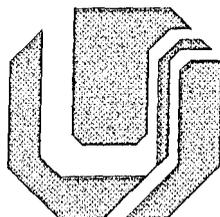


11011  
621.3  
F4810  
TCC/ME

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ANÁLISE DA EFICÁCIA DE INDICADORES DE  
PROXIMIDADE DE COLAPSO DE TENSÃO ATRAVÉS DE  
UM PROGRAMA DE ESTABILIDADE**

**DIRBI/UFU**



1000186955

**MARCELO SILVA FILGUEIRAS**

**Uberlândia  
Agosto/1997**

100  
f

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DA EFICÁCIA DE INDICADORES DE PROXIMIDADE  
DE COLAPSO DE TENSÃO ATRAVÉS DE UM  
PROGRAMA DE ESTABILIDADE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por **Marcelo Silva Filgueiras**, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca examinadora:

Geraldo Caixeta Guimarães, PhD. (UFU) - Orientador  
José Carlos de Oliveira, Dr. (UFU) - Co-Orientador  
Adélio José de Moraes, Dr. (UFU)  
Carlos Roberto Minussi, Dr. (UNESP)

Uberlândia, 28 de agosto de 1997

## RESUMO

Nos últimos anos, tem-se observado que o nível de investimentos em melhoramentos e mesmo ampliações na geração e transmissão dos sistemas elétricos de potência não tem acompanhado o crescimento do consumo de energia, fazendo com que estes sistemas operem mais carregados e próximos de seus limites. Estes fatos têm evidenciado o problema de insuficiência das reservas de reativos necessárias para garantir um perfil de tensão satisfatório para o sistema em face a acréscimos de demanda. Tendo isto em vista, este trabalho tem por objetivo estudar os fatores que determinam este fenômeno e, a partir daí, analisar alguns coeficientes de sensibilidade propostos para indicar a proximidade de ocorrência deste. Para tanto, é utilizado um programa de estabilidade dinâmica modificado, no qual são implementados três indicadores de proximidade do colapso (VCPI's). As simulações levam em conta o efeito da limitação do suprimento de potência reativa pelo gerador na estabilidade de tensão. São empregados dois sistemas-teste: um pequeno sistema de 3 barras, para facilitar as conclusões, e outro de 36 barras.

## **ABSTRACT**

In the last years, it has been observed that the amount of investment to improve and increase the power system generation and transmission has not matched the growing load demand. As a result, the system has been working more loaded and, therefore, nearer to its limits. These facts have put in evidence the problem of insufficient reserve of reactive supply which is necessary to support the system voltage level as the load increase. In this situation, a lack of reactive power may lead one or more system load buses to the well known voltage collapse phenomenon.

Having this in mind, this work aims to study the developing of the voltage collapse and evaluate some sensitivity coefficients proposed to indicate the occurrence of such phenomenon. To accomplish this objective, it is used a modified dynamic stability analysis program in which three voltage collapse proximity indicators (VCPI's) are implemented.

Using static and dynamic load models, several studies are then conducted in order to show the voltage collapse mechanism and the behavior of the sensitivity coefficients implemented. The simulations take into account the effect of limited generator reactive power supply. Two test systems are investigated: a small 3-bus test system, which facilitates the conclusions, and also a 36-bus system.

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO I INTRODUÇÃO

<b>1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS</b>	<b>01</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b>	<b>02</b>
<b>1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>03</b>
<b>1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b>	<b>04</b>

## CAPÍTULO II MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM PROBLEMA DE INSTABILIDADE DE TENSÃO (COLAPSO)

<b>2.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>06</b>
<b>2.2 DESCRIÇÃO DE UM PROBLEMA DE COLAPSO DE TENSÃO</b>	<b>08</b>
<b>2.3 O MECANISMO DO COLAPSO DE TENSÃO</b>	<b>09</b>
2.3.1 Cálculo do limite de estabilidade estática	11
2.3.2 Cálculo do limite de estabilidade de tensão - Análise I	13
2.3.3 Cálculo do limite de estabilidade de tensão - Análise II	17
<b>2.4 INFLUÊNCIA DOS REGULADORES AUTOMÁTICOS DE TENSÃO</b>	<b>25</b>

