

**IVAIR JOÃO SANTOS LOURINHO**

**ESTUDO DOS ÍNDICES DE ESTABILIDADE E  
CONTROLABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS**

**FLORIANÓPOLIS**

**2001**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**ESTUDO DOS ÍNDICES DE ESTABILIDADE E  
CONTROLABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

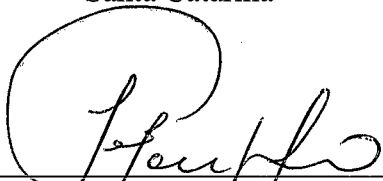
**IVAIR JOÃO SANTOS LOURINHO**

Florianópolis, Abril de 2001

# ESTUDO DOS ÍNDICES DE ESTABILIDADE E CONTROLABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS

IVAIR JOÃO SANTOS LOURINHO

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Potência*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’



---

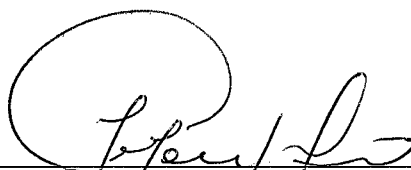
Prof. Jorge Mário Campagnolo, D.Sc.  
Orientador



---

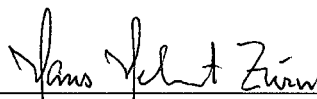
Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



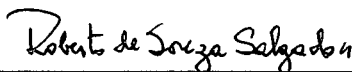
---

Prof. Jorge Mário Campagnolo, D.Sc.  
Orientador



---

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.



---

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.

*Aos meus pais Iran e Miraci Lourinho a quem devo toda minha formação pessoal e profissional.*

*Eis aqui mais um fruto de vossos esforços.*

*À Deus, Senhor de todos os meu passos.*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Jorge Mário Campagnolo por acreditar em meu trabalho e pela orientação prestada no desenvolvimento do mesmo.

Aos professores do LABSPOT que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação acadêmica; em especial aos professores Hans Helmut Zürn e Roberto de Souza Salgado por suas contribuições para este trabalho.

À Karina Barbosa, minha eterna Princesa, por seu constante incentivo e companheirismo, mesmo que de forma dolorosa mas fundamentais em todos os momentos.

Aos Amigos de Belém, pessoas responsáveis pelo suporte familiar a mim concedido, Hallthmann Reis e Sílvio Rafael que iniciaram esta árdua jornada comigo, e em especial aos amigos Luiz Magno, por seu constante incentivo, apoio e compreensão, e Michelle Wingham por quem tenho profundo respeito e afeição.

Aos colegas do LABSPOT André Colussi, Andrea, Angela Agudelo, Antônio Sertich, Antônio Pedraza, Carlos Eduardo, Carlos Moyano, Carlos Silva, Carolina Affonso, Edson Cunha, Elizete Lourenço, Fábio Vieira, Ghendy Cardoso, Joni Coser, Luciano Barbosa, Luciano Colzani, Nicole Orfali, Nolasco Palacio, Paulo Fritzen, Sérgio Villamizar, Thelma e Wadaed Uturbey que sempre mantiveram nosso ambiente de trabalho alegre e em perfeita harmonia.

Aos Amigos conhecidos em Floripa que fizeram dos momentos de repouso a maior descontração, em especial ao Prof. André, Everton Silva, Gersina, Liane Ramos, Luís Maurício, Merlin Bandeira, Sandra Buzini, Sandro, irmãos Tuji, Verônica Menezes e demais integrantes da LILITUR & VERO'S Eventos.

À Denise Meireles por sua grande amizade e incentivo.

À grande amiga Daniela Pereira que mesmo à distância, sempre me incentivou e me alegrou nos momentos mais difíceis.

Ao meu irmão Iran Júnior por sua compreensão, apoio e responsabilidade.

Aos Administradores da rede do LABSPOT que passaram por aqui enquanto estive desenvolvendo este trabalho, em especial à Daniel Dotta, responsável em recuperar meus arquivos por inúmeras vezes perdidos em momentos de pouca lucidez.

Aos funcionários Wilson Costa e Marcos de Assis, da Secretaria do PPGEEL, por seus serviços prestados, e que também são responsáveis pela descontração das terças-feiras à noite, com o famoso "Futebol entre Amigos".

À UFSC, sob a representação do LABSPOT, pela infra-estrutura oferecida.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **ESTUDO DOS ÍNDICES DE ESTABILIDADE E CONTROLABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS**

**Ivair João Santos Lourinho**

Abril / 2001

Orientador : Jorge Mário Campagnolo, D.Sc.

Área de Concentração : Sistemas de Potência

Palavras Chave : Estabilidade de tensão, Autovalores, Modelagem do Sistema de Potência.

Número de Páginas : 78

Este trabalho apresenta o estudo do fenômeno da estabilidade de tensão baseado na análise de índices de estabilidade e controlabilidade de tensão propostos para um modelo de sistemas de potência multimáquinas linearizado. A representação do sistema de potência é feita por um modelo genérico proposto por Vournas, válido para sistema com ' $m$ ' geradores síncronos. Os índices de estabilidade e controlabilidade são determinados através do cálculo dos autovalores associados aos terminais dos geradores da rede elétrica via um algoritmo de busca rápida. Neste caso, o método das iterações simultâneas *bi-iteration*, que tem como vantagem o cálculo somente dos autovalores dominantes e, conseqüentemente, baixo tempo computacional requerido para estes cálculos. Estes autovalores são obtidos de duas matrizes genéricas, uma relacionada à estabilidade e outra, à controlabilidade e tensão, formadas a partir do modelo linearizado do sistema. Para validar a metodologia e as implementações apresentadas foram realizadas simulações computacionais em dois sistemas teste clássicos para o estudo de estabilidade, onde foram consideradas algumas das contingências mais comuns que ocorrem no sistema de energia elétrica. No sentido de avaliar o comportamento do perfil de tensão, bem como, garantir as hipóteses levantadas para a determinação do modelo, foram utilizados três programas consagrados na área de sistema de potência: ANAREDE, ANATEM e PACDYN, do CEPTEL. Os resultados obtidos para os índices de estabilidade e controlabilidade de tensão mostraram-se coerentes e satisfatórios no que se refere ao comportamento dos sistemas, apresentando-se como uma ferramenta adequada para análise do planejamento e operação do sistema de potência.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **A STUDY FOR VOLTAGE STABILITY AND CONTROLLABILITY INDICES IN MULTIMACHINES POWER SYSTEMS**

**Ivair João Santos Lourinho**

April / 2001

Advisor : Jorge Mário Campagnolo, D.Sc.

Area of Concentration : Power Systems

Keywords : Voltage stability, Eigenvalues, Power System Modeling.

Number of Pages : 78

This work presents a study of the voltage stability phenomenon based on the analysis of stability and controllability indices considering a linearized model of multimachine power systems. The power system is represented by a generic model developed by Vournas, valid for a system of ' $m$ ' synchronous generators. The stability and controllability indices are related to the eigenvalues associates with the generator terminals of the electric network. The eigenvalues are computed through an efficient algorithm. In this case, the method of simultaneous bi-iteration is used, which has the advantage of computing only the dominant eigenvalues, decreasing the computational cost. The eigenvalues are calculated from two generic matrices, one related to voltage stability and the other one, to the voltage controllability. These matrices are constructed from the linearized system model. To validate the methodology and implementations presented, a computational simulation with two classic systems has been tested for the stability study, considering some of the more usual contingencies to occur in the electric energy system. To evaluate the voltage profile behavior, as well as to assure the hypotheses assumed to determine the model, three usual programs of area power system have been used: ANAREDE, ANATEM and PACDYN, of CEPTEL. The results obtained for the voltage stability and controllability indices are considered to be coherent and satisfactory for the systems behavior, thus presenting themselves as a good tool for analysis of planning and operation in power systems.



# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 BREVE HISTÓRICO .....	2
1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO .....	7
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	8
1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	9
<b>2 O PROBLEMA DA ESTABILIDADE .....</b>	<b>11</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	11
2.2 RELAÇÃO ENTRE A ESTABILIDADE ANGULAR E A ESTABILIDADE DE TENSÃO.....	12
2.3 CONCEITOS E DEFINIÇÕES BÁSICAS.....	14
2.3.1 <i>Estabilidade de Tensão</i> .....	14
2.3.2 <i>Estabilidade de Tensão à Pequenas Perturbações</i> .....	14
2.3.3 <i>Instabilidade de Tensão</i> .....	15
2.3.4 <i>Colapso de Tensão</i> .....	15
2.4 ESTABILIDADE, INSTABILIDADE E COLAPSO DE TENSÃO .....	15
2.5 TIPOS DE ABORDAGEM .....	18
2.5.1 <i>Abordagem Estática</i> .....	18
2.5.2 <i>Abordagem Dinâmica</i> .....	19
2.6 CONSIDERAÇÕES.....	19
<b>3 MODELAGEM DO SISTEMA.....</b>	<b>21</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	21
3.2 MODELO LINEARIZADO MULTIMÁQUINAS.....	22
3.2.1 <i>Equações Básicas</i> .....	22
3.2.2 <i>Representação do Modelo em Diagrama de Blocos</i> .....	24

3.2.3	<i>Constantes Generalizadas do Modelo</i> .....	26
3.3	ALGORITMO PARA MONTAGEM DO MODELO.....	27
3.4	CONSIDERAÇÕES.....	29
<b>4</b>	<b>ÍNDICES DE ESTABILIDADE E CONTROLABILIDADE</b> .....	<b>30</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	30
4.2	MÉTODO DE CÁLCULO DOS AUTOVALORES DOMINANTES E SEUS AUTOVETORES.....	31
4.3	ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO.....	34
4.4	ÍNDICE DE CONTROLABILIDADE DE TENSÃO.....	37
4.5	ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO.....	39
4.6	CONSIDERAÇÕES.....	41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS DO SISTEMA TESTE</b> .....	<b>42</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	42
5.2	SISTEMA DE 9 BARRAS.....	43
5.3	SISTEMA DE 39 BARRAS.....	47
5.4	CONSIDERAÇÕES.....	50
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>52</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
<b>APÊNDICE A: FORMULAÇÃO DO MODELO LINEARIZADO PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS</b> .....		<b>58</b>
<b>APÊNDICE B: MODELO BÁSICO DO GERADOR SÍNCRONO</b> .....		<b>63</b>
<b>APÊNDICE C: DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS</b> .....		<b>67</b>
<b>APÊNDICE D: DADOS DOS SISTEMAS TESTE</b> .....		<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....		<b>74</b>

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 _ DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O MODELO LINEARIZADO DO SISTEMA DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS. ....	24
FIGURA 3.2 _ FLUXOGRAMA PARA A MODELAGEM DO SISTEMA DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS LINEARIZADO. ....	28
FIGURA 4.1 _ FLUXOGRAMA DO ALGORITMO ISBI SEQUENCIAL. ....	32
FIGURA 4.2 _ FLUXOGRAMA PARA O CÁLCULO DOS ÍNDICES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO. ....	40
FIGURA 5.1 : DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA TESTE ANDERSON.....	43
FIGURA 5.2 : DESEMPENHO DO MÓDULO DA TENSÃO NA BARRA 5 P/ O SISTEMA TESTE ANDERSON & FOUAD.....	46
FIGURA 5.3 : SISTEMA TESTE NEW ENGLAND DE 39 BARRAS.....	47
FIGURA 5.4 : DESEMPENHO DO MÓDULO DA TENSÃO NA BARRA 8 P/ O SISTEMA NEW ENGLAND.....	49
FIGURA B.1 _ CIRCUITO EQUIVALENTE P/ O MODELO 2 DO GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS SALIENTES.....	64
FIGURA B.2 _ DIAGRAMA FASORIAL P/ O MODELO 2 DA MÁQUINA SÍCRONA DE PÓLOS SALIENTES. ....	66
FIGURA C.1 _ DIAGRAMA FASORIAL P/ DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DA MÁQUINA SÍCRONA.....	68

# LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 : MODOS DE OSCILAÇÃO CRÍTICO DO SISTEMA ANDERSON P/ A SEQUÊNCIA DE EVENTOS CONSIDERADA. ....	44
TABELA 5.2 : SEQUÊNCIA DE EVENTOS P/ O SISTEMA ANDERSON. ....	45
TABELA 5.3 : MODOS DE OSCILAÇÃO CRÍTICO DO SISTEMA NEW ENGLAND P/ A SEQUÊNCIA DE EVENTOS CONSIDERADA. ....	48
TABELA 5.4 : SEQUÊNCIA DE EVENTOS P/ O SISTEMA NEW ENGLAND. ....	48

# LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	: matriz de estados do sistema.
$B$	: matriz de entrada do sistema.
$D$	: coeficiente de amortecimento natural da máquina síncrona, em p.u.
$E_{fd}$	: tensão de excitação de campo, em p.u.
$E'_q$	: tensão interna transitória do eixo q proporcional ao enlace do fluxo de campo da máquina síncrona, em p.u.
$f^{(*)}, g^{(*)}$	: funções contínuas e diferenciáveis.
$H$	: constante de inércia da máquina síncrona, em s.
$i_{fd}$	: corrente de campo, em p.u.
$i_d, i_q$	: corrente proporcional aos eixos d e q, em p.u.
$J_1$ à $J_4$	: submatrizes da matriz Jacobiana $J$ .
$K_E$	: ganho do regulador de tensão, em p.u.
$M_1$ à $M_6$	: matrizes de dimensão $m \times m$ que representam os coeficientes de linearização do modelo da máquina síncrona.
$P_m, P_e$	: Potências mecânica e elétrica de entrada da máquina síncrona.
$T'_{do}$	: constante de tempo de circuito aberto da máquina síncrona, em s.
$T_d$	: matriz diagonal para as constantes de tempo de circuito aberto das máquinas síncronas, em p.u.
$T_E$	: constante de tempo do regulador de tensão, em s.
$T_M$	: matriz diagonal para as constantes de inércia, em p.u.
$v_d, v_q$	: magnitudes de tensão proporcional aos eixos d e q, em p.u.
$V_T$	: tensão terminal da máquina síncrona, em p.u.
$V_{REF}$	: tensão de referência, em p.u.
$x$	: vetor das variáveis de estado do sistema.
$x_d, x_q$	: reatâncias síncronas dos eixos d e q da máquina síncrona, em p.u.
$x'_d$	: reatância transitória do eixo d da máquina síncrona, em p.u.
$y$	: vetor das variáveis algébricas do sistema.
$z$	: vetor das variáveis de entrada do sistema.
$\delta$	: ângulo interno da máquina síncrona, em p.u.
$\lambda_{VSM}, \lambda_{VCM}$	: autovalores encontrados para as matrizes VSM e VCM.

## Subscritos

- d,q : projeção sobre os eixos direto e de quadratura da máquina síncrona.  
t : terminal de uma barra de geração.  
o : indica o ponto de operação considerado.  
fd : refere-se aos enrolamentos de campo.

## Operadores

- 
- $\dot{x}$  : indica derivada da variável x em relação ao tempo.  
 $\partial$  : indica derivada parcial.  
 $\Delta$  : indica variação incremental de uma grandeza.  
d : indica derivada total.  
 $()^T$  : indica a transposta de um matriz.  
 $()^{-1}$  : indica a inversa de uma matriz.

## Nomeclaturas

- VSM : Voltage Stability Matrix.  
VSI : Voltage Satbility Index.  
VCM : Voltage Controllability Matrix.  
VCI : Voltage Controllability Index

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

O fenômeno da globalização econômica e produtiva, a partir do qual foram introduzidos novos processos e novas medidas estratégicas, iria modificar substancialmente o cenário até então vigente, enfocando-se, especialmente, o setor de energia elétrica. A organização deste setor, apoiado em um ambiente verticalizado, representado por grandes empresas de geração e distribuição, passou por um sensível esgotamento.

Como consequência de todo esse desgaste, o setor de energia elétrica vem sofrendo um processo de reestruturação em vários países. Este processo tem como pontos principais a desverticalização das empresas, discriminando as funções de geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica; e a implantação de um modelo comercial competitivo, abrindo espaço para produtores independentes que queiram comercializar seu produto com qualidade e custos aceitáveis para o consumidor

Associado a este processo de reestruturação existe ainda o crescimento contínuo nas exigências de bem-estar e lazer da população. Face a este conjunto de exigências, o fornecimento de energia elétrica com níveis adequados de qualidade e confiabilidade tornaram-se uma das principais preocupações dos engenheiros e pesquisadores das empresas de serviço deste setor. Desse modo, a indústria elétrica caracteriza-se hoje pela necessidade de atender a uma demanda crescente de carga, entretanto, com restrições na expansão do sistema de transmissão devido a restrições econômicas e ao impacto ambiental.

Como conseqüência dessa necessidade e suas restrições, os sistemas de potência têm operado muito próximo ao limite de sua capacidade, ocasionando condições críticas de segurança, inclusive no que diz respeito à estabilidade de tensão. Portanto, dadas estas condições "estressadas" de operação (HILL, 1993), tem se tornado cada vez maior a ocorrência da instabilidade e muitas vezes do conseqüente colapso de tensão. Dentre os casos ocorridos pode-se citar os incidentes da Suécia, em dezembro de 1983, e o da Inglaterra, em maio de 1986, que provocou instabilidade no sistema durante 5 minutos e 50 segundos, respectivamente, sendo que no segundo caso a instabilidade foi seguida de um colapso de tensão (CIGRE, 1993).

Atualmente, mesmo com o processo de desregulamentação do setor de energia elétrica, onde o objetivo principal é o fornecimento de energia com qualidade e preços competitivos, a manutenção do perfil de tensão de um sistema, considerado como um serviço ancilar no ambiente desregulamentado, continua sendo uma tarefa complexa, porém extremamente necessária. Desta necessidade advém a importância do estudo do fenômeno da estabilidade de tensão. A seguir apresenta-se um breve histórico sobre as pesquisas já realizadas dentro da área de estabilidade de tensão.

## **1.1 BREVE HISTÓRICO**

O problema do colapso de tensão é considerado de grande interesse no planejamento e operação de Sistemas de Energia Elétrica, a fim de evitar problemas de instabilidade.

A instabilidade em um sistema de potência pode se manifestar de diferentes formas, dependendo da configuração do sistema e do seu modo de operação; pois a mesma é influenciada pelas características do sistema de transmissão, geradores, cargas e compensadores estáticos de potência reativa.



