variações da admitância promovidas pelos dispositivos FACTS influenciam diretamente o torque sincronizante. Há que se notar, no entanto, que a influência dos dispositivos FACTS é afetada pelo fator de efeito  $F_{FACTSij}^{efeito}$ , lembrando que

$F_{FACTSij}^{efeito} = \frac{K_{FACTSij}}{Y_{ij}^0}$ , sendo  $K_{FACTSij}$  antes referido como fator de eficácia, têm-se então:

$$K_{FACTS} \Delta y_{FACTS} = \frac{\text{sen}(\delta_{ij}^0) - \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0)}{\text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0)} Y_{ij}^0 \quad (146)$$

**Figura 22** - mostra o traço da STN no plano  $(\Delta y_{FACTS}, \sigma_k)$  obtida para valores do par (10,5) do sistema New England, apresentado no capítulo 6.



**Fonte:** Próprio Autor

Neste caso, como no caso do traço da STN no plano  $(e_i, \sigma_k)$ , há duas possibilidades de a trajetória do sistema abandonar a RSP:

1. Cruzando a curva definida pela equação (144) ou
2. Violando a restrição de mínimo valor admissível de  $K_{FACTS} \Delta y_{FACTS}$ , que é definido a seguir:

O mínimo valor admissível de  $K_{FACTS\ ij}\Delta y_{FACTS}$  é obtido no vértice da curva, em

$$\sigma_K = \frac{\pi}{2} - \delta_{ij}^0.$$

$$\left[ K_{FACTS\ ij}\Delta y_{FACTS} \right]_{min} = \left[ \text{sen}(\delta_{ij}^0) - 1 \right] Y_{ij}^0 \quad (147)$$

Esta pode ser uma limitação relevante em casos de acoplamentos fracos (baixos valores de  $Y_{ij}^0$ ) e/ou altos carregamentos (valores de  $\delta_{ij}^0$  próximos de  $\pi/2$ ) com alto valor de  $K_{FACTS\ ij}$ .

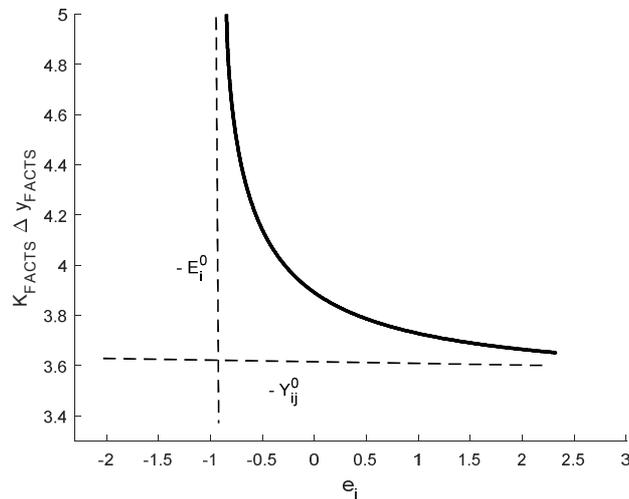
Resta observar o traço da STN no plano  $(\Delta y_{FACTS}, e_i)$  obtido de

$$\left( 1 + F_{FACTS\ ij}^{efeito} \Delta y_{FACTS} \right) (E_i^0 + e_i) = E_i^0 \quad (148)$$

Ou

$$e_i = \frac{-\left( F_{FACTS\ ij}^{efeito} \Delta y_{FACTS} \right) E_i^0}{1 + F_{FACTS\ ij}^{efeito} \Delta y_{FACTS}} \quad (149)$$

**Figura 23** - Traço da STN no plano  $(e_i, K_{FACTS}\Delta y_{FACTS})$



Fonte: Próprio Autor

Os valores mínimos de  $e_i$  e de  $K_{FACTS\ ij}\Delta y_{FACTS}$  obtidas nas análises dos planos  $(e_i, \sigma_k)$ , e  $(\Delta y_{FACTS}, \sigma_k)$  são mais restritivos que os obtidos para o plano  $(\Delta y_{FACTS}, e_i)$ , de modo que, pelo menos por ora, estes não serão levados em conta no estudo da estabilidade.

No entanto, é interessante observar que os valores mínimos encontrados tem significados importantes, uma vez que indicam a anulação da capacidade de sincronização. De um lado, o mínimo da variação tensão interna em  $E_i^0$  significa a total desmagnetização da máquina com anulação da tensão interna e, por outro, o valor mínimo da variação da admitância de transferência em  $-Y_{ij}^0$  significa a virtual “abertura” da conexão entre as máquinas  $i$  e  $j$ . Tanto em um quanto em outro caso, têm-se o desacoplamento das máquinas e a impossibilidade de sincronismo.

### 5.3 EVOLUÇÃO DA TRAJETÓRIA EM RELAÇÃO ÀS FRONTEIRAS DA RSP

As diversas possibilidades de violação das fronteiras por cruzamento da trajetória por superfícies de torque nulo (STNs) são reunidas em consideração da distância ( $d$ ) relativa entre a trajetória (ponto-a-ponto) e as superfícies, calculando, passo-a-passo, as variações desta distância ( $\dot{d}_k$ ).

A velocidade do sistema sob a ação de um dispositivo FACTS em relação a uma certa  $STN_k$  é obtida como

$$\dot{d}_k = \frac{\sigma_k}{|\sigma_k|} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_k & \dot{e}_i & \dot{e}_j & \dot{\Delta y}_{FACTS} \end{bmatrix} \text{grad}f_k(\sigma_{STN_k}, e_i, e_j, \Delta y_{FACTS}) \quad (150)$$

sendo  $\sigma_{STN_k}$  a coordenada  $\sigma_k$  correspondente a  $e_i$  e  $e_j$  na  $STN_k$ , com  $\text{grad}f_k = \nabla f_k(\sigma_k, e_i, e_j, \Delta y_{FACTS})$  dado por:

$$\nabla f_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_k}{\partial \sigma_k} \\ \frac{\partial f_k}{\partial e_i} \\ \frac{\partial f_k}{\partial e_j} \\ \frac{\partial f_k}{\partial \Delta y_{FACTS}} \end{bmatrix} \quad (151)$$

$$\nabla f_k = \begin{bmatrix} Y_{ij}^0 \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) (E_j^0 + e_j) (E_i^0 + e_i) (1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) \\ Y_{ij}^0 \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) (E_j^0 + e_j) (1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) \\ Y_{ij}^0 \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) (E_i^0 + e_i) (1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) \\ K_{ef} Y_{ij}^0 \left[ \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) (E_j^0 + e_j) (E_i^0 + e_i) - E_i^0 E_j^0 \text{sen} \delta_{ij}^0 \right] \end{bmatrix} \quad (152)$$

Efetuando o produto e arranjando termos, chega-se a:

$$\begin{aligned} \dot{d}_k &= \frac{\sigma_k}{|\sigma_k|} Y_{ij}^0 \left\{ (1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) \left[ -(\omega_i - \omega_j) (E_j^0 + e_j) (E_i^0 + e_i) + \right. \right. \\ &\mu_k \left[ \dot{e}_i (E_j^0 + e_j) + \dot{e}_j (E_i^0 + e_i) \right] \left. \right] + \Delta y_{FACTS} \cdot K_{ef} \left[ \mu_k (E_j^0 + e_j) (E_i^0 + e_i) - \right. \\ &\left. \left. E_i^0 E_j^0 \text{sen} \delta_{ij}^0 \right] \right\} \end{aligned} \quad (153)$$

onde

$$\mu_k = \mu_k(e_i, e_j, \Delta y_{FACTS}) = \frac{E_i^0 E_j^0 \text{sen} \delta_{ij}^0}{(E_i^0 + e_i)(E_j^0 + e_j)} \Delta y_{FACTS} \quad (154)$$

Nota-se que a aproximação da  $STN_k$  pelo sistema em seu movimento é afetada pelas variações da admitância do dispositivo FACTS. Então, se o dispositivo for dotado de um controle adicional para ação durante o regime transitório, pode-se exercer uma influência sobre o movimento de modo a reforçar tendência no sentido do interior da RSP e até mesmo reverter uma tendência de instabilidade, forçando inversão do sinal de  $\dot{d}_k$ .

