

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Estudo dos efeitos da compensação em derivação no desempenho dinâmico  
e transitório dos SEE sob o enfoque de energia transitória**

**RAPHAEL VINÍCIUS FARIA MARTINS**

**Orientador: Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara**  
Ilha Solteira – SP, Maio de 2012

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Estudo dos efeitos da compensação em derivação no desempenho dinâmico  
e transitório dos SEE sob o enfoque de energia transitória**

**RAPHAEL VINÍCIUS FARIA MARTINS**

**Orientador:** Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara

Dissertação apresentada à Faculdade  
de Engenharia - UNESP – Campus de  
Ilha Solteira, para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira - SP  
Maio 2012

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

- M386e      Martins, Raphael Vinícius Faria.  
              Estudo dos efeitos da compensação em derivação no desempenho dinâmico e transitório dos SEE sob o enfoque de energia transitória / Raphael Vinícius Faria Martins. – Ilha Solteira : [s.n.], 2012  
              89 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2012
- Orientador: Laurence Duarte Colvara  
              Inclui bibliografia
1. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade. 2. Estabilidade de sistemas de potência. 3. FACTS. 4. SVC. 5. Fator de efeito. 6. Coeficiente de eficácia. 7. Função energia. 8. Estabilidade transitória.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA**

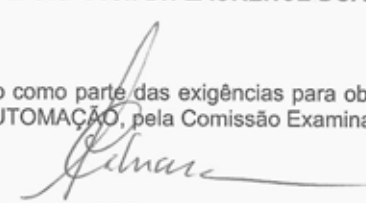
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** Estudo dos efeitos da compensação em derivação no desempenho dinâmico e transitório dos SEE sob o enfoque de energia transitória

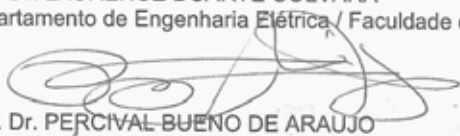
**AUTOR:** RAPHAEL VINICIUS FARIA MARTINS

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

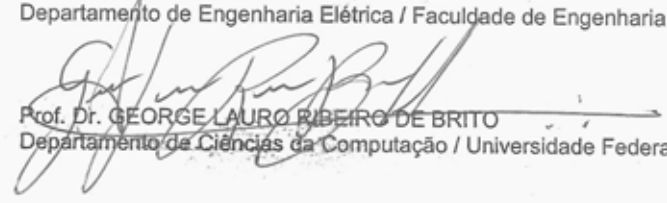
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,  
Área: AUTOMACÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA  
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



Prof. Dr. GEORGE LAURO RIBEIRO DE BRITO  
Departamento de Ciências da Computação / Universidade Federal de Tocantins

Data da realização: 25 de maio de 2012.

Dedico este trabalho à minha família exemplo de apoio e compaixão.

*“A Fé é o caminho”*

Vó Catarina

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus, em sua magnitude, e tudo que ele representa.

À minha família, que sempre me proporcionou estrutura e apoio em todas as etapas do meu desenvolvimento.

À UNESP e todos os seus funcionários que proporcionaram condições favoráveis para a realização deste trabalho.

Ao professor Laurence, exemplo de ética e seriedade, que orientou este trabalho e me proporcionou conhecimento científico e grande aprendizado moral.

Aos professores Dilson, Percival e Dionísio, que acompanharam e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, proporcionando reflexões e questionamento plausíveis com propriedade e competência.

Na oportunidade, destaco amigos conquistados que foram perseverantes e companheiros, compartilhando suas experiências e ensinamentos: Gisele P. Marinho e Danilo B. do Valle. Amizades que juntos discutimos e aprendemos, Mauro Toneli, Erick Somocurcio, Renan Felix, Renan Capellette, Aline Petean, Lucas Teles, Kenji Nose, José Galetti e todos outros que tivemos a oportunidade de estar na mesma sala de aula. Aos amigos do laboratório GAESSE (Grupa de Análise de Estabilidade de Sistema de Energia Elétrica) que me inspiraram e auxiliaram no meu crescimento e na execução deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

## Resumo

Este trabalho dedica-se ao estudo da contribuição do SVC (*Static Var Compensator*) na estabilidade transitória em sistema multimáquinas. Coeficientes de sensibilidade nomeados fator de efeito e coeficiente de eficácia auxiliam na compreensão da atuação do SVC na admitância de transferência entre máquinas, que por sua vez exercem grande influência na capacidade de sincronização do sistema multimáquinas. Estuda-se a dinâmica da compensação do SVC neste trabalho, considerando dois controladores, sendo controle de tensão e controle estabilizador suplementar, este com sinal de entrada remoto das variações das velocidades angulares. Tais controladores, por meio da variação da susceptância do SVC, proporcionam influência na energia potencial do sistema, com reflexos diretos nas cordilheiras energéticas em torno de um ponto de operação, alterando o relevo energético proporcionando maiores condições de estabilidade comprovadas pela elevação do tempo crítico de eliminação de uma falta.

Palavras chaves: Estabilidade de Sistemas de Potência. FACTS. SVC. Fator de Efeito. Coeficiente de Eficácia. Função Energia. Estabilidade Transitória.



## **Abstract**

This work is dedicated to the study of the SVC (Static Var Compensator) contribution on the transient stability in multimachine power system. Coefficients of sensibility named effect factor and coefficient of efficiency help on the comprehension the influence of the SVC in the transference admittance between machines, which, on the other hand, have great influence on the synchronization capacity of the multimachine system. It is studied the dynamic of the SVC compensation in this work, considering two controllers, which are voltage control and supplementary stabilizer control, this one with remote signal input being the angular speeds variations. Such controllers, through the variation of the SVC susceptance, provide influence on the system potential energy, with direct reflections on the energy ridges around an operation point, altering the energy relief providing major conditions of stability proven by the elevation of the critical time of elimination of a fault.

Keywords: Power Systems Stability. FACTS. SVC. Factor. Efficiency Ratio. Energy Function. Transient Stability.

## Lista de Figuras

|             |                                                                                                                                                                                        |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 -  | Sistema Multimáquinas                                                                                                                                                                  | 23 |
| Figura 2 -  | Sistema Multimáquinas com as barras internas e cargas adicionas à rede                                                                                                                 | 23 |
| Figura 3 -  | Classificação de estabilidade de um sistema de potência                                                                                                                                | 27 |
| Figura 4 -  | Característica de transferência de potência de um sistema de duas máquinas (a) diagrama unifilar (b) modelo (c) diagrama fasorial (d) curva de potência versus ângulo                  | 31 |
| Figura 5 -  | Sistema de duas máquinas                                                                                                                                                               | 32 |
| Figura 6 -  | Ilustração critério das áreas iguais de estabilidade transitória                                                                                                                       | 33 |
| Figura 7 -  | Critério das áreas iguais ilustrando a margem de estabilidade transitória de um simples sistema de duas máquinas (a) sem compensação (b) com SVC ideal no meio da linha de transmissão | 34 |
| Figura 8 -  | Compensador Estático de Reativos (SVC) – Esquema Básico                                                                                                                                | 37 |
| Figura 9 -  | Modelo dinâmico do SVC                                                                                                                                                                 | 38 |
| Figura 10 - | Modelo do estabilizador                                                                                                                                                                | 38 |
| Figura 11 - | Diagrama de blocos do duplo controle do SVC                                                                                                                                            | 39 |
| Figura 12 - | Controlador SVC instalado no ponto médio da linha                                                                                                                                      | 40 |
| Figura 13 - | Inclusão do SVC                                                                                                                                                                        | 40 |
| Figura 14 - | Matriz admitância adicionada o controlador SVC                                                                                                                                         | 41 |
| Figura 15 - | Reordenação das linhas e colunas da matriz admitância                                                                                                                                  | 41 |
| Figura 16 - | Rede reduzida às barras de interesse                                                                                                                                                   | 42 |
| Figura 17 - | Matriz admitância reduzida às barras de interesse                                                                                                                                      | 42 |
| Figura 18 - | Impedância do SVC (série) equivalente à admitância (paralelo) do SVC                                                                                                                   | 44 |
| Figura 19 - | Variações da magnitude da admitância de transferência entre máquinas                                                                                                                   | 47 |
| Figura 20 - | Diagrama fasorial para a máquina $i$                                                                                                                                                   | 51 |
| Figura 21 - | Ângulos das admitâncias de transferência                                                                                                                                               | 51 |
| Figura 22 - | Retrato de fase do sistema de três máquinas. Superfície equipotencial                                                                                                                  |    |

|             |                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|             | de energia (linhas sólidas) e superfície de contorno potencial energético (linha pontilhada)                                                                                                                                     | 58 |
| Figura 23 - | Analogia da representação da bola deslizante.                                                                                                                                                                                    | 59 |
| Figura 24 - | Representação do campo vetorial                                                                                                                                                                                                  | 60 |
| Figura 25 - | Sistema multimáquinas de duas áreas e quatro máquinas                                                                                                                                                                            | 62 |
| Figura 26 - | ângulos das máquinas estável (a), ângulos das máquinas instável (b)                                                                                                                                                              | 63 |
| Figura 27 - | defasagem angular do par de máquinas 1-3, (b) Primeira oscilação da defasagem angular do par de máquinas 1-3                                                                                                                     | 65 |
| Figura 28 - | (a) defasagem angular do par de máquinas 1-4, (b) Primeira oscilação da defasagem angular do par de máquinas 1-4                                                                                                                 | 66 |
| Figura 29 - | Superfície de energia potencial em função das defasagens angulares 1-2 e 1-3                                                                                                                                                     | 67 |
| Figura 30 - | Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 1-3 e trajetória estável                                                                                                                                    | 68 |
| Figura 31 - | Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagem angular 1-2 e 1-3 e trajetória instável                                                                                                                                      | 69 |
| Figura 32 - | Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 1-3 com diferentes ganhos dos controladores (a) $K_{svc} = 0,0$ (b) $K_{svc} = 1,0$ (c) $K_{svc} = 4,0$ (d) $K_{svc} = 5,0$                                 | 70 |
| Figura 33 - | Sistema multimáquinas New England                                                                                                                                                                                                | 71 |
| Figura 34 - | ângulos das máquinas estável (a), ângulos das máquinas instável (b)                                                                                                                                                              | 72 |
| Figura 35 - | (a) defasagem angular do par de máquinas 5-4, (b) Primeira oscilação da defasagem angular do par de máquinas 5-4                                                                                                                 | 76 |
| Figura 36 - | (a) defasagem angular do par de máquinas 5-10, (b) Primeira oscilação da defasagem angular do par de máquinas 5-10                                                                                                               | 77 |
| Figura 37 - | (a) Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 8-10 e trajetória estável                                                                                                                               | 78 |
| Figura 38 - | Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 1-3 e trajetória instável                                                                                                                                   | 78 |
| Figura 39 - | Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 8-10 para diferentes ganhos dos controladores (a) $k_{svc} = 0,0$ (b) $k_{svc} = 1$ (c) $k_{svc} = 1$ e $k_{esp} = 0,3$ (d) $k_{svc} = 1$ e $k_{esp} = 0,5$ | 79 |

## Lista de Quadros

|           |                                                                                  |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1- | Fator de efeito nos pares de máquinas com SVC na barra 8                         | 64 |
| Quadro 2- | Magnitude do passo energético comparado ao tempo crítico de eliminação da falta. | 71 |
| Quadro 3- | Fator de efeito na atuação inter-área para diferentes localizações               | 73 |
| Quadro 4- | Tensões nas barras com afundamento de tensão                                     | 74 |
| Quadro 5- | Tensões nas barras com afundamento de tensão após a inclusão do SVC na barra 35. | 75 |
| Quadro 6- | Magnitude do passo energético comparado ao tempo crítico de eliminação da falta. | 80 |

## **Sumário**

### **Capítulo 1 Apresentação do trabalho**

|     |                         |    |
|-----|-------------------------|----|
| 1.1 | Introdução              | 15 |
| 1.2 | Organização do trabalho | 18 |

### **Capítulo 2 Sistema de Energia Elétrica**

|     |                       |    |
|-----|-----------------------|----|
| 2.1 | Rede Elétrica         | 19 |
| 2.2 | Cargas                | 21 |
| 2.3 | Equação de Oscilação  | 21 |
| 2.4 | Sistema Multimáquinas | 23 |

### **Capítulo 3 Estabilidade do Sistema de Energia Elétrica**

|     |                                                                                                                                |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Introdução                                                                                                                     | 25 |
| 3.2 | Conceito de Estabilidade                                                                                                       | 26 |
| 3.3 | Estabilidade Transitória                                                                                                       | 28 |
| 3.4 | Sincronismo e Estabilidade                                                                                                     | 29 |
| 3.5 | A Relação Potência versus Ângulo                                                                                               | 30 |
| 3.6 | Melhoria da Estabilidade Transitória pela Atuação da Compensação no Sistema de Transmissão – Caso Ilustrativo de Duas Máquinas | 31 |

### **Capítulo 4 Inclusão do SVC no Sistema Multimáquinas**

|     |                                                                 |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Introdução                                                      | 35 |
| 4.2 | FACTS                                                           | 35 |
| 4.3 | Compensador Estático de Reativos – SVC (Static Var Compensator) | 36 |
| 4.4 | Localização do SVC                                              | 39 |
| 4.5 | Inclusão do SVC em um Sistema Multimáquinas                     | 40 |
| 4.6 | Efeito do SVC nas interações entre máquinas                     | 47 |
| 4.7 | Fator de efeito                                                 | 48 |

### **Capítulo 5 Influência do SVC na Energia Transitória**

|     |                                                                  |    |
|-----|------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 | Modelagem do SVC na Energia transitória do Sistema Multimáquinas | 50 |
| 5.2 | Efeito do SVC na Função Energia do Sistema                       | 56 |
| 5.3 | Análise transitória da Energia Potencial                         | 57 |

|     |                                   |    |
|-----|-----------------------------------|----|
| 5.4 | Função Gradiente e campo vetorial | 60 |
|-----|-----------------------------------|----|

## **Capítulo 6 Resultados e simulações**

|     |                                                         |    |
|-----|---------------------------------------------------------|----|
| 6.1 | Sistema de 4 máquinas e 11 barras                       | 62 |
| 6.2 | Simulação Sistema 4 máquinas e SVC instalado na barra 8 | 63 |
| 6.3 | Simulação Sistema New England                           | 71 |

## **Capítulo 7 Conclusão**

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| Conclusão e trabalhos futuros | 81 |
| Referências                   | 83 |

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| <b>Anexo A</b> - Dados do sistema Kundur, 4 geradores | 86 |
|-------------------------------------------------------|----|

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| <b>Anexo B</b> - Dados do sistema New England, 10 geradores | 88 |
|-------------------------------------------------------------|----|

## **Capítulo 1**

### **Apresentação do trabalho**

#### **1.1 Introdução**

O Sistema de Energia Elétrica - SEE, visa atender o consumidor de forma segura e confiável e deve ser capaz de manter níveis adequados de frequência e tensão a fim de proteger os equipamentos e garantir a entrega de energia elétrica aos usuários com a frequência especificada, níveis adequados de tensão e com o mínimo de interrupções possível, sendo capaz de suportar contingências e perturbações.

Com a crescente demanda do consumo energético é possível dizer que os limites exploratórios das fontes energéticas viáveis comercialmente estão próximos, e, em muitos casos, sem possibilidade de ampliação dessa oferta, o que enseja outras preocupações como a de que o acréscimo da exploração dessas fontes de energia causaria, além de dificuldades técnicas e alto custo econômico, problemas de natureza ambiental que não são mais tolerados pela sociedade como eram no passado. No entanto, o consumo e a necessidade da ampliação do fornecimento energético é cada vez maior tornando-se uma constante preocupação na área de sistema de energia elétrica.

Fontes alternativas de aproveitamento energético tem sido consideradas e estudadas a fim de fornecerem energia limpa e com baixos impactos ambientais. Por outro lado, a geração de energia elétrica deve ser fornecida em condições seguras e confiáveis aos mercados consumidores e, para isso, têm-se cada vez mais necessitado de longas linhas de transmissão, visto que as unidades geradoras com potencial para serem exploradas, muitas vezes se encontram muito afastadas dos principais centros consumidores. Neste contexto situa-se o conceito de estabilidade, que contribui para tornar o sistema mais confiável e seguro, buscando condições para que a energia elétrica seja entregue com o mínimo de interrupções. Mais especificamente em sistemas de energia elétrica, a estabilidade se refere ao comportamento do sistema após este sofrer algum tipo de perturbação (seja esta perturbação grande ou pequena), deslocando-o do seu ponto de equilíbrio inicial. Como exemplo de grande perturbação pode-se citar um curto-circuito no sistema elétrico e uma pequena

perturbação considera-se uma variação normal da carga em torno de um ponto de operação.

O problema da estabilidade, em si, longe de ser superado, apresenta sempre novos desafios. Destaca-se entre tantos, as dificuldades impostas pelas limitações dos equipamentos, notadamente as linhas de transmissão, caracterizadas por “rigidez” dos parâmetros estabelecidos pelos aspectos construtivos, que interferem na capacidade de transmissão e de sincronização do sistema. Assim, alteração de uma linha visando aumentar sua capacidade de transmissão e/ou característica dinâmica do sistema, tradicionalmente é realizada mediante construção de uma nova linha de transmissão como reforço da existente. Ocorre que, além da necessidade de vultoso investimento econômico, há restrição ambiental quanto à criação ou alargamento do corredor onde se instalará a nova linha. Uma alternativa vem com o avanço no desenvolvimento da tecnologia de eletrônica de potência que tem proporcionado novos equipamentos para o SEE, os quais possibilitam ampliação dos limites dos sistemas existentes. Tais equipamentos são conhecidos como controladores FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*). Esses controladores podem propiciar um rápido controle dos fluxos de potência na rede de transmissão, mantendo-os em rotas estabelecidas, assim como aumentar a capacidade de transmissão e melhorar de forma específica a estabilidade dos sistemas (HINGORANI, 2000; JOHNS; SONG, 1999), adiando assim a construção imediata de novas linhas de transmissão.

Dentre os controladores FACTS destaca-se o SVC (*Static Var Compensator*) idealizado para o controle de tensão, que foi pela primeira vez empregado em Nebraska e comercializado pela GE em 1974. O SVC tem sido usado desde o início dos anos 60 para a compensação reativa de grandes cargas industriais, tal como fornos a arcos, mas somente passaram a ser utilizados no controle de tensão de sistemas de transmissão no final dos anos 70. A precisão, a disponibilidade e a rápida resposta permitem um alto desempenho no controle de tensão em regimes permanente, dinâmico e transitório em relação à compensação *shunt* convencional, o que tornou sua utilização mais comum em sistemas com afundamento de tensão e no aumento da transmissão de potência, como relata o estudo de Kowalski *et. al*, 2006, que indica sua instalação em uma subestação na Califórnia-EUA. Também são usados no amortecimento de oscilações de potência, na melhoria da estabilidade transitória e na redução de perdas sistêmicas através da otimização do controle da potência reativa. (MACHADO, 2003).

Em 1992, Machowski e Nelles apresentaram um estudo da contribuição do SVC no acréscimo da área de desaceleração, fazendo comparativo com o critério das áreas iguais, e demonstraram que uma estratégia adequada de controle proporciona contribuições positivas



nos critérios de estabilidade.

Em estudos na área de estabilidade transitória, a não linearidade do sistema de potência, a variação na estrutura do sistema, as incertezas de parâmetros da planta e as interconexões entre o gerador e o SVC são levados em consideração. Um controle adequado é capaz de estabilizar o sistema e proporcionar melhores condições de estabilidade, valorizando simultaneamente a regulação de tensão em condições operacionais diversas (CONG, *et. al*, 2004). VARMA, 2006, propõe o uso de sinais remotos através de unidade de medida fasorial (PMU – *Phasor Measurement Units*) para melhores condições de operação dos FACTS, sendo que as medições de estados podem ser realizadas em localizações geográficas dispersas utilizando sistema de posicionamento global (GPS).

Estudos recentes analisam a localização e a contribuição do SVC na melhoria da estabilidade do sistema multimáquinas vista a primeira oscilação. Haque, 2006, evidencia a contribuição adicional da compensação de reativos na função energia, proporcionando acréscimo nos valores da energia crítica, que por sua vez é representada pelo limite da contribuição da susceptância provinda do SVC à beira da estabilidade/instabilidade com métodos que consideram o contorno da superfície da energia potencial.

Marques, 2009 em seu estudo destaca que a admitância de transferência entre máquinas do sistema depende diretamente das variações da susceptância do SVC, tal participação pode ser compreendida através dos coeficientes de eficácia e fator de efeito. A avaliação destes coeficientes refletem com propriedade o efeito exercido pela ação do SVC sobre cada admitância de transferência entre máquinas do sistema, e dele se pode inferir quais pares de máquinas são mais e quais são menos afetados.

Neste estudo considera-se a inclusão do FACTS SVC no sistema multimáquinas, a fim de analisar a estabilidade transitória do sistema, considerando especificamente os efeitos da atuação do SVC sobre a capacidade de sincronização entre máquinas com base nos estudos preliminares dos coeficientes de eficácia e fator de efeito provenientes de MARQUES, 2009. A análise da influência da compensação em derivação no estudo de estabilidade fica evidente quando visualizada sua participação no retrato das curvas equipotenciais da função energia, análise esta estudada neste trabalho que considera como parâmetro de contribuição o aumento do tempo crítico de eliminação da falta.

A análise de estabilidade transitória em sistemas de potência por muito tempo foi considerada equivalente à análise de sincronismo entre as máquinas e não necessariamente de estabilidade do sistema no estrito sentido do termo (PAI, 1981). Por sua vez, o conceito de sincronismo exige a existência de dois ou mais entes que, por sua vez, possam estar

sincronizados. Em sistemas de potência diz-se que as máquinas estão em sincronismo se os seus ângulos permanecem oscilando juntos dentro de certos limites (SAUER, 1998). A partir desses conceitos as análises realizadas nesse trabalho visam analisar o sincronismo das máquinas durante a primeira oscilação, esta que ocorre nos primeiros instantes após a contingência. Como parâmetro de avaliação da margem de estabilidade, analisa-se o tempo crítico de eliminação de um curto-circuito, ou seja, procura-se saber o tempo máximo que o sistema suporta a falta sem perder o sincronismo.

## **1.2 Organização do trabalho**

Este trabalho está estruturado em sete capítulos descritos a seguir:

No capítulo 2 é descrito o Sistema de Energia Elétrica, que compreende as unidades geradoras descritas pela equação de oscilação e as unidades consumidoras dada pelo modelo de carga de impedância constante. A representação conveniente da rede é feita pela matriz admitâncias de barra.

No capítulo 3 são abordados os conceitos de estabilidade em sistemas de potência analisando o sincronismo entre as máquinas e as melhorias proporcionadas pelos controladores FACTS na transmissão de potência.

No capítulo 4 descreve-se o controlador FACTS SVC em seu modelo simplificado apresentando teoricamente a sua localização ideal e a respectiva contribuição no sistema multimáquinas. Neste capítulo são definidos alguns coeficientes ideais para a compreensão da influência do SVC na admitância de transferência entre máquinas.

No capítulo 5 é estudada a influência do SVC na energia transitória do sistema multimáquinas bem como o modelamento da função energia relacionada com os coeficientes descritos no capítulo 4.

O capítulo 6 é dedicado a apresentação de resultados e simulações decorridos do equacionamento dos capítulos anteriores, contribuindo na análise da influência do SVC na estabilidade transitória do sistema multimáquinas foram propostos dois sistemas testes, um sistema pequeno constituído de 4 máquinas e 11 barras e um sistema maior dado por 10 geradores e 40 barras.