A instabilidade pode resultar da tentativa do sistema em operar além do máximo nível permitido pelos geradores. Isto deve-se ao fato do aumento contínuo na demanda sem um correspondente aumento na capacidade de transmissão do sistema de energia elétrica que é limitado devido a restrições econômicas e ao impacto ambiental. Com o desbalanceamento provocado entre geração e consumo de energia elétrica o sistema apresenta um desequilíbrio em seus fluxos de potência, e como a impedância dos componentes da rede é predominantemente reativa, torna-se necessário o fornecimento de reativos ao sistema para que este retorne ao equilíbrio. Este é um dos aspectos, talvez principal fator, que causa a instabilidade: a inabilidade do sistema encontrar uma fonte de potência reativa para suprir a demanda.

As primeiras pesquisas relacionadas ao problema da estabilidade de tensão surgiram em 1975 quando Venikov e outros apresentaram um método para estimar a estabilidade dinâmica de um sistema elétrico de potência, sob certas condições de operação (VENIKOV, 1975), entre elas, potência ativa e módulo da tensão nas barras de geração especificadas. Este método foi baseado na análise da matriz Jacobiana do fluxo de potência via método Newton\_Raphson convencional. Os autores observaram uma relação existente entre a singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência via método de Newton convencional e a singularidade da matriz dinâmica de estado do sistema, e propuseram a mudança de sinal no determinante da matriz Jacobiana como uma estimativa de estabilidade.

Em 1983, Tamura e outros estudaram uma relação entre o colapso de tensão e a singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência (TAMURA, 1983), e propuseram a proximidade das múltiplas soluções do fluxo de potência como um índice para a instabilidade de tensão, determinando qual a tensão, do par de tensões obtidas na solução, é estável para o sistema. Em 1986, Thomas e Tiranuchit também apresentaram uma proposta utilizando o mínimo valor singular da matriz Jacobiana como um índice de estabilidade de tensão global (THOMAS, 1986), em regime permanente. Dois anos mais tarde, em 1988, estes mesmos autores sugeriram técnicas para melhorar a condição de operação do sistema com relação a estes índices pela adição de capacitores na rede (TIRANUCHIT, 1988) para o suporte de reativos; neste mesmo trabalho

apresentaram, também, uma técnica que redistribui o sistema de geração para uma condição de operação ótima baseado nos índices obtidos pela singularidade da matriz Jacobiana via método da continuação.

No início da década de 90, Sauer e Pai demonstraram que qualquer conclusão baseada na singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência não é condição de suficiência para a análise do colapso ou da instabilidade de tensão (SAUER, 1990), pois esta análise não pode detectar qualquer instabilidade associada com as características das máquinas síncronas ou seus controladores. Flatabo e outros apresentaram um novo método para determinar as condições da estabilidade de tensão nos sistemas de potência, baseado em técnicas de sensibilidade considerando os limites e a capacidade de geração de potência reativa (FLATABO, 1990). O objetivo desta técnica é determinar uma relação entre as variáveis do sistema elétrico e seu carregamento, através das equações linearizadas do fluxo de potência. A distância para o colapso em termos de MVAR é usada como um critério quantitativo para determinar uma condição da estabilidade de tensão em sistemas de potência, definindo assim uma medida de segurança para o sistema.

Em 1991, Van Cutsem propôs um método para calcular a margem de potência reativa para um dado conjunto de barras de carga do sistema (VAN CUTSEM, 1991). Esta margem tem como finalidade estimar a robustez do sistema com relação ao colapso de tensão. O correspondente ponto do colapso é diretamente obtido como solução de um problema de otimização com o incremento de carga sendo a função objetiva, as cargas não otimizadas como restrições de igualdade e os limites de reativos como restrições de desigualdade.

Em 1992, Begović e Phadke estudaram os efeitos da compensação estática sob os limites da estabilidade de tensão, para diferentes cenários de cargas (BEGOVÍĆ, 1992). O mínimo valor singular da Jacobiana e o total de potência reativa gerada são utilizados como indicadores da margem de estabilidade, e os métodos de sensibilidade são utilizados para determinar a melhor localização para o suporte de reativos. Este estudo é avaliado para uma determinada classe de instabilidade, correspondente a bifurcações estáticas das equações do fluxo de potência.

Neste mesmo ano, Löf, Smed e outros apresentaram um método rápido para o cálculo do mínimo valor singular (LÖF, 1992), cujas principais vantagens estão relacionadas ao baixo tempo computacional necessário e ao número de informações requeridas das quais todas podem ser fornecidas por um simples cálculo de fluxo de potência. O método ainda utiliza técnicas de esparsidade quando aplicada a várias submatrizes derivadas da matriz Jacobiana do fluxo de potência, e fornece um bom indicador para a estabilidade estática de tensão. Cañizares, Alvarado e outros descreveram uma análise diferente, relacionando o fenômeno do colapso de tensão a um fluxo de potência modificado (CAÑIZARES, 1992). Trata-se de um método para avaliar o colapso de tensão sob o ponto de vista do aparecimento de bifurcações do tipo "sela-nó" em um sistema de potência, inclusive para análise integrada de sistemas CA/CC de modo quantitativo e qualitativo.

Ainda em 1992, Gao, Morison e Kundur discutiram a análise da estabilidade de tensão utilizando técnicas de análise modal aplicadas à matriz Jacobiana reduzida do fluxo de potência convencional (GAO, 1992). O método calcula um número específico de autovalores dominantes, e os autovetores associados aos mesmos, a partir da matriz Jacobiana reduzida aos terminais de geração, utilizando um método de iterações simultâneas. Os autovalores fornecem uma medida relativa de proximidade da instabilidade de tensão, e os respectivos autovetores associados são usados para descrever o "mode shape" e fornecer informações sobre os elementos da rede e geradores que são mais afetados pela perturbação sofrida no sistema. No ano seguinte, em 1993, estes mesmos autores, Gao, Morison e Kundur, discutiram a análise da estabilidade de tensão utilizando técnicas de abordagem estática e dinâmica (MORISON, 1993), cujo objetivo era comparar estes dois tipos de abordagem, onde concluíram que apesar da estabilidade de tensão ser um fenômeno de natureza dinâmica, e portanto, técnicas dinâmicas seriam mais precisas, os resultados obtidos sob técnicas estáticas fornecem informações de caráter conceitual consistentes para a compreensão do fenômeno.

Em 1994, Xu e Mansour estabeleceram uma relação entre o fluxo de potência utilizando técnicas estáticas e a simulação no domínio do tempo utilizando técnicas dinâmicas para a análise da estabilidade de tensão (XU,

1994). Os autores utilizam um modelo genérico de carga para representar o desempenho dinâmico das cargas agregadas ao sistema. Assim, torna-se possível entender o mecanismo do colapso de tensão através da interação das cargas dinâmicas com o fornecimento de potência da rede elétrica.

Van Cutsem e outros descreveram uma forma para análise da estabilidade de tensão a médio termo, cujo método proposto combina a simulação a médio termo, análise da estabilidade e ação corretiva dentro de uma mesma ferramenta de análise rápida e coerente, analisando tanto o aumento de carga quanto a saída de um equipamento da rede (VAN CUTSEM, 1994). Trata-se de um método conhecido como análise quase estática, que consiste em substituir as equações diferenciais que representam a dinâmica do sistema pelas correspondentes equações de equilíbrio do mesmo para a obtenção da matriz de estados. A partir desta substituição, o determinante da matriz Jacobiana do fluxo de potência é comparado com o determinante da matriz de estados ‘modificado’ para a análise da estabilidade.

Em 1995, Vournas apresentou um novo índice de estabilidade de tensão para sistemas de potência sem regulador de tensão (VOURNAS, 1995); este índice foi baseado no cálculo dos autovalores de uma matriz diferente da matriz Jacobiana do fluxo de potência, matriz esta que representa um outro modelo linearizado de um sistema de potência multimáquinas. Este modelo assemelha-se muito ao modelo máquina conectada à barra infinita, proposto por Heffron\_Phillips em 1952, mantendo as mesmas definições didáticas (HEFFRON, 1952), embora seja válido para sistemas com  $m$  máquinas. A análise da estabilidade para esta matriz, denominada de ‘Voltage Stability Matrix’ (VSM), é feita da mesma forma como na matriz Jacobiana, ou seja, analisa-se a mudança de sinal da parte real de seus autovalores. A vantagem na formulação proposta por Vournas está na velocidade de obtenção deste índice que é muito rápido, podendo ser utilizado para repetidos cálculos na análise de contingências.

Neste mesmo ano, Lee e Ajarapu apresentaram um método global para análise da estabilidade de tensão a pequenas perturbações que consiste em utilizar o cálculo do fluxo de potência pelo método da continuação em conjunto com um modelo que preserve a estrutura do sistema de potência (LEE, 1995).

Alguns aspectos dos quais se deve ressaltar deste trabalho diz respeito à inclusão de modelos, estático e dinâmico, relevantes para a estabilidade de tensão, em particular, o efeito de cargas dinâmicas e o limite de corrente na excitação do gerador são considerados. Com os resultados deste método é possível traçar e identificar todos os pontos críticos prováveis do sistema onde este muda de comportamento.

Em 1999, Wan e Ekwue propuseram um novo método para o cálculo da margem do colapso de tensão (WAN, 1999). Este método é capaz de calcular a margem de estabilidade de tensão considerando-se dois aspectos causadores do fenômeno da instabilidade: através do limite de reativos ou através de um ponto de bifurcação sela-nó. O método consiste de uma aproximação integrada (IVCM \_ *Integrated Voltage Collapse Margin*), que é baseado na combinação do método de cálculo da margem do colapso de tensão pela análise da sensibilidade com um método de otimização. Sua principal vantagem está em associar a exatidão do método de otimização com a velocidade na resposta do método de sensibilidade.

Ainda em 1999, Nativel e outros descreveram uma ferramenta para análise da estabilidade de tensão usando uma simulação rápida no domínio do tempo junto com uma simulação quase estática (NATIVEL 1999). A principal vantagem apresentada por esta combinação reflete-se no bom compromisso entre a velocidade dos cálculos obtidos pela simulação quase estática e a exatidão dos resultados obtidos pela simulação no domínio do tempo.

## 1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A estabilidade de tensão, por se tratar de um assunto ainda recente no que se refere às suas pesquisas, atraiu na década de 90 um grande número de pesquisadores interessados no problema, e portanto é o período onde surgiu o maior número de publicações, apresentando diferentes métodos de abordagem e

solução para o problema, o que representou um avanço significativo na análise e compreensão do fenômeno.

Seguindo este contexto, o Laboratório de Sistemas de Potência do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSPOT/EEL/UFSC) apresenta uma linha de pesquisa que visa aprofundar-se nos diferentes métodos e tipos de abordagem do problema da estabilidade de tensão, iniciada em 1994 com Lemos que estudou o problema da estabilidade de tensão usando uma metodologia baseada na decomposição em valores singulares, para análise estática (LEMOS, 1994), onde o mesmo utiliza o mínimo valor singular como um índice do colapso de tensão; e em seguida com Lerm que analisou o fenômeno da estabilidade de tensão baseado na análise modal da matriz de estados do sistema (LERM, 1995), dando um enfoque dinâmico para o sistema através da inclusão do comportamento dinâmico das cargas.

Dando continuidade a esta linha de pesquisa, seguindo a proposta de Vournas, onde o autor apresenta um índice de estabilidade baseado em um modelo de sistema de potência multimáquinas linearizado diferente do convencional (VOURNAS, 1995), o presente trabalho apresenta a análise da estabilidade e controlabilidade de tensão através do estudo dos autovalores obtidos via o modelo proposto por Vournas, e seus respectivos autovetores à direita e à esquerda, associados aos terminais dos geradores do sistema; fornecendo assim, informações importantes para avaliar medidas corretivas para o sistema antes que o colapso de tensão se torne inevitável.

### **1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos deste trabalho são relacionados conforme a seguir:

- apresentar um modelo linearizado para o estudo dos sistemas elétricos de potência multimáquinas diferente da matriz Jacobiana tradicional, baseado na representação em diagrama de blocos de Heffron-Phillips.

- apresentar um algoritmo seqüencial de busca rápida para o cálculo dos autovalores e autovetores dos sistemas de potência;
- determinar índices de estabilidade e controlabilidade de tensão para sistemas de potência multimáquinas através do estudo dos autovalores associados aos terminais dos geradores;

## 1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

A apresentação deste trabalho está estruturada em seis capítulos, sendo este o Capítulo 1, onde é apresentado um breve histórico informando algumas das principais referências voltadas ao problema da estabilidade de tensão, e ainda apresenta a motivação e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 são discutidos algumas definições básicas sobre estabilidade de tensão afim de manter uma convenção, para fins didáticos, em todo o contexto, bem como, explicitar a diferença entre estabilidade, colapso e instabilidade de tensão. Em seguida, neste mesmo capítulo, faz-se uma sucinta revisão dos métodos existentes para o cálculo de índices de proximidade do colapso de tensão via abordagem estática e abordagem dinâmica, onde procura-se demonstrar as vantagens e desvantagens de cada tipo de abordagem.

No Capítulo 3 é apresentado o modelo linearizado do sistema de potência multimáquina, proposto por Vournas (1978, 1983), utilizado para análise e determinação dos índices de proximidade do colapso de tensão; apresentam-se também as equações básicas para a formação do modelo, as constantes generalizadas características do modelo linearizado e o algoritmo utilizado para a implementação do mesmo.

Após a modelagem do sistema, no Capítulo 4 é apresentado o método das iterações simultâneas, seu algoritmo e fluxograma, utilizado para o cálculo dos autovalores/autovetores dominantes das matrizes obtidas a partir da formulação

do modelo. Apresenta-se em seguida a matriz de estabilidade de tensão (*VSM - Voltage Stability Matrix*), de onde é determinado o autovalor que caracteriza o índice de proximidade do colapso de tensão e seus respectivos autovetores à direita e à esquerda que indicam quais máquinas são mais afetadas pela instabilidade; neste mesmo capítulo apresenta-se a matriz de controlabilidade de tensão (*VCM - Voltage Controllability Matrix*), de onde se determina um índice de controlabilidade para o sistema. O algoritmo e fluxograma utilizado para a construção de ambas as matrizes e determinação dos índices também é apresentado.

No Capítulo 5 são apresentadas algumas aplicações para o uso destes índices de estabilidade e de controlabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência. São utilizados dois sistemas teste clássicos para estudo de estabilidade. Alguns eventos mais comuns de ocorrerem nos SEE, como aumento de carga, queda de uma (ou mais) linha de transmissão ou perda de um gerador, são estudados. Os resultados obtidos são analisados e discutidos.

Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões gerais obtidas no trabalho, enfatizando quais as vantagens e desvantagens na aplicação deste método e qual a principal contribuição do trabalho. Em seguida, algumas propostas para futuras pesquisas são apresentadas.



# **CAPÍTULO 2**

## **O PROBLEMA DA ESTABILIDADE**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

O estudo da estabilidade de sistemas de potência consiste em analisar o equilíbrio do sistema sob condições normais de operação, bem como sua capacidade de retornar a esta condição normal de operação quando na presença de algum distúrbio. A análise completa do desempenho de um sistema de potência após a ocorrência de um distúrbio pode envolver um grau de complexidade elevado, uma vez que os sistemas tendem a apresentar comportamentos diferentes para cada tipo de falta considerado.

Nestas circunstâncias, para minimizar tamanha complexidade envolvida no estudo dos sistemas de potência, torna-se comum analisar e classificar o desempenho do sistema sob diferentes aspectos. Este capítulo apresenta a relação existente entre os dois tipos de estabilidade que devem ser asseguradas para uma operação confiável: a estabilidade angular e estabilidade de tensão. Em seguida, são apresentadas algumas considerações relacionadas ao sistema que vêm simplificar a modelagem do mesmo, proporcionando a desassociação entre estes fenômenos de estabilidade considerados. Neste trabalho, o enfoque está direcionado somente no que concerne à estabilidade de tensão dos sistemas de potência, que nada mais é que um subconjunto das possíveis classificações de estabilidade dos sistemas de potência.

Para evitar facilitar a análise dos fenômenos mais freqüentes nos sistemas de potência, algumas definições básicas, assim como os diferentes métodos de abordagem, sobre estes fenômenos envolvidos no estudo da estabilidade são vistos neste capítulo afim de que se possa fixar e entender cada um deles, identificando as possíveis causas para suas ocorrências.

## **2.2 RELAÇÃO ENTRE A ESTABILIDADE ANGULAR E A ESTABILIDADE DE TENSÃO**

A energia elétrica fornecida aos consumidores tem sua qualidade avaliada considerando-se aspectos de estabilidade angular e de estabilidade de tensão. Durante o planejamento e a operação do sistema tem-se a finalidade de manter estas variáveis, ângulo e módulo da tensão nas barras, dentro dos limites aceitáveis para um fornecimento de energia contínuo e de boa qualidade.

Quando se produz uma perturbação em um sistema interligado com outros, estes reagem igualmente por sua regulação primária, já que a frequência provoca as mesmas flutuações sobre o conjunto dos sistemas interligados. Estas variações de frequência ocorrem devido ao desbalanceamento entre a potência gerada e a potência consumida. Suponha que um sistema sofra um aumento inesperado na carga. Este aumento na demanda provocará uma queda na tensão e uma conseqüente redução no valor da frequência do sistema; neste instante, a ação dos controladores do sistema tendem a agir no sentido de suprir a quantidade de ativos e reativos injetados na rede pelo aumento súbito da carga, corrigindo a magnitude de tensão e o desvio angular.

A estabilidade angular, assim como a estabilidade de tensão, é afetada pelo controle da potência reativa. Contudo, embora os problemas de estabilidade angular e de estabilidade de tensão possam estar associados, os aspectos básicos destes problemas são geralmente abordados isoladamente, isto é, considerando-se situações nas quais apenas um dos fenômenos predomina.

Esta desassociação pode ser efetuada dado que existe um forte acoplamento entre a potência ativa e o ângulo de fase da tensão, e um fraco acoplamento entre a potência ativa e o módulo da tensão; também existe um forte acoplamento entre a potência reativa e o módulo da tensão, e um fraco acoplamento entre a potência reativa e o ângulo de fase da tensão (ELGERD, 1983); válido somente para redes de extra-alta tensão (EAT) cuja relação X/R é elevada ( $\geq 5$ ).