Procura-se a seguir determinar uma atuação do controle adicional visando obter-se este resultado, por meio de uma Lei de Controle

#### 5.4 UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Para assegurar a estabilidade do sistema, a trajetória do sistema, situada dentro da RSP, deve evoluir no sentido do interior da região, ou seja,  $\dot{d}_k > 0$ , onde:

$$\dot{d}_k = y_{ij}^0 \frac{\sigma_k}{|\sigma_k|} (1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) f_k(\sigma_k, e_i, e_j, \Delta y_{FACTS}) \quad (155)$$

Lembre-se que, a definição da RSP, estabelece que no seu interior,  $\sigma_k f_k(\sigma_k, e_i, e_j, \Delta y_{FACTS}) > 0$  e que naturalmente  $Y_{ij}^0 > 0$ . Então, para  $\dot{d}_k > 0$ , deve-se ter:

$$\Delta y_{FACTS} > -\frac{1}{K_{ef}} \quad (156)$$

Lembrando neste momento que o dispositivo FACTS é modelado por um bloco linear de primeira ordem, com constante de tempo  $T_{FACTS}$ , ganho  $K_{FACTS}$  e entrada  $u$ , a variável  $\Delta y_{FACTS}$  é regida pela equação dinâmica a seguir.

$$\dot{\Delta y}_{FACTS} = \frac{1}{T_{FACTS}} [-\Delta y_{FACTS} + K_{FACTS} \Delta u] \quad (157)$$

Sendo  $T_{FACTS}$  uma constante de tempo de dinâmica eletrônica, pode-se em termos práticos, considerá-la muito pequena diante das dinâmicas que caracterizam o movimento eletromecânico. Assim, pode-se considerar, no movimento eletromecânico,  $T_{FACTS} \dot{\Delta y}_{FACTS} \cong 0$ , com o que

$$\Delta y_{FACTS} \cong K_{FACTS} \Delta u \quad (158)$$

Assim, têm-se as variações da distância da trajetória em relação à  $STN_k$  contendo a influência do dispositivo FACTS modelado como bloco linear de primeira ordem com dinâmica rápida frente à dinâmica eletromecânica. Considerando controle na modalidade bang- bang, com entrada fixa a partir de uma determinada condição,  $\Delta y_{FACTS}$  passa a ser constante, exceto no momento do chaveamento, quando varia rapidamente (considerado instantâneo). Com esta consideração, reescreve-se:

$$(1 + K_{ef\ ij} K_{FACTS} \Delta u) > 0 \therefore \Delta u > -\frac{1}{K_{ef\ ij} K_{FACTS}} \quad (159)$$

Têm-se assim como resultado a indicação de uma ação de controle que deve obedecer apenas um limite mínimo. É significativo observar que a intensidade mínima da ação guarda relação de proporcionalidade inversa com a sensibilidade do par de máquinas considerado em relação ao dispositivo FACTS, o que leva em consideração a distância elétrica relativa entre eles. Para pequenos valores da sensibilidade  $K_{ef\ ij}$  é necessário um esforço  $\Delta y_{FACTS}$  ( $\Delta y_{FACTS} \cong K_{FACTS} \Delta u$ ) grande para atuar no sistema.

Com  $f_k > 0$  sistema sem compensação afasta-se da STN (tendência à estabilidade), para manter essa tendência e reforçá-la o compensador deve atuar para que se tenha  $(1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) > 0 \rightarrow \Delta y_{FACTS} > -\frac{1}{K_{ef}}$ .

O controle parece viável para altas sensibilidades, com atuação dentro de uma faixa de valores mínimos e valores máximos. Esses valores foram obtidos após varias simulações e para o sistema teste em estudo, variam entre (-1,1 e 1,9) como se pode ver na Figura 24.

O efeito produzido por esta atuação do dispositivo resulta no deslocamento da STN no sentido de aumentar a área da Região de Sincronização Positiva e conseqüentemente melhorar a estabilidade do sistema.

Procura-se agora observar a influência do dispositivo sobre as CTN's. Retomando a potência elétrica afetada pela atuação do dispositivo FACTS escrita como:

$$\Delta P_{ei} = Y_{ij}^0 \left[ (1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) E_i E_j \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - E_i^0 E_j^0 \text{sen} \delta_{ij}^0 \right] \quad (160)$$

isola-se  $\delta_{ij}^0$  na condição de  $\Delta P_{ei} = 0$ , como:

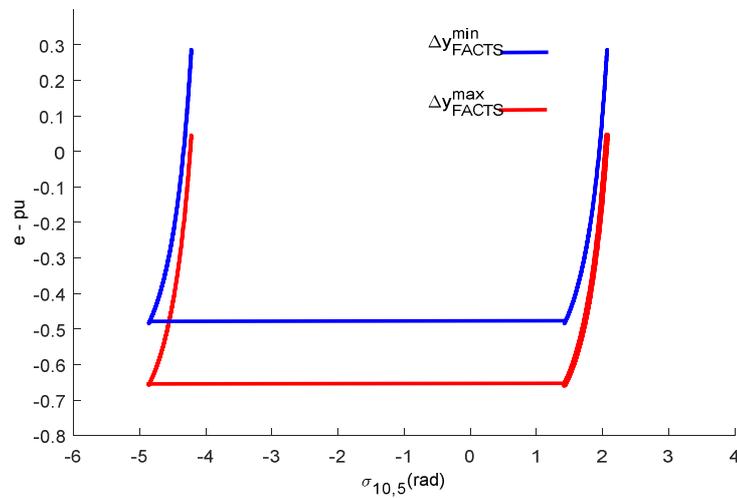
$$Y_{ij}^0 \left[ (1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) E_i E_j \text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - E_i^0 E_j^0 \text{sen} \delta_{ij}^0 \right] = 0 \quad (161)$$

$$\delta_{ij}^0 = \text{arcsen} \left[ \frac{(1 + K_{ef} \Delta y_{FACTS}) E_i E_j \text{sen} \delta_{ij}^0}{E_i^0 E_j^0} \right] \quad (162)$$

Sabendo que as CTN's passam por  $(\sigma_k, e_i, e_j) = (\pi - 2\delta_{ij}^0, 0, 0)$  e outra por  $(\sigma_k, e_i, e_j) = (-\pi - 2\delta_{ij}^0, 0, 0)$ , como se mostra na figura (8). Sem dificuldade conclui-se que a ação do dispositivo influencia diretamente nas CTN's como podemos ver na figura 24.

Para essa simulação foi considerado o par de máquinas (10,5) do sistema teste New England, considerando os valores reais da simulação e variando apenas de  $\Delta y_{facts}^{\min} = -1,1$ , que foi obtido com simulações computacionais  $\Delta y_{facts}^{\max} = 1,9$ .

**Figura 24** - Região de Sincronização Positiva com variação de  $\Delta y_{FACTS}$ .



**Fonte:** Próprio autor.

Nessa simulação é possível perceber o deslocamento das Curvas de Torque Nulos (CTN's) melhorando assim a Região de Sincronização Positiva e conseqüentemente melhorando a estabilidade do sistema.

É de se notar o efeito mais significativo no deslocamento da Mínima Tensão Interna, que pode mostrar-se útil para considerações em caso de eventos implicando estabilidade de tensão

## 5.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram introduzidos os efeitos da atuação dos dispositivos FACTS na formulação da RSP, o que implicou em modificação nas fronteiras antes existentes e na criação de uma nova dimensão desta região, com conseqüente nova fronteira associada às variações da susceptância do dispositivo. A partir da constatação de que o dispositivo de fato modifica a RSP, propôs-se empregar esta capacidade em favor da estabilidade do sistema por meio de uma lei de controle, de formulação simples. Há que se notar, por outro lado, que a implementação em sistemas reais, embora tenha um potencial promissor, depende da disponibilidade de medidas remotas online.

No próximo capítulo, são apresentados resultados de simulações de sistemas exemplos como experimentação da estratégia proposta.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações de dois sistemas multimáquinas teste, com objetivo de validar nos capítulos 4 e 5. As simulações foram realizadas em sistemas de 4 e 10 máquinas, com o uso de programas desenvolvidos no ambiente *MATLAB* utilizando os equacionamentos apresentados nos capítulos 2, 3, 4 e 5.

As simulações efetuadas tiveram como único propósito avaliar o desempenho da metodologia proposta, e nem sempre a alocação do dispositivo FACTS na rede atendeu a restrições e/ou critérios técnicos específicos.

A implementação da estratégia de controle foi efetuada nas simulações de modo “manual”, ou seja, sem o efetivo fechamento do laço de controle.