O capítulo 7 é dedicado as conclusões do trabalho e apresentação de propostas futuras de continuidade do estudo.

## Capítulo 2

### Sistema de Energia Elétrica

#### 2.1 Rede Elétrica

A rede elétrica é representada pela matriz admitância de barra, cujos elementos são obtidos, simplificadaamente, para uma rede em que não existam acoplamentos mútuos entre elementos ou transformadores defasadores como (KUNDUR, 1994):

$$Y_{mk} = Y_{km} = -y_{km} \quad 1$$

$$Y_{mm} = jb_m^{sh} + \sum_{k \in \Omega_m} (jb_{mk}^{sh} + y_{mk}) \quad 2$$

$m \text{ e } k = 1, \dots, NB$

em que:

$\Omega_m$  é o conjunto composto pelas barras vizinhas da barra  $m$ .

$NB$  é o número total de barras da rede

os termos  $b_m^{sh}$  e  $b_{mk}^{sh}$  na equação 2 são as admitâncias shunt da barra  $m$  e série da linha  $m - k$  respectivamente.

$$y_{mk} = (z_{mk})^{-1} = \frac{r_{mk}}{r_{mk}^2 + x_{mk}^2} - j \frac{x_{mk}}{r_{mk}^2 + x_{mk}^2} \quad 3$$

onde  $Y_{mk}$  e  $Y_{km}$  são as admitâncias de transferência entre as barras  $m$  e  $k$  e  $Y_{mm}$  e  $Y_{kk}$  são as admitâncias próprias das barras  $k$  e  $m$ .

Considerando a rede elétrica em regime permanente, ou seja, as dinâmicas de natureza ultrarrápidas de natureza eletromagnéticas das linhas de transmissão são

desconsideradas diante das dinâmicas eletromecânicas (ANDERSON; FOUAD, 1994), seu equacionamento é dada da seguinte forma:

$$I = YV \quad 4$$

onde

$I$  vetor injeções de correntes de barra;;

$Y$  a matriz admitância de barra;

$V$  o vetor das tensões nas barras em relação a um nó de referência não representado na matriz  $Y$  (o neutro ou a terra).

A matriz admitância de barras têm a seguinte estrutura:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1m} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2m} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & Y_{m3} & \dots & Y_{mm} \end{bmatrix} \quad 5$$

ou na forma complexa pela equação:

$$Y = G + jB \quad 6$$

Onde se considera  $G$  a matriz condutância de barra e  $B$  a matriz susceptância de barra.

A matriz admitância de barras que relaciona as injeções líquidas de corrente com as tensões tem as seguintes características:

- é uma matriz esparsa, ou seja, tem uma grande proporção de elementos nulos, que provem do fato de que nem sempre entre os nós  $k$  e  $m$  quaisquer existem ligações;
- é uma matriz quadrada de ordem igual ao número de barras da rede (excluída a referência);
- é uma matriz simétrica, considerando que é constituída por linhas de transmissão e transformadores em fase.

Ressalta-se que os vetores  $I$  e  $V$  são compostos dos fasores injeção de corrente e tensão de barra e portanto são expressos por números complexos.

## 2.2 Cargas

No estudo de estabilidade é usual ter as cargas modeladas como admitâncias constantes, expressa pela equação 7.

$$Y_c = \frac{P_L - jQ_L}{|V|^2} \quad 7$$

onde:

$(P_L - jQ_L)$  – conjugado da potência de carga no barramento  $i$

$|V|$  – módulo do fasor tensão no barramento  $i$

## 2.3 Equação de Oscilação

Para realização do presente trabalho, que considera a dinâmica de movimento rotor das máquinas geradoras de energia, é necessário que todo o sistema seja convenientemente descrito através de equações de estado. A máquina síncrona, que aqui compreende-se como gerador, tem o comportamento das grandezas mecânicas em função das grandezas elétricas, o qual é obtido a partir da equação de oscilação da máquina síncrona.

Para uma completa representação do sistema multimáquinas, é necessário relacionar as grandezas mecânicas, sendo  $\delta$  a posição angular e  $\omega$  a velocidade angular do rotor, com as grandezas elétricas do gerador (tensões e correntes).

Considera-se uma unidade geradora genérica representada por  $i$ , de um sistema elétrico de  $n$  unidades. O gerador recebe através do eixo da turbina a “entrada” mecânica, ou potência da turbina  $P_{m_i}$ , e fornece a “saída” elétrica, ou potência elétrica do gerador,  $P_{e_i}$ , entregue à rede, através de sua barra terminal. Caso essas duas potências sejam iguais, isto é, desprezando as perdas relativamente insignificantes do gerador, a dinâmica de funcionamento

considera velocidade síncrona constante (ELGERD, 1976). Para a situação da máquina funcionando como gerador, o torque mecânico atua no sentido de acelerar o rotor do gerador e o torque elétrico no sentido de desacelerar o mesmo. Assim, em um gerador, tanto o torque mecânico como o elétrico serão positivos, considerando  $P_r$  como potência resultante, temos (ALBERTO; BRETAS, 2000):

$$P_r = P_m - P_e \quad 8$$

Se existir uma diferença entre a potência da turbina e a potência do gerador, essa diferença será usada para a mudança da energia cinética, ou velocidade da unidade, como para dominar o conjugado de amortecimento que se desenvolve principalmente nos enrolamentos de amortecimento.

O comportamento dinâmico do sistema de  $n$  máquinas é descrito por:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{m_i} - P_{e_i} - D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad 9$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

ou, decompondo em duas equações diferenciais de primeiro grau ,

$$\dot{\delta}_i = \omega_i$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{m_i} - P_{e_i} - D_i \omega_i] \quad 10$$

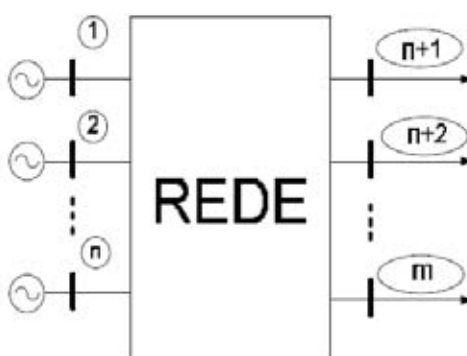
$$i = 1, 2, \dots, n$$

nas quais  $\delta_i$  representa a posição angular do rotor em relação a uma referência que gira à velocidade síncrona, expressa em radianos,  $D_i$  é um parâmetro positivo da máquina, medido em  $p.u$ ,  $M_i$  é a constante de inércia em  $s^2$ , as potências são expressas em  $p.u$  e  $\omega_i$  é o desvio da velocidade angular elétrica da  $i$ -ésima máquina, tomada em radianos por segundo em relação à velocidade síncrona, a qual, no sistema brasileiro é de 377 rad/s, correspondendo à frequência de 60 Hz.

## 2.4 Sistema Multimáquinas

Considera-se um sistema com  $n$  máquinas conectadas a uma rede de  $m$  barras, como ilustrado na Figura 1 (COLVARA, 2005).

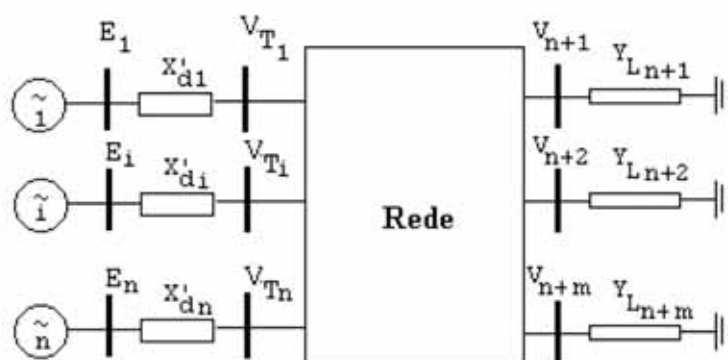
Figura 1 - Sistema Multimáquinas



Fonte: Marques (2009).

Adicionando as barras internas dos geradores à rede, ela terá  $m + n$  barras, as cargas serão representadas como admitâncias constantes e incorporadas à rede, que é representada preservando a estrutura (COLVARA, 2005).

Figura 2 - Sistema Multimáquinas com as barras internas e cargas adicionas à rede



Fonte: Marques (2009)

Assume-se a rede de transmissão composta por  $n + m$  barras, onde as  $n$  primeiras barras são as barras internas dos geradores e as  $m$  barras restantes são barras da rede, que se presumem barras de cargas (PAI, 1981).

Logo a matriz admitância de barra da rede aumentada é dada por:

$$\begin{aligned} Y_{bus} \\ = \begin{bmatrix} n & m \\ Y_{gg} & Y_{gr} \\ Y_{gr} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ m \end{matrix} \end{aligned} \quad 11$$

onde foram acrescentadas as cargas, as reatâncias transitórias e os  $n$  nós internos aos geradores.

Denota-se  $Y_g$  como sendo a matriz diagonal  $n \times n$ , cujos elementos da diagonal são as admitâncias transitórias dos geradores:

$$Y_{gg} = \begin{bmatrix} Y'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y'_2 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y'_n \end{bmatrix} \quad 12$$

$$Y'_k = -j \frac{1}{X'_{dk}}; k = 1, 2, \dots, n$$

e  $Y_l$  e  $Y_{ll}$  como sendo as matrizes diagonais de dimensões  $(n \times n)$  e  $(m) \times (m)$ , respectivamente cujos elementos são as admitâncias das cargas conectadas às barras correspondentes:

Assim, a matriz admitância  $Y_{Bus}$  tem a estrutura a seguir.

$$Y_{Bus} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & -Y_{gg} & 0 \\ -Y_{gg} & Y_l + Y_1 + Y_{gg} & Y_2 \\ 0 & Y_3 & Y_4 + Y_{ll} \end{bmatrix} \quad 13$$

onde  $Y_1, Y_2, Y_3$  e  $Y_4$  são partições da matriz admitância de barra da rede original.



A matriz admitância  $Y_{BUS}$  é de grande importância, pois representa a rede elétrica, e seus elementos, admitâncias de transferência entre as máquinas, têm influência na capacidade de sincronização entre máquinas.

## Capítulo 3

### Estabilidade do Sistema de Energia Elétrica

#### 3.1 Introdução

Entende-se por estabilidade de sistemas elétricos de potência a capacidade que esses sistemas possuem de encontrar um novo ponto de operação estável quando, operando inicialmente num dado ponto de equilíbrio que satisfaça as exigências do atendimento de demanda de seus consumidores de acordo com os princípios básicos de qualidade e confiabilidade, sofrem uma perturbação e se deslocam para outro ponto de operação. A qualidade é caracterizada pela manutenção de níveis adequados de tensão e frequência necessários ao pleno funcionamento dos equipamentos elétricos e a confiabilidade se traduz pela entrega de energia elétrica com o menor número de interrupções possível, mesmo em condições adversas (KUNDUR, 1994).

De acordo com o tipo de perturbação ocorrida pode-se definir uma importante classificação no estudo da estabilidade. Quando o sistema é submetido à variações bruscas nas condições de operação, provocadas por grandes distúrbios tais como curto-circuitos na rede de transmissão, perda de unidades geradoras e quedas de linhas de transmissão, o estudo é chamado de “análise de estabilidade transitória”. Porém, quando nos referimos às pequenas perturbações, como tipicamente são as variações normais de cargas nos barramentos, o estudo da estabilidade é chamado de “estabilidade dinâmica” e, mais recentemente de “estabilidade a pequenas perturbações” (ALBERTO; BRETAS, 2000; IEEE, 2003).

### 3.2 Conceito de Estabilidade

Um Sistema Elétrico de Potência basicamente é constituído de geradores síncronos, cargas e linhas de transmissão que interligam esses controladores e as cargas. Neste sistema o fluxo de potência nas linhas de transmissão, está intimamente relacionados às diferenças entre os ângulos de fase dos geradores. O estado de regime permanente do sistema é entendido quando suas grandezas não variam com o tempo, ou seja, as diferenças entre os ângulos de fase devem permanecer constantes para que o fluxo de potência também permaneça constante (ALBERTO; BRETAS, 2000).

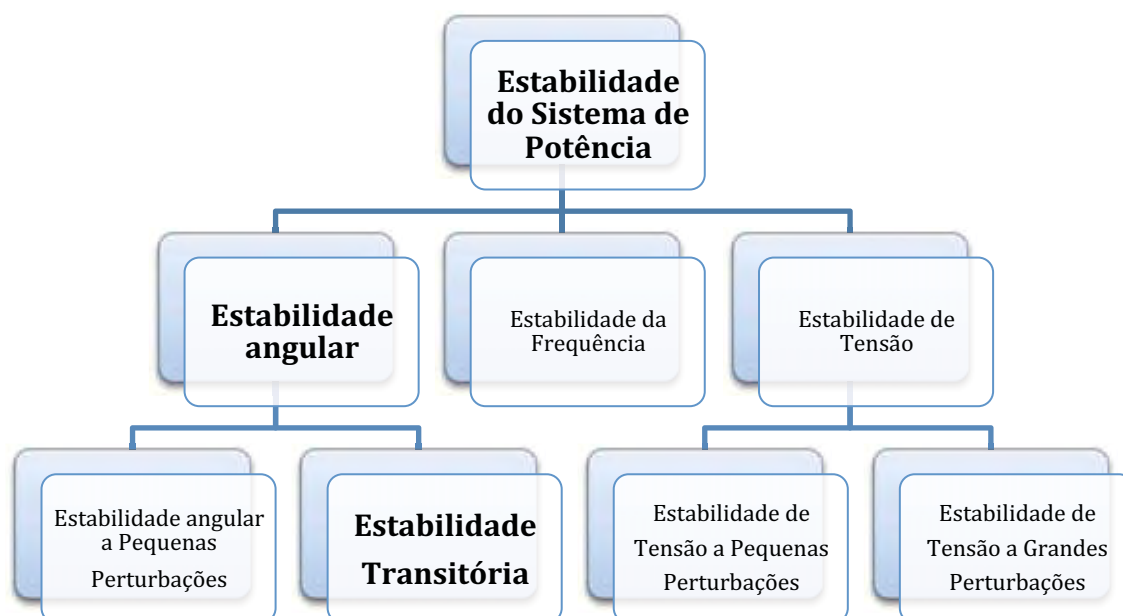
Dada a situação de regime permanente, tem-se todas as máquinas do sistema com a mesma velocidade angular, a potência elétrica gerada nas máquinas é exatamente igual à soma das potências absorvidas nas cargas mais as perdas nas linhas, assim, considera-se que o sistema está em um ponto de operação estável. O sistema permanecerá indefinidamente nesse ponto até que algum distúrbio ou perturbação o remova desse estado (PAI, 1981).

A partir desse conceito e tendo como objetivo prover a compreensão do termo “estabilidade de sistemas de potência” em uma definição física, que se estendesse nas definições da teoria de sistemas elétricos temos em KUNDUR (2004) que a estabilidade de sistemas elétricos de potência é a habilidade de o sistema, para uma determinada condição operacional inicial, depois que for sujeito a uma perturbação física, recuperar um estado de equilíbrio operacional, com limitação das variáveis do sistema de forma que a integridade do sistema seja preservada.

A integridade do sistema é preservada quando praticamente todo sistema de potência restante permanece intacto sem sofrer desligamento de geradores ou cargas, com exceção daqueles desconectados através do isolamento dos elementos sob falta ou intencionalmente desconectados para preservar a continuidade da operação do restante do sistema.

A Figura 3 apresenta o quadro geral do problema de estabilidade, classificando suas categorias e subcategorias (KUNDUR *et. al*, 2004). Para fins didáticos são descritas as formas de estabilidade, propositalmente destacando as categorias dedicadas nesse trabalho.

Figura 3- Classificação de estabilidade de um sistema de potência.



Fonte: Kundur (1994).

É importante observar na Figura 3 que para as categorias de estabilidade angular aqui estudada, pode ser abordada em duas subcategorias: pequenas e grandes perturbações (JOHNS; SONG, 1999; PAI, 1981).

A estabilidade de ângulo refere-se à capacidade que os ângulos dos rotores dos geradores síncronos possuem de continuar em sincronismo (mesma velocidade) após a ocorrência de perturbações no sistema.

O termo Estabilidade Dinâmica (ALBERTO; BRETAS, 2000; ANDERSON; FOUAD, 1994; KUNDUR, 1994), é usado para descrever a resposta de um sistema após a ocorrência de uma pequena perturbação e esse problema pode ser analisado tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Neste caso, as equações são linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio e o modelo matemático utilizado para análise é representado por um conjunto de equações diferenciais lineares.

Os fenômenos que seguem a ocorrência de uma grande e súbita perturbação, como por exemplo um curto circuito no sistema, estão associados à estabilidade transitória (ANDERSON; FOUAD, 1994; BRETAS; ALBERTO, 2000; KUNDUR, 1994) e esses fenômenos são analisados no domínio do tempo. O tempo de análise normalmente fica em torno de uma fração de segundos a dois segundos, período este onde a estabilidade de primeira oscilação é determinada.

### 3.3 Estabilidade Transitória

Considere 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 designados por  $\delta_{0i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Nessas condições, a potência mecânica fornecida aos geradores é exatamente igual à potência elétrica nas cargas mais a potência dissipadas nas linhas. Suponha que no tempo  $t = t_0$  ocorra um grande distúrbio, 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 um excesso ou déficit de potência nas máquinas, que ocasionará a aceleração ou desaceleração de seus rotores. Consequentemente, os ângulos das máquinas alterar-se-ão no tempo, na tentativa de restabelecer o novo equilíbrio de potência.

Considerando o sistema dinamicamente estável após uma perturbação, o sistema pode, por si só, encontrar um novo ponto de operação restabelecendo o balanço de potência para novos valores dos ângulos  $\delta_{0i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Uma determinada contingência pode conduzir o sistema à instabilidade, ou seja, o sistema não evolui para um estado no qual ocorre o equilíbrio de potência. Nessa situação, é necessário atuar no sistema, podendo-se até realizar corte de algumas cargas. Quando isto ocorre, o sistema passa a ter uma nova configuração topológica e busca-se saber se o excesso de energia cinética, adquirido durante o defeito pelos rotores das máquinas, pode ser reabsorvido pelo novo sistema de forma que a estabilidade de ângulos e velocidades das máquinas seja mantida.

Quando um gerador síncrono perde o sincronismo em relação ao resto do sistema, o seu rotor gira numa velocidade maior ou menor que a do sistema.

A perda de sincronismo pode ocorrer entre um gerador e o resto do sistema ou entre grupos de geradores. Neste último caso, o sincronismo poderá ser mantido nos sistemas isolados.

Se após a eliminação do defeito o sistema encontrar um ponto de operação estável, o sistema é dito ser transitoriamente estável. A atuação no sistema de forma a isolar o defeito deve ser feita rapidamente para que se garanta a estabilidade. O tempo máximo em que o isolamento de defeito deve ser feito, tal que o sistema permaneça estável, é conhecido como tempo crítico de abertura ou chaveamento,  $t_{cr}$ . Assim, a eliminação do defeito antes do tempo crítico proporciona um sistema estável; se a eliminação do defeito ocorrer após o tempo crítico o sistema evoluirá para instabilidade. O tempo crítico de abertura é um importante

parâmetro de análise de desempenho transitório de sistemas de energia elétrica e sua determinação é objetivo de muitos estudos de estabilidade transitória. Neste trabalho, o enfoque dos resultados esperados visa aumentar o tempo crítico com a contribuição do compensador FACTS SVC.

### 3.4 Sincronismo e Estabilidade

Na análise de estabilidade transitória, diz-se que um sistema é transitoriamente estável se todas as suas máquinas aceleram ou desaceleram juntas, ou seja, as diferenças entre as suas velocidades e ângulos de fase permanecem limitadas indefinidamente após a eliminação do defeito. Caso ocorra de ao menos uma das máquinas acelerar muito mais que as outras máquinas do sistema, de tal forma que as diferenças entre os ângulos de fase se afastem definitivamente dos valores de equilíbrio, diz-se que o sistema é transitoriamente instável.

Em verdade, a análise de estabilidade transitória em sistemas de potência é uma análise de sincronismo entre as máquinas e não de estabilidade do sistema no sentido rigoroso do termo, e isso ficará mais evidente no capítulo 6 que é dedicado às simulações e análises de estabilidade.

Matematicamente, tem-se (SAUER; PAI, 1998):

*Definição 1:* Diz-se que a solução de equilíbrio  $x_0$  de um sistema autônomo, descrito pelas equações diferenciais  $\dot{x} = f(x)$ , é estável no senso de Lyapunov (ou somente estável), se para cada número  $\varepsilon > 0$ , existir um número real  $\Omega > 0$ , tal que para toda condição inicial  $x(t_0)$  satisfazendo a desigualdade  $\|x(t_0) - x_0\| < \Omega$ , a trajetória do sistema  $x(t)$  satisfaz a desigualdade  $\|x(t) - x_0\| < \varepsilon$  para todo  $t > t_0$ .

Ou seja, a trajetória do sistema perturbado  $x(t)$  não se afasta da solução de equilíbrio para  $t > t_0$ .

Já o conceito de sincronismo é se difere do conceito de estabilidade.

Temos que a definição de sincronismo exige a existência de dois ou mais entes que, por sua vez, possam estar sincronizados. Em sistemas de potência diz-se que as máquinas estão em sincronismo se os seus ângulos permanecem oscilando juntos dentro de certos limites. Matematicamente tem-se:

*Definição 2:* Diz-se que as soluções  $x(t)$  e  $y(t)$  estão sincronizadas, se e somente se  $\|x(t) - y(t)\| < L$  para todo  $t > t_0$ .

O número real  $L$  pode ser escolhido de acordo com os limites permitidos pelo sistema.

### 3.5 A Relação Potência versus Ângulo

A estabilidade do ângulo do rotor é a habilidade que as máquinas síncronas têm de permanecerem em sincronismo. Um fator fundamental neste problema é a maneira pela qual a potência de saída das máquinas síncronas varia de acordo com as oscilações de seus rotores. Uma importante característica que influencia a estabilidade do sistema elétrico de potência é uma relação não linear entre a troca de potência e a posição angular do rotor da máquina síncrona. A Figura 4 (a), ilustra um sistema elétrico de potência simplificado (KUNDUR, 1994), que consiste de duas máquinas síncronas conectadas por uma linha de transmissão com reatância indutiva  $X_L$  e resistência desprezível. A máquina 1 é um gerador que faz a alimentação de potência para o motor síncrono que é a máquina 2. Esse modelo é utilizado para o estudo da transferência de potência do gerador para o motor.