Isso é observado considerando-se duas situações extremas para o sistema (TAYLOR, 1994):

*i*) uma máquina síncrona conectada a uma barra infinita (puramente um problema de estabilidade angular);

*ii*) uma máquina síncrona conectada a uma barra de carga assíncrona através de uma linha de transmissão (puramente um problema de estabilidade de tensão).

Assim, observa-se que a estabilidade angular é basicamente um problema de estabilidade do gerador, e a estabilidade de tensão é basicamente um problema de estabilidade da carga.

Tais considerações descritas para o sistema de potência estudado permitem identificar duas malhas separadas de controle em cada máquina síncrona. A primeira é a malha potência-ângulo, ou controle de frequência, responsável pelo projeto dos controladores de frequência e regulador de velocidade, que por sua vez influencia diretamente na posição angular do rotor do gerador síncrono. A segunda malha é a malha de excitação, ou controle de tensão, responsável pelo projeto dos sistemas de excitação e regulador de tensão.

É importante salientar a existência destas malhas de controle dentro do modelo do sistema de potência utilizado, pois as mesmas serão fundamentais mais adiante (Capítulos 3 e 4) para simplificar e justificar as considerações adotadas no modelo para determinação dos índices de estabilidade.

## 2.3 CONCEITOS E DEFINIÇÕES BÁSICAS

O fenômeno que envolve a instabilidade de tensão pode ocorrer de diferentes formas, dependendo da configuração do sistema, do modo de operação e, principalmente, do tipo de distúrbio (TAYLOR, 1994). Ele pode ser analisado como um fenômeno rápido quando relacionado a componentes como o motor de indução; e pode ser, também, analisado como um fenômeno lento quando relacionado à mudança de tap do transformador.

Para tanto, algumas definições da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência, sob diferentes aspectos, são favoráveis para a compreensão do fenômeno (KUNDUR, 1997), haja vista que a natureza do fenômeno da instabilidade é amplamente diversificada.

Neste trabalho, entretanto, as definições de estabilidade, instabilidade e colapso de tensão seguem as propostas por KUNDUR em [KUN94], que visa abranger todos os aspectos do referido fenômeno diante de suas possíveis classificações.

### 2.3.1 *Estabilidade de Tensão*

A estabilidade de tensão é a habilidade de um sistema de potência em manter tensões firmes aceitáveis em todas as barras no sistema, sob condições normais de operação, após estar sujeita a uma perturbação.

### 2.3.2 *Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações*

Esta é uma definição a parte que será de grande interesse para este trabalho. A estabilidade de tensão a pequenas perturbações está relacionada com a habilidade do sistema de potência em manter a tensão dentro de níveis aceitáveis após qualquer pequeno distúrbio, assim como, qualquer variação incremental na carga do sistema.

### **2.3.3 Instabilidade de Tensão**

A instabilidade de tensão caracteriza-se pela ausência da estabilidade e resulta quando um distúrbio, aumento de carga ou alteração na condição do sistema, causa uma queda progressiva e não controlável da tensão.

### **2.3.4 Colapso de Tensão**

O colapso de tensão é o resultado de uma seqüência de eventos que acompanham a instabilidade de tensão levando a um perfil de baixa tensão inaceitável em uma parte significativa do sistema de potência.

## **2.4 ESTABILIDADE, INSTABILIDADE E COLAPSO DE TENSÃO**

A palavra "estabilidade" implica um sistema dinâmico, e conseqüentemente instabilidade e colapso também são processos dinâmicos, dado que este fenômeno está principalmente relacionado com as cargas do sistema e por esta razão a estabilidade de tensão tem sido chamada de estabilidade de carga (WEEDY, 1987).

No estudo da estabilidade de sistemas elétricos de potência é comum modelar o sistema utilizando um conjunto de 'n' equações algébricas e 'k' equações diferenciais não lineares, como mostrado nas equações (2.1) e (2.2).

$$\dot{x} = f(x, y, z) \quad (2.1)$$

$$0 = g(x, y, z) \quad (2.2)$$

onde  $x$  é um vetor ( $n \times 1$ ) das variáveis de estado;  $y$  é um vetor ( $k \times 1$ ) das variáveis algébricas;  $z$  um vetor ( $k \times 1$ ) das variáveis de entrada e parâmetros dos geradores; 'f' e 'g' são funções contínuas e diferenciáveis.

As equações diferenciais referem-se a componentes do sistema que tenham um comportamento dinâmico (máquinas síncronas, reguladores de velocidade, sistemas de excitação, compensadores estáticos de reativos, elos de correntes contínua, motores de indução e suas cargas dinâmicas, etc.). As equações algébricas descrevem a rede de transmissão, sua interface com os componentes dinâmicos, além de algumas relações internas entre as variáveis de estado destes componentes.

Para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações, linearizam-se as equações (2.1) e (2.2) em torno de um ponto de operação ( $x_0, y_0, z_0$ ), o resultado obtido é mostrado na equação (2.3).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \Delta z \quad (2.3)$$

onde os elementos da matriz Jacobiana do sistema são definidas como:

$$\begin{aligned} J_{1_{ij}} &= \frac{\partial f_i}{\partial x_j} & (n \times n) & & J_{2_{ij}} &= \frac{\partial f_i}{\partial y_j} & (n \times k) \\ J_{3_{ij}} &= \frac{\partial g_i}{\partial x_j} & (k \times n) & & J_{4_{ij}} &= \frac{\partial g_i}{\partial y_j} & (k \times k) \end{aligned} \quad (2.4)$$

e todas as derivadas parciais são calculadas para o ponto de operação ( $x_0, y_0, z_0$ ) considerado.

Considerando que a submatriz  $J_4$  é não singular, o sistema de equações (2.1) e (2.2) pode ainda ser reduzido para 'n' equações linearizadas em função das variáveis de estado, conforme a equação (2.5).

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta z \quad (2.5)$$

onde 'A' é uma matriz de dimensão ( $n \times n$ ) conhecida como matriz de estados do sistema de potência e B é uma matriz de entrada com dimensão ( $n \times r$ ). Esta matriz de estados 'A' pode ser obtida através da eliminação de Gauss efetuada na matriz Jacobiana do fluxo de potência da equação (2.3), conforme mostra a equação (2.6.)

$$A = J_1 - J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot J_3 \quad (2.6)$$

Sob a análise qualitativa, um sistema é dito ser estável se ele retorna ao ponto de equilíbrio após um distúrbio. No domínio do espaço de estados, o sistema é dito ser estável para um determinado ponto de operação se todos os autovalores de A têm parte real negativa.

Um caso especial é quando a matriz A torna-se singular, ou seja, apresenta um autovalor nulo. Esta é uma condição de "equilíbrio não hiperbólico" o qual pode tender à uma bifurcação sela-nó, bifurcação estática ou bifurcação "fold" . Assim, a condição da matriz A ter determinante nulo (  $\det(A) = 0$  ) define um limite de estabilidade de tensão quando o autovalor crítico está relacionado à resposta da tensão.

Outro caso limite está relacionado à singularidade da submatriz  $J_4$  do Jacobiano. Esta é condição suficiente para o colapso de tensão, caracterizado por um autovalor infinitamente elevado da matriz de estados próximo ao ponto do colapso. Isto é claramente uma 'bifurcação induzida pela singularidade' .

Uma questão crítica é saber qual transição (bifurcação) ocorrerá primeiro dentro de uma série de eventos. Se, por exemplo, o ponto de operação torna-se instável antes do ponto de colapso ser alcançado, a região de operação do sistema de potência está limitado por um limite de estabilidade de tensão. Neste caso, a região de estabilidade pode ser estendida, utilizando-se técnicas de controle, próximo ao limite do colapso de tensão .

Os termos instabilidade de tensão e colapso de tensão são freqüentemente empregados de forma invariável, proporcionando muitas vezes determinada confusão na análise do fenômeno. Ambos os fenômenos são geralmente causados por grandes perturbações como, por exemplo, um excessivo

aumento na demanda de carga. Entretanto, a ocorrência do colapso de tensão não implica necessariamente na ocorrência da instabilidade; apesar de sua relação, ambos são fenômenos independentes.

A bem da verdade, o colapso de tensão é na maioria das vezes uma consequência da instabilidade de tensão nos sistemas de potência, que pode atingir todo o sistema, sendo identificado como um colapso total (*blackout*), ou atingir somente uma área, sendo assim chamado de colapso parcial ([CIGRE 1993]).

## 2.5 TIPOS DE ABORDAGEM

A estabilidade de tensão pode ser vista como um problema no qual pode-se aplicar uma combinação de ferramentas linearizadas e não-lineares para sua análise. Outro ponto a ser considerado na análise da estabilidade de tensão está relacionado a abordagem do fenômeno, com uma distinção entre aspectos estáticos e dinâmicos para o problema (VAN CUTSEM, 1998).

O problema da estabilidade em um sistema de potência é proveniente de problemas dinâmicos que estão relacionados com a modelagem, análise e controle do sistema; contudo, mesmo que se tenha a consciência de que a estabilidade de tensão é um fenômeno de natureza dinâmica, a abordagem sob o aspecto estático tem sido amplamente aceitável, haja vista que a mesma fornece resultados através de análise bem mais simples e rápida, sem exigir muito esforço computacional.

### 2.5.1 Abordagem Estática

Sob a abordagem estática, a análise do problema pode ser efetuada para determinar margens de segurança, identificar limitações da rede e os fatores relevantes para a estabilidade. A análise estática é também utilizada para



examinar a estabilidade de tensão de um amplo número de possíveis pontos de operação do sistema quando o mesmo é sujeito a uma determinada contingência.

A maioria dos métodos que utilizam abordagem estática são baseados nas informações obtidas via estudo de fluxo de potência (LERM, 1995). Estes métodos usados para análise da estabilidade de tensão estão classificados por grupos, proposto por Lemos, com base nas seguintes características: sensibilidade, mínimo valor singular, múltiplas soluções, autovalores e técnicas de otimização (LEMOS, 1994).

### **2.5.2 Abordagem Dinâmica**

No que diz respeito à abordagem dinâmica da estabilidade de tensão, a precisão dos resultados obtidos tem dependência direta com o grau de detalhamento dos componentes do sistema, e devido à complexidade na modelagem desses componentes a abordagem dinâmica não é amplamente referenciada na literatura como é a estabilidade estática (LEMOS, 1994).

A maioria dos métodos que são baseados na abordagem dinâmica utilizam técnicas lineares de análise para facilitar a implementação de algoritmos já existentes. Dentre esses métodos pode-se citar a análise da simulação no domínio do tempo e a análise modal sob a influência de cargas dinâmicas que baseia-se na análise dos autovalores do sistema linearizado em um ponto de operação.

## **2.6 CONSIDERAÇÕES**

Neste capítulo foram apresentadas algumas terminologias padronizadas internacionalmente para o estudo da estabilidade de tensão. Alguns autores muitas vezes preferem utilizar diferentes definições ou suas próprias terminologias, de acordo com o seu entendimento de cada fenômeno. Isso não

implica em definições incorretas da estabilidade de tensão, mas em diferentes critérios de classificação para o fenômeno. A idéia de se utilizar terminologias padrões é manter uma linha de pesquisa compatível a inúmeras referências consagradas da literatura de engenharia.

Em seguida, as distintas formas de abordagem do fenômeno, estática ou dinâmica foram apresentadas. Não há como afirmar qual a melhor abordagem ou o melhor método para a análise da estabilidade de tensão; pois, embora este seja um fenômeno de natureza não-linear e dinâmica, a abordagem dinâmica requer um grau de complexidade muito elevado e exige grande esforço computacional, ao passo que abordagem estática não exige este esforço computacional e fornece resultados que permitem um bom entendimento do fenômeno real. É possível considerar que, tanto com a abordagem estática quanto a abordagem dinâmica, as pesquisas desenvolvidas foram de grande contribuição para a análise e compreensão do fenômeno de estabilidade.

No próximo capítulo será apresentado o modelo linearizado do sistema de potência multimáquinas utilizado para a análise do fenômeno da estabilidade de tensão e na determinação do índice de proximidade do colapso.

# **CAPÍTULO 3**

## **MODELAGEM DO SISTEMA**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

No capítulo anterior foram apresentados duas formas genéricas de abordagem para análise da estabilidade de tensão: dinâmica e estática.

Para qualquer estudo da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência (SEP), de acordo com o tipo de abordagem, um modelo matemático próprio e adequado deve ser escolhido para incluir todos os componentes relevantes ao problema e para excluir aqueles componentes irrelevantes ao mesmo. Em sistemas de potência multimáquinas, a modelagem tem fundamental importância, a fim de minimizar as dificuldades encontradas nos projetos de controladores.

Neste capítulo é apresentado o modelo linear multimáquinas de um SEP utilizado para análise e determinação dos índices de proximidade do colapso de tensão. O presente modelo pode ser aplicado na análise da sensibilidade e dos parâmetros do controlador de uma máquina síncrona, e também na identificação, para conseqüente correção, de possíveis causas de instabilidade, que é objeto deste trabalho.

## 3.2 MODELO LINEARIZADO MULTIMÁQUINAS

No estudo da estabilidade de um sistema de potência, as variáveis que devem ser observadas são a frequência e a tensão na barra terminal; onde a frequência é a principal variável influenciada pela interação mecânica do sistema (malha potência-ângulo), enquanto a tensão é mais fortemente influenciada pelos enrolamentos de campo representando a interação elétrica do sistema (malha de excitação).

O modelo que conecta estas duas malhas foi primeiramente desenvolvido por Heffron e Phillips em 1952, que consiste de uma máquina simples conectada a uma barra infinita (HEFFRON, 1952), e apresenta do ponto de vista conceitual grandes vantagens didáticas para o estudo da interação entre geradores, assim como entre as principais malhas de controle de cada gerador.

O modelo de Heffron-Phillips é caracterizado por seis constantes de interligação ( $K_1$  até  $K_6$ ) responsáveis pelo acoplamento entre as duas malhas do sistema, e através destas é possível avaliar qualitativamente o sistema sob seus aspectos de estabilidade.

Baseado no modelo linear de Heffron-Phillips, Vournas propôs um modelo linear generalizado para sistemas de potência multimáquinas (VOURNAS, 1983). Trata-se de uma extensão das constantes de interligação de Heffron-Phillips, transformando-as em matrizes constantes de ordem igual ao número de geradores considerados no sistema de potência.

### 3.2.1 Equações Básicas

Dado que o modelo multimáquinas apresentado é baseado no modelo linearizado máquina-barra infinita de Heffron-Phillips, as equações utilizadas para descrever o sistema são as mesmas utilizadas por Heffron-Phillips, também utilizadas por DeMello e Concórdia (DEMELLO, 1969), conforme mostrado a seguir:

$$v_d = x_q \cdot i_q \quad (3.1)$$

$$v_q = E'_q - x'_d \cdot i_d \quad (3.2)$$

$$v_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (3.3)$$

$$T'_{do} \cdot \frac{d}{dt} E'_q = E_{fd} - x_{ad} \cdot i_{fd} \quad (3.4)$$

$$P_e = E_{qd} \cdot i_q \quad (3.5)$$

$$E'_q = x_{ad} \cdot i_{fd} - (x_d - x'_d) \cdot i_d \quad (3.6)$$

$$E_{qd} = E'_q + (x_q - x'_d) \cdot i_d \quad (3.7)$$

$$\frac{2H}{377} \cdot \frac{d^2}{dt^2} \delta + \frac{D}{377} \cdot \frac{d}{dt} \delta = P_m - P_e \quad (3.8)$$

O sistema modelado consiste de máquinas síncronas de pólos salientes, considerando o amortecimento e a resistência da armadura desprezíveis, representadas por três variáveis de estado dadas pelos desvios do ângulo elétrico ( $\Delta\delta$ ) e da velocidade do rotor ( $\Delta\omega$ ) e também pelo desvio da força eletromagnética transitória ( $\Delta E'_q$ ) no eixo de quadratura da transformada de Park; conseqüentemente, representado por um modelo de 3ª ordem, conhecido como 'modelo 2' em Arrillaga (1983) e apresentado no Apêndice B. Contudo, neste trabalho considera-se o eixo direto atrasado em relação ao eixo de quadratura.

Este modelo parece relativamente simples, e talvez insuficiente para o estudo da estabilidade de tensão, contudo o mesmo apresenta um comportamento fundamental para análise e compreensão acerca deste fenômeno.

### 3.2.2 Representação do Modelo em Diagrama de Blocos

No sentido de manter a clareza conceitual fornecida pelo modelo de Heffron-Phillips para o caso de uma máquina simples conectada à barra infinita, o modelo linearizado do sistema de potência multimáquinas é representado pelo mesmo diagrama de blocos, conforme ilustrado na Figura 3.1, onde as constantes  $K_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) são substituídas pelas matrizes  $M_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ).

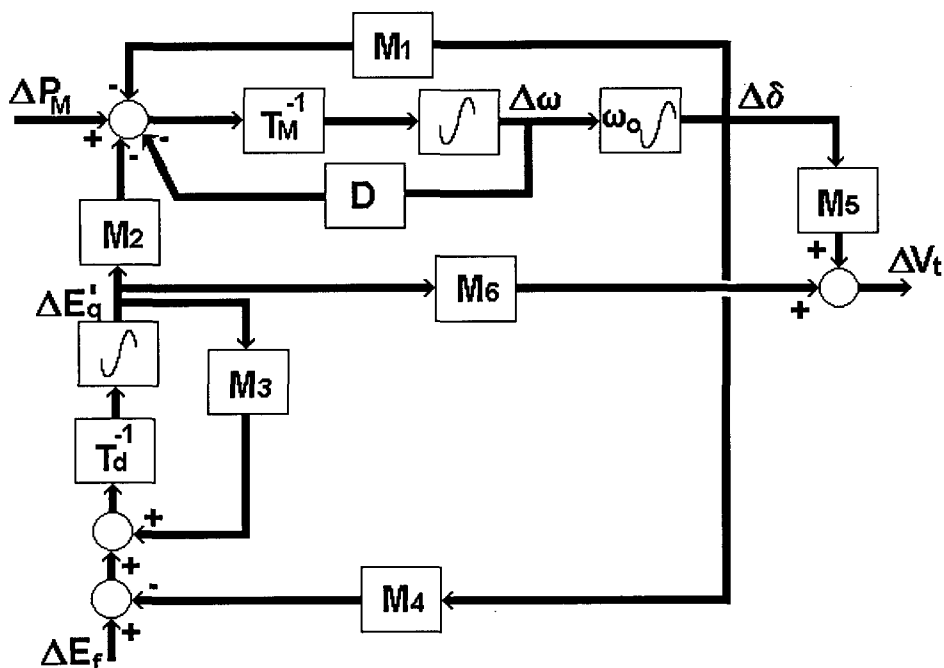


Figura 3.1 \_ Diagrama de Blocos para o Modelo Linearizado do Sistema de Potência Multimáquinas.