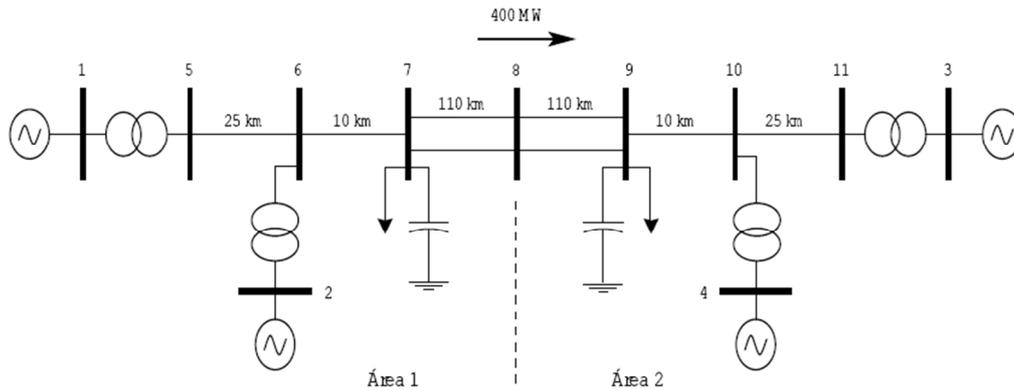
### 6.2 SISTEMA DE 4 MÁQUINAS E 11 BARRAS

O sistema teste multimáquinas, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 25, foi proposto para estudar a influência da contribuição do SVC no sistema multimáquinas.

Esse sistema consiste de duas áreas simétricas, sendo essas conectadas por duas linhas de intercâmbio paralelas longas, ou seja, com alta reatância indutiva, constituindo uma interligação eletricamente fraca entre os sistemas. Cada área consiste de duas unidades de geração em que a Área 1 transfere para a Área 2 uma potência ativa de 400 MW, conforme Figura 25.

Esse sistema pode ser encontrado em Klein (1991).

**Figura 25** – Diagrama Sistema Multimáquinas Simétrico de duas áreas e quatro máquinas.

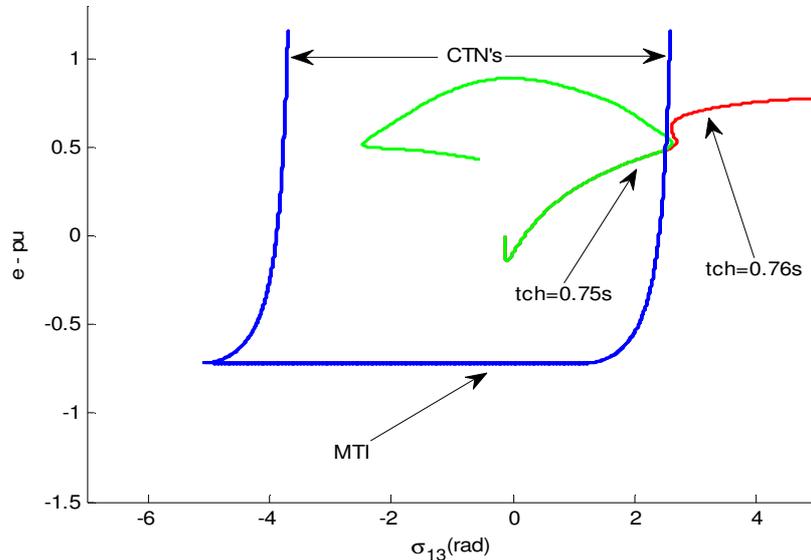


**Fonte:** Klein et all (1991).

### 6.3 DISPOSITIVO FACTS INSTALADO NA BARRA 6 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA.

Considerando a atuação do SVC instalado na barra 6, e com uma contingência na barra 9, com atuação estática, o comportamento da trajetória do sistema pode ser observado no plano  $\sigma \times e$  Figuras 26. Observa-se nos gráficos que com o tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.75s$ , a trajetória do sistema pós-falta permanece dentro da RSP, mostrando que o sistema é estável. No caso do tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.76s$  a trajetória do sistema abandona a RSP, concluindo pela instabilidade do sistema pós-falta.

**Figura 26** – Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta sob a ação estática do dispositivo SVC instalado na Barra 6 no (plano  $\sigma \times e$ ), para uma contingência na barra 9.

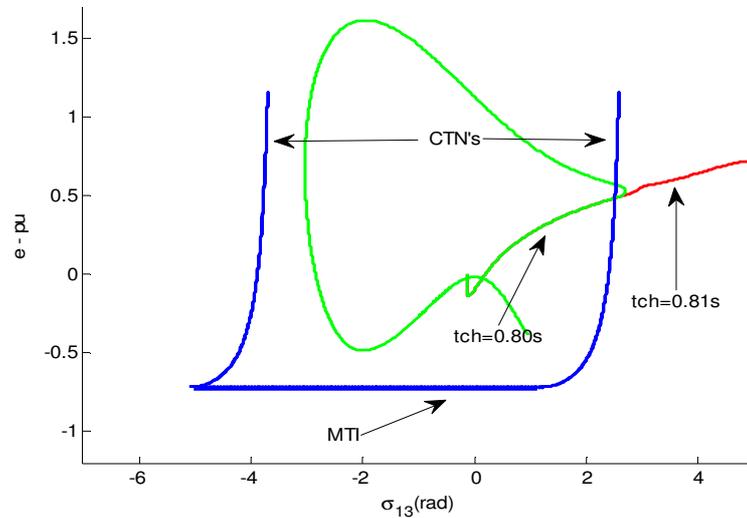


**Fonte:** Elaboração do próprio autor.

### 6.3.1 DISPOSITIVO FACTS INSTALADO NA BARRA 6 COM A COMPENSAÇÃO ESTÁTICA E ACRESCENTANDO O CONTROLE ADICIONAL.

Considerando a atuação do SVC instalado na barra 6 e com uma contingência na barra 9, com adição do controle e adotando  $\Delta y_{FACTS}^{Max} = 1,7$  além da compensação estática mostrada antes, o comportamento da trajetória do sistema pode ser observado no plano  $\sigma \times e$  na Figura 27. Onde se verifica que com o tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.80s$ , a trajetória do sistema pós-falta permanece dentro da RSP, mostrando que o sistema é estável. No caso do tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.81s$  a trajetória do sistema abandona a RSP, concluindo pela instabilidade do sistema pós-falta.

**Figura 27** – Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta sob a ação e do dispositivo instalado na Barra 6 e com Lei de controle no (plano  $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 9.

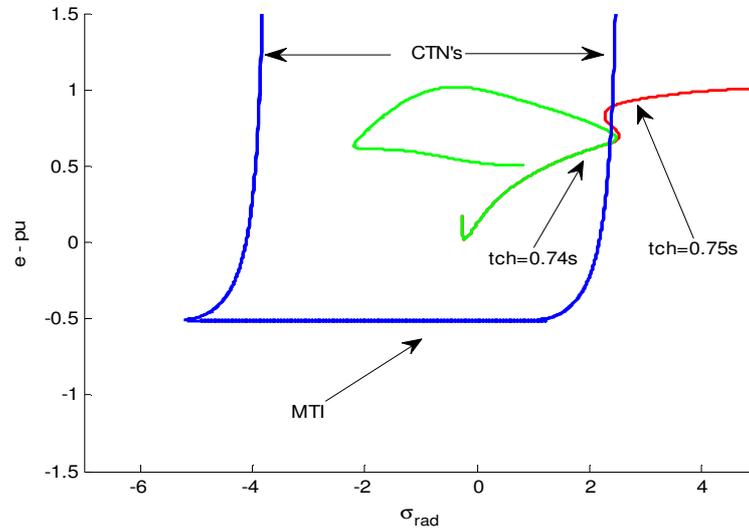


Fonte: Elaboração do próprio autor

### 6.3.2 DISPOSITIVO SVC INSTALADO NA BARRA 8 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA

Considerando a atuação do dispositivo SVC instalado na barra 8, e com uma contingência na barra 9, com atuação estática o comportamento da trajetória do sistema pode ser observado no plano  $\sigma \times e$  na Figura 28. Onde se verifica que com o tempo de chaveamento  $t_{ch}=0.74s$ , a trajetória do sistema pós falta permanece dentro da RSP, mostrando que o sistema é estável. No caso do tempo de chaveamento  $t_{ch}=0.75s$  a trajetória do sistema abandona a RSP, concluindo pela instabilidade do sistema pós-falta.