A transferência de potência do gerador (máquina G) para o motor (máquina M) é dada em função do deslocamento angular  $\delta$  entre os rotores das duas máquinas, representado pela equação 14. O deslocamento angular depende de três componentes: ângulo interno do gerador  $\delta_G$ , diferença angular entre as tensões terminais do gerador e do motor  $\delta_L$  e ângulo interno do motor  $\delta_M$ .

$$\delta = \delta_G + \delta_L + \delta_M \quad 14$$

A potência transferida do gerador para o motor é dada por:

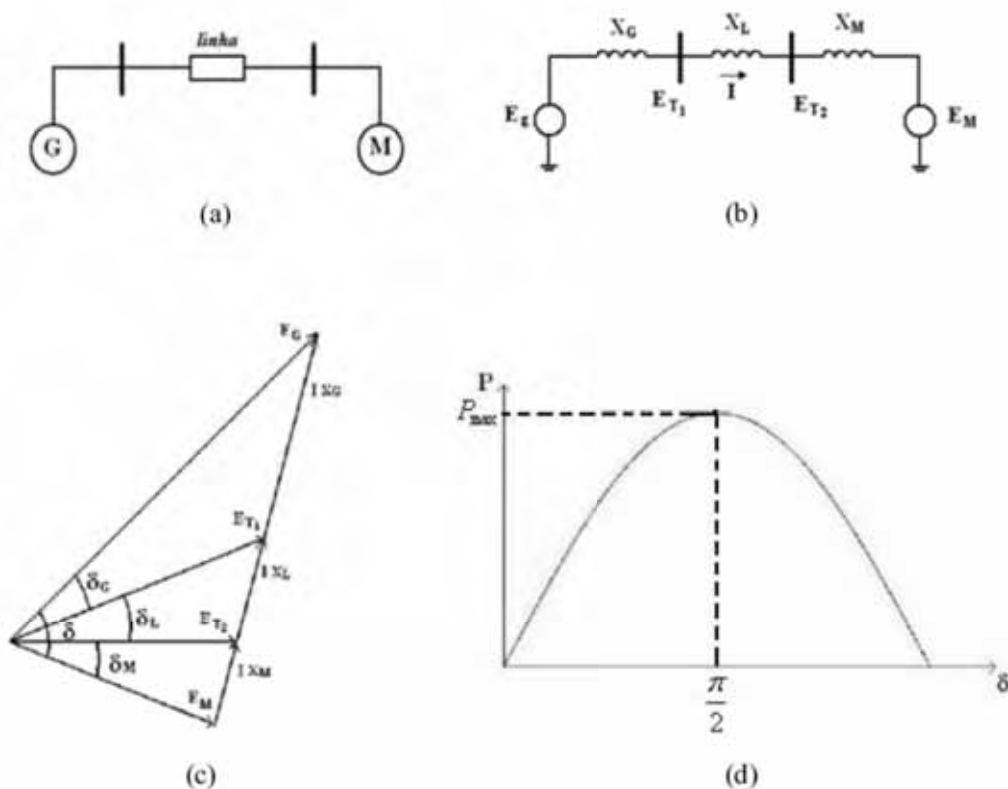
$$P_e = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad 15$$

onde:

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad 16$$

Na Figura 4 (b) mostra-se um diagrama unifilar usado para determinar a relação entre a potência e o ângulo, (c) diagrama fasorial que mostra a relação entre a tensão do gerador e o motor e (d), têm-se a curva que relaciona o ângulo e a potência, obtida da equação 15 (KUNDUR, 1994). Considerando que a potência varia com o seno do deslocamento angular, têm-se que a transferência de potência aumenta de acordo com o aumento do ângulo até um valor máximo, quando o valor do ângulo é igual a  $\frac{\pi}{2}$  e após este valor, o crescimento do ângulo resulta na diminuição da transferência de potência, caracterizando uma relação não linear. Obviamente, quando o ângulo é zero não há transferência de potência.

Figura 4 – Característica de transferência de potência de um sistema de duas máquinas (a) diagrama unifilar (b) modelo (c) diagrama fasorial (d) curva de potência versus ângulo.



Fonte: Kundur (1994).

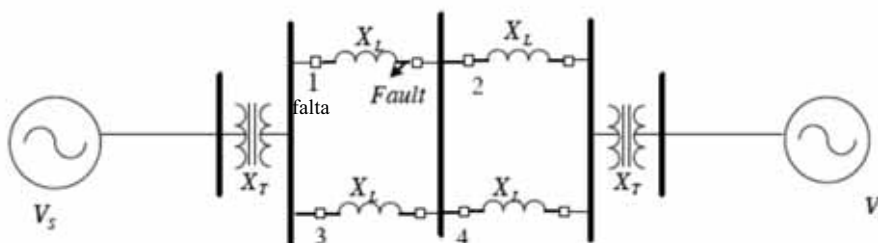
### 3.6 Melhoria da Estabilidade Transitória pela Atuação da Compensação no Sistema de Transmissão – Caso Ilustrativo de Duas Máquinas

O efeito da compensação em derivação sobre a estabilidade transitória pode se traduzir em melhoria do desempenho transitório do sistema e isto pode ser avaliado pelo critério da igualdade das áreas. O significado do critério da igualdade de áreas é explicado com o sistema

simples de duas máquinas e duas linhas mostrado na Figura 5 e das correspondentes curvas  $P$  versus  $\delta$  mostradas na Figura 6.

Considerando que o sistema completo é caracterizado por  $P$  versus  $\delta$  na curva "a" o sistema opera com ângulo  $\delta_1$  para transmitir potência  $P_1$  quando ocorre uma falta na linha "1". Durante a falta o sistema é caracterizado por  $P$  versus  $\delta$  na curva "b" e, assim, ao longo deste período, a transmissão de potência elétrica é significativamente menor. Como consequência, o gerador acelera levando o ângulo a evoluir desde o ângulo inicial  $\delta_1$  (equilíbrio pré-falta) passando por  $\delta_2$ , quando os disjuntores desconectam a linha "1" onde ocorreu a falta, continuando a crescer em razão da inércia; porém o gerador passa a sofrer desaceleração, uma vez que a potência elétrica ditada pela curva "c" é maior que a potência mecânica. Sob a vigência da falta o gerador absorve energia acelerante representada pela área  $A_1$ . O ângulo máximo é alcançado em  $\delta_3$ , onde a energia de desaceleração, representado pela área  $A_2$ , se torna igual à energia de aceleração representada pela área  $A_1$ . O ângulo  $\delta_3 = \delta_{crit}$  determina a máxima área de desaceleração possível, definindo o limite de estabilidade transitória.

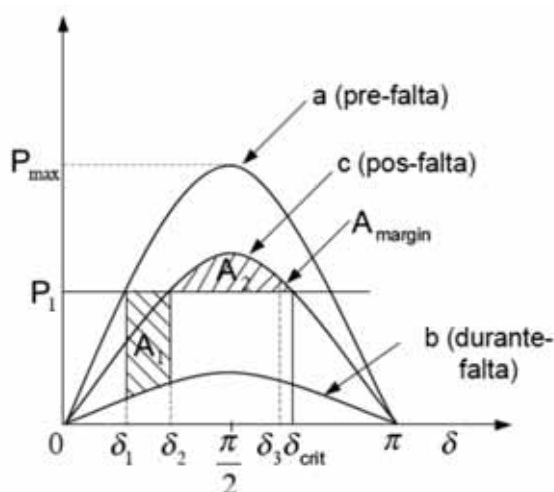
Figura 5 - Sistema de duas máquinas



Fonte: Johns e Song (1999).



Figura 6 - Ilustração critério das áreas iguais de estabilidade transitória



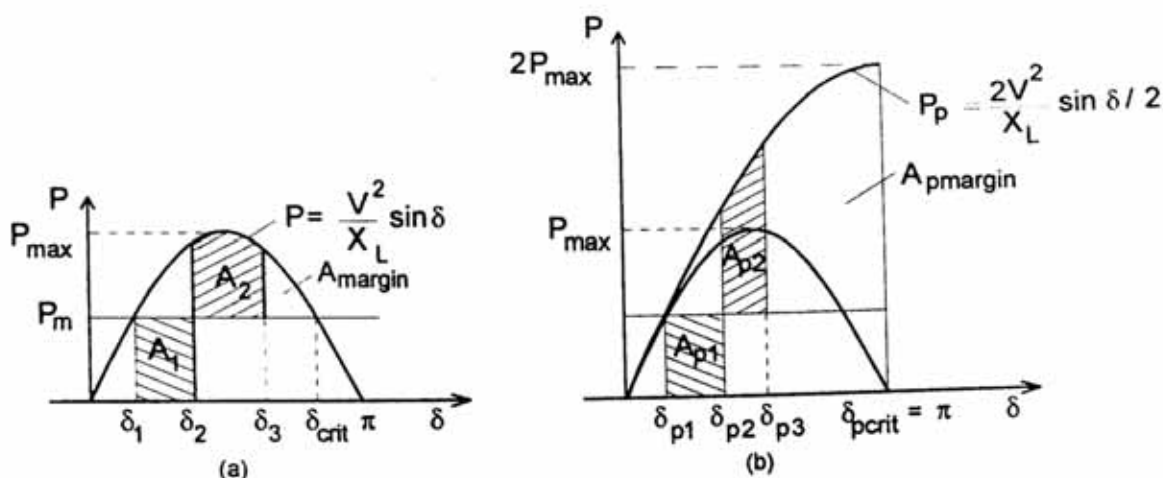
Fonte: Johns e Song (1999).

Com a presença de controlador em derivação ideal no ponto central do sistema de transmissão de modo que mantenha a tensão neste ponto constante e igual à tensão interna das máquinas, têm-se o resultado como ilustrados na Figura 6. Pode ser verificado o acréscimo de área de desaceleração, com conseqüente melhoria da área de estabilidade no comportamento transitório do sistema. A comparação do sistema sem qualquer compensação e com compensação ideal em derivação no ponto médio, respectivamente, pode ser analisado nas ilustrações de Johns e Song (1999).

As Figuras ilustram o critério de igualdade de área aplicado ao estudo de um curto-circuito eliminado sem abertura de linha, sendo a área  $A_1$  a área de aceleração e a área  $A_2$  a área de desaceleração. Fica evidente o benefício da compensação pelo expressivo acréscimo da margem de estabilidade indicada pela área  $A_{margem}$ .

Como ilustrado na figura 7, a compensação em derivação pode aumentar significativamente a margem de estabilidade transitória em relação ao sistema não compensado. Estas são boas ilustrações para utilização dos controladores FACTS em um sistema simples de duas máquinas.

Figura 7 - Critério das áreas iguais ilustrando a margem de estabilidade transitória de um simples sistema de duas máquinas (a) sem compensação (b) com SVC ideal no meio da linha de transmissão



Fonte: Johns e Song (1999).

Em um sistema real, multimáquinas, estes efeitos não são tão facilmente visualizados, e mesmo a influência do controlador no desempenho global do sistema, assim como sobre as interações entre máquinas ou áreas do sistema não é evidente. É óbvio que há grande interesse em saber como um controlador instalado em determinada barra da rede influencia o comportamento dinâmico/transitório do sistema, principalmente sobre qual(is) máquina(s) são mais ou menos afetadas. De acordo com Marques (2009), tal influência pode ser melhor compreendida analisando a compensação em derivação pelos coeficientes de eficácia e fator de efeito. Estas informações podem ser extremamente úteis para se escolher a localização do controlador FACTS, e até mesmo para ajustar parâmetros com vistas a certo critério de desempenho. Este aspecto é tratado no próximo capítulo, onde se apresenta um estudo das interações entre máquinas de um sistema afetadas pela presença de um SVC em determinada barra de rede, analisando como a presença do dispositivo influencia a energia transitória do sistema, e, mais especificamente, como a energia potencial, diretamente relacionada aos torques de sincronização do sistema é afetada pela ação do dispositivo.

## Capítulo 4

### Inclusão do SVC no Sistema Multimáquinas

#### 4.1 Introdução

Este capítulo dedica-se a modelagem e inclusão da estrutura do controlador FACTS SVC no sistema multimáquinas, sendo considerado o controle dinâmico da tensão no ponto instalado.

Visto que o trabalho estuda a estabilidade transitória, um estabilizador suplementar será considerado.

#### 4.2 FACTS

Os elevados custos na construção de novas linhas de transmissão e unidades geradoras, tornam cada vez mais importante uma melhor utilização da capacidade de transferência de potência dos sistemas existentes. Essa capacidade é, em grande parte, restringida pelos limites de estabilidade ou térmicos inerentes aos equipamentos da rede de transmissão (WATANABE, 1998). Devido aos grandes avanços na eletrônica de alta potência, esses limites podem agora ser significativamente estendidos, em virtude do surgimento dos controladores FACTS. A sigla FACTS do inglês *Flexible Alternating Current Transmission Systems*, definido pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) 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 conceito de flexibilização de sistemas via equipamentos eletrônicos tem o seu início a partir do final da década de 1960. Hingorani em seu artigo (*Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems*; IEEE, 1988) definiu uma série de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência e que permitem obter um sistema mais confiável, flexível e eficaz.

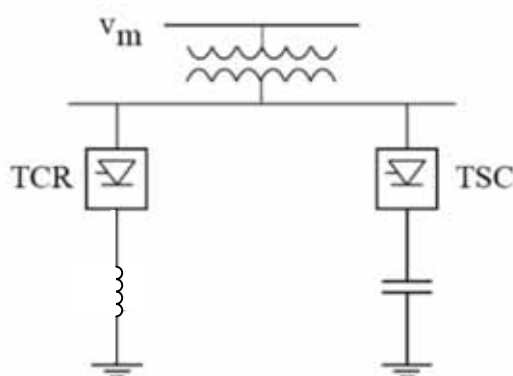
Neste caso, entende-se como flexibilidade a capacidade de rápido e contínuo controle de grandezas elétricas tal como impedância, tensão, correntes e ângulos de fase. Embora sejam esses os objetivos básicos para implantação dos controladores FACTS, observa-se também uma melhora significativa da estabilidade do sistema alcançada com o auxílio da compensação dinâmica de cada controlador FACTS. Neste trabalho estudaremos o efeito do controle dinâmico de reativos com o FACTS SVC e analisaremos a sua contribuição na estabilidade e sincronismo no sistema multimáquinas.

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

O compensador estático de reativos, usualmente denominados SVC, sigla provinda do inglês *Static Var Compensator*, é um dos precursores dos controladores FACTS atuais. Os primeiros foram utilizados no final da década de 1960 para a compensação reativa de grandes cargas industriais, tal como fornos a arcos e na redução de perdas energéticas no acionamento de motores a indução (SADEK, 1991). No final da década de 1970 o SVC começou a ser aplicado em sistemas de transmissão com o propósito de melhorar o controle dinâmico de tensão. Padiyar e Immanuel (1994), citam o interesse crescente na aplicação dos compensadores estáticos (SVC) usados estrategicamente em grandes sistemas de transmissão com elevadas distâncias das unidades geradoras para melhorar a estabilidade além de proporcionar um rápido controle de tensão, sendo que isto se deve principalmente à rápida velocidade de resposta e de controle contínuo.

Esse compensador é considerado estático por não apresentar partes móveis, e sua configuração mais comum é constituída por um reator controlado a tiristores (TCR - *Thyristor-Controlled Reactor*) ligado em paralelo com um banco de capacitores chaveado por tiristores (TSC - *Thyristor-Switched Capacitor*), como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Compensador Estático de Reativos (SVC) – Esquema Básico



Fonte: Johns e Song (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 ser variada 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.

Uma vez que o SVC altera a tensão da barra na qual está conectado por meio da variação de sua susceptância, o mesmo pode ser visualizado como uma carga reativa variável.

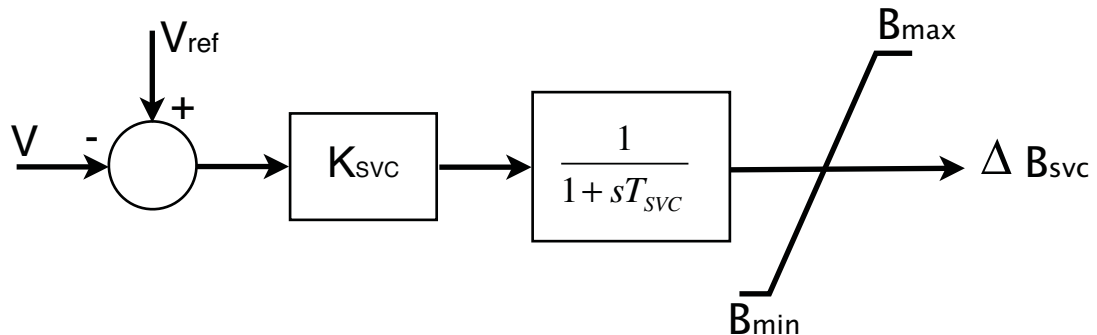
A potência reativa que o SVC troca com o sistema é dada por: (DOMINGUES 2001; NASSIF 2004).

$$Q_{svc} = B_{svc} V^2$$

17

No estudo de estabilidade transitória o SVC é modelado como ilustra o diagrama de blocos da Figura 9 (PADIYAR; IMMANUEL, 1994). Um controle simples e básico do modelo dinâmico do SVC que tem como entrada a variação de tensão no ponto onde se encontra conectado.

Figura 9 - Modelo dinâmico do SVC.

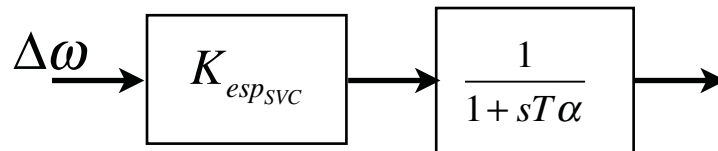


Fonte: Padiyar e Immanuel (1994).

Conforme esse modelo, a susceptância do SVC ( $B_{svc}$ ) é ajustada através do ganho  $K_{SVC}$ , de modo a manter a tensão da barra praticamente inalterada. A constante de tempo  $T_{svc}$  representa o atraso do circuito de disparo dos tiristores, geralmente este muito pequeno (WANG, 2000), as componentes  $B_{max}$  e  $B_{min}$ , representam, respectivamente, os limites capacitivo e indutivo do equipamento. Embora esse modelo de primeira ordem seja bastante simples, ele vem sendo usado em diversos trabalhos (ARAÚJO; ARAUJO, 2002) e é adequado para o estudo de estabilidade transitória (PADIYAR; IMMANUEL, 1994), e também é similar aos modelos existentes na maioria dos programas de estabilidade em uso pelas empresas concessionárias de energia elétrica (IEEE, 1994).

Um sinal estabilizante suplementar pode ser adicionado à malha de controle de tensão do SVC com o objetivo de proporcionar melhores condições de estabilidade entre as máquinas do sistema. A estrutura desse controlador pode ser observada na ilustração da Figura 10.

Figura 10 - Modelo do estabilizador



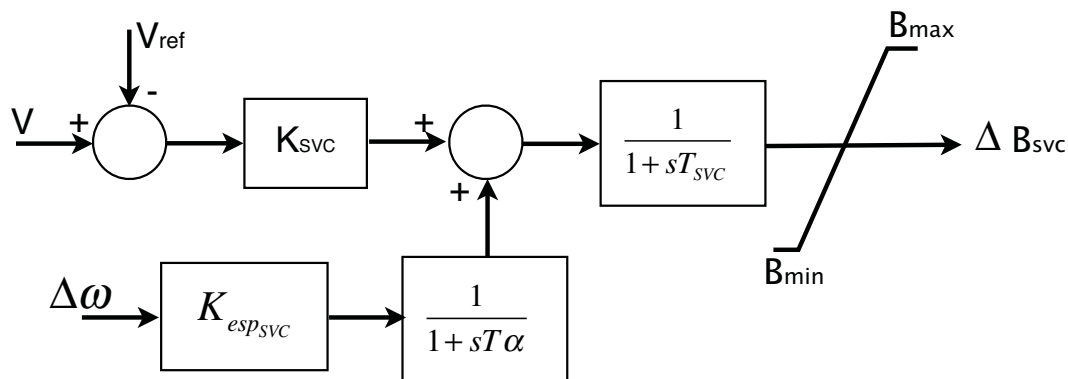
Fonte: Elaboração do próprio autor

A principal razão da instalação destes compensadores é que seu controle dinâmico de tensão melhora o desempenho no que se refere à estabilidade transitória. Além disso, estudos

mostraram que é possível obter amortecimento das oscilações eletromecânicas locais a partir da atuação do SVC, se este for dotado de um controle adicional (WANG; SWIFT 1996; ZHOU, 1993). Sugeriu-se então um sinal estabilizador adicional ao controle da tensão com o propósito de aumentar o amortecimento das oscilações do sistema de potência, como utilizado no sistema máquina versus barra infinita em (NOROOZIAN; ANDERSSON, 1994; ZHOU, 1993).

Neste trabalho, com foco na estabilidade de sistemas multimáquinas, considera-se como entrada do controlador a variação da velocidade angular entre o par de máquinas com maior e menor aceleração no instante inicial da falta. Sabe-se que este não é um sinal local, porém a sua utilização é viável usando unidade de medição fasorial - PMU (*Phasor Measurement Unit*) (HUANG *et. al.* 2008; PHADKE, 2002; RAJIV; AUDDY, 2006; TABRIZI; RADMAN, 2004). A união deste duplo controle, sendo o controle de tensão e estabilizador suplementar é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama de blocos do duplo controle do SVC

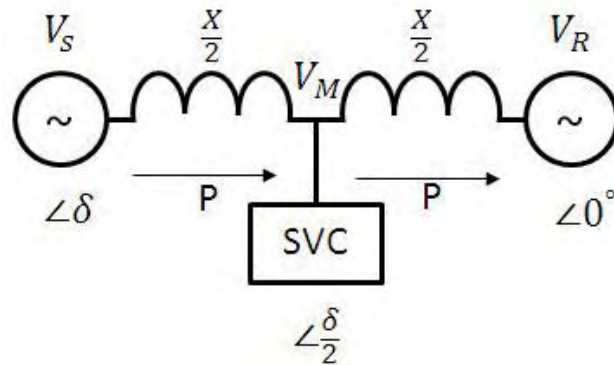


Fonte: Elaboração do próprio autor

#### 4.4 Localização do SVC

Tomando como exemplo ilustrativo um sistema de duas máquinas demonstrado em Johns e Song (1999), a compensação em derivação idealmente é instalada no ponto médio da linha de transmissão, atuando de tal forma que a tensão seja mantida constante em todos os níveis de fluxo de potência. Desta forma a linha é dividida em duas partes iguais, (reatância  $X/2$ ), como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Controlador SVC instalado no ponto médio da linha

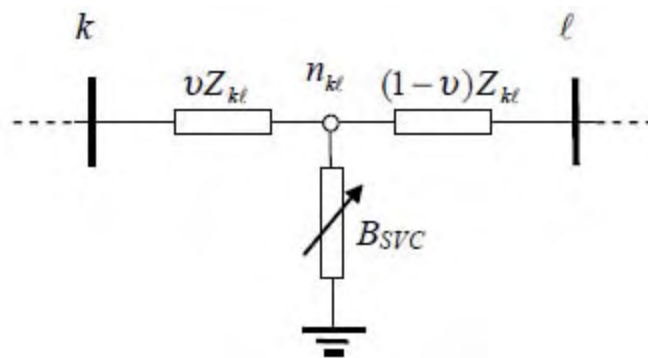


Fonte: Johns e Song (1999).

#### 4.5 Inclusão do SVC em um Sistema Multimáquinas

Considera-se o SVC instalado em ponto médio de uma linha de transmissão de uma rede. Assim, a inclusão do SVC em um sistema multimáquinas como desenvolvido em Marques, 2009, considera o SEE cuja rede de  $m$  nós tenha-se o SVC instalado entre as barras genéricas  $k$  e  $\ell$ , conforme traz a literatura, criando um novo nó denominado  $n_{k\ell}$  como ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Inclusão do SVC



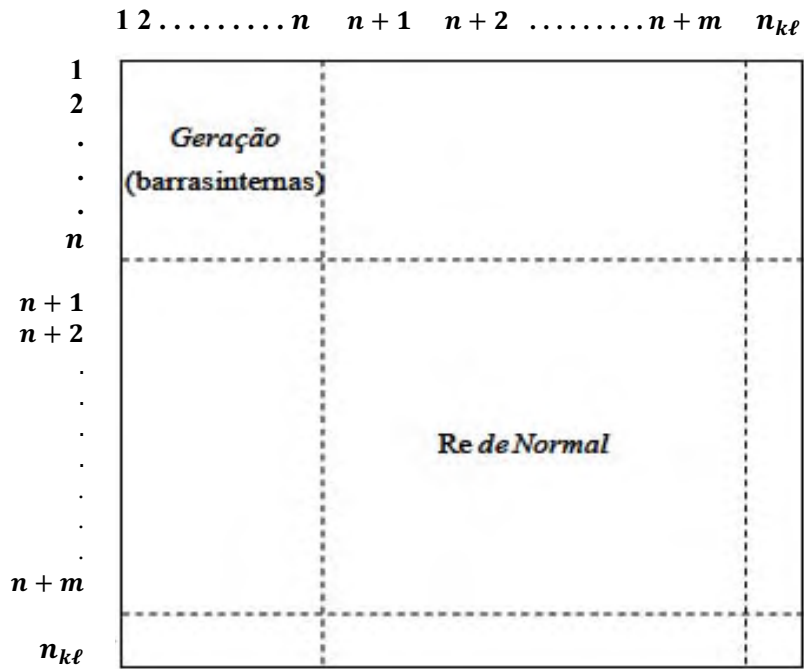
Fonte: Marques (2009).