Ainda na Figura 3.1, " $T_M$ " é uma matriz diagonal  $m \times m$  que representa a inércia das máquinas síncronas dada por  $T_M = 2.H_i$ , " $T_d$ " é uma matriz diagonal  $m \times m$  que representa a constante de tempo de circuito aberto do

eixo\_d  $T'_{do}$ , e "D" é uma matriz diagonal  $m \times m$  que representa o coeficiente de amortecimento natural das máquinas.

As matrizes linearizadas  $M_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) que representam as constantes generalizadas do modelo descrevem o comportamento de cada máquina síncrona e a interação entre elas; e são definidas como a seguir:

$$M_{1ij} = \frac{\partial P_{ei}}{\partial \delta_j} \quad \checkmark \text{ matriz de sincronização}$$

$$M_{2ij} = \frac{\partial P_{ei}}{\partial E'_{qj}} \quad \checkmark \text{ efeito da potência elétrica para uma variação da tensão no enrolamento}$$

$$M_{3ij} = T'_{doi} \cdot \frac{\partial \dot{E}'_{qi}}{\partial E'_{qj}} \quad \checkmark \text{ efeito magnético para uma variação da tensão no enrolamento}$$

$$M_{4ij} = -T'_{doi} \cdot \frac{\partial \dot{E}'_{qi}}{\partial \delta_j} \quad \checkmark \text{ efeito desmagnetizante para uma variação no ângulo}$$

$$M_{5ij} = \frac{\partial v_{ti}}{\partial \delta_j} \quad \checkmark \text{ efeito da tensão terminal para uma variação no ângulo do rotor}$$

$$M_{6ij} = \frac{\partial v_{ti}}{\partial E'_{qj}} \quad \checkmark \text{ efeito da tensão terminal para uma variação da tensão no enrolamento}$$

Estas matrizes são descritas de forma análoga à descrição efetuada para o modelo da máquina simples, ou seja, o comportamento e a interação entre elas pode ser analisado de forma similar, sob as mesmas considerações. Dessa forma, é possível obter uma avaliação qualitativa sobre o comportamento do

sistema multimáquina pela análise direta das matrizes representadas pelas constantes generalizadas do modelo.

A interação entre a malha potência-ângulo e a malha de excitação pode ser descrita por analogia ao caso máquina simples conectada à barra infinita pelas matrizes  $M_2$ ,  $M_4$  e  $M_5$  da Figura 3.1. A malha  $M_4$ - $M_2$  é importante para o amortecimento dos modos de oscilação eletromecânicos quando o controle de excitação é manual ou muito lento, enquanto a malha  $M_5$ - $M_2$  é dominante para o caso quando se tem um elevado ganho do sistema de excitação em serviço.

### 3.2.3 Constantes Generalizadas do Modelo

As constantes generalizadas do modelo linearizado para o sistema de potência multimáquinas são determinadas pela diferenciação das equações (3.1) à (3.5) das máquinas síncronas em função de  $\delta$  e  $E'_q$ , após as mesmas terem sido combinadas com as equações características da rede elétrica, conforme demonstrado no Apêndice A. A obtenção destas constantes torna-se viável devido às considerações de desacoplamento possível entre a dinâmica do ângulo e da tensão, como vistos no Capítulo 2 (secção 2.2).

As seguintes expressões são obtidas:

$$M_{1ij} = E_{qdo_i} \cdot \frac{\partial i_{qi}}{\partial \delta_j} + (x_{qi} - x'_{di}) \cdot i_{qo_i} \cdot \frac{\partial i_{di}}{\partial \delta_j} \quad (3.9)$$

$$M_{2ij} = \{ \delta_{ij} + (x_{qi} - x'_{di}) \cdot \frac{\partial i_{di}}{\partial E'_{qj}} \} \cdot i_{qo_i} + E_{qdo_i} \cdot \frac{\partial i_{qi}}{\partial E'_{qj}} \quad (3.10)$$

$$M_{3ij} = -\delta_{ij} - (x_{di} - x'_{di}) \cdot \frac{\partial i_{di}}{\partial E'_{qj}} \quad (3.11)$$

$$M_{4ij} = (x_{di} - x'_{di}) \cdot \frac{\partial i_{di}}{\partial \delta_j} \quad (3.12)$$



$$M_{5ij} = \frac{v_{do\ i}}{v_{to\ i}} \cdot x_{qi} \cdot \frac{\partial i_{qi}}{\partial \delta_j} - \frac{v_{qo\ i}}{v_{to\ i}} \cdot x'_{di} \cdot \frac{\partial i_{di}}{\partial \delta_j} \quad (3.13)$$

$$M_{6ij} = \frac{v_{do\ i}}{v_{to\ i}} \cdot x_{qi} \cdot \frac{\partial i_{qi}}{\partial E'_{qj}} - \frac{v_{qo\ i}}{v_{to\ i}} \cdot x'_{di} \cdot \frac{\partial i_{di}}{\partial E'_{qj}} \quad (3.14)$$

Nas expressões (3.9) à (3.14) as variáveis  $x_q$ ,  $x_d$ ,  $x'_d$  representam as reatâncias do eixo de quadratura, do eixo direto e transitória do eixo direto, respectivamente, que são parâmetros físicos da máquina; as variáveis  $i_{qo}$ ,  $i_{do}$ ,  $v_{qo}$ ,  $v_{do}$ ,  $v_{to}$  e  $E_{qdo}$  descrevem as condições iniciais das máquinas síncronas (Apêndice B); as variáveis  $\partial i_d / \partial \delta_j$  e  $\partial i_q / \partial E'_{qj}$  são as derivadas parciais das correntes da máquina em relação ao ângulo, e  $\partial i_d / \partial \delta_j$  e  $\partial i_q / \partial E'_{qj}$  as derivadas parciais em relação ao enlace do fluxo de campo da  $j$ -ésima máquina (Apêndice A).

O termo  $\delta_{ij}$  é denominado por Delta de Kronecker (VOURNAS, 1983), onde tem-se:  $\delta_{ij} = 0$  para  $i \neq j$  e  $\delta_{ij} = 1$  para  $i = j$ .

### 3.3 ALGORITMO PARA MONTAGEM DO MODELO

Nesta secção é apresentado o fluxograma para a montagem do modelo linearizado do sistema de potência multimáquinas, como ilustra a Figura 3.2. A obtenção deste modelo é constituída basicamente da determinação das matrizes que representam as constantes generalizadas. A seguir, tem-se uma breve descrição passo-a-passo do fluxograma:

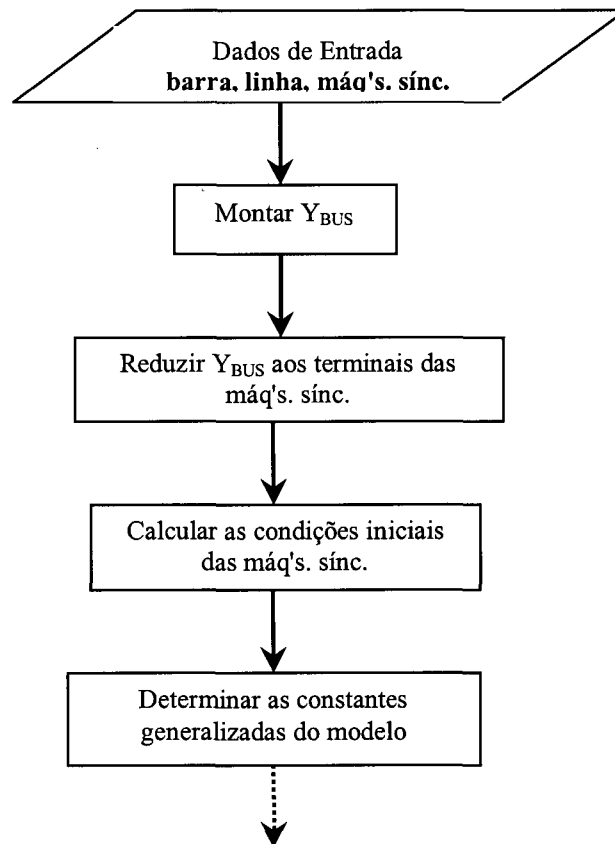
**Passo 1:** Leitura dos dados de entrada. Dados de linhas, barras e parâmetros característicos das máquinas síncronas;

**Passo 2:** Montar a matriz admitância nodal utilizando-se das técnicas de esparsidade (CLEMENTS, 1998);

**Passo 3:** Reduzir a matriz  $Y_{BUS}$  aos terminais das máquinas síncronas através de uma eliminação parcial de Gauss (MONTICELLI, 1983);

**Passo 4:** Determinar as condições iniciais das máquinas síncronas (KUNDUR, 1994);

**Passo 5:** Determinar as constantes generalizadas  $M_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ), (VOURNAS, 1983).



**Figura 3.2** \_ Fluxograma para a Modelagem do Sistema de Potência Multimáquinas Linearizado.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES

O presente capítulo apresentou de forma genérica o modelo linearizado do sistema de potência multimáquinas utilizado neste trabalho para o estudo da estabilidade de tensão. Sua principal vantagem está relacionada a sua simplicidade, pois pode ser analisado por analogia ao modelo linearizado de uma máquina simples ligado a uma barra infinita, quando os geradores são modelados sob as mesmas considerações; e assim mantém diversos conceitos fundamentais para a compreensão do fenômeno da estabilidade de tensão.

Uma outra vantagem é obtida do ponto de vista didático pois tamanha simplicidade do modelo viabiliza a distinção entre as principais malhas de controle de cada gerador, possibilitando observar as interações entre os mesmos.

Considerando o esforço computacional exigido para a determinação do modelo linearizado multimáquinas proposto, o problema computacional mais importante é a redução da rede para os terminais das máquinas síncronas. Este problema é resolvido de forma eficiente pelo uso da ordenação e das técnicas de esparsidade aplicadas ao sistema.

A partir deste modelo linearizado multimáquinas, após determinadas condições preliminares, é possível modelar uma matriz sob a qual pode-se determinar os autovalores relacionados aos índices da estabilidade de tensão, que é assunto do próximo capítulo.

# **CAPÍTULO 4**

## **ÍNDICES DE ESTABILIDADE E CONTROLABILIDADE**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

O problema da estabilidade de tensão e suas conseqüências, como instabilidade e colapso de tensão, vem sendo estudado nestas últimas décadas e tem sido atualmente uma das maiores preocupações dos engenheiros da área de sistemas de potência. Muitas pesquisas desenvolvidas nesta área visam determinar métodos para prevenir que o sistema perca sua estabilidade. Estas pesquisas são baseadas em índices que indicam o limite da estabilidade ou a proximidade do colapso de tensão.

O Capítulo anterior descreve o modelo linearizado multimáquinas que é a base para a determinação dos índices da estabilidade de tensão aqui apresentados. Muitos índices preditores do colapso de tensão são baseados na matriz Jacobiana do fluxo de potência ou em uma matriz modificada do mesmo (SCHLUETER, 1991, LÖF, 1992, CAÑIZARES, 1992, GAO, 1993).

Neste capítulo, contudo, será apresentado o método para o cálculo destes índices, proposto por Vournas (1995). São índices de estabilidade de tensão relacionados aos autovalores de uma matriz de dimensão  $m \times m$ , sendo  $m$  o número de máquinas síncronas, em um sistema multimáquinas. Algumas observações a serem consideradas para a obtenção da referida matriz  $m \times m$ , assim como o algoritmo utilizado para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão são apresentados nas seções seguintes.

## 4.2 MÉTODO DE CÁLCULO DOS AUTOVALORES DOMINANTES E SEUS AUTOVETORES.

Atualmente as técnicas para o cálculo parcial dos autovalores de uma matriz para a análise da estabilidade a pequenas perturbações em sistemas de potência de grande porte já estão bem definidas.

Neste trabalho é utilizado um método denominado Método das Iterações Simultâneas *Bi-iteration* (**ISBI**) que nada mais é que uma extensão do método das potências para o cálculo de múltiplos autovalores/autovetores. O método ISBI se aplica para matrizes não-defectivas, isto é, matrizes que podem ser diagonalizadas através de transformações de similaridade e pode ser utilizada na obtenção de múltiplos autovalores e os correspondentes autovetores à direita e à esquerda de matrizes não-simétricas.

No método ISBI, o algoritmo determina dois subespaços bi-ortogonais,  $U^{(k)} \in C^{n \times m}$  e  $\bar{U}^{(k)} \in C^{n \times m}$ , de uma matriz não-simétrica de ordem  $n \times n$ , a partir de dois conjuntos iniciais de  $m$  vetores, todos linearmente independentes, correspondendo às estimativas iniciais para os autovetores à direita e à esquerda (*trial vectors*), onde  $m \ll n$ .

Embora o algoritmo ISBI exija um esforço computacional e área de memória elevados, devido ao mesmo iterar com dois vetores, ele apresenta-se como uma solução robusta e eficiente, pois para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações é necessário conhecer tanto os autovetores à direita quanto os autovetores à esquerda. Outra característica importante do algoritmo ISBI é a taxa de convergência quadrática para os autovalores em matrizes não-simétricas, e a taxa de convergência linear para os autovetores (CAMPAGNOLO, 1994).

Um fluxograma para o método das iterações simultâneas *bi-iteration* é mostrado na Figura 4.1 e seu algoritmo, descrito passo-a-passo, a seguir:

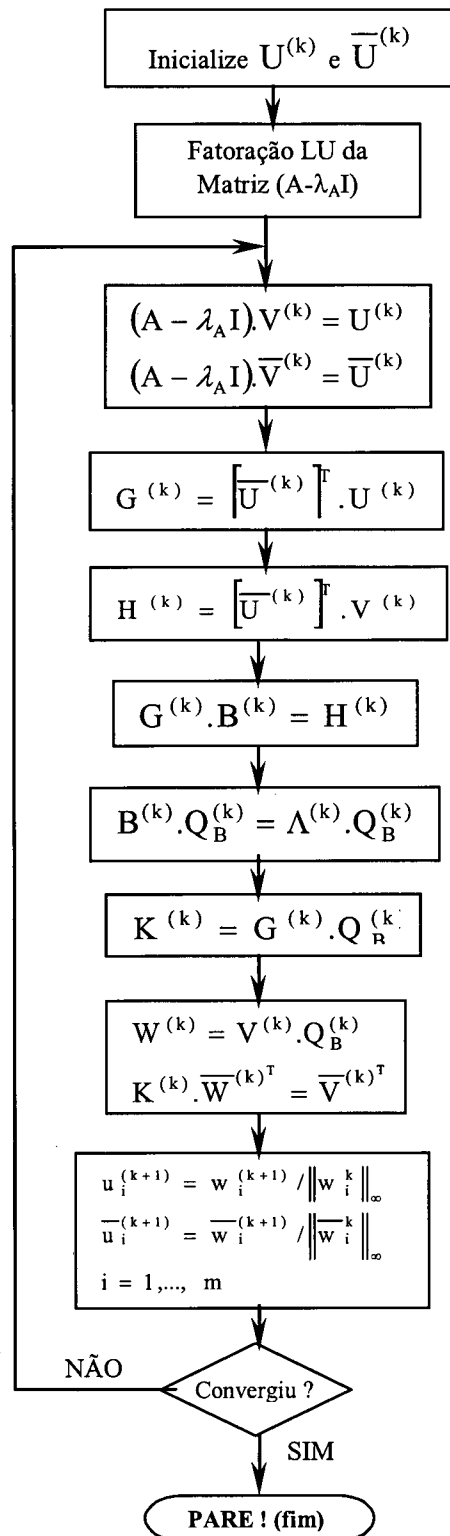


Figura 4.1 \_ Fluxograma do Algoritmo ISBI Sequencial.

**ALGORITMO**

**Passo 1:** Inicializar os  $m$  *trial vectors* à direita  $U^{(k)}$  e os  $m$  *trial vectors* à esquerda  $\bar{U}^{(k)}$ , os  $2m$  vetores devem ser linearmente independentes;

**Passo 2:** Obter os fatores LU para a matriz  $(A-\lambda_A I)$ , sendo  $\lambda_A$  um deslocamento complexo e  $I$  uma matriz identidade;

**Passo 3:** Resolver o sistema linear para determinar  $V^{(k)}$  e  $\bar{V}^{(k)}$  a partir de  $(A-\lambda_A I)$ ,  $U^{(k)}$  e  $\bar{U}^{(k)}$ ;

**Passo 4:** Determinar a matriz  $G^{(k)}$  a partir das matrizes  $U^{(k)}$  e  $\bar{U}^{(k)}$ ;

**Passo 5:** Determinar a matriz  $H^{(k)}$  a partir das matrizes  $\bar{U}^{(k)}$  e  $V^{(k)}$ ;

**Passo 6:** Obter os fatores LU da matriz  $G^{(k)}$  e determinar a matriz de iteração  $B^{(k)}$ ;

**Passo 7:** Obter os autovalores e autovetores à direita da matriz  $B^{(k)}$  utilizando uma rotina **QR**<sup>1</sup> (SMITH, 1976);

**Passo 8:** Obter a matriz  $K^{(k)}$  a partir das matrizes  $G^{(k)}$  e  $Q_B^{(k)}$ , cujas colunas correspondem aos autovetores à direita da matriz  $B^{(k)}$ ;

**Passo 9:** Obter as matrizes  $W^{(k)}$  a partir das matrizes  $V^{(k)}$  e  $Q_B^{(k)}$ , e  $\bar{W}^{(k)}$  a partir das matrizes  $K^{(k)}$  e  $\bar{V}^{(k)}$ ;

**Passo 10:** Obter as atualizações  $U^{(k+1)}$  e  $\bar{U}^{(k+1)}$  para a próxima iteração;

**Passo 11:** Testar a convergência do algoritmo. Se convergiu, parar. Caso contrário, voltar ao passo 3.

---

<sup>1</sup> O método QR é um algoritmo para o cálculo de todos os autovalores de uma matriz geral, pela sua triangularização, através de transformações unitárias.