**Figura 28** - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação estática do dispositivo SVC instalado na Barra 8 no (plano  $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 9.

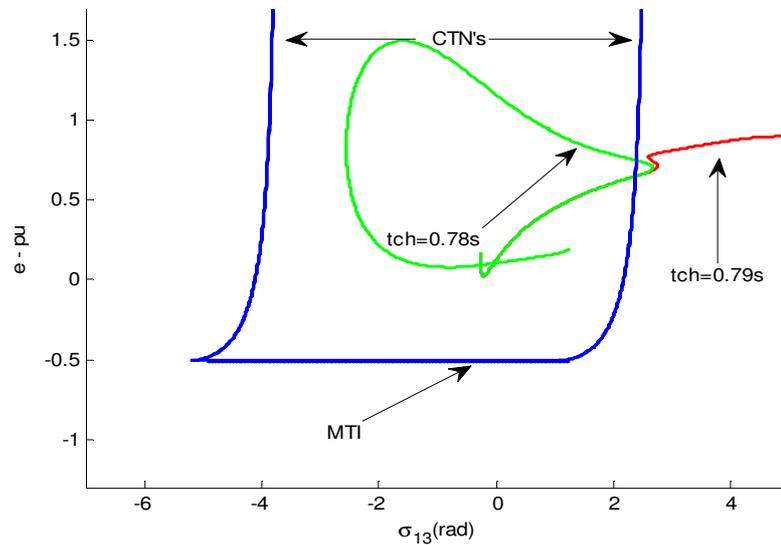


**Fonte:** Elaboração do próprio autor.

### 6.3.3 DISPOSITIVO SVC INSTALADO NA BARRA 8 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA E CONTROLE ADICIONAL.

Considerando a atuação do dispositivo SVC instalado na barra 8, plano  $e$  e com um curto-circuito na barra 9, com adição do controle e adotando  $\Delta y_{FACTS}^{Max} = 1,8$  além da compensação estática mostrada antes, o comportamento da trajetória do sistema pode ser observado no plano  $\sigma \times e$  na Figura 29. Onde se verifica que com o tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.78s$ , a trajetória do sistema pós falta permanece dentro da RSP, mostrando que o sistema é estável. No caso do tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.79s$  a trajetória do sistema abandona a RSP, concluindo pela instabilidade do sistema pós-falta.

**Figura 29** - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação do dispositivo instalado na Barra 8 com Controle adicional no (plano  $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 9.

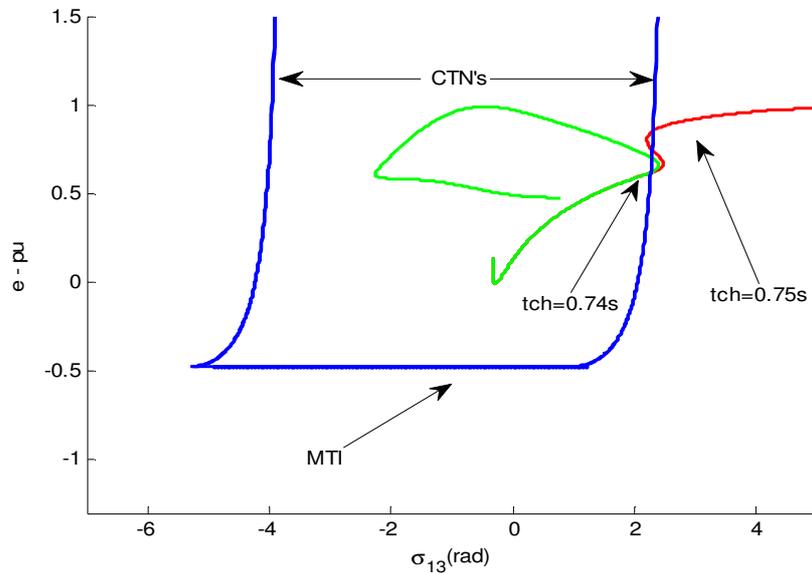


Fonte: Elaboração do próprio autor

#### 6.3.4 DISPOSITIVO SVC INSTALADO NA BARRA 9 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA

Considerando a atuação do dispositivo SVC instalado na barra 9, plano  $e$  e com uma contingência na barra 10, com atuação Estática, o comportamento da trajetória do sistema pode ser observado no plano  $\sigma \times e$  na Figura 30. Onde se verifica que com o tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.74s$ , a trajetória do sistema pós-falta permanece dentro da RSP, mostrando que o sistema é estável. No caso do tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.75s$  a trajetória do sistema abandona a RSP, concluindo pela instabilidade do sistema pós-falta.

**Figura 30** - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação estática do dispositivo instalado na Barra 9 no (plano  $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 10.

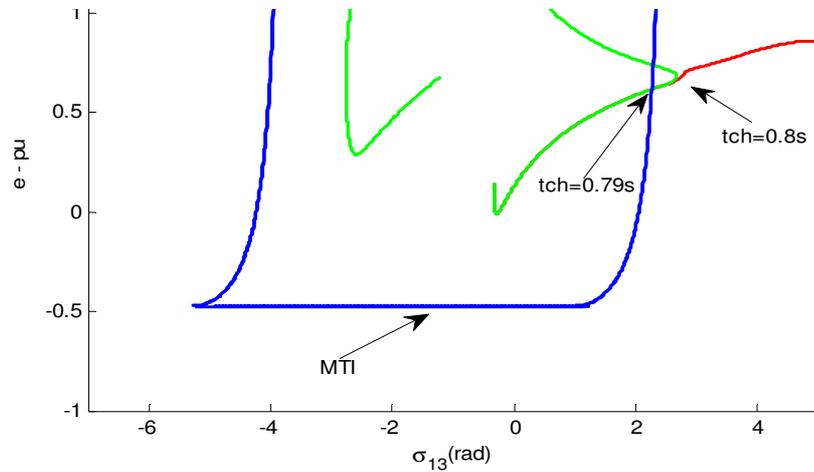


**Fonte:** Elaboração do próprio autor.

### 6.3.5 DISPOSITIVO SVC INSTALADO NA BARRA 9 COM COMPENSAÇÃO ESTÁTICA E COM CONTROLE ADICIONAL.

Considerando a atuação do dispositivo SVC instalado na barra 9, plano  $e$  e com uma contingência na barra 10, com adição do controle e adotando  $\Delta y_{FACTS}^{Max} = 1,6$  além da compensação estática mostrada antes, o comportamento da trajetória do sistema pode ser observado no plano  $\sigma \times e$  na Figura 33 e no plano  $\sigma \times e$  Figura 34. Onde se verifica que com o tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.79s$ , a trajetória do sistema pós falta permanece dentro da RSP, mostrando que o sistema é estável. No caso do tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.80s$  a trajetória do sistema abandona a RSP, concluindo pela instabilidade do sistema pós-falta.

**Figura 31-** Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação do dispositivo instalado na Barra 9 com Controle adicional no (plano  $\sigma \times e$ ), para contingência na barra 10.



**Fonte:** Elaboração do próprio autor

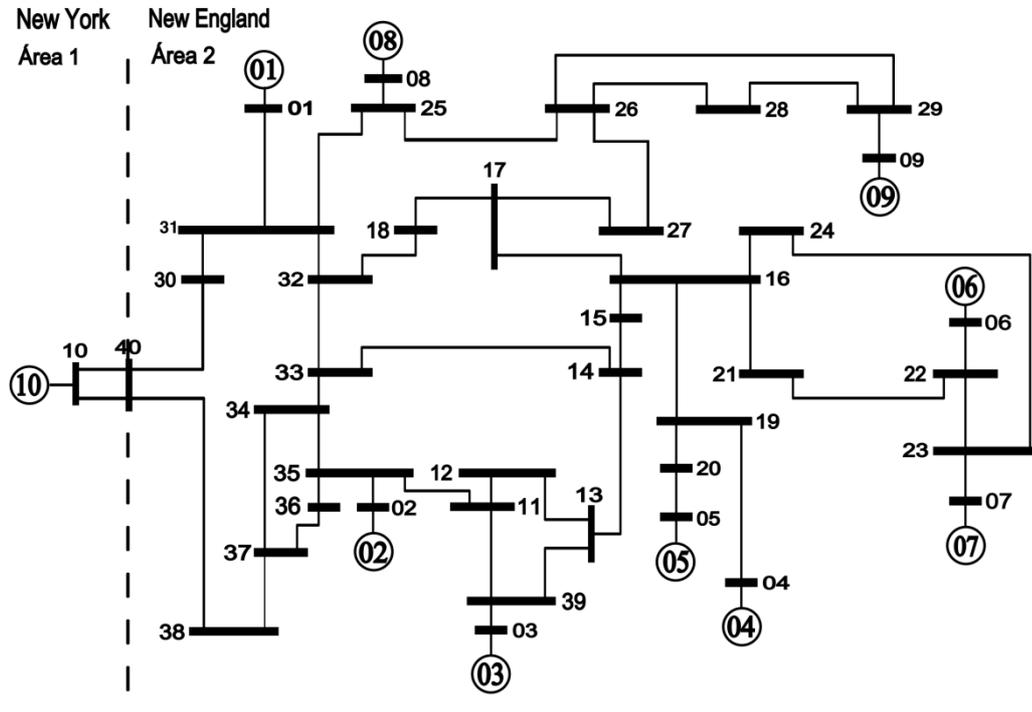
Em todos os casos é possível perceber que a trajetória do sistema (em verde) abandona momentaneamente a RSP e volta, como está descrito no passo 3 do teste de estabilidade, pois  $\dot{d}$  inverte o sinal.