<b>2.5 INFLUÊNCIA DOS TRANSFORMADORES COMUTADORES DE TAP SOB CARGA (“OLTC’s”)</b>	<b>25</b>
<b>2.6 INFLUÊNCIA DAS CARGAS</b>	<b>26</b>
<b>2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO III INDICADORES DE PROXIMIDADE DE COLAPSO DE TENSÃO</b>	
<b>3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b>	<b>29</b>
<b>3.2 FORMAS DE ANÁLISE DO FENÔMENO DE COLAPSO DE TENSÃO</b>	<b>30</b>
<b>3.3 UTILIZAÇÃO DA SINGULARIDADE DA MATRIZ JACOBIANA NA INDICAÇÃO DO COLAPSO DE TENSÃO</b>	<b>31</b>
<b>3.4 COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE E/OU INDICADORES DO COLAPSO DE TENSÃO</b>	<b>33</b>
3.4.1 Coeficiente de Sensibilidade representado pelo mínimo autovalor da matriz Jacobiana (CSJ)	34
3.4.2 Coeficientes de Sensibilidade em função dos mínimos autovalores das submatrizes L e N da matriz Jacobiana (CSL e CSN, respectivamente)	36
3.4.3 Coeficiente de Sensibilidade em função da variação da magnitude da tensão da barra de carga (CS)	37
3.4.4 Outros coeficientes de sensibilidade	38
<b>3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>41</b>

## **CAPÍTULO IV IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS INDICADORES DE PROXIMIDADE DE COLAPSO DE TENSÃO**

<b>4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b>	<b>42</b>
<b>4.2 PROGRAMA DIGITAL DE ESTABILIDADE DINÂMICA</b>	<b>43</b>
4.2.1 Modelos incorporados ao programa original	43
4.2.1.1 Máquinas síncronas, reguladores de tensão e de velocidade	43
4.2.1.2 Motores de Indução	45
4.2.1.3 Linhas de transmissão e transformadores	45
4.2.1.4 Cargas Estáticas	46
4.2.1.5 Indicadores de proximidade do colapso de tensão (VCPI's)	46
<b>4.3 O PROGRAMA DE ESTABILIDADE ORIGINAL</b>	<b>47</b>
<b>4.4 O PROGRAMA DE ESTABILIDADE MODIFICADO</b>	<b>50</b>
<b>4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>52</b>

## **CAPÍTULO V RESULTADOS DE SIMULAÇÕES**

<b>5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b>	<b>53</b>
<b>5.2 ESTUDOS ENVOLVENDO O SISTEMA ELÉTRICO DE 3 BARRAS: SP-1</b>	<b>54</b>
<b>5.3 RESULTADOS OBTIDOS COM O SISTEMA ELÉTRICO SP-1</b>	<b>57</b>
5.3.1 Resultados para o gerador sem limitação de reativos	58
5.3.2 Resultados para o gerador com limitação de reativos	60

5.3.3	Comparação entre as respostas obtidas com o coeficiente CSJ para as diferentes modelagens de carga	64
5.3.4	Comparação entre as respostas obtidas com o coeficiente CSJ através dos programas de fluxo de carga e de estabilidade	65
<b>5.4</b>	<b>ESTUDOS ENVOLVENDO O SISTEMA ELÉTRICO DE 36 BARRAS: SP-2</b>	<b>66</b>
<b>5.5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS COM O SISTEMA ELÉTRICO SP-2</b>	<b>71</b>
5.5.1	Análise da barra 19 do sistema SP-2	72
5.5.2	Análise da barra 35 do sistema SP-2	75
<b>5.6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>77</b>
 <b>CAPÍTULO VI CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>		
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	<b>79</b>
<b>6.2</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>80</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		
		<b>81</b>

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Um dos maiores problemas encontrados atualmente na operação de sistemas de potência é o constante aumento da demanda de energia dos pontos consumidores, que não é acompanhado pelo aumento no investimento para a melhoria da capacidade de geração e transmissão de energia do sistema. Com isto, a estabilidade de tensão dos sistemas de potência fica seriamente comprometida.