Temos que o nó  $n_{k\ell}$  é adicionado à rede, de modo que a rede passa a ter  $m + 1$  nós.

A esta rede adicionam-se as barras internas dos geradores e a matriz admitância que tem então a dimensão  $n + m + 1$ , sendo  $(n + m + 1)$ -ésima linha e coluna sejam as correspondentes ao nó  $n_{k\ell}$ , que representa a barra de inclusão do SVC, ilustrado na Figura 14.



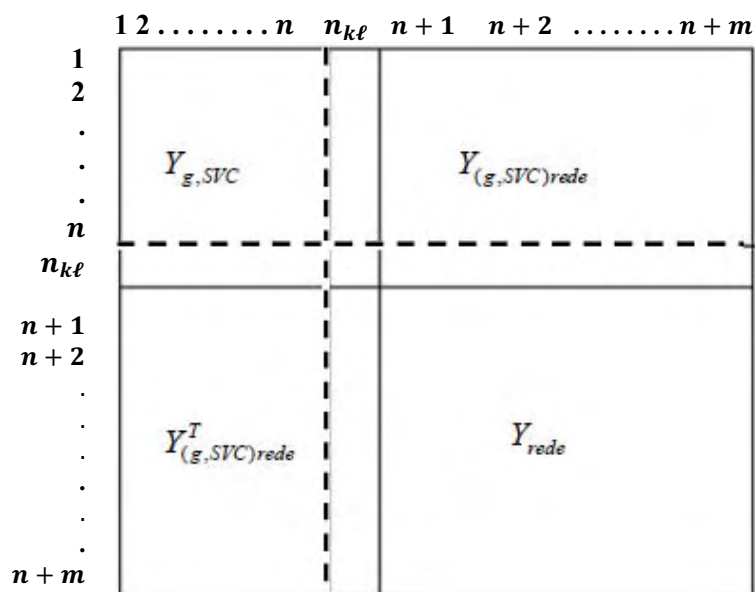
Figura 14 - Matriz admitância adicionada o controlador SVC



Fonte: Marques (2009).

Faz-se, então, uma reordenação de barras, de modo que as  $(n + 1)$ -ésima linha e coluna sejam as correspondentes ao nó  $n_{k\ell}$ . Passando a ser considerada a matriz da rede como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Reordenação das linhas e colunas da matriz admitância

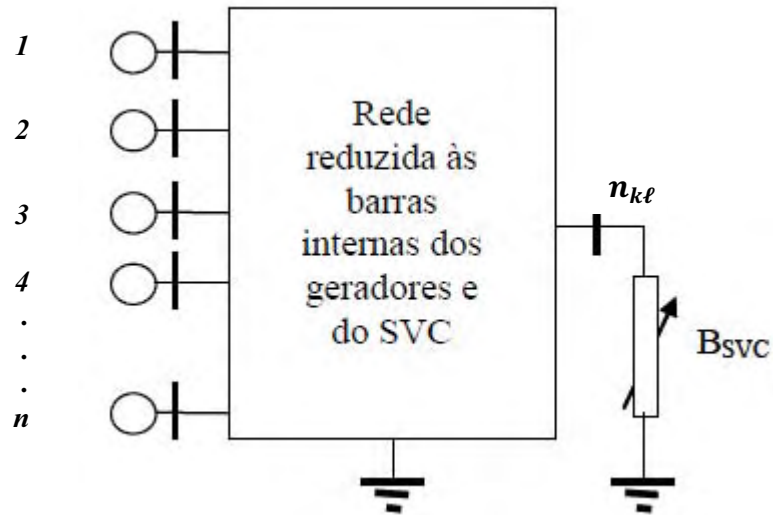


Fonte: Marques (2009).

Este estudo dedica-se a análise das barras de interesse, que são considerados as barras internas dos geradores e a barra onde encontra-se o SVC.

Logo, o desempenho elétrico das demais barras deixa de interessar e a rede é reduzida às barras de interesse, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Rede reduzida às barras de interesse



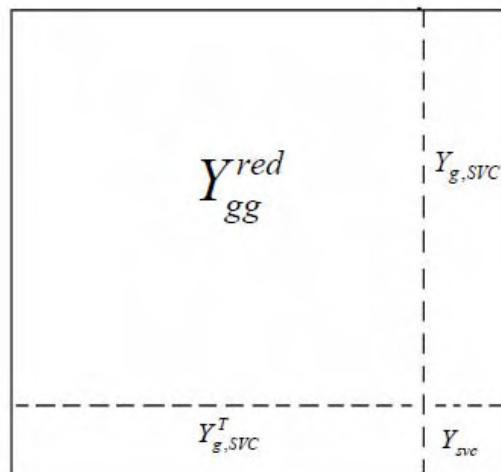
Fonte: Marques (2009).

Assim pode-se fazer a redução da matriz admitância às barras de interesse, pela equação 18.

$$Y_{int} = Y_{g,svc} - Y_{(g,svc)rede} Y_{rede}^{-1} Y_{(g,svc)rede}^T \quad 18$$

desta forma tem-se a matriz reduzida às barras de interesse.

Figura 17 - Matriz admitância reduzida às barras de interesse



Fonte: Marques (2009).

Onde, destaca-se o elemento  $Y_{svc}$  é a admitância própria da barra onde o SVC está instalado.

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

$$\begin{bmatrix} I_g \\ I_{svc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg}^{red} & Y_{g,svc} \\ Y_{g,svc}^T & Y_{svc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ V_{svc} \end{bmatrix} \quad 19$$

Observa-se que  $Y_{g,svc}$  é um vetor de dimensão  $n$  e seu  $i$ -ésimo elemento genérico  $Y_{g,svc\ i}$  pode ser entendido como a sensibilidade da corrente terminal do  $i$ -ésimo gerador às variações da tensão sobre o SVC, isto é  $Y_{g,svc\ i} = \frac{\Delta I_{gi}}{\Delta V_{svc}}$ .

Uma vez que a admitância equivalente do SVC foi incorporada à rede, a corrente que circula na própria 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 final, relacionando exclusivamente as barras internas dos geradores é obtida como:

$$Y_{redf} = Y_{gg}^{red} - Y_{g,svc} Y_{svc}^{-1} Y_{g,svc}^T \quad 20$$

Considera-se a seguir a susceptância do SVC dada por:

$$Y_{svc} = Y_{svc}^0 + \Delta Y_{svc} \quad 21$$

e a impedância do SVC obtida por:

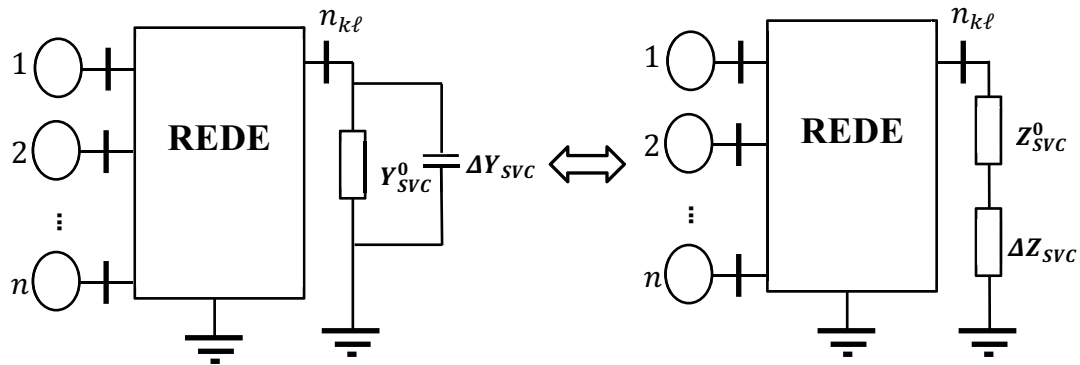
$$Z_{svc} = Y_{svc}^{-1} = (Y_{svc}^0 + \Delta Y_{svc})^{-1} \quad 22$$

Sendo  $Z_{svc}^0 = Y_{svc}^0{}^{-1}$  a impedância equivalente do SVC na condição de operação normal (equilíbrio) e a equação 21 a impedância afetada por variação  $\Delta Y_{svc}$ , então:

$$\Delta Z_{svc} = \frac{1}{Y_{svc}^0 + \Delta Y_{svc}} - \frac{1}{Y_{svc}^0} = \frac{-\Delta Y_{svc}}{Y_{svc}^0 (Y_{svc}^0 + \Delta Y_{svc})} \quad 23$$

Note-se que  $\Delta Z_{SVC}$  é a correspondente variação (em série) da impedância do SVC correspondente à alteração da admitância do SVC (em paralelo), e assim pode-se estabelecer a admitância de transferência entre as barras internas  $i$  e  $j$  como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Impedância do SVC (série) equivalente à admitância (paralelo) do SVC



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Consideradas as variações da admitância do SVC, originadas de alguma lei de controle, pode-se estabelecer como são afetadas as admitâncias de transferência entre as barras internas dos geradores genéricos  $i$  e  $j$  como:

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij} \quad 24$$

e a matriz reduzida final, relacionando exclusivamente as barras internas dos geradores será dada por:

$$Y_{redf} = Y_{red}^0 + \Delta Y_{SVC} \quad 25$$

sendo

$$Y_{red}^0 = [Y_{gg}^{red} + \Delta Y_{SVC}^0] \quad 26$$

com

$$\Delta Y_{SVC}^0 = -Z_{SVC}^0 [Y_{g,SVC} Y_{g,SVC}^T] \quad 27$$

Destaca-se que  $Y_{red}^0$  é a matriz admitância de barra da rede reduzida às barras internas dos geradores, incorporando a admitância equivalente do SVC na situação de regime permanente. Pode-se dizer que é a matriz reduzida considerando a compensação estática (fixa ou constante).

Além da compensação paralela constante, tem-se uma parcela da admitância variante, que então conduz a variação da matriz admitância reduzida dada por:

$$\Delta Y_{SVC\ ij} = -[Y_{g,SVC\ i} Y_{g,SVC\ j}] \Delta Z_{SVC} \quad 28$$

Sendo  $Y_{g,SVC\ i} Y_{g,SVC\ j} = cte, \forall i, j$  têm-se que as variações de cada admitância de transferência entre máquinas genéricas  $i$  e  $j$  do sistema dependem diretamente das variações da impedância do SVC, por intermédio do coeficiente  $K'_{SVC\ ij}$  definido como:

$$K'_{SVC\ ij} = -Y_{g,SVC\ i} Y_{g,SVC\ j} \quad 29$$

O coeficiente  $K'_{SVC\ ij}$  pode ser identificado como a sensibilidade da admitância de transferência do par de máquinas  $i, j$  em relação às variações da impedância do SVC.

Adicionalmente, considerando que a admitância própria de uma barra da rede é dada pela soma das admitâncias dos elementos conectados à barra e que, na barra onde o SVC está instalado incidem outras admitâncias, é razoável admitir que  $Y_{SVC}^0 (Y_{SVC}^0 + \Delta Y_{SVC}) \approx (Y_{SVC}^0)^2$ , e assim pode-se escrever a partir de (4.12):

$$\Delta Z_{SVC} = -\frac{\Delta Y_{SVC}}{Y_{SVC}^0 (Y_{SVC}^0 + \Delta Y_{SVC})} \cong -\frac{\Delta Y_{SVC}}{(Y_{SVC}^0)^2} \quad 30$$

Finalmente, considerando que as variações da admitância própria da barra se devem exclusivamente à ação do SVC, expressa por  $\Delta B_{SVC}$  originada de uma lei de controle, têm-se:

$$\Delta Y_{SVC} = j \Delta B_{SVC} \quad 31$$

$$\Delta Z_{SVC} = -\frac{j \Delta B_{SVC}}{(Y_{SVC}^0)^2} \quad 32$$

reunindo os resultados, têm-se:

$$K_{SVC\ ij} = \frac{\Delta Y_{SVC\ ij}}{\Delta B_{SVC}} \cong -Y_{g,SVC\ i} Y_{g,SVC\ j} \frac{\Delta Z_{SVC}}{\Delta B_{SVC}} \quad 33$$

$$K_{SVC\ ij} \cong j \frac{Y_{g,SVC\ i} Y_{g,SVC\ j}}{(Y_{SVC}^0)^2} \quad 34$$

Assim determina-se  $K_{SVC\ ij}$  como o coeficiente de sensibilidade das variações da admitância de transferência entre as barras internas das máquinas  $i$  e  $j$   $\Delta Y_{SVC\ ij}$  em relação às variações da susceptância  $\Delta B_{SVC}$  do SVC (MARQUES, 2009).

Enfatiza-se que o coeficiente  $K_{SVC\ ij}$  tem valor complexo e, portanto pode ser expresso na forma polar pela sua magnitude  $K_{SVC\ ij}$  e ângulo  $\varphi_{SVC\ ij}$  como:

$$\bar{K}_{SVC\ ij} = K_{SVC\ ij} \angle \varphi_{SVC\ ij} \quad 35$$

Então a variação da admitância de transferência entre as barras internas das máquinas  $i$  e  $j$  originada da ação do SVC é dada por:

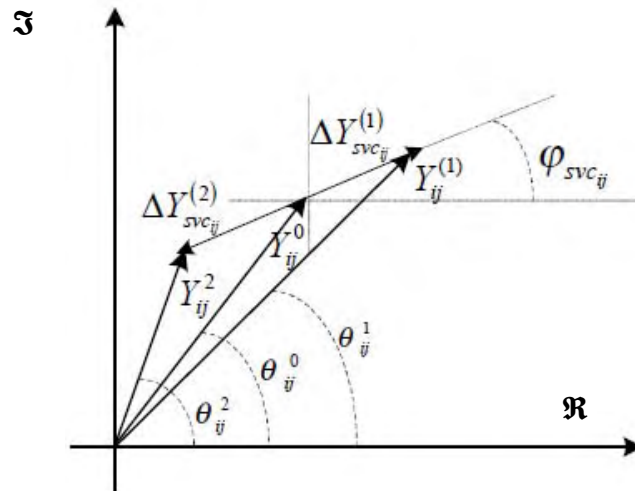
$$\Delta Y_{SVC\ ij} = \bar{K}_{SVC\ ij} \Delta B_{SVC} \quad 36$$

ou

$$\Delta Y_{SVC\ ij} = |K_{SVC\ ij}| \Delta B_{SVC} \angle \varphi_{SVC\ ij} \quad 37$$

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 ( $\varphi_{SVC\ ij}$ ), como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Variações da magnitude da admitância de transferência entre máquinas



Fonte: Marques (2009).

O efeito resultante das variações da admitância de transferência entre máquinas pode ainda ser expresso por:

$$\Delta Y_{ij} = \Delta G_{ij} + j\Delta B_{ij} \quad 38$$

sendo

$$\Delta G_{ij} = \text{real}(K_{SVC})\Delta B_{SVC} \quad 39$$

$$\Delta B_{ij} = \text{imaginário}(K_{SVC})\Delta B_{SVC} \quad 40$$

#### 4.6 Efeito do SVC nas interações entre máquinas

A capacidade de sincronização entre as máquinas  $i$  e  $j$  está diretamente associada à magnitude da admitância de transferência entre elas, que pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} Y_{ij} &= Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef} \cong \\ &= Y_{ij}^0 + K_{SVC\ ij}^{ef} \Delta B_{SVC} \end{aligned} \quad 41$$

Nota-se que o coeficiente de eficácia da susceptância do SVC pode ser avaliado como:

$$K_{SVC\ ij}^{ef} \cong K_{SVC\ ij} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{SVC\ ij}) \quad 42$$

Este coeficiente, por sua vez, expressa a participação efetiva das variações da susceptância  $\Delta B_{SVC}$  do SVC na magnitude da admitância de transferência entre duas máquinas genéricas  $i$  e  $j$  de um sistema multimáquinas. Este é, em si, um dado significativo, uma vez que, mesmo para uma rede de transmissão de grande complexidade, se tem uma avaliação da eficácia da atuação do SVC quanto a interação entre as duas máquinas consideradas.

#### 4.7 Fator de efeito

Há de se considerar que uma determinada variação da admitância de transferência pode ter maior ou menor importância quando comparada com a magnitude original da mesma. Logo, torna-se mais significativa a informação da importância relativa da contribuição das variações da susceptância do SVC para a admitância de transferência. Com este objetivo, define-se o Fator de Efeito (MARQUES, 2009).

$$K_{SVC\ ij}^{efeito} \triangleq \frac{K_{SVC\ ij}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad 43$$

Este fator de efeito pode ser útil para técnicas de análise da atuação do sistema de potência sob ação do SVC, assim como para realização de ajustes da atuação do sistema de potência.

Enfatiza-se que isto significa influência direta sobre a potência sincronizante entre as máquinas do sistema e assim este fator pode ser denominado índice de efeito da atuação do SVC sobre a capacidade de sincronização das máquinas do sistema. Naturalmente, o índice pode ser usado ainda para avaliar quais pares de máquinas são mais e quais são menos afetados pela atuação do SVC localizado em determinada barra do sistema. Consequentemente, considerando diversas localizações, pode-se identificar qual é a mais



efetiva visando às interações entre determinado par de máquinas, ou ainda, visando às oscilações entre determinadas áreas do sistema, bastando para isto observar duas máquinas pertencentes a áreas diferentes.

## Capítulo 5

### Influência do SVC na Energia Transitória

#### 5.1 Modelagem do SVC na Energia transitória do Sistema Multimáquinas

A presença do SVC na rede altera a matriz admitância de barra do sistema reduzida às barras internas dos geradores conforme equacionamento desenvolvido no capítulo anterior, assim podemos ter a matriz admitância como:

$$Y = Y_{red}^0 + \Delta Y_{SVC} \quad 44$$

Sendo  $Y_{red}^0$  a matriz reduzida correspondente à condição de regime permanente e  $\Delta Y_{SVC}$  a variação imposta pela ação dinâmica do SVC.

Os elementos de  $Y_{red}^0$  são  $Y_{ij}^0$  e as correspondentes em  $\Delta Y_{SVC}$  são dados por:

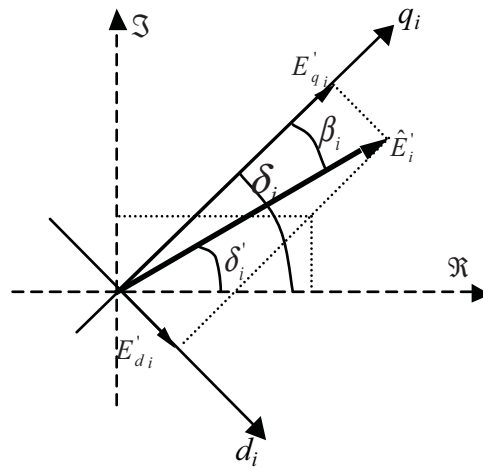
$$\Delta Y_{SVC} = K_{SVC \ ij} \Delta B_{SVC} \quad 45$$

sendo  $\Delta B_{SVC}$  a variação da variável controlada pelo compensador e o fator de sensibilidade é determinado de judiciosas considerações e desenvolvimentos matemáticos a partir do modelo da rede completa resultando em valor complexo, descrito como:

$$K_{SVC \ ij} = |K_{SVC \ ij}| \angle \varphi_{SVC \ ij} \quad 46$$

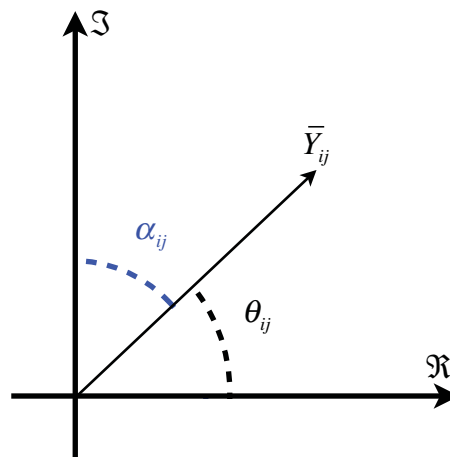
onde  $\varphi_{SVC \ ij} = \text{ângulo}(K_{SVC \ ij})$ . A magnitude e o ângulo do fator de sensibilidade dependem de parâmetros e carregamento do sistema e são constantes.

Se o valor final da admitância de transferência complexa entre as barras internas das máquinas  $i$  e  $j$  dado por  $Y_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij}$  e as tensões internas fasoriais expressas genericamente por  $\dot{E}_i = E_i \angle \delta_i$ , como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Diagrama fasorial para máquina  $i$ 

Fonte: Kundur (1994).

Figura 21 - Ângulos das admitâncias de transferência



Fonte: Marques (2009).