O tempo crítico para todos os casos foram encontrados depois de exaustivas simulações.

#### 6.4 SISTEMA NEW ENGLAND: 10 MÁQUINAS E 39 BARRAS

O sistema que é denominado “Sistema New England”, tal como usualmente na literatura, é composto por 10 geradores, 39 barras e 46 linhas de transmissão, representado na Figura 32. Os dados de cargas e de linhas, em regime permanente, constam no anexo.

**Figura 32** - Diagrama unifilar do Sistema New England.



Fonte: Athay (1979).

O objetivo das simulações é o de analisar o efeito da compensação inserida na rede com dispositivos FACTS inseridos no Sistema New England com a aplicação da estratégia de controle apresentada neste trabalho, com o propósito de melhoria da estabilidade transitória. Considera-se a aplicação da estratégia de controle em múltiplos dispositivos FACTS, supostos pré-existentes, comparando os resultados com a condição anterior a aplicação do controle, quando se supõe a compensação estática.

**Tabela 1** – Dispositivos FACTS alocados, pares de máquinas mais afetados e valor do tempo de duração da falta ( $t_{ch}$ ), para cada curto-circuito.

Falta	SVC	TCSC	Máq.
Barra 01	B15, B36	LT (30-31)	(1,10)
Barra 02		LT (02-35), LT (26-29), LT (32-33)	(2,10)
Barra 03	B14, B35, B39	LT (03-39), LT (14-15), LT (32-33)	(3,10)
Barra 04	B16	LT (04-19), LT (05-20)	(4,10)
Barra 05	B19	LT (05-20)	(5,10)
Barra 06	B16	LT (23-24), LT (38-40)	(6,10)
Barra 07	B16	LT (23-24), LT (38-40)	(7,10)
Barra 08	B26	LT (08-25), LT (17-27)	(8, 10)
Barra 09	B27	LT (26-29)	(9,10)

**Fonte:** Elaboração do próprio autor.

#### 6.4.1 CURTO-CIRCUITO NA BARRA 1

Com o propósito de conhecer o comportamento do sistema apresentado sem compensação, quando submetido a um curto-circuito na Barra 01 com eliminação da falta sem chaveamento, verificou-se que a máquina 01 perdeu sincronismo em relação às outras máquinas com tempo de chaveamento  $t_{ch} = 0.43s$ .

Considerando a atuação de dois SVCs instalado nas Barras 15 e 36 e do TCSC instalado na Linha 30-31 e com uma contingência na Barra 01, com a adição da Lei de Controle, o comportamento da trajetória do sistema pode ser observado no plano  $\sigma \times e$  na Figura 33, onde se verifica que com o controle proposto o tempo de chaveamento criticamente instável passou a ser  $t_{ch} = 0.59s$ .

#### 6.4.2 CURTO- CIRCUITO NAS BARRAS DE GERAÇÃO

As simulações apresentadas a seguir correspondem aos curtos-circuitos nas barras (01, 02,..., 09) do sistema New England com tempo de duração da falta inferior e/ou próximo ao tempo crítico de eliminação de cada curto-circuito do sistema sem compensação.

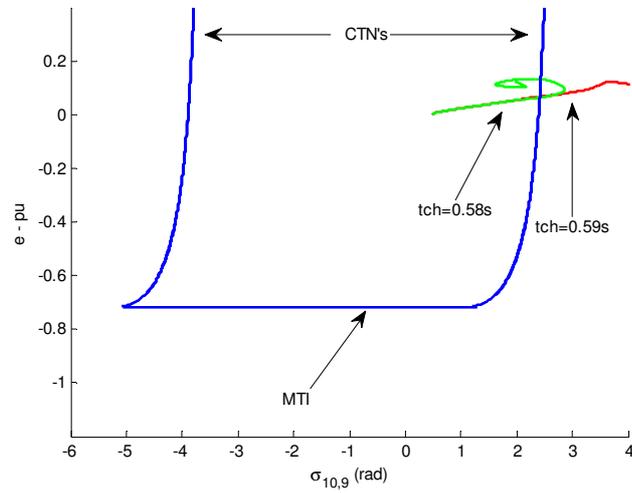
**Tabela 2** – Tempo de eliminação da falta do Sistema New England.

Curto-circuito	Sem comp.	Com comp.
Barra 01	0,42 – 0,43	0,58 – 0,59
Barra 02	0,32 – 0,33	0,47 – 0,48
Barra 03	0,19 – 0,20	0,29 – 0,30
Barra 04	0,15 – 0,16	0,21 – 0,22
Barra 05	0,16 – 0,17	0,23 – 0,24
Barra 06	0,17 – 0,18	0,23 – 0,24
Barra 07	0,18 – 0,19	0,23 – 0,24
Barra 08	0,20 – 0,21	0,25 – 0,26
Barra 09	0,14 – 0,15	0,18 – 0,19

**Fonte:** Elaboração do próprio autor.

Os resultados apresentados na tabela 2 mostram o quanto o Controle suplementar proposto contribui para o aumento do tempo crítico e conseqüentemente para o aumento da estabilidade transitória do sistema, destacando-se que em todos os casos houve uma melhora significativa.

**Figura 33** - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação dos dispositivos SVC instalados nas Barras 15 e 36 e TCSC instalado na LT (30-31) com de Controle adicional no (plano  $\sigma \times e$ ).



**Fonte:** Elaboração do próprio autor.

### 6.4.3 CURTO-CIRCUITO EM BARRAS PROXIMAS AS BARRAS DE GERAÇÃO

**Tabela 3 – Curto em barras próximas as barras de geração.**

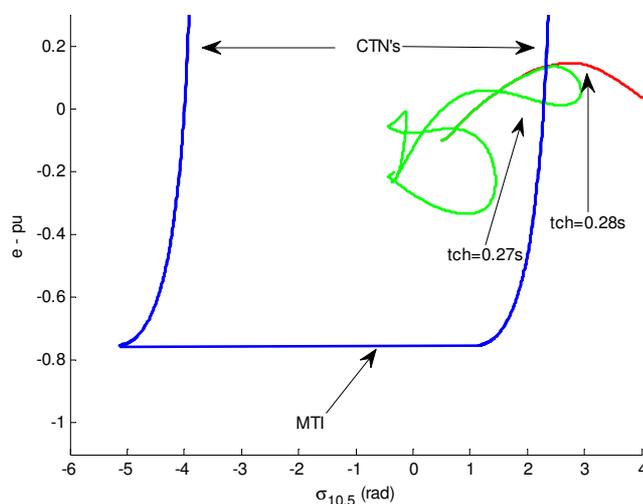
Curto - circuito	Barra geração próxima	Sem comp.	Com comp.
Barra 31	01	0,25 – 0,26	0,35 – 0,36
Barra 35	02	0,19 – 0,20	0,30 – 0,31
Barra 36	02	0,23 – 0,24	0,41 – 0,42
Barra 39	03	0,18 – 0,19	0,32 – 0,33
Barra 11	03	0,18 – 0,19	0,38 – 0,39
Barra 16	04	0,12 – 0,13	0,21 – 0,22
Barra 20	05	0,17 – 0,18	0,27 – 0,28
Barra 19	05	0,14 – 0,15	0,23 – 0,24
Barra 21	06	0,16 – 0,17	0,26 – 0,27
Barra 22	06	0,16 – 0,17	0,24 – 0,25
Barra 23	07	0,16 – 0,17	0,24 – 0,25
Barra 24	07	0,14 – 0,15	0,24 – 0,25
Barra 25	08	0,17 – 0,18	0,25 – 0,26
Barra 26	08	0,15 – 0,16	0,23 – 0,24
Barra 28	09	0,17 – 0,18	0,25 – 0,26
Barra 29	09	0,15 – 0,16	0,20 – 0,21

**Fonte:** Elaboração do próprio autor.

### 6.4.4 CURTO-CIRCUITO NA BARRA 20

Considerando a atuação de um SVC instalado na Barra 19 e um TCSC instalado na Linha 05-20 e para uma contingencia na Barra 19, com controle adicional e adotando  $\Delta y_{FACTS}^{Max} = 1,9$ , o comportamento da trajetória do sistema pode ser observado no plano  $\sigma \times e$  na Figura 35, onde se verifica que com controle proposto o tempo de chaveamento passou a ser  $t_{ch} = 0.24s$ , concluindo pela instabilidade do sistema.