O algoritmo ISBI é constituído basicamente de três etapas fundamentais: potencialização, reorientação e atualização.

A etapa de potencialização tem por objetivo aproximar os *trial vectors* dos autovetores correspondentes aos autovalores dominantes. Nesta etapa, correspondente ao passo 3 do fluxograma da Figura 4.1, pode-se aplicar uma técnica para melhoria da eficiência e convergência do algoritmo denominada de ciclo de iterações rápidas ("*Fast Iteration Cycles*") que consiste em realizar um maior número de potencializações antes da reorientação dos *trial vectors*.

A etapa de reorientação, correspondente ao passo 6 do fluxograma da Figura 4.1, realiza o cálculo da matriz de iteração **B** com dimensão  $m \ll n$ . Nesta etapa procura-se ortogonalizar os vetores correspondentes ao subespaço invariante de dimensão  $m$ , permitindo assim a convergência para múltiplos autovalores/autovetores.

Por fim, a etapa de atualização, correspondente ao passo 10 do fluxograma da Figura 4.1, introduz as ortogonalizações realizadas dentro do subespaço reduzido para o subespaço do problema original.

### 4.3 ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Para um sistema de potência com  $m$  máquinas conectadas a uma ou mais barras infinitas, a ordem do sistema da Figura 3.1 é  $3m$ . Os autovalores da matriz do sistema consistem de  $m$  pares complexos conjugados correspondentes aos modos de oscilação eletromecânicos, e  $m$  autovalores reais definindo a resposta de tensão do sistema.

No sentido de desacoplar a dinâmica do sistema, proporcionada pelo desvio de tensão, da dinâmica proporcionada pelo desvio de ângulo, supõe-se que o sistema está próximo do seu estado de regime permanente, após uma pequena perturbação em sua tensão de excitação. Assumindo que os modos de oscilação



eletromecânicos são todos estáveis e considerando também que o coeficiente de amortecimento natural (D) de todas as máquinas é desprezível, após algum tempo todos os desvios de potência elétrica tenderão para zero, e a partir da malha de controle de frequência (ou malha potência-ângulo) obtém-se a expressão (4.1).

$$M_1 \cdot \Delta \delta + M_2 \cdot \Delta E'_q = 0 \quad (4.1)$$

Com base no mesmo diagrama de blocos da Figura 3.1, e considerando que não existe variação da tensão nos enrolamentos de campo do gerador, obtém-se a partir da malha de controle de tensão (ou malha de excitação) a seguinte relação:

$$\dot{\Delta E}'_q = T_d^{-1} \cdot [M_3 \cdot \Delta E'_q - M_4 \cdot \Delta \delta + \Delta E_f] \quad (4.2)$$

Resolvendo (4.1) para  $\Delta \delta$  e substituindo este resultado em (4.2), onde considera-se que a variação da tensão de campo  $\Delta E_f$  é zero, dado que o sistema não apresenta regulação na tensão, tem-se

$$\dot{\Delta E}'_q = T_d^{-1} \cdot [M_3 \cdot \Delta E'_q + M_4 \cdot M_1^{-1} \cdot M_2 \cdot \Delta E'_q] \quad (4.3)$$

Dada a consideração da dinâmica da malha potência-ângulo desprezível (modos de oscilação estáveis), a resposta de tensão do sistema de potência sem regulador de tensão pode ser aproximada pelos autovalores da seguinte matriz  $m \times m$ , denominada de matriz de estabilidade de tensão (*VSM - Voltage Stability Matrix*), conforme expressão (4.4).

$$VSM = T_d^{-1} \cdot [M_3 + M_4 \cdot M_1^{-1} \cdot M_2] \quad (4.4)$$

A matriz VSM é formada de duas parcelas contribuintes: a primeira parcela, correspondente a  $T_d^{-1} \cdot M_3$ , caracteriza o efeito magnético proporcionado por uma variação no enrolamento do gerador; a segunda parcela,  $T_d^{-1} \cdot M_4 \cdot M_1^{-1} \cdot M_2$ , caracteriza o amortecimento dos modos de oscilação eletromecânicos, que são considerados estáveis. Para um sistema formado por  $m$  máquinas síncronas, a matriz VSM tem  $m$  autovalores, geralmente todos reais, dado que são estes os autovalores que estão relacionados à resposta de tensão do sistema.

A estabilidade da matriz VSM está associada à mudança de sinal dos seus autovalores. Se um destes autovalores é positivo, então o sistema de potência sem regulador é instável em tensão. Se todos os autovalores são negativos, aquele que estiver mais próximo da origem fornece uma medida quantitativa de proximidade da estabilidade de tensão.

Essa proximidade é identificada pelo que se denomina índice de estabilidade de tensão (*VSI - Voltage Stability Index*). Portanto, o índice de estabilidade de tensão para um sistema sem regulador de tensão pode ser definido como

$$VSI = \Delta \max(\lambda_{VSM}) \quad (4.5)$$

onde  $\lambda_{VSM}$  representa os autovalores de VSM definida em (4.4).

Para um valor positivo de VSI, o sistema sem regulador é dito instável. Para um valor negativo de VSI, seu valor absoluto representa uma medida de distância para a instabilidade de tensão.

Os correspondentes autovetores de VSM indicam quais máquinas são mais afetadas pela instabilidade em questão, fornecendo informações de total relevância no instante de decidir as medidas preventivas contra uma aproximação da instabilidade.

## 4.4 ÍNDICE DE CONTROLABILIDADE DE TENSÃO

Quando os geradores estão sob regulação automática de tensão e dentro de seus limites aceitáveis de excitação, o sistema de potência pode ser estável mesmo para um valor positivo de VSI. A razão para isso é que o regulador automático de tensão tende a aumentar a margem de estabilidade de tensão desde que o sistema não tenha alcançado o seu limite de controlabilidade. Contudo, um valor positivo de VSI indica que o sistema está estressado e sua estabilidade é somente assegurada sob a atuação do regulador automático de tensão do gerador.

Uma proximidade para o referido limite de controlabilidade de tensão pode ser investigada por uma outra matriz, de dimensão  $m \times m$ , a partir do diagrama de blocos da Figura 3.1, considerando um regulador de tensão de 1ª ordem, cuja função de transferência é dada pela expressão (4.6), a seguir.

$$\Delta E_f = \frac{K_E}{1 + sT_E} (\Delta V_{REF} - \Delta V_T) \quad (4.6)$$

onde  $K_E$  é uma matriz diagonal que representa o ganho dos AVR's e  $T_E$  é uma matriz diagonal que representa a constante de tempo dos reguladores, ambas de dimensão  $m \times m$ .

A tensão terminal do gerador pode ser representada em função da tensão interna transitória do eixo de quadratura, conforme expressão (4.7).

$$\Delta V_T = M_6 \cdot \Delta E'_q \quad (4.7)$$

Deseja-se obter uma relação entre a variação na tensão de campo para uma certa variação na tensão terminal do gerador. Substituindo (4.7) em (4.6), e considerando em (4.2) somente a parcela influenciada pela variação da tensão de campo, obtém-se

$$\Delta \dot{E}'_q = T_d^{-1} \left[ -\frac{K_E}{1 + sT_E} \cdot M_6 \cdot \Delta E'_q \right] \quad (4.8)$$

Considerando-se em (4.8) que a constante de tempo  $T_E$  do regulador tenha um valor elevado, então a controlabilidade de um sistema de potência pode ser aproximada pelos autovalores de uma matriz cuja denominação é VCM (*Voltage Controllability Matrix*) conforme expressão (4.9).

$$\text{VCM} = K_E T_E^{-1} T_d^{-1} M_6 \quad (4.9)$$

De modo análogo à análise efetuada para a estabilidade, onde a estabilidade está associada à mudança de sinal em seus autovalores, tem-se a análise para a controlabilidade. Entretanto, neste caso, devido à presença do sinal negativo na expressão (4.8), tem-se as definições com sinais contrários, e portanto analisa-se somente a expressão (4.9) sem considerar o sinal negativo.

Assim, o sistema de potência é controlável, ou seja, o sistema de potência controlado é estável, quando todos os autovalores de VCM são positivos, correspondendo a um aumento da tensão terminal para um aumento da tensão de excitação; caso contrário, o sistema é dito não controlável, ou instável. Como discutido em (VOURNAS, 1993), no limite do colapso de tensão a matriz VCM tem um autovalor infinito o qual muda de sinal. Portanto, um índice de controlabilidade de tensão (VCI - *Voltage Controllability Index*) pode ser definido como sendo o inverso do maior autovalor da matriz VCM, conforme a expressão matemática (4.10), positivo para a estabilidade e que corresponde a uma resposta oscilatória da malha de controle de tensão.

$$\text{VCI} = \frac{1}{\max(\lambda_{\text{VSM}})} \quad (4.10)$$

onde  $\lambda_{\text{VCM}}$  representa os autovalores de VCM definida em (4.9).

De acordo com a expressão (4.10), no ponto de colapso, o índice de controlabilidade VCI torna-se nulo, portanto seu valor serve como uma medida quantitativa da distância do colapso.

## 4.5 ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

A Figura 4.2 apresenta o fluxograma do algoritmo utilizado para o cálculo dos índices de estabilidade (VSI) e de controlabilidade (VCI) de tensão e seus respectivos autovetores, à direita e à esquerda. Para o cálculo destes autovalores e autovetores utilizou-se uma rotina baseada em técnicas de iterações simultâneas "*bi-iteration*" (ISBI). Embora este método exija esforço computacional e área de memória maiores que outros métodos existentes, o mesmo apresenta grandes vantagens pois permite explorar eficientemente as técnicas de esparsidade e fornece simultaneamente os autovetores à direita e à esquerda de cada autovalor, que é de grande necessidade prática no estudo da estabilidade a pequenas perturbações.

O algoritmo para o cálculo de VSI é descrito passo-a-passo, conforme a seguir:

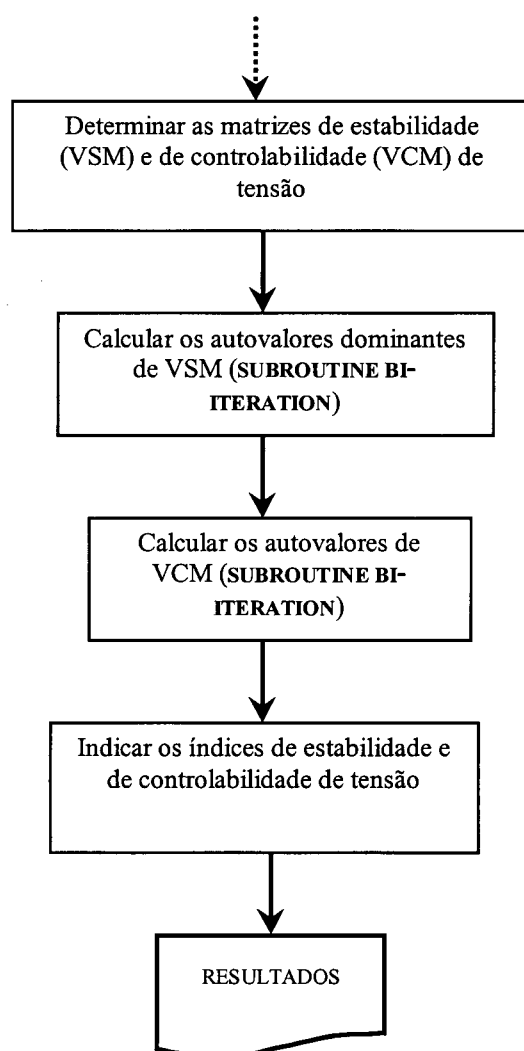
**Passo 1:** Dado os parâmetros característicos das máquinas síncronas, determinar as matrizes VSM e VCM;

**Passo 2:** A partir da matriz VSM, calcular os autovalores dominantes da referida matriz utilizando a rotina BI-ITERATION (CAMPAGNOLO, 1994);

**Passo 3:** A partir da matriz VCM, calcular os autovalores da referida matriz utilizando a rotina BI-ITERATION;

**Passo 4:** Indicar os índices de estabilidade (VSI) e de controlabilidade (VCI) de tensão, e seus respectivos autovetores à direita e à esquerda;

**Passo 5:** Fornecer resultados para análise.



**Figura 4.2** \_ Fluxograma para o Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão.

## 4.6 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo foi apresentada a proposta de um índice de estabilidade de tensão (VSI) para sistemas de potência sem a presença do regulador de tensão. A importância deste índice, sob determinada condição, é que a mudança de sinal no autovalor ocorre bem antes que o colapso de tensão se torne inevitável, fornecendo assim um indicador de que o sistema está entrando em estado de alerta.

Considerando a presença do regulador de tensão, foi proposto um índice de controlabilidade de tensão a partir do qual pode-se verificar os efeitos do regulador de tensão atuando sob o sistema de potência e verificar também até que ponto o regulador assegura a estabilidade.

Sob análise qualitativa, um valor positivo de VSI significa que o sistema entrará em colapso se a excitação máxima da máquina síncrona for alcançada. Um valor positivo de VCI significa que este limite de excitação foi assegurado.

Para um sistema de grande porte, constituído de muitas máquinas síncronas, a velocidade no cálculo dos autovalores pode ser melhorada pelo cálculo somente dos autovalores dominantes das matrizes VSM e VCM, haja vista que são estes os autovalores de interesse.

No capítulo seguinte são apresentados alguns sistemas de potência testes para verificar a aplicação e análise dos índices apresentados neste trabalho.

# **CAPÍTULO 5**

## **RESULTADOS DOS SISTEMAS TESTE**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo são apresentados alguns sistemas teste, e suas descrições, para avaliar a aplicação da metodologia proposta no capítulo anterior para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão, considerando o pior caso onde o sistema não apresenta regulação de tensão; e índices de controlabilidade de tensão, quando o regulador de tensão é considerado nas unidades geradoras do sistema. Estes sistemas teste são amplamente conhecidos e muito utilizados na literatura que envolvem o estudo da estabilidade em sistemas elétricos de potência.

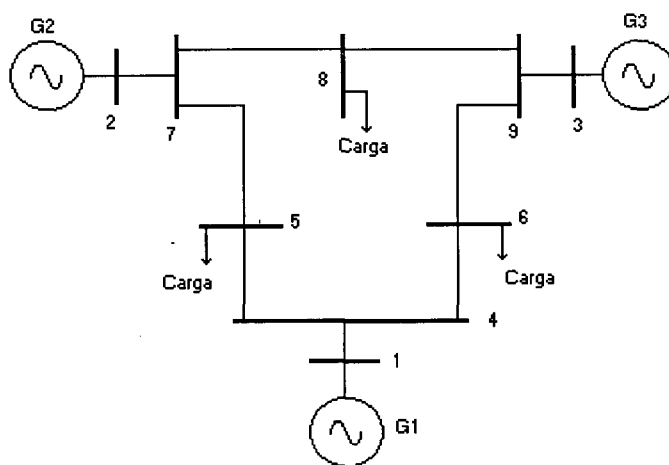
Algumas das contingências mais frequentes na rede elétrica são aplicadas. Entre elas considera-se o aumento na demanda de carga, a queda de uma ou mais linhas de transmissão, ou mesmo a perda de uma unidade geradora. Os resultados obtidos para cada sistema teste são apresentados também neste capítulo, bem como sua análise e algumas considerações. Para verificar o desempenho do sistema e a validade dos resultados obtidos utilizou-se o *software* ANATEM (CEPEL, 1995b) para observar o perfil de tensão nas barras do sistema.



## 5.2 SISTEMA 9 BARRAS

Este primeiro sistema teste é um clássico para o estudo de estabilidade, apresentado por Anderson e Fouad (1977) e utilizado em inúmeras outras obras destinadas à pesquisa do problema. O sistema Anderson e Fouad, denominado sistema WSCC, é constituído de 9 barras, 3 geradores síncronos interligados em anel e 9 linhas de transmissão.

Os dados da rede elétrica, assim como dos geradores síncronos, são apresentados no Apêndice D. Seu diagrama unifilar é apresentado na Figura 5.1, a seguir.



**Figura 5.1 : Diagrama Unifilar do Sistema Teste Anderson.**

Para fins de cálculo do fluxo de potência do sistema teste, no *software* ANAREDE (CEPEL, 1995a), o gerador G1 foi modelado como uma barra infinita e representa a barra de referência do sistema. Os geradores G2 e G3 foram modelados pelo modelo de terceira ordem descrito no Capítulo 3 (seção 3.2.1), conforme proposto por Arrillaga (Apêndice B) e denominado pelo mesmo de

'modelo 2'. As cargas do sistema são representadas por injeções de potência constante.

Durante a formulação do modelo, para a obtenção da matriz de estabilidade de tensão VSM, foi assumido que todos os modos de oscilação eletromecânicos do sistema são estáveis. Esta suposição foi garantida através da simulação do sistema, tanto para o caso base quanto para as contingências consideradas, via *software* PACDYN (CEPEL, 1997), onde os modos de eletromecânicos críticos são apresentados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 : Modos de Oscilação Críticos do Sistema Anderson para a Sequência de Eventos considerada.**

CASO	Dados do PACDYN			
	Autovalor	Amort. (%)	Freq. (Hz)	Barra
Base	$-0.1537 \pm j82613$	1.86	1.31	2
Aumento de Carga	$-0.1387 \pm j8.1202$	1.71	1.29	2
Queda da LT 5-7	$-0.1393 \pm j6.8085$	2.05	1.08	2
Queda do Gerador G3	$-0.0056 \pm j22.442$	0.02	3.57	3

A seguir, na Tabela 5.2, é apresentada a mesma seqüência de eventos adotada para avaliar o comportamento do sistema de 9 barras quanto a seu amortecimento. Entretanto, nesta tabela apresentam-se os índices de estabilidade e controlabilidade de tensão obtidos com a metodologia apresentada neste trabalho e apresenta-se, também, o perfil de tensão para a barra crítica do sistema obtido pelo ANAREDE.