Sabendo-se que a admitância é dada em magnitude e ângulo, pode-se definir:

$$\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} \quad 47$$

$$\theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij} \quad 48$$

A potência transferida entre elas, já bem conhecida (ANDERSON; FOUAD, 1994; PAI, 1981), expressa por:

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \cos(\delta'_{ij} - \theta_{ij}) \quad 49$$

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

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \cos(\delta'_{ij} + \alpha_{ij} - \frac{\pi}{2}) \quad 50$$

que pode ser escrita como

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \sin(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}) \quad 51$$

Considerando que a admitância de transferência seja afetada por ação dinâmica do SVC na rede, pode-se expressar:

$$\bar{Y}_{ij} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}) \left| \underline{\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij}} \right. \quad 52$$

incluindo a variação de  $Y_{ij}$  correspondente a contribuição do SVC, vem:

$$\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ij}^0 + \bar{K}_{SVC\ ij} \Delta B_{SVC} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}) \left| \underline{\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij}} \right. \quad 53$$

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

$$\Delta Y_{ij}^{ef} = K_{SVC\ ij}^{ef} \Delta B_{SVC} \quad 54$$

em que o coeficiente de eficácia do SVC é obtido como (MARQUES, 2009)

$$K_{SVC\ ij}^{ef} \cong K_{SVC\ ij} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{SVC\ ij}) \quad 55$$

e a variação do ângulo da admitância de transferência é

$$\Delta\theta_{ij} = \theta_{ij} - \theta_{ij}^0 = \arctan \left[ \frac{K_{SVC\ ij} \Delta B_{SVC} \sen(\varphi_{SVC\ ij} - \theta_{ij}^0)}{Y_{ij}^0 + K_{SVC\ ij} \Delta B_{SVC} \cos(\varphi_{SVC\ ij} - \theta_{ij}^0)} \right] \quad 56$$

ou, sendo

$$\theta_{ij} + \alpha_{ij} = \theta_{ij}^0 + \Delta\theta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij} = \frac{\pi}{2} \theta_{ij}^0 + \Delta\theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - (\alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}) \quad 57$$

Como  $\theta_{ij}^0 = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij}^0$ , têm se  $\Delta\alpha_{ij} = -\Delta\theta_{ij}$ .

$$\bar{Y}_{ij} = \left( Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef} \right) \left| \frac{\pi}{2} - (\alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}) \right. \quad 58$$

Assim, a potência transferida entre as máquinas  $i$  e  $j$  pode ser expressa por

$$P_{e\ ij} = E_i \left( Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef} \right) E_j \sen(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}) \quad 59$$

ou, utilizando a definição do fator de efeito:

$$F_{SVC\ ij}^{efeito} \triangleq \frac{K_{SVC\ ij}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad 60$$

chega-se a

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 \left( 1 + F_{SVC\ ij}^{efeito} \Delta B_{SVC} \right) \quad 61$$

e

$$P_{e\ ij} = \left( 1 + F_{SVC\ ij}^{efeito} \Delta B_{SVC} \right) E_i Y_{ij}^0 E_j \sen(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}) \quad 62$$

Considerando a referência centro inercial tomada a partir do sincronismo das máquinas, temos a potência elétrica de transferência entre máquinas dada por:

$$P_{e_i} = G_{ii}E_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n [E_i' Y_{ij} E_j' \text{sen}(\delta_{ij}' + \alpha_{ij})] \quad 63$$

definindo  $\varphi_k = \delta_{ij}' + \alpha_{ij}$

$$\Delta P_{e_i} = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \Delta P_{e_{ij}} = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n [E_i' Y_{ij} E_j' (\text{sen} \varphi_k - \text{sen} \varphi_k^0)] \quad 64$$

e, com  $\sigma_k = \varphi_k - \varphi_k^0$ , a i-ésima variação de potência elétrica da máquina é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta P_{e_i} &= \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \Delta P_{e_{ij}} = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n [E_i' Y_{ij} E_j' (\text{sen}(\sigma_k + \varphi_k^0) - \text{sen} \varphi_k^0)] = \\ &\triangleq \sum_{k=1}^m f_k(\sigma_k) \end{aligned} \quad 65$$

com  $m = \frac{n(n-1)}{2}$  logo, tem-se que a potência elétrica transferida entre máquinas tem a seguinte relação, onde:

$$P_{e_{ji}} = E_j' Y_{ji} E_i' \text{sen}(\delta_{ji}' + \alpha_{ji}) \neq -E_i' Y_{ij} E_j' \text{sen}(\delta_{ij}' + \alpha_{ij}) \quad 66$$

A rigor, a igualdade

$$f_k(-\sigma_k) = -f_k(\sigma_k) \quad 67$$

Considera-se verdade se, e somente se,  $\alpha_{ij} = 0$ , isto é, desconsiderando as condutâncias de transferência.

Assim, neste caso, temos o sistema descrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}D & -M^{-1}K^T \\ K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ f(\sigma) \end{bmatrix} \quad 68$$

sendo  $\omega$  o vetor da velocidade angular da máquina  $n$ ,  $\sigma$  é o vetor de dimensão  $m = \frac{n(n-1)}{2}$  das variações dos desvios angulares de  $\sigma_k = \varphi_k - \varphi_k^0$  e  $f(\sigma)$  é o vetor das funções  $f_k(\sigma_k)$  definidas na equação (65).

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 Função de Lyapunov considerada é a chamada energia transitória do sistema composta de energia cinética e energia potencial. A energia cinética é armazenada na massa inercial dos rotores das máquinas em função do desvio de velocidade em relação ao valor de operação normal. A energia potencial é armazenada em campos magnéticos, principalmente no sistema de transmissão, e elétricos em capacitores de compensação (por exemplo), e é função dos desvios das variáveis que definem o torque de restauração do equilíbrio em torno do ponto de operação.

A função ( $V(x)$ ), conhecida como função de Lyapunov (PAI, 1981) é dada por:

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 + \sum_{k=1}^m \int_{\delta'_{ij} + \alpha_{ij}}^{\delta'_{ij} + \alpha_{ij}} \bar{f}(\tau_k) d\tau_k \quad 69$$

Reescrevendo a função em termos das variáveis originais, têm-se:

$$\begin{aligned} V(x) = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 \\ & + \sum_{k=1}^m \{ E_i^0 Y_{ij} E_j^0 [-\cos(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}) \\ & - (\delta_{ij} - \delta'_{ij}) \sin(\delta'_{ij} - \alpha_{ij})] \} \end{aligned} \quad 70$$

onde o termo que representa a energia cinética é dado por:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 \quad 71$$

e o termo que representa a energia potencial é dado por:

$$\sum_{k=1}^m \{E_i^0 Y_{ij} E_j^0 [-\cos(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}) - (\delta_{ij} - \delta'_{ij}) \text{sen}(\delta'_{ij} - \alpha_{ij})]\} \quad 72$$

É importante notar que, a rigor, esta é uma função válida como Função de Lyapunov somente se  $\alpha_{ij} = 0, \forall(i, j)$ .

## 5.2 Efeito do SVC na Função Energia do Sistema

Lembrando que a transferência de potência entre as máquinas  $i$  e  $j$  é afetada pela ação da dinâmica do controlador FACTS como expresso em:

$$P_{e_{ij}} = (1 + F_{SVC\ ij}^{efeito} \Delta B_{SVC}) E_i Y_{ij}^0 E_j \text{sen}(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \quad 73$$

e considerando neste momento apenas o efeito sobre a magnitude, podem-se determinar os desvios como:

$$\Delta P_{e_{ij}} = (1 + F_{SVC\ ij}^{efeito} \Delta B_{SVC}) f_k(\sigma_k) \quad 74$$

Definindo  $K_{SVC\ k} = (1 + F_{SVC\ ij}^{efeito} \Delta B_{SVC})$  têm-se,

$$\Delta P_{e_{ij}} = K_{SVC\ k} f_k(\sigma_k) \quad 75$$



Assim, pode-se determinar a função energia do sistema como afetada pela contribuição do SVC:

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 + \sum_{k=1}^m \{K_{SVC\ ij} E_i^0 Y_{ij} E_j^0 [-\cos(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}) - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^0) \sin(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij})]\} \quad 76$$

É conhecido que a localização do SVC pode ter maior ou menor influência na admitância de transferência entre máquinas, sendo esta informação devidamente expressa pelo fator de efeito (MARQUES, 2009). Tendo a função energia modelada considerando a contribuição do SVC é possível compreender a sua maior ou menor contribuição nos contornos da superfície da energia potencial. Tal compreensão se torna mais clara no capítulo 6 destinado as simulações e resultados.

### 5.3 Análise transitória da Energia Potencial

Considere-se a função energia como função de Lyapunov, compreendida como uma parcela de energia cinética e uma parcela de energia potencial (PAI, 1981). Embora muitos estudos tenham sido desenvolvidos mais recentemente quanto a metodologias de análise, a formulação da energia transitória tem se mantido.

Este estudo considera uma condição severa de falta com o objetivo de observar como a atuação do SVC influencia na energia potencial bem como a trajetória do sistema, visando o futuro emprego destas informações em procedimentos de estabilização do sistema.

Segundo Haque, 2006, após uma grande perturbação o SVC deve contribuir para o aumento da estabilidade na primeira oscilação com o aumento da área de desaceleração. A respectiva contribuição na estabilidade proveniente do SVC será analisada mapeando a região de estabilidade definida no subespaço angular em torno do ponto de equilíbrio estável considerando a energia potencial do sistema representada por:

$$E_{p_{ij}} = \sum_{k=1}^m \{K_{SVC_{ij}} E_i^0 [-\cos(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}) - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^0) \sin(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij})]\} \quad 77$$

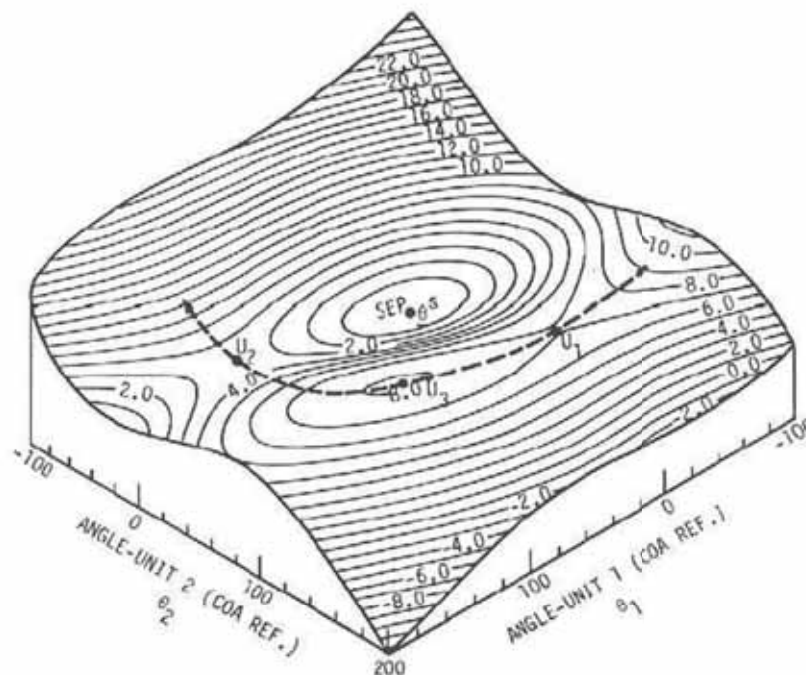
Faremos aqui as curvas equipotenciais projetadas no espaço  $\delta_{ij}$ . Essas curvas são definidas em uma região em torno do ponto de equilíbrio estável, como ilustrado em Pai, 1981. Os pontos de equilíbrio instável ( $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$ ), a energia potencial tem o gradiente igual a zero além de os pontos  $U_1$  e  $U_2$  serem do tipo sela.

O ponto de equilíbrio estável ( $\theta_s$ ) é o ponto de mínima energia potencial.

Em Pai, 1981, é mostrado o mapeamento da região de estabilidade no espaço de estado do subespaço angular  $\theta_i$  's. Este conceito é estendido na construção das curvas equipotenciais utilizando as defasagens angulares das máquinas.

A trajetória do sistema em regime transitório pode ser projetada no subespaço das defasagens angulares das máquinas e sobrepostas às curvas equipotenciais podendo-se assim observar a evolução do sistema com respeito à energia potencial, como ilustrado em Pai (1981).

Figura 22 - Retrato de fase do sistema de três máquinas. Superfície equipotencial de energia (linhas sólidas) e superfície de contorno potencial energético (linha pontilhada).

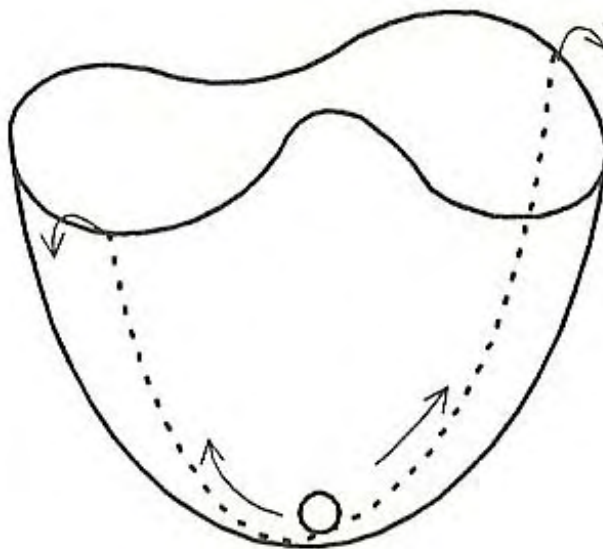


Fonte: Pai (1981).

Uma boa analogia para compreensão da análise de estabilidade sem a necessidade de resolução de equações diferenciais pode ser encontrada em Johns e Song, 1999, que traz uma analogia da superfície da energia potencial, denominada bacia energética em (ALBERTO; BRETAS, 2000). Considera-se o sistema em equilíbrio, o seu ponto de operação é representado com uma bola no fundo de uma bacia e assim permanecerá indefinidamente enquanto o sistema não sofrer nenhuma contingência. Caso ocorra uma falta no sistema, um curto circuito por exemplo, o sistema ganha energia cinética e potencial que analogamente excita a bola a deslizar avançando sobre as elevações em torno do seu novo ponto de equilíbrio, podendo alcançar este novo ponto após eliminada a perturbação. Com a eliminação da falta, ainda resta velocidade, dada pela energia cinética adquirida, e se esta energia é superior à diferença de potencial entre a posição da bola atual e a borda da elevação, a bola poderá transpor a borda da bacia, abandonando a região de atração do ponto de equilíbrio e assim o sistema não mais será considerado estável. Essa borda representa a máxima capacidade de absorção da energia do sistema após o distúrbio do sistema.

Essa analogia é muito bem ilustrada na Figura 23.

Figura 23 - Analogia da representação da bola deslizante.



Fonte: Johns e Song (1999).

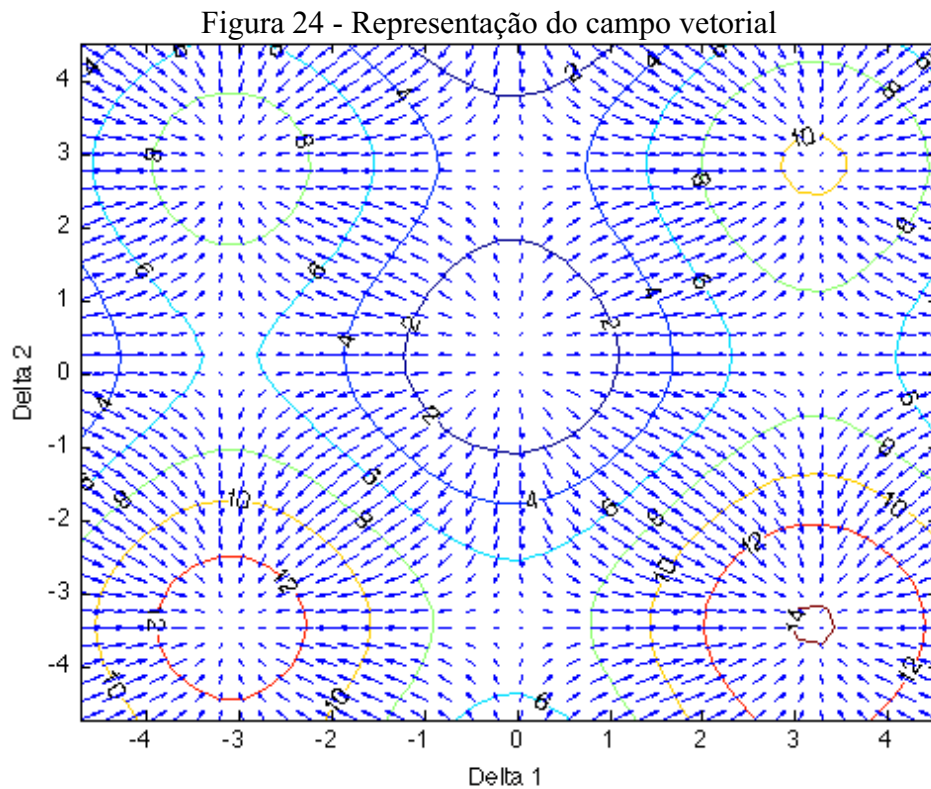
## 5.4 Função Gradiente e campo vetorial

Desconsiderando a condutância de transferência o sistema pós falta é conservativo, isto é, desde que a trajetória dos ângulos das máquinas sobrepostas ao retrato da superfície do contorno de energia potencial não supere a borda da bacia energética, o sistema retornará ao ponto de equilíbrio estável, assim pode-se definir o vetor de torque do sistema (PAI, 1981).

$$\bar{T} = -\frac{\partial E_p}{\partial \delta} \quad 78$$

Assim, a direção do vetor de torque  $\bar{T}$  é contrária ao vetor gradiente. O vetor gradiente ( $\nabla E_p$ ) é ortogonal às curvas equipotenciais da energia potencial e tem direção e sentido ao máximo crescimento da função.

Para uma melhor representação gráfica, utiliza-se a visualização do campo vetorial constituído de um campo de vetores gradientes calculados para cada ponto do domínio, como ilustrado na Figura 24.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Compreendendo o comportamento do sistema na superfície energética quando o mesmo sofre uma contingência, este estudo visa proporcionar melhores condições de estabilidade ao SEE atuando no relevo energético, ou seja, a presença do SVC com adequado controle dinâmico irá modificar as elevações energéticas a fim de dificultar que a trajetória do sistema transponha a cordilheira que circunda o vale energético. Dessa forma, o SVC estará contribuindo para melhores condições de estabilidade o que é evidenciado no próximo capítulo com as simulações computacionais.

## Capítulo 6

### Resultados e simulações

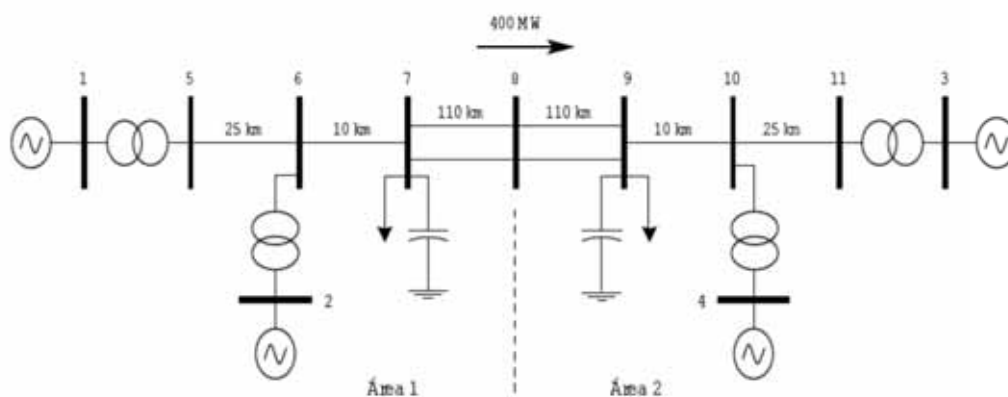
#### 6.1 Sistema de 4 máquinas e 11 barras

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.

Esse sistema pode ser encontrado em Kundur (1994).

Figura 25 - Sistema multimáquinas de duas áreas e quatro máquinas



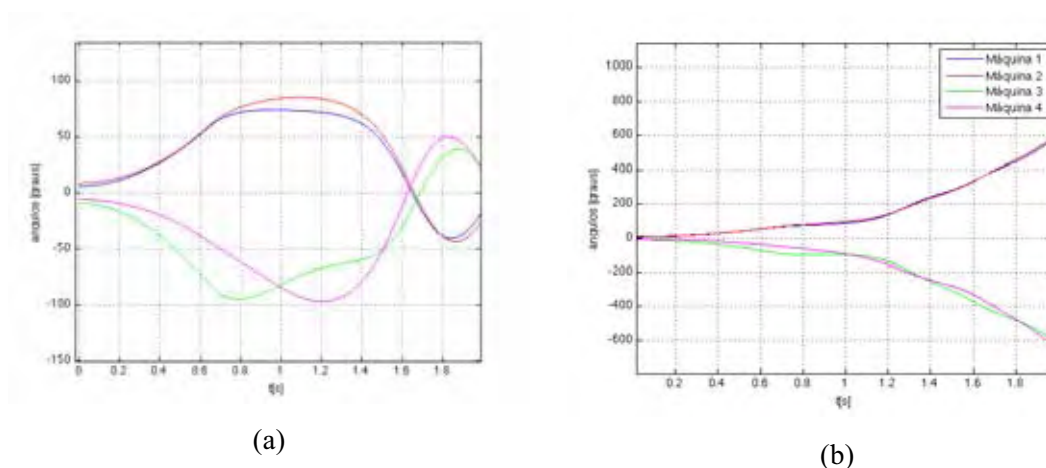
Fonte: Kundur (1994).

Esse sistema, considerado de pequeno porte, possui estrutura e parâmetros baseados em equipamentos reais, favorecendo assim uma análise dos efeitos dos modos de oscilação eletromecânicos.

## 6.2 Simulação Sistema 4 máquinas e SVC instalado na barra 8

Na Figura 26 (a), têm-se as curvas de oscilação considerada a ocorrência de curto-circuito trifásico na linha 8-9 tão próximo da barra 9 que se considera que o curto-circuito ocorre na própria barra no instante de tempo igual a zero com duração de 0,64 segundos, mostrando que o sistema é estável para primeira oscilação. O que já não ocorre na Figura 26 (b), em que as curvas de oscilação correspondem à mesma falta com duração de 0,65 segundos, sendo que neste caso o sistema é instável. Os tempos de duração de falta são entendidos como limites de um intervalo que contém o tempo crítico de eliminação da falta.

Figura 26 - ângulos das máquinas estável (a), ângulos das máquinas instável (b).



Fonte: Elaboração do próprio autor

No caso ilustrado na Figura 26, o sistema não dispõe de nenhum controle, mas tão somente uma compensação fixa provinda da compensação estática do SVC.

Considerando o SVC instalado na barra 8 do sistema de quatro máquinas, ilustrado na Figura 25, pretende-se proporcionar uma melhor margem de estabilidade do sistema.

De acordo com os índices do fator de efeito e coeficiente de eficácia, apresentado na Quadro 1, é possível fazer uma análise comparativa da influência do SVC nos pares de máquinas quando instalado na barra 8.

Quadro 1 - Fator de efeito nos pares de máquinas com SVC na barra 8

| Par de máquinas | Fator de Efeito | Coefficiente de Eficácia |
|-----------------|-----------------|--------------------------|
| 1-2             | 0,7826          | 0,7773                   |
| 1-3             | 1,9529          | 1,0095                   |
| 1-4             | 1,9529          | 1,0886                   |
| 2-3             | 1,9529          | 1,0886                   |
| 2-4             | 1,9529          | 1,1740                   |
| 3-4             | 0,6902          | 0,6746                   |

De acordo com a Quadro 1, pode-se observar a efetiva contribuição do SVC na capacidade de sincronização entre máquinas do sistema, uma vez que esta depende diretamente das admitâncias de transferência entre máquinas. Sabendo-se que essa contribuição pode ter maior ou menor participação quando comparada com a magnitude da admitância inicial, tem-se a participação do SVC na admitância de transferência entre máquinas dado pelo fator de efeito, em que se observa que a sua atuação é representativamente igual nos pares de pares inter-área. Tal contribuição é possível devido à localização do SVC na barra 8, barra central do sistema.

Para as contribuições dinâmicas, tem-se a susceptância do SVC ajustada de modo a regular a tensão na barra de instalação do SVC pelo regulador de tensão com ganho  $K_{SVC}$ , e, se for instalado um controle suplementar para obtenção de melhores condições de estabilidade, este atuará com o ganho  $K_{esp_{SVC}}$ .

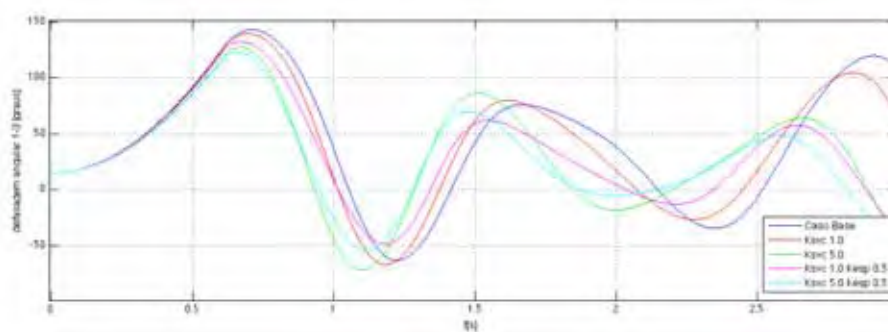
Nas simulações a seguir considera-se a falta descrita antes com duração de 0,6 segundos, tempo esse próximo do tempo crítico. O caso base ilustrado nas figuras a seguir compreendem o sistema com o SVC contribuindo apenas com a sua compensação fixa (constante).