Figura 34 - Gráfico da RSP e da trajetória pós-falta do sistema sob a ação dos dispositivos SVC instalado na Barra 19 e TCSC instalado na LT (05-20) com Controle adicional no plano ( $\sigma \times e$ ).



Fonte: Elaboração do próprio autor

## 6.5 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido abordou o estudo de dispositivos FACTS inseridos no sistema multimáquinas com vista à melhoria da estabilidade desses sistemas. Os dispositivos abordados neste trabalho foram o SVC e o TCSC, e importante destacar que o trabalho visa aproveitar dispositivos já alocados no sistema com objetivo de estabilização em regime transitório, com a incorporação de um controle adicional que foi desenvolvido no trabalho.

Com os dispositivos alocados, analisou-se o comportamento do sistema para diferentes localizações de contingência.

## 7 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido nessa pesquisa abordou o estudo da compensação de múltiplos dispositivos FACTS, com compensação em derivação empregando o SVC e compensação em série por meio do TCSC no Sistema Multimáquinas, no sentido de melhorar as condições de estabilidade transitória do sistema elétrico de potência. A contribuição do SVC e do TCSC no sistema multimáquinas pode ter maior ou menor influência dependendo de sua localização, e tal participação pode ser observada pelos coeficientes de sensibilidade, fator de efeito e coeficiente de eficácia, que expressam a participação do SVC e do TCSC na admitância de transferência entre máquinas, que, por sua vez, exerce grande influência na capacidade de sincronização entre máquinas. A análise desses coeficientes proporciona informações que auxiliam na escolha da localização do dispositivo no sentido de obter melhor torque sincronizante entre os pares de máquinas mais afetados em uma possível contingência.

Neste trabalho, foi proposta uma lei de controle de dispositivos FACTS instalados no sistema, onde a atuação desses dispositivos resultou no deslocamento da Superfície de Torque Nulo, melhorando de forma significativa a área da Região de Sincronização Positiva, consequentemente, aumentando o tempo crítico de chaveamento e melhorando a estabilidade do sistema. É possível notar o efeito mais significativo no deslocamento da Mínima Tensão Interna, o que pode ser útil para considerações em caso de eventos implicando estabilidade de tensão.

Após considerações sobre a influência de dispositivos FACTS no desempenho transitório do sistema e incorporação desses efeitos no monitoramento da trajetória do sistema em relação às fronteiras da Região de Sincronização Positiva, é desenvolvido um controle suplementar incorporado dispositivos pré-existentes com objetivo de exercer um controle do sistema por meio desses dispositivos.

Os resultados dos testes de estabilidade do sistema com o controle suplementar implementado nos modelos propostos (Sistema Simétrico de Duas Áreas e New England), foram analisados por meio de gráficos da RSP e da trajetória do sistema pós-falta, possibilitando a visualização do seu comportamento. Destas análises foi possível determinar os tempos críticos de chaveamento de cada modelo, verificando a eficácia do dispositivo em melhorar a estabilidade dos sistemas de potência frente a grandes contingências. Em todos os casos a Lei de controle proposta para o sistema resultou num acréscimo do tempo crítico de

eliminação da falta na primeira oscilação, melhorando a estabilidade e ampliando assim a segurança do sistema.

## **8 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

A continuidade do trabalho se dará pela consideração de múltiplos dispositivos na rede, e com vistas a:

1. Propor uma estratégia automatizada de controle em tempo real incorporando desde a detecção de uma falta, a identificação de qual ou quais dispositivos poderão ser mais eficaz (es), até a atuação e critério de parada do controle.
2. Com controles independentes, porém coordenados, para diferentes pares críticos, sob diferentes condições de faltas.
3. Estender a atuação para multioscilações, podendo neste caso atuar inclusive para amortecimento de oscilações com estratégia de controle adequada.

## REFERÊNCIAS

- ALBERTO, L. F. C; BRETAS, N. G. **Estabilidade transitória em sistemas eletromagnéticos**. São Carlos: USP/ EESC, 2000. 155 p.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power system control and stability**. Ames: The Iowa State University, 2000.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power system control and stability**. Pistacaway: IEEE Press, 2003.
- ATHAY, T.; PODMORE, R.; VIRMANI, S. A practical method for direct analysis of transient stability. **IEEE Trans on PAS**, Pistacaway, v. PAS-98, p. 573-584, 1979.
- CAPELLETTE, R. F. **Estudo dos efeitos da compensação série no desempenho transitório dos sistemas de energia elétrica sob o enfoque da energia**. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.
- CHIANG, H.D.; F.F. WU and P.P. Varaiya, Foundations of Direct Methods for Power System Transient Stability Analysis. **IEEE transactions on Circuits and Systems**, Pistacaway, v. CAS-34, p. 712-728, Feb. 1987.
- CHIANG, H-D.; THORP, J.S. The closest unstable equilibrium point method for power system dynamic security assessment. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, Pistacaway, v. 36, n. 9, 1989.
- CHIANG, H.D.; CHU, C.C.; CAULEY, G. Direct Stability Analysis of Electric Power Systems Using Energy Functions: Theory, Applications, and Perspective. **Proceedings of the IEEE**, Pistacaway, v. 83, n. 11, 1995.
- CHOW, J. H.; SANCHES-GASCA, J. J.; HAOXING, R.; SHAOPENG, W, Power system damping controller design using multiple input signals. **IEEE Control Syst. Mag.**, Pistacaway, v. 20, p. 82-90, Aug. 2000.
- COLVARA, L. D. **Análise de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica com reguladores automáticos de tensão usando funções de lyapunov**. 1988. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica- Faculdade de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1988.
- COLVARA, L. D.; HSU, L. **Análise de estabilidade transitória de sistemas de potência com reguladores automáticos de tensão por método direto- parte i: máquina vs. barra infinita**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 6., 1988, Belo Horizonte. **Anais...** [S. l.: s. n.], 1988. p. 83- 88.
- COLVARA, L. D.; HSU, L. **Análise de estabilidade transitória de sistemas de potência com reguladores automáticos de tensão usando funções de Lyapunov**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 8., 1990, Belém. **Anais...** Belém: SBA, 1990. p. 826-831. e

COLVARA, L. D. **Método automático de análise de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica considerando modelos detalhados: um desenvolvimento.** 1995. 52 f. Tese (Livre Docência em Introdução a Sistemas de Energia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 1995.

COLVARA, L. D.; FESTRAITS, E. B.; ARAUJO, S. C. B. Effect of FACTS devices on power system performance in view of small-signal or great disturbances. In: POWER TECH CONFERENCE PROCEEDINGS, 2003, Bologna. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2003. p. 1-8.

COLVARA, L. D. Influencia do TCSC na energia transitória dos sistemas de potência. **IEEE Latin America Transactions**, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 284-289, 2005.

COLVARA, L. D.; MARQUES, M. M. Efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas em sistema de potência multimáquinas. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE, 8., 2009, Ubatuba. **Proceedings...** Guaratinguetá: FDTC, 2009. p. 6.

DECKER, I. C. **Análise de estabilidade transitória em sistemas de potência usando o conceito de superfície limite de energia potencial.** 1984. 181 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1984.

ELGERD, O. I. **Electric energy systems theory.** New York: McGraw-Hill, 1982.

ERCHE, E.; LERCH, E.; POVH, D.; MIHALIC, R. **Improvement of power system performance using power electronic equipment.** [S. l.: s. n.], 1992.