Vale ressaltar que para a obtenção dos índices apresentados na Tabela 5.2 todos o geradores foram modelados como sendo de terceira ordem (modelo 2), no entanto, o gerador G1 continua sendo a referência do sistema.

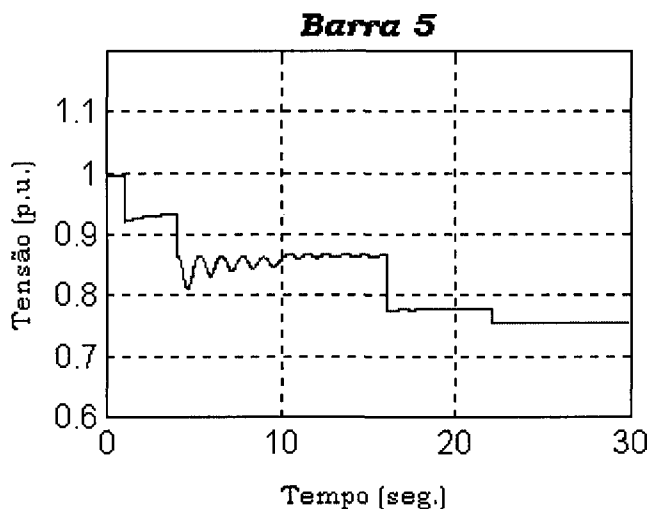
**Tabela 5.2 : Sequência de Eventos para o Sistema Anderson.**

CASO	VSI	VCI	Dados do ANAREDE	
			Tensão	B. Crítica
Base	-0.18520	0.08662	0.996	5
Aumento de Carga	-0.06451	0.08216	0.918	5
Queda da LT 5-7	0.08905	0.07198	0.773	5
Queda do Gerador G3	0.20647	0.07085	0.754	5

A primeira contingência aplicada no sistema de 9 barras consiste em um aumento de carga na barra 5, que antes era de  $125 \pm j50$  MVA e passou a ser de  $250 \pm j100$  MVA, o que representa um aumento de 100% no carregamento da barra. Observe que o sistema permanece estável, com o perfil de tensão da barra 5 ainda dentro dos limites aceitáveis. O sistema perde sua estabilidade no instante em que ocorre a abertura da linha de transmissão 5-7, onde a barra 5 apresenta um perfil de tensão inadequado para a operação do sistema e o índice proposto para a análise da estabilidade é positivo.

Com a perda de uma unidade geradora (queda de G3) o sistema torna-se mais instável, exigindo uma ação mais imediata de seus equipamentos de proteção e controle. Todavia, em todos os casos avaliados, é possível recuperar a estabilidade do sistema através da atuação de seus controladores; neste caso, do regulador de tensão, haja vista que os índices apresentados para avaliar a controlabilidade do sistema são todos positivos.

A Figura 5.2 apresenta o gráfico do perfil da tensão na barra 5 em função do tempo obtido pelo ANATEM. As contingências consideradas na Tabela 5.2 são aplicadas no decorrer do tempo e seus resultados, comparados com os índices apresentados nesta mesma tabela.



**Figura 5.2 : Desempenho do Módulo da Tensão na Barra 5 p/ o Sistema Anderson & Fouad.**

Faz-se necessário salientar, para a compreensão do gráfico do perfil de tensão obtido, que na simulação do sistema teste no ANATEM é considerada a atuação dos reguladores de tensão em cada gerador, sendo estes modelados por uma função de transferência de primeira ordem com um ganho  $K_A$  e uma constante de tempo  $T_A$ . Os valores destes parâmetros tornam-se irrelevantes para a análise do problema e foi considerado que o mesmo atua somente para a controlabilidade do sistema, de modo que estes foram especificados sem adotar qualquer critério para projeto de controladores.

Observe que da mesma forma como analisado na Tabela 5.2, o sistema tem sua estabilidade assegurada pelo regulador de tensão para qualquer contingência considerada, confirmando assim os índices de controlabilidade apresentados. Para ratificar os índices de estabilidade de tensão apresentados, observe que no instante da abertura da linha de transmissão 5-7, o sistema perderia sua estabilidade não fosse a atuação imediata dos reguladores.

### 5.3 SISTEMA 39 BARRAS

Este é um outro sistema também muito utilizado para os estudos de estabilidade, mais conhecido pela denominação Sistema 'New England'. O diagrama unifilar do sistema New England é apresentado na Figura 5.3.

O sistema é composto de 10 unidades geradoras síncronas, um total de 39 barras, com cargas distribuídas por toda a rede elétrica que são interligadas por 46 linhas de transmissão. Os dados da rede elétrica e os parâmetros característicos dos geradores são apresentados no Apêndice D.

Para este sistema, foi considerado como referência o gerador conectado à barra 39, que é modelado como uma barra infinita no ANAREDE para cálculo do fluxo de potência do sistema. Os demais geradores seguem o mesmo modelo de terceira ordem apresentado no Capítulo 3, denominado 'modelo 2' (Apêndice B). Da mesma forma como no sistema de 9 barras, as cargas do sistema New England são representadas por injeções de potência constante.

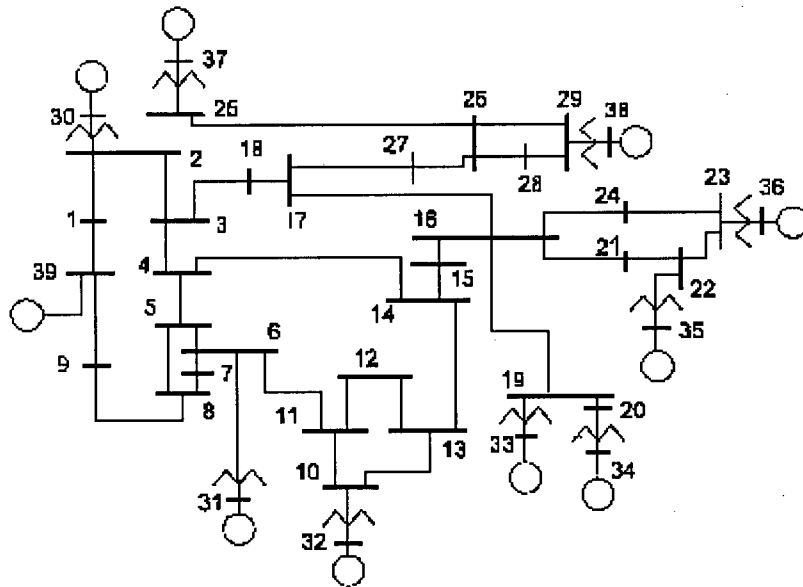


Figura 5.3 : Sistema Teste New England de 39 barras.

Do mesmo modo como no sistema teste anterior, as contingências consideradas para o sistema de 39 barras foram simuladas via PACDYN para verificar o comportamento dos modos de oscilação eletromecânicos. Os resultados obtidos para as barras de menor amortecimento são apresentadas na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 : Modos de Oscilação Críticos do Sistema New England para a Sequência de Eventos considerada.**

CASO	Dados do PACDYN			
	Autovalor	Amort. (%)	Freq. (Hz)	Barra
Base	$-0.0965 \pm j7.1067$	1.36	1.13	30
Aumento de Carga	$-0.1034 \pm j7.1267$	1.45	1.13	30
Queda da LT 2-3	$-0.1445 \pm j7.3427$	1.97	1.17	31
Queda da LT 6-11	$-0.1524 \pm j8.2285$	1.85	1.31	37
Queda do Gerador G30	$-0.1506 \pm j8.2277$	1.83	1.31	37

Na Tabela 5.4 apresenta-se a seqüência de eventos considerada para avaliar o comportamento do sistema diante de cada contingência, e verificar os índices de estabilidade e controlabilidade de tensão propostos que também são apresentados na Tabela 5.4. Nesta mesma tabela pode-se ainda acompanhar o perfil de tensão para a barra crítica obtido no ANAREDE.

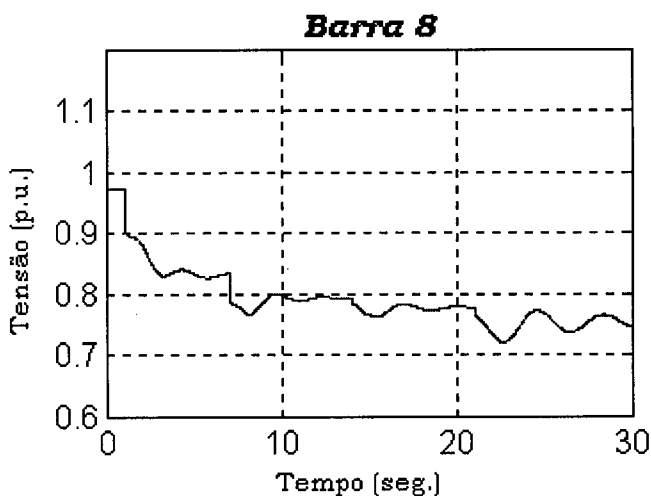
**Tabela 5.4 : Sequência de Eventos para o Sistema New England.**

CASO	VSI	VCI	Dados do ANAREDE	
			Tensão	B. Crítica
Base	-0.26451	0.13032	0.968	8
Aumento de Carga	-0.00126	0.12304	0.908	8
Queda da LT 2-3	0.08132	0.12026	0.797	8
Queda da LT 6-11	0.86757	0.11784	0.766	8
Queda do Gerador 30	1.27811	0.09706	0.719	8

Neste sistema, a primeira contingência considerada refere-se a um aumento na demanda de carga correspondente a 30% da carga base em todas as barras de carga, o que deixou o sistema próximo do seu limite de estabilidade, com o índice *VSI* igual à -0.00126. A partir desta configuração, dando seqüência às contingências aplicadas, com a abertura da linha de transmissão 2-3 o sistema atinge a instabilidade, que é observado pela mudança de sinal do índice de estabilidade tornando-se positivo. E à medida que as contingências seguintes são aplicadas, a instabilidade apresenta-se cada vez mais crítica.

Do mesmo modo como no exemplo anterior, os índices propostos para avaliar a capacidade de controlar a tensão do sistema demonstram que é possível recuperar a estabilidade deste sistema com a atuação de seus equipamentos controladores.

O gráfico do perfil da tensão na barra 8 (barra crítica) em função do tempo, obtido pela simulação no ANATEM, é ilustrado na Figura 5.4; onde para esta simulação os reguladores de tensão, representados por modelos de primeira ordem, são considerados. A seqüência das contingências consideradas na Tabela 5.4 é aplicada no tempo e os resultados obtidos são comparados com os índices apresentados nesta mesma tabela.



**Figura 5.4 : Desempenho do Módulo da Tensão na Barra 8 p/ o Sistema New England.**

Observou-se na Tabela 5.4 que, de acordo com os índices de controlabilidade de tensão obtidos para as contingências aplicadas, a estabilidade de tensão é sempre assegurada pelos controladores do sistema, e este fato foi confirmado na simulação das contingências pelo ANATEM, onde o sistema apresenta-se estável para todas as contingências aplicadas através da atuação dos reguladores de tensão do sistema.

É devido à atuação destes reguladores de tensão que o sistema teste *New England* recupera sua estabilidade após a abertura da linha de transmissão 2-3, quando o índice de estabilidade de tensão apresentado muda de sinal, indicando instabilidade do sistema sem regulação.

## 5.4 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo apresentou dois sistemas clássicos para estudos de estabilidade. Para ambos os sistemas fez-se necessária a determinação do fluxo de potência através do *software* ANAREDE, pois estes foram utilizados como dados de entrada para o programa implementado.

Para salientar a observação feita no Capítulo 4, onde todos os modos de oscilação são tidos como estáveis, verificou-se o comportamento angular do sistema para cada evento considerado, utilizando-se do *software* PACDYN. Pode-se constatar através do mesmo que todos os modos, mesmo que pouco amortecidos, são estáveis em ângulo.

Outro *software* utilizado como ferramenta de análise do desempenho da tensão foi o ANATEM, que simula as contingências aplicadas em função do tempo. A partir da comparação do desempenho obtido no ANATEM com os índices de estabilidade e controlabilidade de tensão obtidos pelo modelo implementado, pode-se certificar de que estes índices apresentam uma boa margem de segurança na determinação do grau de estabilidade do sistema.

Observe, também, que em nenhum caso foi possível verificar a perda da controlabilidade do sistema. Isso deve-se ao fato de não ter sido possível efetuar,



para uma dada contingência, a convergência de um fluxo de potência no ANAREDE de modo a utilizá-lo como dado de entrada no programa implementado.

# **CAPÍTULO 6**

## **CONCLUSÕES**

Por fim, este Capítulo apresenta de forma sucinta, na Seção 6.1, um escopo completo da metodologia adotada para este trabalho, dando ênfase para as particularidades do método e citando alguns comentários em respeito às ferramentas computacionais utilizadas para a implementação do mesmo. Seguindo este contexto, nesta mesma Seção, apresentam-se algumas considerações gerais que objetivam qualificar e validar a metodologia aqui apresentada. Em seguida, na Seção 6.2, estão apresentadas algumas idéias, como forma de sugestões para futuros trabalhos, no intuito de dar continuidade, e com novos aperfeiçoamentos, às atividades dentro desta linha de pesquisa de estabilidade.

### **6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho vem adicionar uma nova modelagem do sistema de potência para o estudo e análise da estabilidade de tensão junto ao grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT/UFSC). O trabalho apresentou, reunido em sua documentação, uma breve revisão bibliográfica onde se observa que o estudo do problema da estabilidade dá-se pelas mais diversificadas abordagens e metodologias nas quais tem-se o objetivo comum que é a solução do mesmo, e apresentou-se também uma nova metodologia para

modelagem do sistema de potência no qual a análise do mesmo é feita através de seus autovalores e respectivos autovetores à direita e à esquerda.

Essa modelagem utilizada para o sistema de potência é diferente do modelo da matriz Jacobiana tradicional onde se obtém uma matriz de dimensão igual ao número de equações algébricas mais as equações diferenciais. Este novo modelo considerado, proposto por Vournas, é baseado em uma matriz de ordem  $m$ , sendo  $m$  o número de unidades geradoras no sistema de potência, obtida a partir da linearização das equações da rede, das equações das máquinas e das equações de transformação direta e inversa, em torno de um ponto de operação. Este é um modelo análogo ao proposto por Heffron-Phillips em [29] que considera o sistema de uma máquina conectada à barra infinita, porém com algumas particularidades.

O modelo para o gerador síncrono utilizado neste trabalho é o mesmo definido como 'modelo 2' em Arrillaga, representado por um modelo de terceira ordem onde a resistência da armadura e os enrolamentos amortecedores não são considerados. O modelo para o regulador automático de tensão é representado por uma função de transferência de primeira ordem, entretanto este não é considerado na determinação dos índices de estabilidade de tensão. Sob este aspecto, os índices de estabilidade determinados tornam-se importantes, tendo em vista que os mesmos podem detectar o colapso de tensão bem antes que este se torne inevitável e portanto pode indicar quando o sistema está em estado de alerta.

O regulador de tensão é considerado somente na determinação dos índices de controlabilidade de tensão do sistema que têm por finalidade indicar se o sistema é controlável ou não a cada contingência aplicada, considerando que o sistema apresenta apenas o regulador de tensão para seu controle; sem considerar controladores do tipo PSS.

Para ratificar e validar os resultados obtidos pela metodologia proposta, foram utilizados os *softwares* ANAREDE, ANATEM e PACDYN na análise dos sistemas teste. Estas três ferramentas, desenvolvidas pelo Centro de Pesquisa em

Energia Elétrica (CEPEL), são pacotes computacionais já consagradas no estudo da estabilidade de sistemas de potência

De um modo geral, os índices de estabilidade de tensão apresentados neste trabalho fornecem um ótimo parâmetro para analisar o planejamento da operação de um sistema elétrico de potência; pois com base nos mesmos é possível identificar as contingências críticas e avaliar o grau de controlabilidade do mesmo através dos índices de controlabilidade obtidos.

Considerando o tempo computacional requerido para o cálculo dos índices propostos, o maior esforço exigido está direcionado para a redução da rede elétrica aos terminais de geração, todavia este problema é facilmente contornado com a utilização de rotinas envolvendo técnicas de ordenação e esparsidade. As demais operações matriciais existentes, como por exemplo, a inversão de  $D^{-1}$  e o cálculo dos autovalores, não se apresentam como dificuldades computacionais relevantes para o contexto deste trabalho pois as mesmas são efetuadas para matrizes de dimensão reduzida. Para o caso de sistemas de grande porte, com um número elevado de geradores, o esforço computacional despendido para o cálculo dos autovalores pode ser melhorado utilizando um algoritmo sequencial, aplicando-se o método de iterações simultâneas “bi-iteration” (ISBI) para o cálculo somente dos maiores (ou menores) autovalores de matriz de controlabilidade (ou estabilidade) de tensão.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma das principais contribuições deste trabalho concerne na apresentação de um novo modelo para o estudo e análise da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência. Neste sentido, baseado no modelo aqui proposto e nas melhorias computacionais que têm sido desenvolvidas atualmente, uma série de novos trabalhos podem surgir dando continuidade ao que fora desenvolvido até aqui, dentre os quais pode-se citar.

1) Para o aproveitamento do novo modelo apresentado:

- **Considerar cargas variáveis.** Como o problema da estabilidade de tensão está intimamente relacionado com o carregamento da rede, seria interessante avaliar o comportamento destes índices junto à cargas variáveis, aproximando o sistema de um modelo mais realístico;
- **Aplicar em sistemas de maior porte.** O maior sistema testado neste trabalho apresenta uma matriz de dimensão  $10 \times 10$  após a redução aos terminais dos geradores. Em sistemas de grande porte, com um maior número de geradores, é possível verificar a vantagem da utilização do algoritmo sequencial 'bi-iteration' para cálculo dos autovalores. Uma desvantagem que pode surgir é na inversão da matriz  $D^{-1}$  que também é densa;
- **Aplicar o modelo no estudo de projetos de controladores especiais.** Este tópico seria uma extensão muito interessante nesta linha de pesquisa, substituindo a matriz Jacobiana tradicional no projeto de reguladores pelo modelo implementado neste trabalho; tentando observar quais mudanças significativas seriam apresentadas pela nova metodologia.