O controlador suplementar, ajustado pelo ganho  $K_{esp_{SVC}}$ , tem como entrada a variação da velocidade angular das máquinas de maior e menor aceleração no instante inicial da falta, respectivamente as máquina 1 e 3.

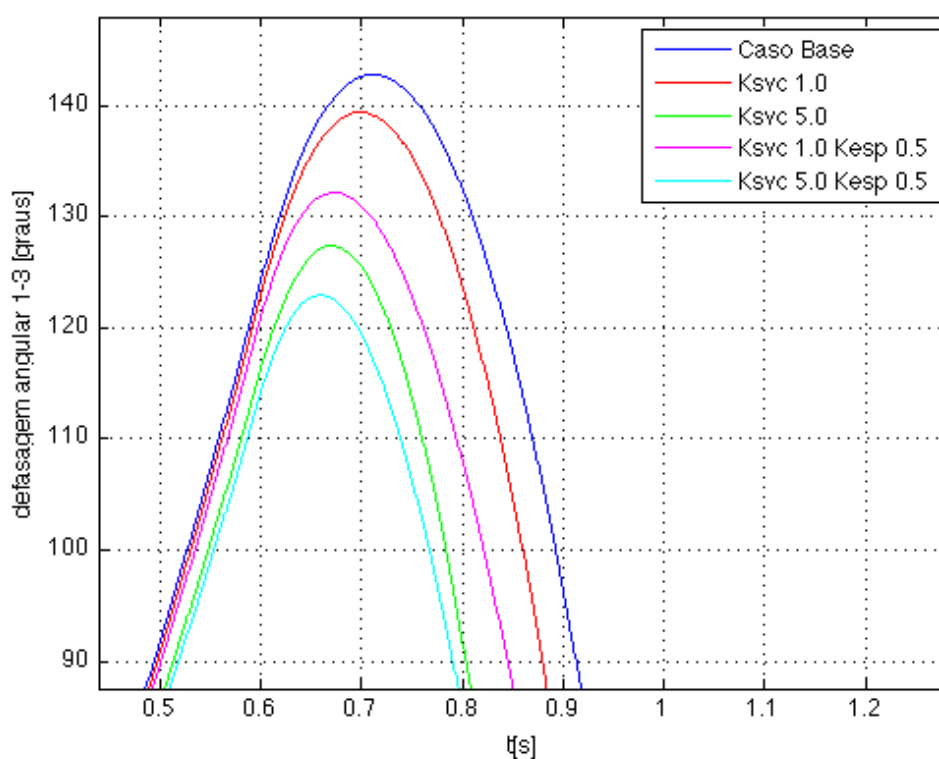
A contribuição do SVC auxilia no sincronismo entre máquinas e na redução das defasagens angulares entre máquinas, fazendo com que o sistema trabalhe com uma menor abertura angular, como se pode observar nas ilustrações a seguir com vista à primeira oscilação.



Figura 27 - (a) defasagem angular do par de máquinas 1-3, (b) Primeira oscilação da defasagem angular do par de máquinas 1-3



(a)



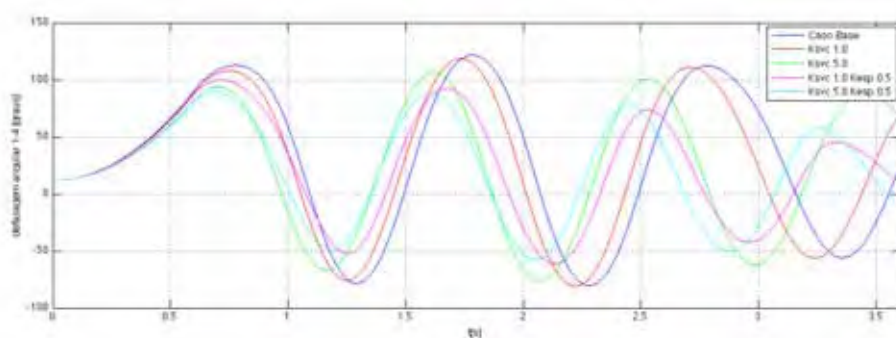
(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor

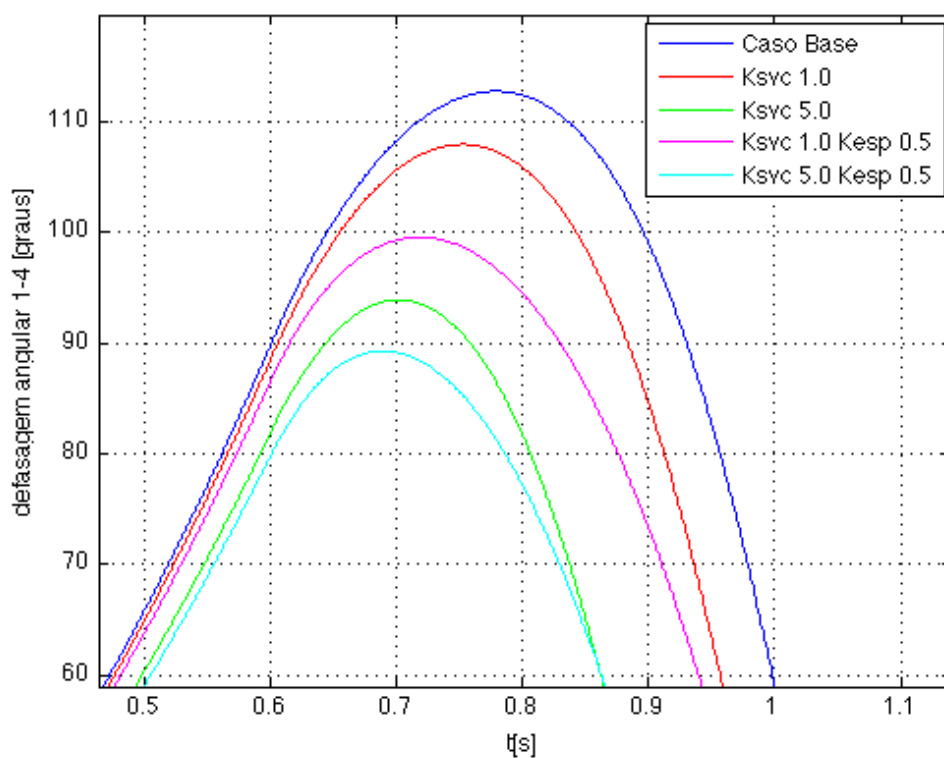
Na ilustração da Figura 27, a defasagem angular do par de máquinas 1-3, é possível observar a considerável contribuição do SVC para os diferentes ajustes dos controladores,  $K_{SVC}$  e  $K_{esp}$ . Observando a primeira oscilação, nota-se uma diferença da amplitude da oscilação de aproximadamente 20 graus entre o caso base e o melhor ajuste.

Na ilustração da Figura 28, observa-se uma diminuição semelhante nas defasagens angulares, proporcionando melhores condições de sincronismo entre as máquinas de diferentes áreas.

Figura 28 - (a) defasagem angular do par de máquinas 1-4, (b) Primeira oscilação da defasagem angular do par de máquinas 1-4



(a)



(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor

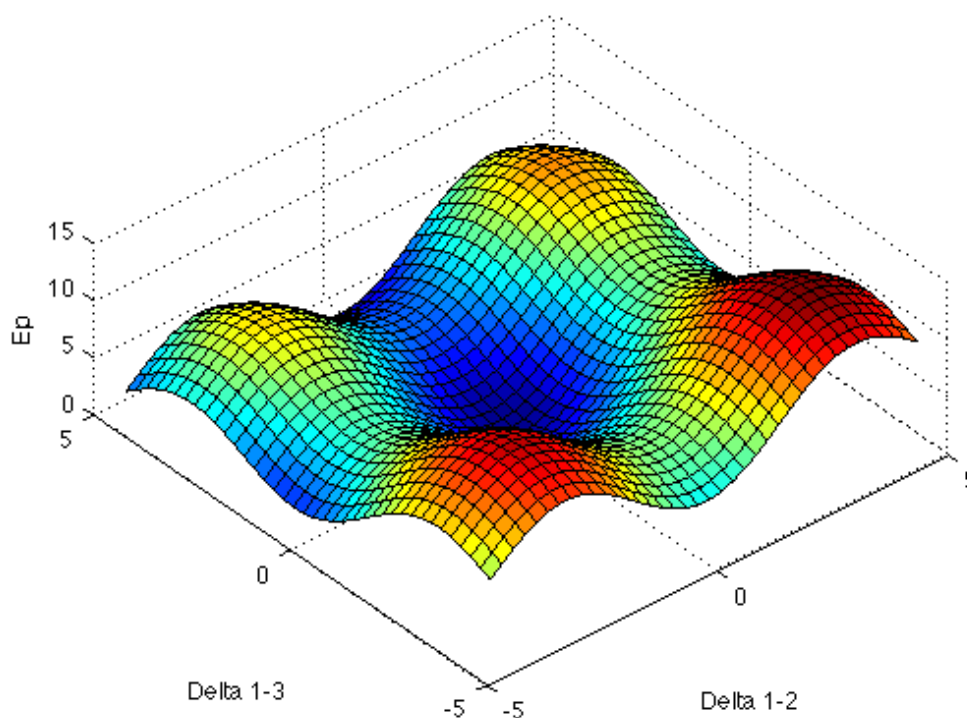
Na Figura 28, nota-se uma redução na defasagem angular aproximadamente de 20° comparando o caso base com o melhor ajuste apresentado.

Tais melhorias providas da contribuição do SVC na estabilidade transitória são proporcionadas pela mudança no relevo energético, que pode ser compreendido analisando as

curvas equipotenciais projetadas no espaço  $\delta_{ij}$ . Estas curvas são definidas em uma região em torno do ponto de equilíbrio estável (PAI, 1981).

A Figura 29 ilustra a superfície da função energia, de tal forma que é possível observar as depressões em tons de azul, denominado vale energético, em que se encontra o ponto de equilíbrio estável e em seu entorno as elevações energéticas em tons de vermelho e amarelo que possuem os pontos de equilíbrio instável.

Figura 29 - Superfície de energia potencial em função das defasagens angulares 1-2 e 1-3



Fonte: Elaboração do próprio autor

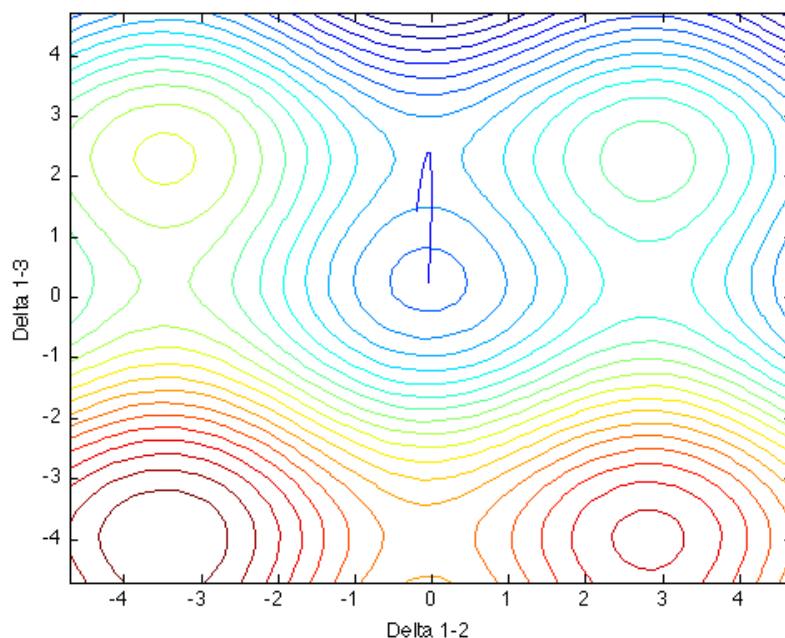
Dada uma contingência, o sistema é excitado adquirindo energia potencial e cinética, no qual o ponto de operação do sistema é excitado a se movimentar pelas elevações energéticas a fim de encontrar um novo ponto de equilíbrio, pois se desloca no espaço de estado no sentido de crescimento da energia potencial.

A contribuição dinâmica do SVC é capaz de alterar, durante um regime transitório, a configuração dessa superfície (Figura 29), ilustrativamente montanhosa, tornando o seu vale mais fundo ou mais raso, e por consequência seus picos mais ou menos elevados, assim proporcionando maiores condições de estabilidade para o sistema.

As curvas equipotenciais a seguir constituem-se em um retrato do sistema no instante de maior variação da susceptância controlada pelo SVC, visto que o controle é dinâmico e

variante no tempo. Os níveis dados em cada contorno do ponto de equilíbrio são consideradas alturas da energia potencial.

Figura 30 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 1-3 e trajetória estável

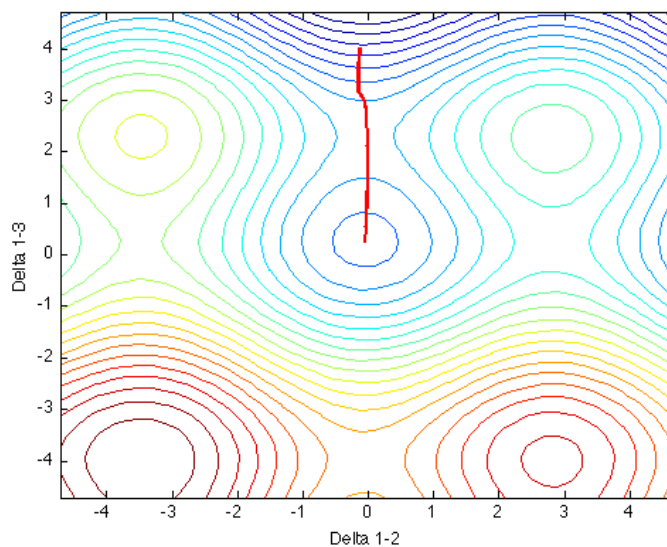


Fonte: Elaboração do próprio autor

Após a eliminação da falta e tendo toda a energia cinética adquirida nos rotores das máquinas consumida, o sistema tende a retornar ao seu ponto de equilíbrio inicial, desde que não tenha vencido a cordilheira energética, assim a trajetória do ponto de equilíbrio do sistema é dita estável, como se pode observar na Figura 30. O movimento da trajetória do sistema é representado pelo traço em azul, em que a falta foi eliminada com o tempo de 0,64 segundos, não ultrapassando a cordilheira energética.

Na Figura 31, a trajetória dada em vermelho ultrapassou a cordilheira energética após ter a falta eliminada com 0,65 segundos, e assim caracterizou uma trajetória de instabilidade.

Figura 31 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagem angular 1-2 e 1-3 e trajetória instável

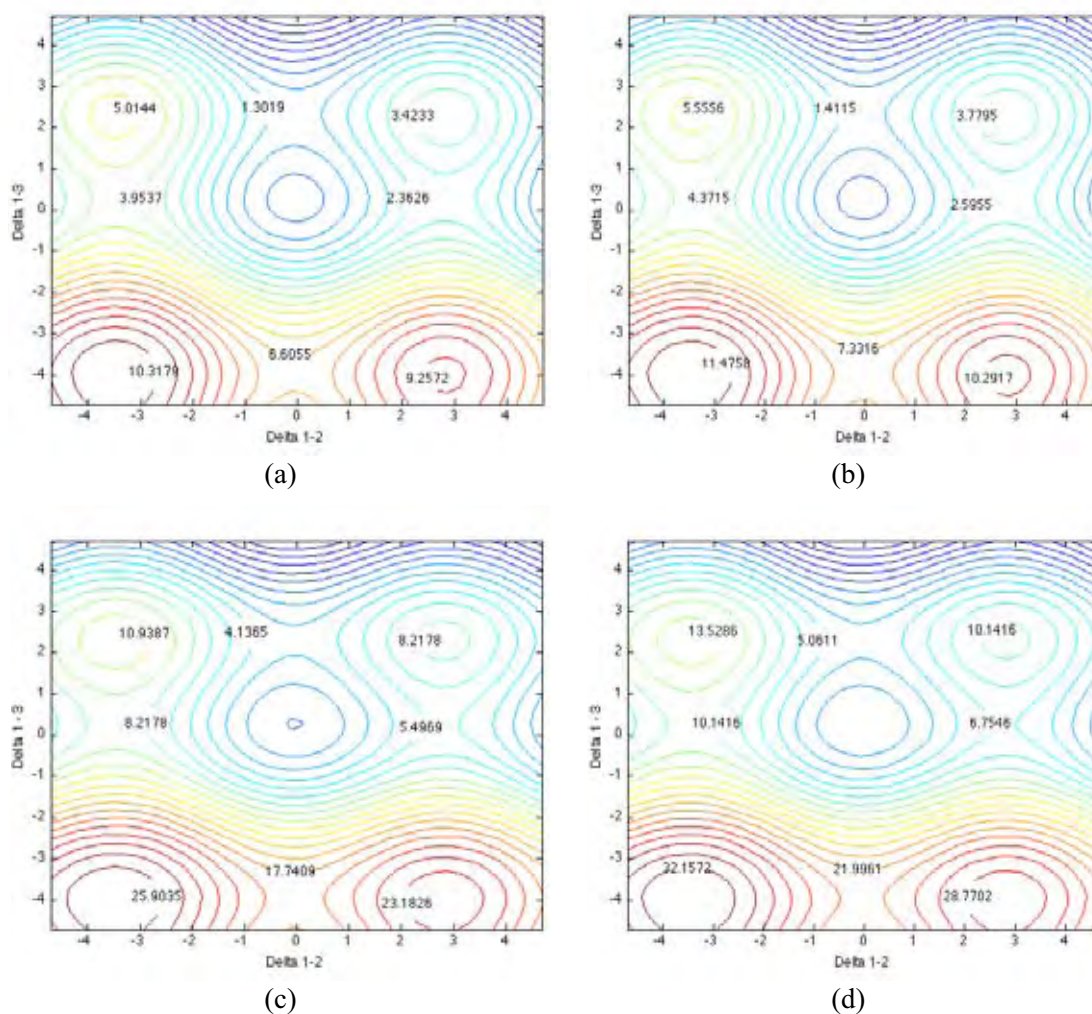


Fonte: Elaboração do próprio autor

A contribuição dinâmica do SVC visa tornar esse percurso mais longo e/ou mais íngreme, ou não, com o intuito de aumentar a dificuldade de a trajetória, transpor o vale energético. Nota-se nas duas ilustrações anteriores que a trajetória do sistema caminha em direção ao passo energético, ponto esse de menor elevação da cordilheira, situado entre dois picos energéticos muitas vezes referido como ponto de sela.

Na ilustração da Figura 32, têm-se as contribuições dinâmicas do SVC atuando no aumento da magnitude das cordilheiras energéticas, o que se pode observar comparando os valores da energia potencial destacados nos pontos extremos da cordilheira energética.

Figura 32 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 1-3 com diferentes ganhos dos controladores (a)  $K_{svc} = 0,0$  (b)  $K_{svc} = 1,0$  (c)  $K_{svc} = 4,0$  (d)  $K_{svc} = 5,0$



Fonte: Elaboração do próprio autor

Um controle adequado de tensão provinda do SVC pode contribuir para o aumento das cordilheiras energéticas, tornando o sistema suscetível a suportar contingências mais severas. A elevação da altura do passo energético proporcionou que o sistema suportasse a contingência por um período maior de tempo, evidenciado pelo tempo crítico de eliminação da falta, como pode ser observado na Quadro 2.

Quadro 2 - Magnitude do passo energético comparado ao tempo crítico de eliminação da falta.

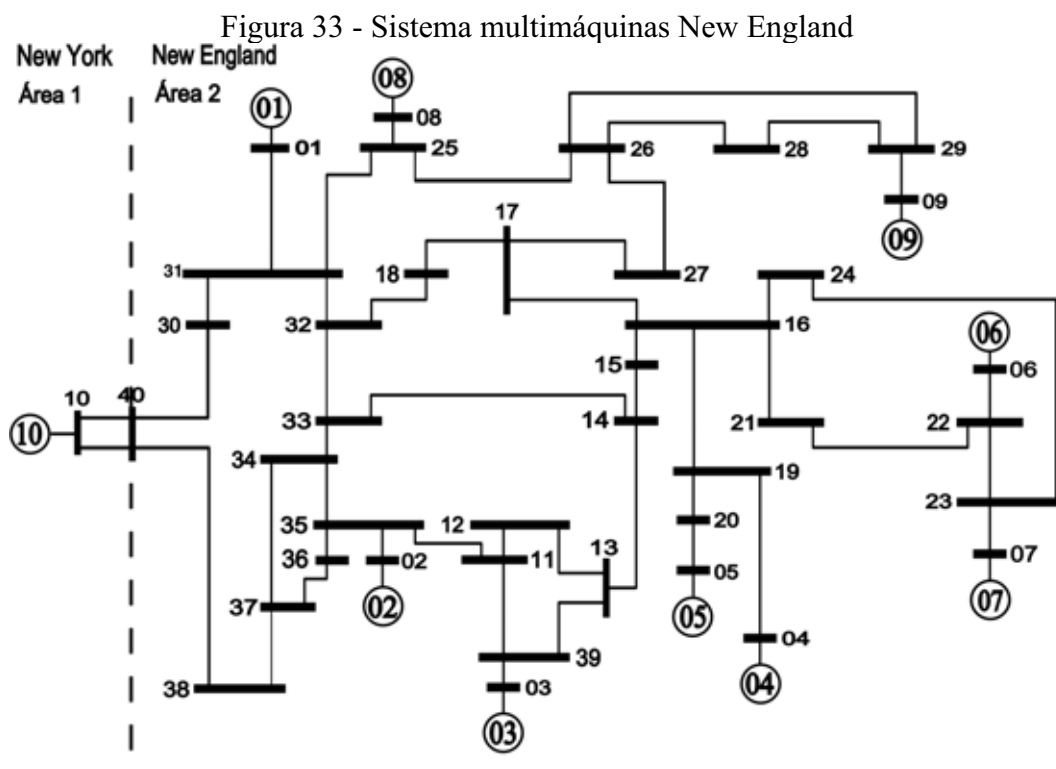
| Ajuste   | Magnitude do Passo energético ( $E_p$ ) | Tempo crítico de eliminação da falta (s) |
|----------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Ksvc 0,0 | 1,3019                                  | 0,64 – 0,65                              |
| Ksvc 1,0 | 1,4115                                  | 0,65 – 0,66                              |
| Ksvc 2,0 | 1,8022                                  | 0,66 – 0,67                              |
| Ksvc 3,0 | 3,5388                                  | 0,68 – 0,69                              |
| Ksvc 4,0 | 4,1365                                  | 0,69 – 0,70                              |
| Ksvc 5,0 | 5,0611                                  | 0,71 – 0,72                              |

Fonte: Elaboração do próprio autor

### 6.3 Simulação Sistema New England

Nesta seção o estudo da compensação do SVC é feito no sistema New England, de maior porte que o anterior, obtido em Padiyar (1996). Neste estudo foi incluído uma barra na interligação das duas áreas com o propósito de inclusão do SVC na interconexão das áreas como feito no sistema anterior, assim o sistema passa a contar com 10 geradores, 40 barras e 47 linhas de transmissão, como ilustrado na Figura 33.

Este sistema consiste em duas grandes áreas, sendo a área 1 constituída pelo gerador 10 que representa de forma compacta o sistema New York e as demais máquinas constituem o sistema New England.