FOUAD, A. A.; VITTAL, V. **Power system transient stability analysis: using the transient energy function method.** New Jersey: Prentice Hall, 1992. 352 p.

FURINI, M. A. **Projeto de controladores suplementares de amortecimento utilizando redes neurais artificiais.** 2011. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

FURINI, M. A.; MOURA, R. F.; ARAUJO P. B. Ajuste de parâmetros de controladores UPFC POD utilizando algoritmos genéticos. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, Goiânia, 15- 18 Maio 2012, 01- 06.

GUPTA, S.; TRIPATHI, R. K. Two-Area Power System Stability Improvement using a Robust Controller-based CSC-STATCOM. **Acta Polytechnica Hungarica**, [S. l.], v. 11, n. 7, p. 135-155, 2014.

HINGORANI, N.G. FACTS-flexible AC. transmission system. In: International Conference on IEE Conf. Publication No. 345, AC and DC Power Transmission.1991

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: concepts and technology o flexible AC transmission systems.** New York: IEEE, 1999. 452 p.

HINGORANI, N.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.

IEEE/CIGRE, Joint task force on stability, terms and definitions, definition and classification of power system stability. **IEEE Transactions On Power Systems**, Piscataway, v. 19, n.2, p. 1387–1401, 2004.

JARDIM, J. L. de A. **Advances in power system transient stability assessment using transient energy function methods**. 1994. (Ph.D. Thesis) - Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, October 1994.

KAKIMOTO, N.; OHSAWA Y. e HAYASHI, M. Transient stability analysis of electric-power system via Lure-type Lyapunov function, Part I and II. **Trans. IEE Japan**, Tokyo, v. 98, p. 62-7, 72-79, 1978.

KLEIN, M.; ROGERS, G. J.; KUNDUR, P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 914-921, 1991.

KUIAVA, R. **Controle robusto de dispositivos FACTS para o amortecimento de oscilações em sistemas elétricos de potência**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

KUNDUR, P. **Power systems stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

MAC-LEOD, H. E. P. **Controle ótimo descentralizado para o projeto e coordenação de sinais estabilizadores em sistemas elétricos de potência**. 1992. 217 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 1992.

MACHADO, R. L. **Aplicação de dispositivos FACTS no sistema de transmissão da Eletrosul**. 2003. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MARQUES, M. M. **Um estudo dos efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas de um sistema de potência multimáquinas**. 2009. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2009.

MARTINS, R. V. F. **Estudo dos efeitos da compensação em derivação no desempenho dinâmico e transitório dos SEE sob o enfoque de energia transitória**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.

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

MIHALIC, R.; ZUNCO, P.; PAPIC, I., POVH, D. Improvement of transient stability by insertion of facts devices. In: JOINT INTERNATIONAL POWER CONFERENCE ATHENS POWER TECH, IEE1993, Athen. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1993. p. 521-525.

MIOTTO, E.; COVACIC, M. Analysis of impacts of PSS controllers and TCSC FACTS devices at dynamic stability of a multimachine system power. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA- TCED - LA, 9., 2010, São Paulo. **Proceedings...** Piscataway: IEEE/PES, 2010. p. 359–365.

MONDAL, D.; CHAKRABARTI, A.; SENGUPTA, A. Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem. **Electric Power System Research**, v. 42, n. 1, p. 334-340, 2012.

NASCIMENTO, S., GOVÊA JUNIOR, M, M. **Voltage stability enhancement in power systems with automatic facts device allocation.** Barcelona: ICCER, 2016.

NGUIMFACK-NDONGMO, J. D.; KENNÉ, G.; KUATE-FOCHIE, R.; CHEUKEM, A.; FOTSIN, H. B.; LAMNABHI-LAGARRIGUE, F. **A simplified nonlinear controller for transient stability enhancement of multimachine power systems using SSSC device.** Electrical Power and Energy Systems, 2013.

PAI, M. A. **Power system stability:** analysis by the direct method of lyapunov. Amsterdam: North-Holland Systems and Control, 1981. 251 p.

PAVELLA, M., MURTHY, P. G. **Transient stability of power systems, theory and practice.** New York: John Wiley & Sons, 1994.

PAVELLA, M; ERNST, D.; BETTIOL, A.; ZHANG, Y.; WEHENKEL, L. Real-time transientstability emergency control of the south-southeast Brazilian system. In: SIMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING – SEPOPE, 6., 1998, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 1998. p. 1-9.

PERARO, N. R. **Estudo do efeito dos transformadores de relação de transformação variável sobre a capacidade de sincronização intermáquinas.** 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2010.

SAM, A. R.; ARUL, P. **Transient stability enhancement of multi-machine power system using UPFC and SSSC.** [S. l.]: International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2013.

SILVA, J. C. **Efeitos da compensação série na capacidade de sincronização em sistema multimáquinas.** 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2010.

SILVA JÚNIOR, E. P. da. **Controle coordenado de múltiplos dispositivos facts com vistas à estabilidade transitória de SEE.** 2014. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2014.

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

TORTELLI, O. L. **Alocação e operação de controladores FACTS em sistemas elétricos de potência**. 2010. 157 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2010.

WANG, H. F.; Interaction analysis and co-ordination of SVC voltage and damping control. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES, 2000, London. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2000. p. 361–365.

WATANABE, E. H. et al. Tecnologia FACTS- Tutorial. **SBA Controle e Automação**, Campinas, v. 9, n. 1, 1998.

### ANEXO A – DADOS DO SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

Neste anexo, serão apresentados os dados do sistema simétrico de duas áreas em regime permanente, sem compensação.

Tabela 4 – Dados de linha do sistema simétrico de duas áreas.

N° da Linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância Série (pu)		Admitância Paralela (pu)	
			R	X	G	B
01	1	5	0,0000	0,0167	0,0000	0,0000
02	2	6	0,0000	0,0167	0,0000	0,0000
03	3	11	0,0000	0,0167	0,0000	0,0000
04	4	10	0,0000	0,0167	0,0000	0,0000
05	5	6	0,0025	0,0250	0,0000	0,0437
06	6	7	0,0010	0,0100	0,0000	0,0175
07	7	8	0,0110	0,1100	0,0000	0,1925
08	7	8	0,0110	0,1100	0,0000	0,1925
09	8	9	0,0110	0,1100	0,0000	0,1925
10	8	9	0,0110	0,1100	0,0000	0,1925
11	9	10	0,0010	0,0100	0,0000	0,0175
12	10	11	0,0025	0,0250	0,0000	0,0437

Fonte: (KUNDUR, 1994)

Tabela 5 – Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do sistema simétrico de duas áreas.

Nº da Barra	Nome da Barra	Tensão de Barra		Potência de Barra (pu)	
		Módulo (pu)	Ângulo (graus)	Ativa	Reativa
01	Barra 01	1,0300	7,2781	1,0000	0,2335
02	Barra 01	1,0100	5,9656	1,0000	-0,4963
03	Barra 01	1,0300	0,0000	0,4787	0,3067
04	Barra 04	1,0100	-0,5098	0,5767	-0,3622
05	Barra 05	1,0263	6,3730	0,0000	0,0000
06	Barra 06	1,0183	5,0353	0,0000	0,0000
07	Barra 07	1,0192	3,9177	-1,0744	-0,1111
08	Barra 08	1,0269	1,0855	0,0000	0,0000
09	Barra 09	1,0153	-1,6344	-1,9633	-0,2778
10	Barra 10	1,0160	-1,0475	0,0000	0,0000
11	Barra 11	1,0251	-0,4338	0,0000	0,0000

Fonte: Próprio Autor

Tabela 6 – Parâmetros das máquinas do sistema simétrico de duas áreas.

Máquina	Barra	Xd	X'd	M	D	Tldo	Tlqo	Kr	Tr
1	1	1,800	0,300	0,0345	0,0000	8,0000	0,4000	25,0000	0,1000
2	2	1,800	0,300	0,0345	0,0000	8,0000	0,4000	25,0000	0,1000
3	3	1,800	0,300	0,0345	0,0000	8,0000	0,4000	25,0000	0,1000
4	4	1,800	0,300	0,0345	0,0000	8,0000	0,4000	25,0000	0,1000

Fonte: (MARQUES, 2009)

Tabela 7 – Tensões internas (atrás de X'd) do sistema simétrico de duas áreas em regime permanente.