2) Para o aproveitamento das inovações computacional e tecnológica atuais:

- **Utilizar processamento paralelo.** A utilização desta ferramenta pode representar ganhos significativos em respeito ao tempo e esforço computacional despendido na inversão de  $D^{-1}$  para sistemas de grande porte;
- **Implementar sistema iterativo para execução da contingência.** Para cada nova contingência que se queira estudar é necessária a

execução do fluxo de potência e, portanto, para tornar o sistema iterativo faz-se necessária a inserção de um método para o cálculo do fluxo de potência no algoritmo implementado.

- **Explorar o cálculo dos autovetores à direita e à esquerda do método ISBI.** O algoritmo sequencial 'bi-iteration' é uma ferramenta bem mais completa do que fora explorado neste trabalho. A determinação dos autovetores à direita e à esquerda é uma das informações não utilizadas aqui, as quais têm grande valor para determinar quais geradores são mais afetados pela contingência estudada.

# APÊNDICE A

## FORMULAÇÃO DO MODELO LINEARIZADO PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS

### A.1 EQUAÇÕES BÁSICAS

As equações utilizadas para descrever uma máquina síncrona conectada a barra infinita são as mesmas utilizadas por Heffron-Phillips (1052) e por DeMello e Concórdia (1969), conforme a seguir:

$$v_d = x_q \cdot i_q \quad (\text{A.1})$$

$$v_q = E'_q - x'_d \cdot i_d \quad (\text{A.2})$$

$$v_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (\text{A.3})$$

$$T'_{do} \cdot \frac{d}{dt} E'_q = E_{fd} - x_{ad} \cdot i_{fd} \quad (\text{A.4})$$

$$P_e = E_{qd} \cdot i_q \quad (\text{A.5})$$

$$E'_q = x_{ad} \cdot i_{fd} - (x_d - x'_d) \cdot i_d \quad (\text{A.6})$$

$$E_{qd} = E'_q + (x_q - x'_d) \cdot i_d \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{2H}{377} \cdot \frac{d^2}{dt^2} \delta + \frac{D}{377} \cdot \frac{d}{dt} \delta = P_m - P_e \quad (\text{A.8})$$

As equações representam máquinas síncronas de pólos salientes, considerando o amortecimento e a resistência da armadura desprezíveis. O modelo é de 3ª ordem, representado pelos desvios do ângulo elétrico ( $\Delta\delta$ ) e da velocidade do rotor ( $\Delta\omega$ ) e também pelo desvio da força eletromagnética transitória no eixo\_q ( $\Delta E'_q$ ). Este é um modelo similar ao modelo conhecido na literatura como 'modelo 2', em Arrillaga (Apêndice B).

## A.2 NOTAÇÃO MATRICIAL

As equações das máquinas síncronas devem ser associadas as equações da rede a fim de que se possa linearizá-las em torno de um ponto de operação e formar o modelo para o sistema de potência.

Neste sentido, faz-se necessário introduzir uma notação matricial para representar o modelo do sistema de potência multimáquinas. Esta notação matricial é a mesma adotada por Taylor (1962) e seguida por Vournas (1983).

Seja um sistema de potência constituído por  $m$  máquinas síncronas e qualquer número de barras infinita. As expressões (A.9) e (A.10) representam vetores e dimensão  $2m \times 1$ , contendo, respectivamente, as correntes dos eixos 'd' e 'q', e as partes real e imaginária das correntes da máquina em relação à referência síncrona. Os vetores para as tensões terminais  $v_M$  e  $V_N$ , que não são mostrados aqui, são representados de forma similar.

$${}^{(iM)} = \begin{bmatrix} id_i \\ iq_i \end{bmatrix} \quad (A.9)$$

$${}^{(IN)} = \begin{bmatrix} I_{R_i} \\ I_{I_i} \end{bmatrix} \quad (A.10)$$



A tensão interna da máquina é representada pela expressão (A.11), de dimensão  $2m \times 1$ , sendo  $E'_d = 0$ , devido os enrolamentos amortecedores do eixo-q não serem considerados.

$$(E) = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{q_i} \end{bmatrix} \tag{A.11}$$

Nas expressões (A.12) e (A.13) tem-se matrizes de dimensão  $2m \times 2m$  que representam, respectivamente, a matriz admitância nodal onde os números complexos são equivalentes a submatrizes  $2 \times 2$ , e a matriz de impedância das máquinas onde a resistência da armadura é desprezível.

$$(Y_N) = \begin{bmatrix} g_{ji} & -b_{ji} \\ b_{ji} & g_{ji} \\ g_{ii} & -b_{ii} \\ b_{ii} & g_{ii} \end{bmatrix} \tag{A.12}$$

$$(Z_M) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -x_{q_i} \\ x'_{d_i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{A.13}$$

A matriz 'Q' da expressão (A.14) representa a matriz de transformação ortogonal responsável por associar as equações das máquinas síncronas às equações da rede.

$$Q = \begin{bmatrix} \cdot & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_i & \sin \delta_i \\ 0 & -\sin \delta_i & \cos \delta_i \\ 0 & 0 & \cdot \end{bmatrix} \tag{A.14}$$

A partir desta notação matricial de (A.9) à (A.14), o modelo para o sistema de potência multimáquinas pode ser representado sob a seguinte forma compacta, conforme expressões de (A.15) à (A.18), e que serão úteis no instante de determinar as constantes generalizadas para o modelo multimáquinas.

$$(i_m) = (A)(I_N) \quad (A.15)$$

$$(v_m) = (A)(V_N) \quad (A.16)$$

$$(I_N) = (Y_N)(V_N) \quad (A.17)$$

$$(E') = (v_m) + (Z_M)(i_m) \quad (A.18)$$

### A.3 CONSTANTES GENERALIZADAS

As constantes generalizadas do modelo, definidas pelas matrizes 'M', são obtidas a partir das derivadas parcial das expressões (A.1) à (A.5), chegando-se às seguintes expressões:

$$M_{1ij} = \frac{\partial P_{e_i}}{\partial \delta_j} = E_{q_{do_i}} \cdot \frac{\partial i_{q_i}}{\partial \delta_j} + (x_{q_i} - x'_{d_i}) \cdot i_{q_{o_i}} \cdot \frac{\partial i_{d_i}}{\partial \delta_j} \quad (A.19)$$

$$M_{2ij} = \frac{\partial P_{e_i}}{\partial E'_{q_j}} = \{ \delta_{ij} + (x_{q_i} - x'_{d_i}) \cdot \frac{\partial i_{d_i}}{\partial E'_{q_j}} \} \cdot i_{q_{o_i}} + E_{q_{do_i}} \cdot \frac{\partial i_{q_i}}{\partial E'_{q_j}} \quad (A.20)$$

$$M_{3ij} = T'_{do_i} \cdot \frac{\partial E'_{q_i}}{\partial E'_{q_j}} = -\delta_{ij} - (x_{d_i} - x'_{d_i}) \cdot \frac{\partial i_{d_i}}{\partial E'_{q_j}} \quad (A.21)$$

$$M_{4ij} = -T'_{do_i} \cdot \frac{\partial E'_{q_i}}{\partial \delta_j} = (x_{d_i} - x'_{d_i}) \cdot \frac{\partial i_{d_i}}{\partial \delta_j} \quad (A.22)$$

$$M_{5ij} = \frac{\partial V_{t_i}}{\partial \delta_j} = \frac{v_{do_i}}{v_{to_i}} \cdot x_{q_i} \cdot \frac{\partial i_{q_i}}{\partial \delta_j} - \frac{v_{qo_i}}{v_{to_i}} \cdot x'_{d_i} \cdot \frac{\partial i_{d_i}}{\partial \delta_j} \quad (A.23)$$

$$M_{\sigma_{ij}} = \frac{\partial V_{t_i}}{\partial E'_{q_j}} = \frac{v_{do_i}}{v_{to_i}} \cdot x_{q_i} \cdot \frac{\partial i_{q_i}}{\partial E'_{q_j}} - \frac{v_{qo_i}}{v_{to_i}} \cdot x_{d_i} \cdot \frac{\partial i_{d_i}}{\partial E'_{q_j}} \quad (\text{A.24})$$

O termo  $\delta_{ij}$ , denominado de Delta de Kronecker, é definido por  $\delta_{ij} \triangleq \frac{\partial E'_{q_i}}{\partial E'_{q_j}}$  e seu valor é dado da seguinte forma:  $\delta_{ij} = 0$  no caso de  $i \neq j$ , e  $\delta_{ij} = 1$  no caso de  $i = j$ .

Estas matrizes só podem ser calculadas quando as derivadas das correntes das máquinas em relação ao ângulo do rotor, e em relação ao enlace de fluxo do campo, são conhecidos. Para obter estas derivadas, a equação de transformação da corrente (A.15) é diferenciada em relação ao ângulo do rotor, em seguida a diferencial da equação da rede (A.17) é aplicada, e com o uso da equação de transformação da tensão (A.16), em sua forma inversa, e da equação da máquina (A.18), tem-se a seguinte relação:

$$\left( I_{2m} + AY_N A^T Z_M \right) \left( \frac{\partial i_m}{\partial \delta_j} \right) = \left( \frac{\partial A}{\partial \delta_j} \right) (I_N) + (AY_N) \left( \frac{\partial A^T}{\partial \delta_j} \right) (v_m) \quad (\text{A.21})$$

Definindo em (A.21)

$$\left( I_{2m} + AY_N A^T Z_M \right) = (D)^{-1} \quad (\text{A.22})$$

E sabendo-se que as seguintes expressões são verdadeiras.

$$\left( \frac{\partial A}{\partial \delta_j} \right) (I_N) = \begin{bmatrix} 0 \\ \hline i_{qo_j} \\ -i_{do_j} \\ \hline 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.23})$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{A}^T}{\partial \delta_j}\right)(\mathbf{v}_m) = \begin{bmatrix} 0 \\ -V_{Io_j} \\ V_{Ro_j} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.24})$$

As derivadas parcial da corrente da máquina em relação ao ângulo do rotor para a  $i$ -ésima máquina são dadas por:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{i}_m}{\partial \delta_j}\right) = (\mathbf{D}) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{qo_j} \\ -i_{do_j} \\ 0 \end{bmatrix} + (\text{DAY}_N) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -V_{Io_j} \\ V_{Ro_j} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

De forma análoga à dedução acima, pode-se obter as derivadas parcial da corrente em relação ao enlace de fluxo do campo. O resultado é a equação (A.26).

$$\left(\frac{\partial \mathbf{i}_m}{\partial E'_{q_j}}\right) = (\text{DAY}_N \mathbf{A}^T) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.26})$$

As expressões (A.25) e (A.26) fornecem as derivadas necessárias para o cálculo das matrizes 'M' a partir das equações (A.19) até (A.24).

A principal dificuldade deste modelo, sob o aspecto computacional, está na inversão da matriz  $\mathbf{D}^{-1}$  definida em (A.22) a qual é, a maioria as vezes, não-singular. A matriz  $\mathbf{D}^{-1}$  é uma matriz densa e, portanto, não permite o uso das técnicas de esparsidade para determinar sua inversa.

## **APÊNDICE B**

### **MODELO BÁSICO DO GERADOR SÍNCRONO**

Neste Apêndice apresenta-se o modelo do gerador síncrono proposto por Arrillaga (1983) e denominado de 'modelo 2'. Embora este modelo apresente o eixo direto adiantado em relação ao eixo de quadratura nas coordenadas de Park, enquanto o modelo utilizado no trabalho apresenta este eixo direto atrasado, esta é uma referência clássica para a modelagem de geradores, onde as equações para a representação do modelo podem ser as mesmas, com pequenas mudanças no sinal das variáveis ligadas ao eixo direto, que reflete o deslocamento de 180 graus considerado.

#### **B.1 CONVENÇÕES PARA O MODELO**

- Eixo direto adiantado.
- Tensões terminais representadas por  $V_d$  e  $V_q$ , respectivamente, par os eixos direto e de quadratura.
- Correntes dos eixos direto e de quadratura representadas por  $I_d$  e  $I_q$ , respectivamente.
- Corrente e tensão terminal representadas por  $V$  e  $I$ , respectivamente.

• Circuito Equivalente

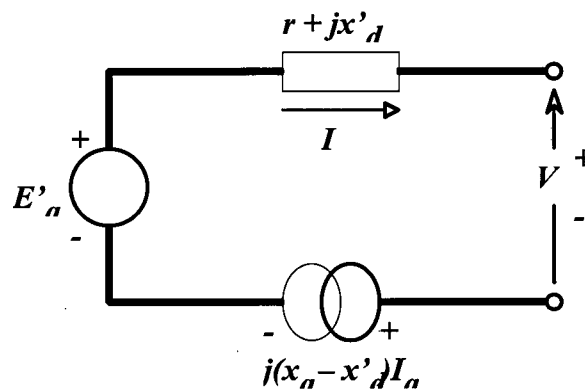


Figura B.1 \_ Circuito Equivalente para o Modelo 2 da Máquina Síncrona de Pólos Salientes.

## B.2 HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS

- Hipóteses gerais para estudos e estabilidade.
- Desprezam-se todos os enrolamentos amortecedores e/ou correntes no ferro e seus efeitos ( $x'_q = x'_d$  e  $E'_d = 0$ ).
- Consideram-se os transitórios de campo.

## B.3 EQUAÇÕES MATEMÁTICAS

• Potência Elétrica no entreferro

$$P_e = E'_q \cdot I_q - (x'_q - x'_d) I_d \cdot I_q \quad (\text{B.1})$$

• **Equações do Rotor**

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} + (x_d - x'_d)I_d - E'_q] \quad (\text{B.2})$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_R}{2H} [P_m - P_e - D(\omega - \omega_R)] \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_R \quad (\text{B.4})$$

• **Equações do Estator**

\_ Em transformada de Park.

$$E'_q - V_q = r.I_q - x'_d.I_d \quad (\text{B.5})$$

$$-V_d = r.I_d + x'_q.I_q \quad (\text{B.6})$$

\_ Na forma fasorial (ver Figura B.1).

$$E'_q = V + r.I + jx'_d.I + j(x_q - x'_d)I_q \quad (\text{B.7})$$

• **Diagrama Fasorial**

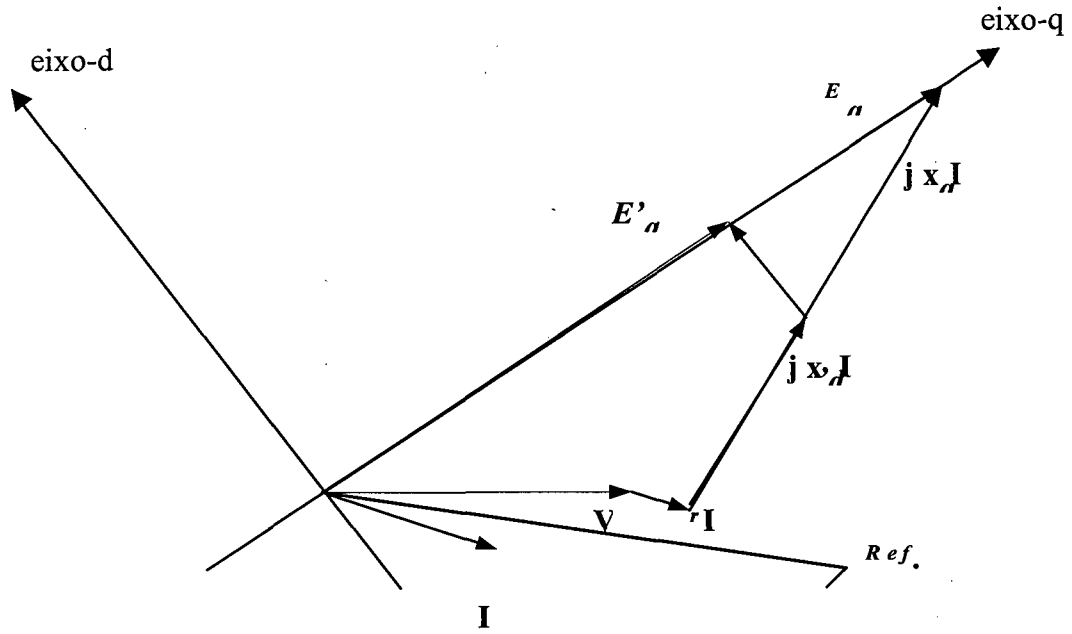


Figura B.2 \_ Diagrama Fasorial para o Modelo 2 da Máquina Síncrona de Pólos Salientes.



## APÊNDICE C

### DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS

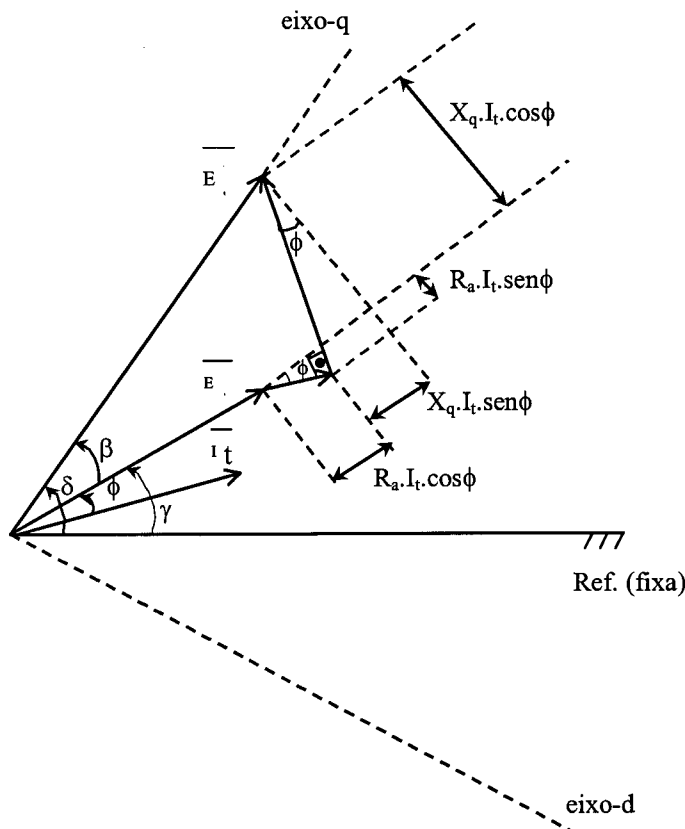
Para realizar a análise da estabilidade é necessário conhecer as condições sob as quais o sistema está operando antes que ocorra a perturbação. Tais condições são definidas como condições iniciais de operação para a máquina síncrona e podem ser determinadas conforme demonstrativo a seguir.