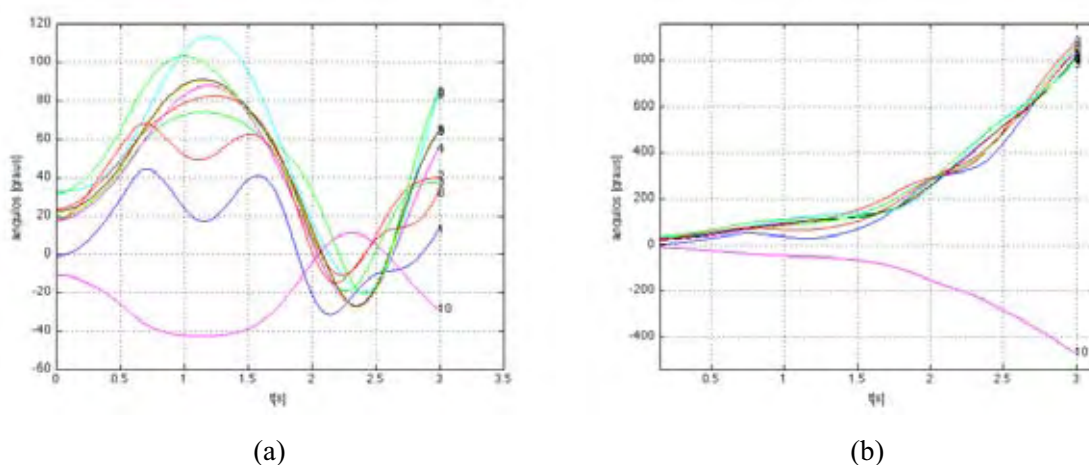
Fonte: Padiyar (1996).



A contingência neste sistema consiste num curto-circuito trifásico na linha 30-31 tão próxima da barra 30 que se considera que o curto-circuito tenha ocorrido na própria barra.

Com o propósito de conhecer o comportamento do sistema, analisa-se a estabilidade vista à primeira oscilação com base no tempo crítico de eliminação da falta, como ilustra a Figura 34.

Figura 34 - ângulos das máquinas estável (a), ângulos das máquinas instável (b).



Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando a ilustração da Figura 34 dos ângulos das máquinas, é possível observar que o sistema instabiliza com a máquina 10 perdendo o sincronismo com as demais máquinas do sistema. Logo, pretende-se determinar a localização de inclusão do SVC com o propósito de melhorar o sincronismo inter-área.

Randomicamente escolheram-se sete barras candidatas a inclusão do SVC, onde foi analisado a fator de efeito em cada uma delas nas interações inter-área, como apresenta a Quadro 3.



Quadro 3 - Fator de efeito na atuação inter-área para diferentes localizações

| Máquinas | Fator de Efeito |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|          | SVC na Barra 27 | SVC na Barra 31 | SVC na Barra 34 | SVC na Barra 35 | SVC na Barra 37 | SVC na Barra 38 | SVC na Barra 40 |
| 1-10     | 0,1216          | -1,3883         | -1,4229         | 16,5024         | 0,2256          | -0,0586         | 5,0598          |
| 2-10     | -0,7347         | -1,3378         | -1,3330         | 2,9165          | -0,6487         | -0,2216         | -0,4698         |
| 3-10     | -0,0768         | -1,3942         | -1,1365         | 3,8184          | -0,5190         | -0,2330         | -0,1734         |
| 4-10     | 13,4640         | 1,9277          | 7,3536          | 10,0250         | 3,0842          | -0,0039         | 2,8106          |
| 5-10     | 13,4640         | 1,9277          | 7,3536          | 10,0250         | 3,0842          | -0,0039         | 2,8106          |
| 6-10     | 13,4640         | 9,9144          | 10,2679         | 10,0250         | 3,0842          | -0,0039         | 2,8106          |
| 7-10     | 13,4640         | 7,7750          | 11,8515         | 10,0250         | 3,0842          | -0,0039         | 2,8106          |
| 8-10     | -1,8063         | -2,1373         | -2,4739         | 17,5050         | -1,5416         | 0,6962          | 5,6855          |
| 9-10     | 4,0382          | -2,2852         | -1,7077         | 17,3777         | 5,2564          | 5,1613          | 5,6097          |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando o fator de efeito das barras candidatas, Quadro 3, a barra 35 foi a única que apresentou todos os resultados positivos nas interações inter-área, assim pode-se dizer que a inclusão do SVC na barra 35 terá influência positiva na sincronização inter-área, o que não acontecerá necessariamente nas demais interações, o que se pode observar analisando a participação efetiva do SVC em relação a todas as máquinas do sistema a seguir nas matrizes referente ao coeficiente de eficácia e fator de efeito.

Coeficiente de Eficácia =

|          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -53,0980 | 15,6182 | 19,8072 | 19,2409 | 6,6526  | 17,2894 | 14,4695 | 47,7381 | 26,9731 | 77,7355 |
| 15,6182  | 1,8551  | 0,0272  | 1,5443  | 0,5339  | 1,3957  | 1,1613  | 8,8915  | 4,4041  | 7,9916  |
| 19,8072  | 0,0272  | 2,8879  | 1,6566  | 0,5728  | 1,4972  | 1,2458  | 11,3574 | 5,4424  | 11,1668 |
| 19,2409  | 1,5443  | 1,6566  | 5,2560  | -0,7781 | -0,1587 | -0,1320 | 11,8049 | 4,0249  | 15,2832 |
| 6,6526   | 0,5339  | 0,5728  | -0,7781 | 0,7508  | -0,0549 | -0,0457 | 4,0816  | 1,3916  | 5,2842  |
| 17,2894  | 1,3957  | 1,4972  | -0,1587 | -0,0549 | 3,9819  | -1,4872 | 10,6689 | 3,6376  | 13,8125 |
| 14,4695  | 1,1613  | 1,2458  | -0,1320 | -0,0457 | -1,4872 | 2,7830  | 8,8775  | 3,0268  | 11,4932 |
| 47,7381  | 8,8915  | 11,3574 | 11,8049 | 4,0816  | 10,6689 | 8,8775  | 10,2416 | 20,7878 | 41,3444 |
| 26,9731  | 4,4041  | 5,4424  | 4,0249  | 1,3916  | 3,6376  | 3,0268  | 20,7878 | 15,9247 | 24,5606 |
| 77,7355  | 7,9916  | 11,1668 | 15,2832 | 5,2842  | 13,8125 | 11,4932 | 41,3444 | 24,5606 | 91,9398 |

Fator de Efeito =

|         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -3,5511 | 16,6259 | 16,6826 | 17,3864 | 17,3864 | 17,3864 | 17,3864 | 17,5050 | 19,0230 | 16,5024 |
| 16,6259 | 0,2111  | 0,0149  | 2,3298  | 2,3298  | 2,3298  | 2,3298  | 17,5050 | 10,5736 | 2,9165  |
| 16,6826 | 0,0149  | 0,2759  | 1,7854  | 1,7854  | 1,7854  | 1,7854  | 17,5050 | 9,9002  | 3,8184  |
| 17,3864 | 2,3298  | 1,7854  | 0,4460  | -0,3953 | -0,0970 | -0,0970 | 17,5050 | 5,3870  | 10,0250 |
| 17,3864 | 2,3298  | 1,7854  | -0,3953 | 0,1367  | -0,0970 | -0,0970 | 17,5050 | 5,3870  | 10,0250 |
| 17,3864 | 2,3298  | 1,7854  | -0,0970 | -0,0970 | 0,3558  | -0,4858 | 17,5050 | 5,3870  | 10,0250 |
| 17,3864 | 2,3298  | 1,7854  | -0,0970 | -0,0970 | -0,4858 | 0,2827  | 17,5050 | 5,3870  | 10,0250 |
| 17,5050 | 17,5050 | 17,5050 | 17,5050 | 17,5050 | 17,5050 | 17,5050 | 1,0225  | 17,5050 | 17,5050 |
| 19,0230 | 10,5736 | 9,9002  | 5,3870  | 5,3870  | 5,3870  | 5,3870  | 17,5050 | 2,0151  | 17,3777 |
| 16,5024 | 2,9165  | 3,8184  | 10,0250 | 10,0250 | 10,0250 | 10,0250 | 17,5050 | 17,3777 | 4,0792  |

A análise comparativa do coeficiente de eficácia e do fator de efeito evidencia a atuação do SVC em todas as máquinas do sistema. Assim, é possível dizer que o SVC instalado na barra 35 tem participação positiva considerável nas interações inter-área e pouca contribuição negativa, quando ocorre, nas interações intra-área. Desta forma, considera-se favorável a inclusão do SVC na barra 35, visando proporcionar melhores condições de estabilidade.

Para o fluxo de potência convergido é ideal que todas as barras estejam com tensões em 1,0 *p.u.*, ou ao menos próximas, sendo aceitável uma margem de tolerância de 5% nas tensões.

Na convergência do fluxo de potência, sem a presença do SVC, nota-se que seis barras apresentam magnitudes de tensões abaixo de 0,95 *p.u.*; essas barras são destacadas na Quadro 4.

Quadro 4 - Tensões nas barras com afundamento de tensão

| Barra | Tensão na Barra |                 | Potência na Barra (p.u) |         |
|-------|-----------------|-----------------|-------------------------|---------|
|       | Módulo (p.u)    | Ângulos (graus) | Ativa                   | Reativa |
| 12    | 0,9359          | -8,2158         | -0,0800                 | -0,8800 |
| 15    | 0,9467          | -10,5334        | -3,2000                 | -1,5300 |
| 33    | 0,9432          | -12,2352        | -5,0000                 | -1,8400 |
| 34    | 0,9483          | -10,7635        | 0,0000                  | 0,0000  |
| 36    | 0,9406          | -12,5677        | -2,3300                 | -0,8400 |
| 37    | 0,9400          | -13,2382        | -5,2200                 | -1,7600 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

A localização do SVC na barra 35, com sua compensação fixa e constante, foi capaz de proporcionar participação positiva nas interações entre máquinas das diferentes áreas e contribuiu na convergência do sistema para que todas as tensões mantivessem próximas a 1 *p.u.*, como pode-se observar na Quadro 5.

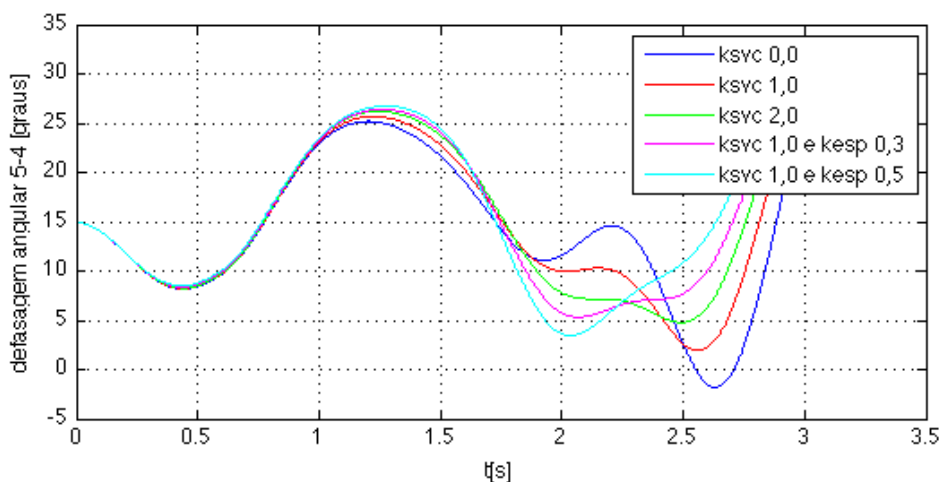
Quadro 5 - Tensões nas barras com afundamento de tensão após a inclusão do SVC na barra 35.

| Barra | Tensão na Barra        |                 | Potência na Barra (p.u) |         |
|-------|------------------------|-----------------|-------------------------|---------|
|       | Módulo ( <i>p.u.</i> ) | Ângulos (graus) | Ativa                   | Reativa |
| 12    | 0,9512                 | -8,1294         | -0,0800                 | -0,8800 |
| 15    | 1,0001                 | -10,5104        | -3,2000                 | 2,3300  |
| 33    | 0,9611                 | -12,0174        | -5,0000                 | -1,8400 |
| 34    | 0,9609                 | -10,5931        | 0,0000                  | 0,0000  |
| 36    | 0,9522                 | -12,3514        | -2,3300                 | -0,8400 |
| 37    | 0,9512                 | -13,0042        | -5,2200                 | -1,7600 |

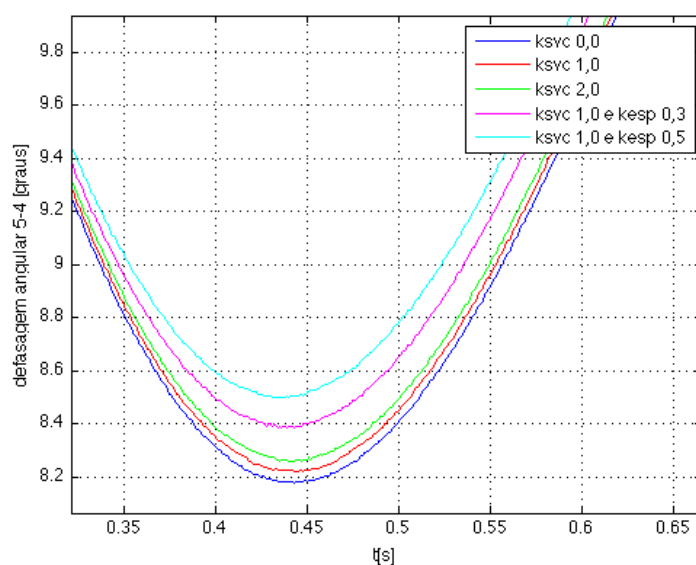
Fonte: Elaboração do próprio autor

A contribuição fixa/constante do SVC, expressa pelo coeficiente fator de efeito, tem considerável influência nas condições de sincronismo entre máquinas, que se pode observar nas defasagens angulares das máquinas nas ilustrações a seguir.

Figura 35 - (a) defasagem angular do par de máquinas 5-4, (b) Primeira oscilação da defasagem angular do par de máquinas 5-4



(a)



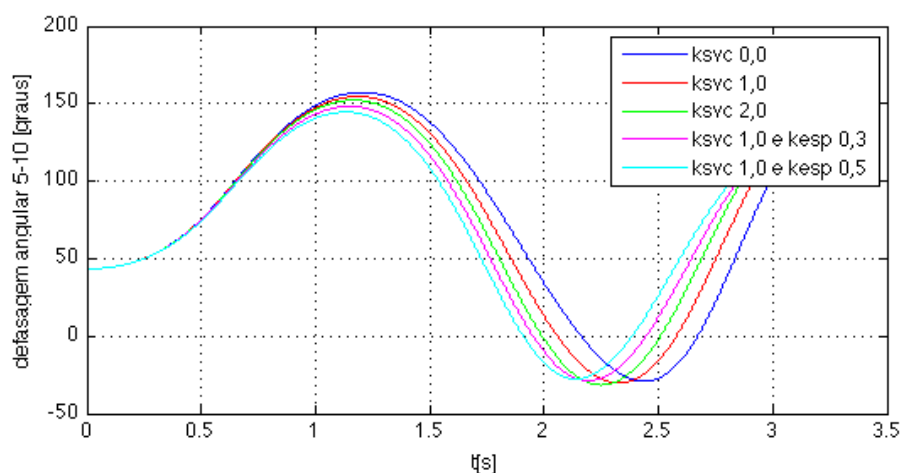
(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor

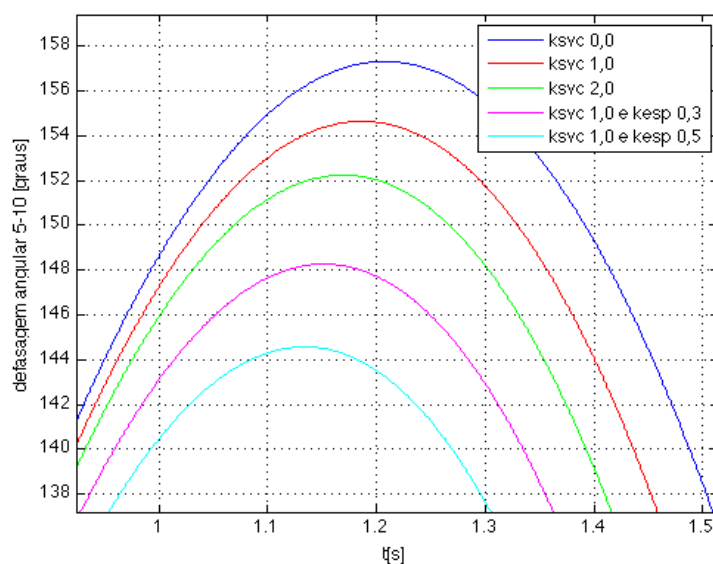
No par de máquinas 5-4, o índice fator de efeito apresenta influência negativa, -0,7781, o que proporcionou acréscimo das defasagens angulares com o aumento do ganho dos controladores. Contudo, tal contribuição negativa, em pequena proporção, não contribuiu para instabilidade do sistema, visto que o sistema perde estabilidade nas oscilações inter-área.

A localização do SVC proporciona influência positiva, evidenciado pelo fator de efeito igual a 10,0250. Tal participação na capacidade de sincronização das máquinas inter-áreas proporcionou a redução das defasagens angulares inter-áreas.

Figura 36 - (a) defasagem angular do par de máquinas 5-10, (b) Primeira oscilação da defasagem angular do par de máquinas 5-10



(a)



(b)

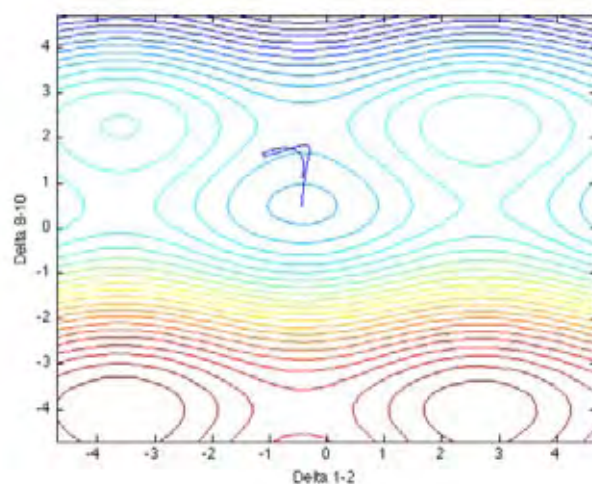
Fonte: Elaboração do próprio autor

Considerando a mesma condição de falta, com curto-circuito na barra 30 com duração de 0,6 segundos, pode-se observar uma redução de aproximadamente  $11^\circ$  na amplitude da primeira oscilação comparando o caso sem compensação dinâmica ( $K_{svc} = 0,0$ ) com o caso com ganho do controle de tensão igual a 1 e ganho do controle suplementar igual a 0,5, como pode-se observar na Figura 36.

A Figura 37 mostra as curvas de nível da energia potencial. Essa ilustração retrata a situação do caso base, sem qualquer compensação. Dado curto-circuito na barra 30, o sistema descreve uma trajetória percorrendo as elevações sem abandonar o vale energético, até a

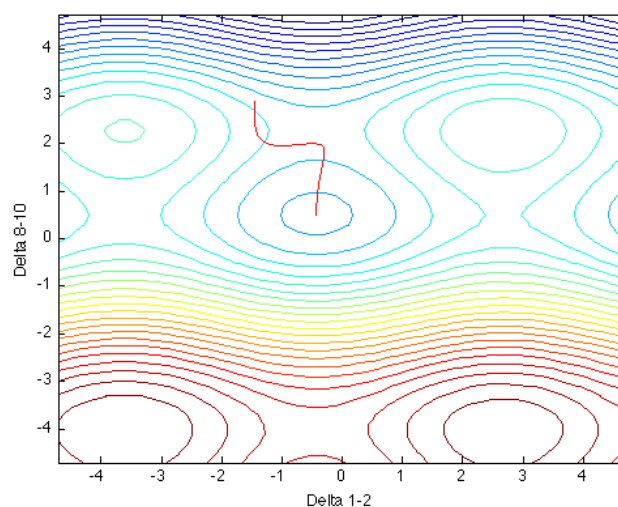
duração da falta de 0,617 segundos. Tendo a falta eliminada após esse tempo, a energia adquirida pelo sistema foi maior do que a energia potencial do vale energético, o que representou o abandono do vale energético evoluindo para a perda de estabilidade do sistema, como ilustrado na Figura 37 (b).

Figura 37 - (a) Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 8-10 e trajetória estável



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 38 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 1-3 e trajetória instável

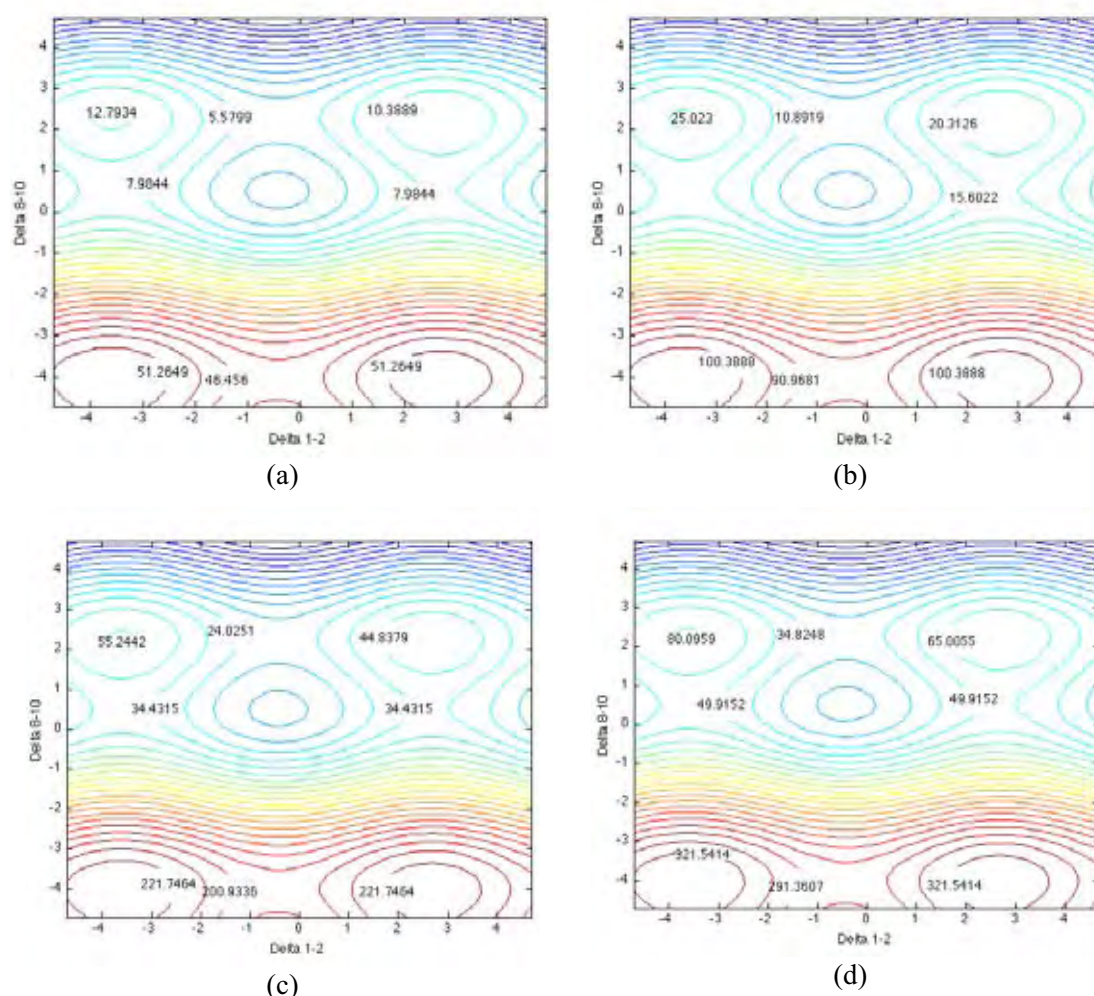


Fonte: Elaboração do próprio autor

No instante inicial da falta, a máquina 8 apresentou maior aceleração, enquanto que a máquina 10, menor aceleração, o que é naturalmente esperado, uma vez a máquina 10 representa um conjunto de máquinas do sistema New York e tem a sua inércia consideravelmente maior do que as demais máquinas do sistema. Assim, a entrada do controlador suplementar será dada pela variação da velocidade angular do par de máquinas 8-10.