Máquina	Módulo (pu)	Ângulo (rad)
1	1,1360	0,3863
2	0,9123	0,4357
3	1,1280	0,1239
4	0,9185	0,1787

**Fonte:** Próprio Autor

### ANEXO B – DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND

Os dados apresentados neste anexo são referentes ao Sistema New England, composto por 10 máquinas e 39 barras, em regime permanente e sem compensação.

Tabela 8 – Dados de linhas do Sistema New England.

N° da Linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância Série (pu)		Admitância Paralela (pu)	
			R	X	G	B
01	30	31	0,0035	0,0411	0,0000	0,6987
02	30	40	0,0010	0,0250	0,0000	0,7500
03	31	32	0,0013	0,0151	0,0000	0,2572
04	31	25	0,0070	0,0086	0,0000	0,1460
05	32	33	0,0013	0,0213	0,0000	0,2214
06	32	18	0,0011	0,0133	0,0000	0,2138
07	33	34	0,0008	0,0128	0,0000	0,1342
08	33	14	0,0008	0,0129	0,0000	0,1382
09	34	35	0,0002	0,0026	0,0000	0,0434
10	34	37	0,0008	0,0112	0,0000	0,1476
11	35	36	0,0006	0,0092	0,0000	0,1130
12	35	11	0,0007	0,0082	0,0000	0,1389
13	36	37	0,0004	0,0046	0,0000	0,0780
14	37	38	0,0023	0,0363	0,0000	0,3804
15	38	40	0,0010	0,0250	0,0000	1,2000
16	39	11	0,0004	0,0043	0,0000	0,0729
17	39	13	0,0004	0,0043	0,0000	0,0729
18	13	14	0,0009	0,0101	0,0000	0,1723
19	14	15	0,0018	0,0217	0,0000	0,3660
20	15	16	0,0009	0,0094	0,0000	0,1710
21	16	17	0,0007	0,0089	0,0000	0,1342
22	16	19	0,0016	0,0195	0,0000	0,3040
23	16	21	0,0008	0,0135	0,0000	0,2548
24	16	24	0,0003	0,0059	0,0000	0,0680
25	17	18	0,0007	0,0082	0,0000	0,1319
26	17	27	0,0013	0,0173	0,0000	0,3216
27	21	22	0,0008	0,0140	0,0000	0,2565

28	22	23	0,0006	0,0096	0,0000	0,1846
29	23	24	0,0022	0,0350	0,0000	0,3610
30	25	26	0,0032	0,0323	0,0000	0,5130
31	26	27	0,0014	0,0147	0,0000	0,2396
32	26	28	0,0043	0,0474	0,0000	0,7802
33	26	29	0,0057	0,0625	0,0000	1,0290
34	28	29	0,0014	0,0151	0,0000	0,2490
35	12	11	0,0016	0,0435	0,0000	0,0000
36	12	13	0,0016	0,0435	0,0000	0,0000
37	35	2	0,0000	0,0250	0,0000	0,0000
38	39	3	0,0000	0,0200	0,0000	0,0000
39	19	4	0,0007	0,0142	0,0000	0,0000
40	20	5	0,0009	0,0180	0,0000	0,0000
41	22	6	0,0000	0,0143	0,0000	0,0000
42	23	7	0,0005	0,0272	0,0000	0,0000
43	25	8	0,0006	0,0232	0,0000	0,0000
44	31	1	0,0000	0,0181	0,0000	0,0000
45	29	9	0,0008	0,0156	0,0000	0,0000
46	19	20	0,0007	0,0138	0,0000	0,0000
47	10	40	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000

Fonte: (MAC-LEOD, 1992)

Tabela 9 – Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do Sistema New England.

Nº da Linha	Nome da Barra	Tensão de Barra		Potência de Barra (pu)	
		Módulo (pu)	Ângulo (graus)	Ativa	Reativa
01	Barra 01	1,0000	3,2891	2,5000	-0,0749
02	Barra 02	1,0000	0,0000	1,7617	-0,1777
03	Barra 03	1,0000	8,1951	6,5000	0,2059
04	Barra 04	1,0000	10,7346	6,3200	0,6446
05	Barra 05	1,0000	9,4571	5,0800	0,9968
06	Barra 06	1,0000	13,4263	6,5000	1,1092
07	Barra 07	1,0000	16,6631	5,6000	0,8653

08	Barra 08	1,0000	9,4571	5,4000	-0,2182
09	Barra 09	1,0000	15,5358	8,3000	0,2606
10	Barra 10	1,0000	-5,2279	10,0000	0,9514
11	Barra 11	1,0033	-0,3502	0,0000	0,0000
12	Barra 12	0,9848	-0,1087	-0,0850	-0,8800
13	Barra 13	1,0054	0,2648	0,0000	0,0000
14	Barra 14	1,0118	-0,8072	0,0000	0,0000
15	Barra 15	1,0000	-1,2159	-3,2000	0,1792
16	Barra 16	0,9939	0,3647	-3,2900	-0,3230
17	Barra 17	0,9976	-0,7395	0,0000	0,0000
18	Barra 18	0,9999	-1,6306	-1,5800	-0,3000
19	Barra 19	0,9905	5,5622	0,0000	0,0000
20	Barra 20	0,9817	4,1650	-6,8000	-1,0300
21	Barra 21	0,9815	3,0278	-2,7400	-1,1500
22	Barra 22	0,9885	8,0308	0,0000	0,0000
23	Barra 23	0,9854	7,7966	-2,4750	-0,8460
24	Barra 24	0,9963	0,5040	-3,0860	0,9200
25	Barra 25	1,0096	2,3514	-2,2400	-0,4720
26	Barra 26	1,0051	1,1571	-13900	-0,1700
27	Barra 27	0,9954	-0,9744	-2,8100	-0,7550
28	Barra 28	0,9984	5,0370	-2,0600	-0,2760
29	Barra 29	0,9977	8,0912	-2,8350	-0,2690
30	Barra 30	1,0075	-3,0353	0,0000	0,0000
31	Barra 31	1,0024	0,7017	0,0000	0,0000
32	Barra 32	1,0073	-1,8737	-3,2200	-0,0240
33	Barra 33	1,0235	-1,8759	0,0000	2,9231
34	Barra 34	1,0071	-2,8426	0,0000	0,0000
35	Barra 35	1,0054	-2,5106	0,0000	0,0000
36	Barra 36	1,0037	-4,6764	-2,3380	0,8530
37	Barra 37	0,9994	-5,1304	-5,2200	-1,7600
38	Barra 38	1,0110	-5,5611	0,0000	0,0000
39	Barra 39	1,0043	0,7579	0,0000	0,0000
40	Barra 40	0,9991	-5,8014	-12,1400	-2,5000

Fonte: Próprio Autor

Tabela 10 – Parâmetros das máquinas do Sistema New England.

Máquina	Barra	Xd	X'd	M	D	Tld0	Tlqo	Kr	Tr
1	1	0,1000	0,0310	0,2228	0,0530	10,2000	1,0000	100,0000	0,0100
2	2	0,2950	0,0697	0,1607	0,0258	6,5600	1,5000	100,0000	0,0100
3	3	0,2495	0,0531	0,1899	0,0301	5,7000	1,5000	100,0000	0,0100
4	4	0,2620	0,0436	0,1517	0,0246	6,5600	1,5000	100,0000	0,0100
5	5	0,6700	0,1320	0,1379	0,0224	5,4000	0,4400	100,0000	0,0100
6	6	0,2540	0,0500	0,1846	0,0299	7,3300	0,4000	100,0000	0,0100
7	7	0,2950	0,0490	0,1401	0,0227	5,6600	1,5000	100,0000	0,0100
8	8	0,2900	0,0570	0,1289	0,0209	6,7000	0,4100	100,0000	0,0100
9	9	0,2106	0,0570	0,1839	0,0297	4,7900	1,9600	100,0000	0,0100
10	10	0,2000	0,0050	2,6525	0,0362	7,0000	0,7000	100,0000	0,0100

Fonte: (MARTINS, 2012)

Tabela 11 – Tensões internas (atrás de X'd) do Sistema New England em regime permanente.

Máquina	Módulo (pu)	Ângulo (rad)
1	1,0007	0,1349
2	0,9952	0,1237
3	1,0682	0,4720
4	1,0644	0,4492
5	1,3153	0,7000
6	1,1044	0,5330
7	1,0779	0,5482
8	1,0344	0,4677
9	1,1197	0,7074
10	1,0060	-0,0415

Fonte: Próprio Autor