Considerando que uma referência comum, definida por referência síncrona, é adotada para o sistema de potência. Esta referência pode ser escolhida de forma arbitrária entretanto, uma vez escolhida, não pode ser variada durante a realização do estudo da estabilidade. Considerando também que as potências ativa e reativa e o módulo de tensão da barra terminal são grandezas especificadas (ou podem ser obtidas através do fluxo de potência), é possível determinar, a partir destas, a corrente terminal da *i*-ésima máquina síncrona e o ângulo  $\phi$  do fator de potência da referida máquina, como ilustra as equações (C.1) e (C.2), respectivamente.

$$I_{t_i} = \frac{\sqrt{P_{t_i}^2 + Q_{t_i}^2}}{E_{t_i}} \quad (\text{C.1})$$

$$\phi_i = \cos^{-1} \left( \frac{P_{t_i}}{E_{t_i} \cdot I_{t_i}} \right) \quad (\text{C.2})$$

Considere agora a  $i$ -ésima máquina síncrona. Seja  $\overline{E}_{t_i}$  o fasor da tensão terminal que forma um ângulo  $\gamma_i$  em relação à referência síncrona arbitrária (adotada no início do estudo), e  $\delta_i$  o ângulo formado pelo fasor  $\overline{E}'_{q_i}$  da tensão proporcional ao enlace do fluxo de campo, em relação à mesma referência síncrona arbitrária, conforme diagrama fasorial ilustrado na Figura C.1.



**Figura C.1 \_ Diagrama Fasorial para Determinação das Condições Iniciais da Máquina Síncrona**

Pode-se notar no diagrama fasorial da Figura C.1 que o ângulo formado entre  $\overline{E}_{t_i}$  e  $\overline{E}'_{q_i}$ , definido por ângulo de carga e representado pela variável  $\beta_i$ , é determinado analiticamente se os parâmetros  $R_{ai}$  (resistência da armadura) e  $X_{qi}$

(reatância do eixo-q) da *i*-ésima máquina forem conhecidos. Estes parâmetros são, geralmente, identificados na máquina síncrona e portanto  $\beta_i$  pode ser obtido através da equação (C.3).

$$\beta_i = \tan^{-1} \left( \frac{X_{q_i} \cdot I_{t_i} \cdot \cos \phi_i - R_{a_i} \cdot I_{t_i} \cdot \sen \phi_i}{E_{t_i} + R_{a_i} \cdot I_{t_i} \cdot \cos \phi_i + X_{q_i} \cdot I_{t_i} \cdot \sen \phi_i} \right) \quad (\text{C.3})$$

Após o cálculo do ângulo  $\beta_i$  é possível determinar o ponto de operação inicial para a *i*-ésima máquina síncrona, com base no diagrama fasorial da Figura C.1, pela projeção das componentes de corrente e tensão para os eixos direto e de quadratura, conforme mostrado a seguir.

$$\delta_i = \beta_i + \phi_i \quad (\text{C.4})$$

$$e_{d_i} = E_{t_i} \cdot \sen \beta_i \quad (\text{C.5})$$

$$e_{q_i} = E_{t_i} \cdot \cos \beta_i \quad (\text{C.6})$$

$$i_{d_i} = I_{t_i} \cdot \sen(\beta_i + \phi_i) \quad (\text{C.7})$$

$$i_{q_i} = I_{t_i} \cdot \cos(\beta_i + \phi_i) \quad (\text{C.8})$$

## APÊNDICE D

### DADOS DOS SISTEMAS TESTE

Este apêndice apresenta os dados dos sistemas testes para o caso base que são utilizados na obtenção do fluxo de carga. Na tabela referente aos dados de barra, tem-se uma coluna indicando o tipo de cada barra que segue a mesma notação utilizada no software para a simulação do fluxo de carga (ANAREDE). Ou seja: '0' para barras do tipo PQ (carga), '1' para barras do tipo PV (geração) e '2' para barras do tipo V $\theta$  ('slack'). A base adotada para os dados da rede é de 100 MVA.

#### D.1 SISTEMA ANDERSON & FOUAD

© *Dados de barra*

Barra	Tipo	Tensão pu	Geração		Carga	
			MW	MW	MVAR	MVAR
1	2	1.040		0.0	0.0	
2	1	1.025	163.0	0.0	0.0	
3	1	1.025	85.0	0.0	0.0	
4	0		0.0	0.0	0.0	
5	0		0.0	125.0	50.0	
6	0		0.0	90.0	30.0	
7	0		0.0	0.0	0.0	
8	0		0.0	100.0	35.0	
9	0		0.0	0.0	0.0	

© **Dados de Linha**

Da Barra	Para Barra	Rl pu	Xl pu	Bsh pu	Tap
1	4	0.000	0.0576	0.0	1.0
2	7	0.000	0.0625	0.0	1.0
3	9	0.000	0.0586	0.0	1.0
4	5	0.010	0.085	0.176	1.0
4	6	0.017	0.092	0.158	1.0
5	7	0.032	0.161	0.306	1.0
6	9	0.039	0.170	0.358	1.0
7	8	0.0085	0.072	0.149	1.0
8	9	0.0119	0.1008	0.209	1.0

© **Dados do Gerador Síncrono**

MS	Base MVA	H seg	X'd pu	Xd pu	Xq pu	Ra pu	T'do pu	D	Ka pu	Ta pu
1	100.0	23.64	0.0608	0.1460	0.0969	0.0	8.96	0.0		
2	100.0	6.40	0.1198	0.8958	0.8645	0.0	6.00	0.0		
3	100.0	3.01	0.1813	1.3125	1.2578	0.0	5.89	0.0		

## D.2 SISTEMA NEW ENGLAND

© **Dados de barra**

Barra	Tipo	Tensão pu	Geração MW	Carga MW	MVAR
1	0		0.0	0.0	0.0
2	0		0.0	0.0	0.0
3	0		0.0	322.0	2.4
4	0		0.0	500.0	184.0
5	0		0.0	0.0	0.0
6	0		0.0	0.0	0.0
7	0		0.0	233.8	84.0
8	0		0.0	522.0	176.0
9	0		0.0	0.0	0.0
10	0		0.0	0.0	0.0
11	0		0.0	0.0	0.0
12	0		0.0	8.5	88.0
13	0		0.0	0.0	0.0
14	0		0.0	0.0	0.0
15	0		0.0	320.0	153.0
16	0		0.0	329.4	32.3
17	0		0.0	0.0	0.0

18	0		0.0	158.0	30.0
19	0		0.0	0.0	0.0
20	0		0.0	680.0	103.0
21	0		0.0	274.0	115.0
22	0		0.0	0.0	0.0
23	0		0.0	247.5	84.6
24	0		0.0	308.6	-92.2
25	0		0.0	224.0	47.2
26	0		0.0	139.0	17.0
27	0		0.0	281.0	75.5
28	0		0.0	206.0	27.6
29	0		0.0	283.5	26.9
30	1	1.0480	250.00	0.0	0.0
31	1	0.9820	573.22	9.2	4.6
32	1	0.9831	650.00	0.0	0.0
33	1	0.9972	632.00	0.0	0.0
34	1	1.0120	508.00	0.0	0.0
35	1	1.0490	650.00	0.0	0.0
36	1	1.0640	560.00	0.0	0.0
37	1	1.0280	540.00	0.0	0.0
38	1	1.0270	830.00	0.0	0.0
39	2	1.0300		1104.0	250.0

© **Dados de Linha**

Da Barra	Para Barra	Rl pu	Xl pu	Bsh pu	Tap
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	1.0
1	39	0.0010	0.0250	0.7500	1.0
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	1.0
2	25	0.0070	0.0086	0.1460	1.0
2	30	0.0000	0.0181	0.0000	1.025
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	1.0
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	1.0
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	1.0
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	1.0
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	1.0
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	1.0
6	7	0.0006	0.0092	0.1130	1.0
6	11	0.0007	0.0082	0.13889	1.0
6	31	0.0000	0.0250	0.0000	1.070
7	8	0.0004	0.0046	0.0780	1.0
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	1.0
9	39	0.0010	0.0250	1.2000	1.0
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	1.0
10	13	0.0004	0.0043	0.0729	1.0
10	32	0.0000	0.0200	0.0000	1.070
12	11	0.0016	0.0435	0.0000	1.006
12	13	0.0016	0.0435	0.0000	1.006
13	14	0.0009	0.0101	0.1723	1.0
14	15	0.0018	0.0217	0.3660	1.0
15	16	0.0009	0.0094	0.1710	1.0
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	1.0

16	19	0.0016	0.0195	0.3040	1.0
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	1.0
16	24	0.0003	0.0059	0.0680	1.0
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	1.0
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	1.0
19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.070
19	20	0.0007	0.0138	0.0000	1.060
20	34	0.0009	0.0180	0.0000	1.009
21	22	0.0008	0.0140	0.2565	1.0
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	1.0
22	35	0.0000	0.0143	0.0000	1.025
23	24	0.0022	0.0350	0.3610	1.0
23	36	0.0005	0.0272	0.0000	1.0
25	26	0.0032	0.0323	0.5130	1.0
25	37	0.0006	0.0232	0.0000	1.025
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	1.0
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	1.0
26	29	0.0057	0.0625	1.0290	1.0
28	29	0.0014	0.0151	0.2490	1.0
29	38	0.0008	0.0156	0.0000	1.025

© **Dados do Gerador Síncrono**

MS	Base MVA	H seg	X'd pu	Xd pu	Xq pu	Ra pu	T'do pu	D	Ka pu	Ta pu
30	1000	4.20	0.310	1.000	0.690	0.0	10.20	4.00		
31	1000	3.03	0.697	2.950	2.820	0.0	6.56	9.75		
32	1000	3.58	0.531	2.495	2.370	0.0	5.70	10.00		
33	1000	2.86	0.436	2.620	2.580	0.0	5.69	10.00		
34	1000	2.60	1.320	6.700	6.200	0.0	5.40	3.00		
35	1000	3.48	0.500	2.540	2.410	0.0	7.30	10.00		
36	1000	2.64	0.490	2.950	2.920	0.0	5.66	8.00		
37	1000	2.43	0.570	2.900	2.800	0.0	6.70	9.00		
38	1000	3.45	0.570	2.106	2.050	0.0	4.79	14.00		
39	1000	50.00	0.060	0.200	0.190	0.0	7.00	10.00		

## **BIBLIOGRAFIA**

**ANDERSON, P.M.; FOUAD, A.A.** "Power System Control and Stability". Iowa State University Press, 1977.

**ARRILLAGA, J.; ARNOLD, C.P.; HARKER, B.J.** "Computer Modelling of Electrical Power Systems". John Wiley & Sons, 1983.

**BEGOVIĆ, M.M.; PHADKE, A.G.** "Control of Voltage Stability using Sensitivity Analysis". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRS-7, p. 114-123, Fev. 1992.

**CAMPAGNOLO, J.M.** "Aplicação de Processamento Paralelo na Avaliação da Estabilidade a Pequenas Perturbações: Algoritmos para o Cálculo Parcial de Autovalores e Autovetores". Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Dez. 1994.

**CAÑIZARES, C.A.; ALVARADO, F.L.; DEMARCO, C.L. et al.** "Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRS-7, p. 673-683, Mai. 1992.

**CEPEL** - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. ANAREDE – "Programa de Análise de Redes". Manual do Usuário. Versão 05. Jan. 1995.

**CEPEL** - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. ANATEM – "Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos". Manual do Usuário. Versão 01. Jan. 1995.

**CEPEL** - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. PACDYN – "Small Signal Stability Analysis and Control". User's Manual. Versão 4.1. Mai. 1997.



**CIGRE.** Task Force 38.02.10, "Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena", Mar. 1993.

**CLEMENTS, K.** "Métodos Computacionais para Sistemas de Potência de Grande Porte". EEL 6350 - Curso de Pós Graduação de Engenharia Elétrica, UFSC, Maio 1998.

**DEMELO, F.P. e CONCÓRDIA, C.** "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control". IEEE Transactions on Power Apparatus System, V. PAS-88, p. 189-202, Abr. 1969.

**ELGERD, O.L.** "Electric Energy Systems Theory, An Introduction". McGraw-Hill Company, 1983.

**FLATABO, N.; OGNEDAL, R.; CARLSEN, T.** "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRS-5, p. 1286-1293, Nov. 1990.

**GAO, B.; MORISON, G.K.; KUNDUR, P.** "Voltage Stability Evaluation using Modal Analysis". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRS-7, p. 1529-1542, Nov. 1992.

**HEFFRON, W.G.; PHILLIPS, R.A.** "Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large turbine Generators". AIEE Transactions on Power Apparatus System, V. PAS-71, p. 692-697, Ago. 1952.

**HILL, D. J.** "Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRS-8, p. 166-176, 1993.

**KUNDUR, P.** "Power System Stability and Control". McGraw-Hill Inc., 1994.

**KUNDUR, P.; MORISON, G.K.** "A Review of Definitions and Classification of Stability Problems in Today's Power Systems". IEEE/PES Meeting, New York, Fev. 1997.

- LEE**, B.; **AJJARAPU**, V. "A Piecewise Global Small-Disturbance Voltage Stability Analysis of Structure-Preserving Power System Models". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRs-10, p. 1963-1971, Nov. 1995.
- LEMOS**, F.A.B. "Aplicação de um Método para Análise Estática de Estabilidade de Tensão". Dissertação de Mestrado, UFSC, Maio 1994.
- LERM**, A.A.P. "Análise Modal Aplicada à Estabilidade de Tensão com a Inclusão de Modelos Dinâmicos de Cargas". Dissertação de Mestrado, UFSC, Maio 1995.
- LÖF**, P.A.; **SMED**, T.; **ANDERSON**, G. et al. "Fast Calculation of a Voltage Stability Index". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRs-7, p. 54-64, Fev. 1992.
- MONTICELLI**, A.J. "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica". Ed. Edgard Blücher, 1983.
- MORISON**, G.K.; **GAO**, B.; **KUNDUR**, P. "Voltage Stability Analysis using Static and Dynamic Approaches". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRs-8, p. 1159-1171, Ago. 1993.
- NATIVEL**, G.; **JACQUEMART**, Y.; **SERMANSON**, V. et al. "Implementation of a Voltage Stability Analysis Tool using Quasi-Steady-State Time Simulation". 13th Power Systems Computation Conference, Trondheim, p. 1016-1022, 28 Jun. - 02 Jul. 1999.
- SAUER**, P.W.; **PAI**, M.A. "Power System Steady-State and the Load Flow Jacobian". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRs-5, p. 1374-1383, Nov. 1990.
- SCHLUETER**, R.A.; **HU**, I.; **CHANG**, M.W. et al. "Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse". IEEE Transactions on Power Systems, V. PWRs-6, p. 285-292, Fev. 1991.

- SILVA**, E. L. Projeto ONS/UFSC. "Administração dos Serviços Ancilares para o Sistema Elétrico Brasileiro". Relatório No.1 – Descrição do problema e a experiência internacional. Ago. 1999.
- SMITH**, B.T.; **GARBOW**, B.S.; **MOLLER**, C.B. et al. "Matrix Eigensystem Routines - EISPACK Guide". Springer-Verlog, 2a ed., 1976.
- TAMURA**, Y.; **MORI**, H.; **IWAMOTO**, S. "Relationship Between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-102, p. 1115-1125, May 1983.
- TAYLOR**, D.G. "Analysis of Synchronous Machines Connected to Power System Networks". IEE Monograph no. 526 S, p. 606-610, Jul. 1962.
- TAYLOR**, C.W. "Power System Voltage Stability". McGraw-Hill Inc., 1994.
- THOMAS**, R. J.; **TIRANUCHIT**, A. "Voltage Instabilities in Electric Power Networks". Proceedings Eighteenth Southeast Symposium on System Theory, p. 359-363, 1986.
- TIRANUCHIT**, A.; **THOMAS**, R. J. "A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRS-3, p. 87-93, Fev. 1988.
- VAN CUTSEM**, T. "A Method to Compute Reactive Power Margins with Respect to Voltage Collapse". IEEE Transactions on Power , v. PWRS-6, p. 145-156, Fev. 1991.
- VAN CUTSEM**, T.; **JACQUEMART**, Y. **MARQUET**, J.N. et al. "Extensions and Applications of a Mid-Term Voltage Analysis Method". Proceedings 3rd International Workshop on Bulk Power System Voltage Phenomena, p. 251-270, Ago. 1994.
- VAN CUTSEM**, T.; **VOURNAS**, C.D. "Voltage Stability of Electric Power Systems". Kluwer Academic Publishers, 1998.

- VENIKOV**, V.A.; **STROEV**, V.A.; **IDELCHICK**; V.I. et al. "Estimation of Electrical Power System Steady-State Stability in Load Flow Calculations". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-94, p. 1034-1041, May/Jun. 1975.
- VOURNAS**, C.D.; **FLEMING**, R.J. "Generalization of the Heffron-Phillips Model of a Synchronous Generator". IEEE/PES Summer Meeting, Los Angeles, paper A 78 534-0, Jul. 1978.
- VOURNAS**, C.D.; **PAPADIAS**, B.C. "A Linear Multimachine Model of a Power System that Mantains Conceptual Clarity". IASTED EES'83 Conference Proceedings, p. 195-198, Set. 1983.
- VOURNAS**, C.D.; **KRASSAS**, N.D. "Voltage Stability as Affected by Static Load Characteristics". IEE PROCEEDINGS, Parte C, V. 140, p. 221-228, Maio 1993.
- VOURNAS**, C.D. "Voltage Stability and Controllability Indices for Multimachine Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, V. PWRS-10, p. 1183-1194, Ago. 1995.
- WAN**, H.B.; **EKWUE**, A.O. "Integrated Approach to Voltage Collapse Margin Calculation". 13th Power Systems Computation Conference, Trondheim, p. 987-992, 28 Jun. - 02 Jul. 1999.
- WEEDY**, B.M. "Electric Power Systems". 3a ed. revisada, John Wiley & Sons, 1987.
- XU**, W.; **MANSOUR**, Y. "Voltage Stability Analysis using Generic Dynamic Load Models". IEEE Transactions on Power Systems, v. PWRS-9, p. 479-493, Fev. 1994.
- YU**, Y-N. "Electric Power System Dynamics". Academic Press, 1983.