Os diferentes ajustes dos controles aqui dispostos proporcionam um considerável acréscimo na cordilheira energética, proporcionando maior dificuldade de a trajetória abandonar o vale energético. Nas ilustrações da Figura 39, é possível observar o acréscimo das cordilheiras providas da compensação dinâmica do SVC.

Figura 39 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-2 e 8-10 para diferentes ganhos dos controladores (a)  $k_{svc} = 0,0$  (b)  $k_{svc} = 1$  (c)  $k_{svc} = 1$  e  $k_{esp} = 0,3$  (d)  $k_{svc} = 1$  e  $k_{esp} = 0,5$



Fonte: Elaboração do próprio autor

A contribuição para estabilidade do sistema com a elevação das cordilheiras energéticas fica evidente quando comparadas com o tempo crítico que distingue a estabilidade e instabilidade do sistema. Na Quadro 6 são relacionadas o valores das alturas dos passos energéticos com os tempos críticos.

Quadro 6 - Magnitude do passo energético comparado ao tempo crítico de eliminação da falta.

| <b>Ajuste</b>       | <b>Tempo crítico de eliminação da falta (s)</b> |
|---------------------|-------------------------------------------------|
| Ksvc 0,0            | 0,617 – 0,618                                   |
| Ksvc 1,0            | 0,624 – 0,625                                   |
| Ksvc 2,0            | 0,63 – 0,64                                     |
| Ksvc 1,0 + Kesp 0,3 | 0,64 – 0,65                                     |
| Ksvc 1,0 + Kesp 0,5 | 0,65 – 0,66                                     |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com um ajuste adequado dos controles de tensão feito pelo FACTS SVC, é possível contribuir para a melhora da estabilidade do sistema. A lei de controle do SVC, quando equipado com controle suplementar, como proposto nestas simulações, pode-se contribuir positivamente, exigindo menores valores de ganho do controle de tensão. Suas contribuições atuam na modificação do relevo energético, proporcionando maior dificuldade no caminho de a trajetória transpor as cordilheiras energéticas.



## Capítulo 7

### Conclusão e sugestões para trabalhos futuros

Os estudos aqui realizados evoluíram no sentido de proporcionar melhores condições de análise de estabilidade transitória no sistema elétrico de potência considerando o sistema multimáquinas com compensação em derivação proveniente do SVC (*Static Var Compensator*).

A efetiva contribuição do SVC quando alocado em condições ideais, como encontrado em JOHNS e SONG, 1999 com um exemplo de duas máquinas, proporciona melhores condições de estabilidade e auxilia no fluxo de potência. No entanto, no sistema multimáquinas a sua contribuição 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 na admitância de transferência entre máquinas, que, por sua vez, exerce grande influência na capacidade de sincronização entre máquinas. A análise da correspondente contribuição proporciona avaliação do desempenho interativo entre máquinas proporcionando informações que auxiliam na escolha da localização do compensador.

Nas simulações aqui realizadas em dois sistemas testes, os controles dinâmicos de tensão no barramento de inclusão do SVC e estabilizador suplementar para mesma situação de falta, proporcionaram melhores condições de estabilidade reduzindo as amplitudes das aberturas angulares entre máquinas.

A modelagem da função energia, considerando a participação do controlador FACTS permitiu analisar a contribuição dinâmica do SVC, e, com uma certa lei de controle, evidenciou-se a sua capacidade de contribuir para o aumento do torque restaurativo no sistema multimáquinas. As ilustrações dos relevos energéticos proporcionaram compreender a devida influência nas superfícies energéticas, no sentido de dificultar o caminho da trajetória do sistema para abandonar o vale energético, e tal contribuição resulta no acréscimo do tempo crítico de eliminação da falta, assim ampliando a segurança do sistema.

A continuidade do trabalho se dará pelo estudo da viabilidade de emprego dos resultados obtidos quanto à influência da ação do SVC (ou possivelmente outra compensação em derivação) para obtenção de controle do dispositivo utilizando outros sinais de entrada, visando medidas de melhoria do desempenho transitório do sistema pela alteração da

trajetória e/ou da superfície de energia potencial. Adicionalmente, pretende-se estender os conceitos aqui estudados em outros sistemas e com a presença de diferentes FACTS, como sugestão compensador série (TCSC) e em derivação (SVC), analisando sua influência na função energia e na trajetória do sistema.

## 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**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1994. 464 p.

ARAÚJO, R. L. JR.; ARAUJO P. B. Modelo linear do sistema elétrico de potência com a inclusão do compensador estático de reativos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 14., 2002, Natal. **Anais...** Natal: [s.n.], 2002. p. 2840-2845.

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**, Piscataway, v. 83, n. 11, p. 1497-1529, 1995.

COLVARA, L. D.; ARAÚJO, S. C. B.; FESTRAITS, E. B. Stability analysis of Power system including FACTS (TCSC) effects by direct method approach. **International Journal of Electrical Power And Energy System**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 264-274, 2005.

CONG, L.; WANG, Y. HILL, D. J. Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 27, n. 2, p. 121-130, 2005.

DOMINGUES, A. F. **Aplicação de dispositivos FACTS para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência em sistemas de energia elétrica**. 2001. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

ELGERD, O. I. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica**. São Paulo: Mackron Books, 1976. p. 521-522.

HAQUE, M. H. Best location of SVC to improve first swing stability limit of a power system. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 77, n. 10, p. 1402-1409, 2006.

HINGORANI N. G. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. **Proceedings of IEEE**, Piscataway, v. 76, n. 4, p. 481-482, 1988.

HINGORANI N.G; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. New York: Wiley-IEEE Press, 2000.

HUANG, P. H.; TSENG, T. H.; DING, S. C. Power system stabilizer using local and remote signals. In: SICE ANNUAL CONFERENCE, 2008, Tokyo. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2008, p. 222-226.

HUANG, P. H.; TSENG, T. H.; KE, Y. K. Static Var compensator using remote signal. In: SICE ANNUAL CONFERENCE, 2010, Taipei. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p. 307-310.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. Special Stability Controls Working Group. Static Var compensator model for power flow and dynamic performance simulation. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 9, n. 1, p. 229-240, 1994.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE/CIGRE JOINT TASK FORCE. Definition and classification of power system stability. **Electra**, Paris, n. 208, p. 74-80, 2003.

KOWALSKI, J. et al. Application of static VAR compensation on the Southern California Edison System to improve transmission system capacity and address voltage stability issues - part 1 - planning, design and performance criteria considerations. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2006, Atlanta. **Proceedings...** New York: IEEE, 2006. p. 451-458.

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

KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability, IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n.2, p. 1387-1401, 2004.

JOHNS, A. T.; SONG, Y. H. **Flexible ac transmission systems (FACTS)**. England: The Institution of Electrical Engineers, 1999. 592 p.

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.

MACHOWSKI, J.; NELLES, D. Power system transient stability enhancement by optimal control of static VAR compensators. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 411-421, 1992.

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.

NASSIF, A. B. **Análise da estabilidade de ângulo e de tensão de sistemas elétricos de potência sujeitos a pequenas perturbações**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de Campinas, Campinas, 2004.

NOROOZIAN, M.; ANDERSSON, G. Damping of power system oscillations by use controllable components. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 2046-2054, 1994.

PADIYAR, K. R.; IMMANUEL, V. Modelling of SVC for stability evaluation using structure preserving energy function. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 16, n. 5, p. 339-348, 1994.

PADIYAR, K. R. **Power system dynamics and control**. New York: John Wiley, 1996.

PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements: a historical overview. In: IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION: Asia Pacific, 2002, Yokohama. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2002. v. 1, p. 476-479.

PAI, M. A. **Power system stability: analysis by direct of Lyapunov**. Amsterdam: North Holland, 1981. 251 p.

RAJIV, K. V.; AUDDY, S. Mitigation of subsynchronous resonance by SVC using PMU-Acquired Remote Generator Speed. In: IEEE ON POWER INDIA CONFERENCE, 2006, New Delhi. **Proceedings...** New York: IEEE, 2006. 8 p.

SADEK, M. Z. E. Static VAR compensators for reducing energy losses in large industrial loads. In: AL-AZHAR ENGINEERING FIRST CONFERENCE, Cairo. **Proceedings...** Cairo: [s.n.], 1989. p. 291-304.

SAUER, P. W.; PAI, M. A. **Power system dynamics and stability**. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.

TABRIZI, M. A.; RADMAN, G. PMU-Based Multi-Input SVC supplementary controller for damping inter-area oscillation. **IEEE Transaction on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 1123 -1134, 2004.

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 - DRPT, 2000, London. **Proceedings...** New York: IEEE, 2000. p. 361-365.

WANG, H. F.; SWIFT, F. J. Capability of the Static Var compensator in damping power system oscillations. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 143, n. 4, p. 353-358, 1996.

WATANABE, E. H. et al. Tecnologia FACTS – tutorial. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39-55, 1998.

ZHOU, E. Z. Application of Static Var Compensators to increase power system damping. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 8, n. 2, p. 655-661, 1993.

### Anexo A - Dados do sistema Kundur, 4 geradores

| Dados de Linha |        |         |         |        |         |        |
|----------------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|
| Linha          | Início | Termino | Z série |        | Y shunt |        |
| 1              | 1      | 5       | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000  | 0,0000 |
| 2              | 2      | 6       | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000  | 0,0000 |
| 3              | 3      | 11      | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000  | 0,0000 |
| 4              | 4      | 10      | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000  | 0,0000 |
| 5              | 5      | 6       | 0,0025  | 0,0000 | 0,0000  | 0,0437 |
| 6              | 6      | 7       | 0,0010  | 0,0000 | 0,0000  | 0,0175 |
| 7              | 7      | 8       | 0,0110  | 0,0000 | 0,0000  | 0,1925 |
| 8              | 7      | 8       | 0,0110  | 0,0000 | 0,0000  | 0,1925 |
| 9              | 8      | 9       | 0,0110  | 0,0000 | 0,0000  | 0,1925 |
| 10             | 8      | 9       | 0,0110  | 0,0000 | 0,0000  | 0,1925 |
| 11             | 9      | 10      | 0,0100  | 0,0000 | 0,0000  | 0,0175 |
| 12             | 10     | 11      | 0,0250  | 0,0000 | 0,0000  | 0,0437 |

| Especificação de potencia e de tensão |         |          |            |         |                 |           |
|---------------------------------------|---------|----------|------------|---------|-----------------|-----------|
| Barra                                 | Nome    | Tipo     | Pot. Barra |         | Tensão na Barra |           |
|                                       |         |          | Ativa      | Reativa | Modulo          | Arg (gra) |
| 1                                     | Barra1  | PV       | 1,000      | 0,000   | 1,03            | 0,000     |
| 2                                     | Barra2  | PV       | 1,000      | 0,000   | 1,01            | 0,000     |
| 3                                     | Barra3  | B. Folga | ---        | ---     | 1,03            | 0,000     |
| 4                                     | Barra4  | PV       | 0,5767     | 0,000   | 1,01            | 0,000     |
| 5                                     | Barra5  | PQ       | 0,000      | 0,000   | 0,000           | 0,000     |
| 6                                     | Barra6  | PQ       | 0,00       | 0,000   | 0,000           | 0,000     |
| 7                                     | Barra7  | PQ       | -1,0744    | -0,111  | 0,000           | 0,000     |
| 8                                     | Barra8  | PQ       | 0,000      | 0,0469  | 0,000           | 0,000     |
| 9                                     | Barra9  | PQ       | -1,9633    | -0,2778 | 0,000           | 0,000     |
| 10                                    | Barra10 | PQ       | 0,000      | 0,0469  | 0,000           | 0,000     |
| 11                                    | Barra11 | PQ       | 0,000      | 0,0000  | 0,000           | 0,000     |

**Dados de máquina**

| <b>Máq</b> | <b>n.<br/>barra</b> | <b>Xd</b> | <b>Xld</b> | <b>M</b> | <b>D</b> | <b>Tld0</b> | <b>Tlq0</b> | <b>Kr</b> | <b>Tr</b> | <b>Efdmax</b> | <b>Efdmin</b> |
|------------|---------------------|-----------|------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------------|---------------|
| 1          | 1                   | 0,300     | 0,300      | 0,0345   | 0        | 8           | 0,4         | 25        | 0,1       | 5,0           | -5,0          |
| 2          | 2                   | 0,300     | 0,300      | 0,0345   | 0        | 8           | 0,4         | 25        | 0,1       | 5,0           | -5,0          |
| 3          | 3                   | 0,300     | 0,300      | 0,0328   | 0        | 8           | 0,4         | 25        | 0,1       | 5,0           | -5,0          |
| 4          | 4                   | 0,300     | 0,300      | 0,0328   | 0        | 8           | 0,4         | 25        | 0,1       | 5,0           | 5,0           |

**Anexo B - Dados do sistema New England, 10 geradores**

| <b>Dados de Linha</b> |               |                |                |        |                |        |
|-----------------------|---------------|----------------|----------------|--------|----------------|--------|
| <b>Linha</b>          | <b>Início</b> | <b>Termino</b> | <b>Z série</b> |        | <b>Y shunt</b> |        |
| 1                     | 30            | 31             | 0,0035         | 0,0411 | 0,000          | 0,6987 |
| 2                     | 30            | 10             | 0,0010         | 0,0250 | 0,000          | 0,7500 |
| 3                     | 31            | 32             | 0,0013         | 0,0151 | 0,000          | 0,2572 |
| 4                     | 31            | 25             | 0,0070         | 0,0086 | 0,000          | 0,1460 |
| 5                     | 32            | 33             | 0,0000         | 0,0181 | 0,000          | 0,2214 |
| 6                     | 32            | 18             | 0,0011         | 0,0133 | 0,000          | 0,2138 |
| 7                     | 33            | 34             | 0,0008         | 0,0128 | 0,000          | 0,1342 |
| 8                     | 33            | 14             | 0,0008         | 0,0129 | 0,000          | 0,1382 |
| 9                     | 34            | 35             | 0,0002         | 0,0026 | 0,000          | 0,0434 |
| 10                    | 34            | 37             | 0,0008         | 0,0112 | 0,000          | 0,1476 |
| 11                    | 35            | 36             | 0,0006         | 0,0092 | 0,000          | 0,1130 |
| 12                    | 35            | 11             | 0,0007         | 0,0082 | 0,000          | 0,1389 |
| 13                    | 36            | 37             | 0,0004         | 0,0046 | 0,000          | 0,0780 |
| 14                    | 37            | 38             | 0,0023         | 0,0363 | 0,000          | 0,3804 |
| 15                    | 38            | 10             | 0,0010         | 0,0250 | 0,000          | 1,2000 |
| 16                    | 39            | 11             | 0,004          | 0,0043 | 0,000          | 0,0729 |
| 17                    | 39            | 13             | 0,0004         | 0,0043 | 0,000          | 0,729  |
| 18                    | 13            | 14             | 0,0009         | 0,0101 | 0,000          | 0,1723 |
| 19                    | 14            | 15             | 0,0018         | 0,0217 | 0,000          | 0,3660 |
| 20                    | 15            | 16             | 0,0009         | 0,0094 | 0,000          | 0,1710 |
| 21                    | 16            | 17             | 0,0007         | 0,0089 | 0,000          | 0,1342 |
| 22                    | 16            | 19             | 0,0016         | 0,0195 | 0,000          | 0,3040 |
| 23                    | 16            | 21             | 0,0008         | 0,0135 | 0,000          | 0,2548 |
| 24                    | 16            | 24             | 0,0003         | 0,0059 | 0,000          | 0,0680 |
| 25                    | 17            | 18             | 0,0007         | 0,0082 | 0,000          | 0,1319 |
| 26                    | 17            | 27             | 0,0013         | 0,0173 | 0,000          | 0,3216 |
| 27                    | 21            | 22             | 0,0008         | 0,0140 | 0,000          | 0,2565 |
| 28                    | 22            | 23             | 0,0006         | 0,0096 | 0,000          | 0,1846 |
| 29                    | 23            | 24             | 0,0022         | 0,0350 | 0,000          | 0,3610 |
| 30                    | 25            | 26             | 0,0032         | 0,0323 | 0,000          | 0,5130 |
| 31                    | 26            | 27             | 0,0014         | 0,0147 | 0,000          | 0,2396 |
| 32                    | 26            | 28             | 0,0043         | 0,0474 | 0,000          | 0,7802 |



|    |    |    |        |        |        |        |
|----|----|----|--------|--------|--------|--------|
| 33 | 26 | 29 | 0,0057 | 0,0625 | 0,000  | 1,0290 |
| 34 | 28 | 29 | 0,0014 | 0,0151 | 0,000  | 0,2490 |
| 35 | 12 | 11 | 0,0016 | 0,0435 | 0,000  | 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 | 0,2000 | 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 | 40 | 10 | 0,0000 | 0,0010 | 0,000  | 0,0000 |

| Especificação de potencia e de tensão |         |          |            |         |                 |           |
|---------------------------------------|---------|----------|------------|---------|-----------------|-----------|
| Barra                                 | Nome    | Tipo     | Pot. Barra |         | Tensão na Barra |           |
|                                       |         |          | Ativa      | Reativa | Modulo          | Arg (gra) |
| 1                                     | Barra1  | PV       | 2,500      | 0,8989  | 1,0000          | 0,0000    |
| 2                                     | Barra2  | B. Folga | ---        | ---     | 1,0000          | 0,0000    |
| 3                                     | Barra3  | PV       | 6,5000     | 2,5810  | 1,0000          | 0,0000    |
| 4                                     | Barra4  | PV       | 6,3200     | 1,4190  | 1,0000          | 0,0000    |
| 5                                     | Barra5  | PV       | 5,0800     | 1,3300  | 1,0000          | 0,0000    |
| 6                                     | Barra6  | PV       | 6,5000     | 1,9460  | 1,0000          | 0,0000    |
| 7                                     | Barra7  | PV       | 5,6000     | 1,3300  | 1,0000          | 0,0000    |
| 8                                     | Barra8  | PV       | 5,4000     | 3,6990  | 1,0000          | 0,0000    |
| 9                                     | Barra9  | PV       | 8,3000     | 6,6320  | 1,0000          | 0,0000    |
| 10                                    | Barra10 | PQ       | -12,1400   | -2,500  | 0,0000          | 0,0000    |
| 11                                    | Barra11 | PQ       | 0,0000     | 0,0000  | 0,0000          | 0,0000    |
| 12                                    | Barra12 | PQ       | -0,0800    | -0,8800 | 0,0000          | 0,0000    |
| 13                                    | Barra13 | PQ       | 0,0000     | 0,0000  | 0,0000          | 0,0000    |
| 14                                    | Barra14 | PQ       | 0,0000     | 0,0000  | 0,0000          | 0,0000    |
| 15                                    | Barra15 | PQ       | -3,2000    | 2,3300  | 0,0000          | 0,0000    |
| 16                                    | Barra16 | PQ       | -3,2900    | -0,3230 | 0,0000          | 0,0000    |

|    |         |    |         |         |        |        |
|----|---------|----|---------|---------|--------|--------|
| 17 | Barra17 | PQ | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000 |
| 18 | Barra18 | PQ | -1,5800 | -0,3000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 19 | Barra19 | PQ | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000 |
| 20 | Barra20 | PQ | -6,2800 | -1,0300 | 0,0000 | 0,0000 |
| 21 | Barra21 | PQ | -2,7400 | -1,1500 | 0,0000 | 0,0000 |
| 22 | Barra22 | PQ | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000 |
| 23 | Barra23 | PQ | -2,7500 | -0,8500 | 0,0000 | 0,0000 |
| 24 | Barra24 | PQ | -3,0860 | 0,9200  | 0,0000 | 0,0000 |
| 25 | Barra25 | PQ | -2,2400 | -0,4720 | 0,0000 | 0,0000 |
| 26 | Barra26 | PQ | -1,3900 | -0,1700 | 0,0000 | 0,0000 |
| 27 | Barra27 | PQ | -2,8100 | -0,7550 | 0,0000 | 0,0000 |
| 28 | Barra28 | PQ | -2,0600 | -0,2760 | 0,0000 | 0,0000 |
| 29 | Barra29 | PQ | -2,8350 | -0,2690 | 0,0000 | 0,0000 |
| 30 | Barra30 | PQ | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000 |
| 31 | Barra31 | PQ | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000 |
| 32 | Barra32 | PQ | -3,2200 | -0,0200 | 0,0000 | 0,0000 |
| 33 | Barra33 | PQ | -5,0000 | -1,8400 | 0,0000 | 0,0000 |
| 34 | Barra34 | PQ | 0,0000  | 3,8480  | 0,0000 | 0,0000 |
| 35 | Barra35 | PQ | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000 |
| 36 | Barra36 | PQ | -2,3300 | -0,8400 | 0,0000 | 0,0000 |
| 37 | Barra37 | PQ | -5,2200 | -1,7600 | 0,0000 | 0,0000 |
| 38 | Barra38 | PQ | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000 |
| 39 | Barra39 | PQ | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000 | 0,0000 |
| 40 | Barra40 | PV | 10,000  | 2,0660  | 1,0000 | 0,0000 |

### Dados de máquina

| Máq | n.<br>barra | Xd     | Xld    | M      | D      | Tld0   | Tlq0  | Kr  | Tr   | Efdmax | Efdmin |
|-----|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-----|------|--------|--------|
| 1   | 1           | 0,0310 | 0,0310 | 0,2228 | 0,0530 | 10,200 | 1,00  | 100 | 0,01 | 5,00   | -5,00  |
| 2   | 2           | 0,0697 | 0,0697 | 0,1607 | 0,0258 | 6,5600 | 1,5   | 100 | 0,01 | 5,00   | -5,00  |
| 3   | 3           | 0,0531 | 0,0531 | 0,1899 | 0,0301 | 5,70   | 1,5   | 100 | 0,01 | 5,00   | -5,00  |
| 4   | 4           | 0,0436 | 0,0436 | 0,1517 | 0,0246 | 6,56   | 1,5   | 100 | 0,01 | 5,00   | -5,00  |
| 5   | 5           | 0,1320 | 0,1320 | 0,1379 | 0,0224 | 5,40   | 0,44  | 100 | 0,01 | 5,00   | -5,00  |
| 6   | 6           | 0,0500 | 0,0500 | 0,1846 | 0,0299 | 7,33   | 0,400 | 100 | 0,01 | 5,00   | -5,00  |

|    |    |        |        |        |        |        |       |     |      |      |       |
|----|----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-----|------|------|-------|
| 7  | 7  | 0,0490 | 0,0490 | 0,1401 | 0,0227 | 5,66   | 1,5   | 100 | 0,01 | 5,00 | -5,00 |
| 8  | 8  | 0,0570 | 0,0570 | 0,1289 | 0,0209 | 6,70   | 0,41  | 100 | 0,01 | 5,00 | -5,00 |
| 9  | 9  | 0,0570 | 0,0570 | 0,1839 | 0,0297 | 4,7900 | 1,96  | 100 | 0,01 | 5,00 | -5,00 |
| 10 | 10 | 0,005  | 0,005  | 2,6525 | 0,0362 | 7,000  | 0,700 | 100 | 0,01 | 5,00 | -5,00 |