A estabilidade de tensão de um sistema elétrico pode ser definida como a capacidade do sistema de se manter estável face a variações de carga lentas ou bruscas, quando a frequência do sistema permanece praticamente inalterada. Assim, a instabilidade de tensão pode ocorrer com defasagens angulares entre as tensões da carga e da fonte bastante pequenas.

Uma forma mais drástica do problema de estabilidade de tensão consiste no fenômeno mais conhecido por “colapso de tensão”, cuja compreensão e análise tem sido objeto de interesse crescente tanto por parte de pesquisadores quanto pelos operadores de sistemas elétricos.

O colapso de tensão pode ser caracterizado pela incapacidade do sistema de suprir a demanda de potência reativa das cargas, para manter a magnitude das tensões nestas barras dentro dos limites de operação especificados.

Para se determinar o quanto um sistema é propenso ao colapso, são desenvolvidos indicadores de proximidade do colapso de tensão, do inglês VCPI (“Voltage Collapse Proximity Indicators”).

Os indicadores analisados neste trabalho foram implementados em um programa de estabilidade existente [17], no qual são consideradas características dinâmicas de todos os componentes do sistema, incluindo a carga, tornando assim a análise mais próxima da realidade e, portanto, mais confiável. O objetivo principal deste procedimento é no sentido de validar a utilização destes indicadores no programa de fluxo de carga convencional, o qual realiza a análise do sistema em regime permanente.

## 1.2 OBJETIVOS

Problemas de estabilidade de tensão têm recebido enfoque especial nos últimos anos. Isto é explicado pelo fato de que os sistemas elétricos têm trabalhado mais sobrecarregados e próximos de seus limites, devido às limitações impostas por falta de investimentos neste setor e pelo aumento da demanda de potência.

Este trabalho tem como principal objetivo contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno do colapso de tensão e avaliar as técnicas para predição deste. Para atingir este objetivo, pode-se subdividir o trabalho nas seguintes etapas:

- (i) implementar, em um programa de estabilidade transitória, alguns indicadores de proximidade do colapso de tensão;
- (ii) ilustrar o desenvolvimento do fenômeno do colapso de tensão através deste programa de estabilidade modificado;
- (iii) analisar as características de cada indicador quanto ao seu comportamento no sistema elétrico sob diferentes condições, tais como: cargas com características diferentes e reguladores primários de tensão (AVR - “Automatic Voltage Regulator”) com/sem limites de excitação.

### 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na tentativa de encontrar uma solução para os problemas de instabilidade de tensão e, particularmente, de colapso de tensão, apesar de já se ter um bom entendimento quanto ao processo que pode levar o sistema a sofrer tais distúrbios, os pesquisadores se dividem. Assim, diversas formas de investigação e estudo do comportamento do sistema e de prevenção do fenômeno têm conduzido estes à abertura de novas linhas de pesquisa.

Alguns pesquisadores [1,2] utilizam a curva P-V (curva “nose” ou “knee”) e/ou a curva Q-V de uma barra de carga qualquer do sistema para este estudo. Esta análise tem por objetivo observar o comportamento da tensão da barra quando a potência consumida é aumentada e quando o ponto de operação se torna instável. Isto ocorre quando o ponto de operação se aproxima de um ponto de carregamento máximo ou ponto final da curva “nose”. Os resultados são utilizados para auxiliar o planejamento do sistema e, quando necessário, efetuar medidas corretivas para que o ponto de operação volte a ser estável.

Um estudo ainda mais completo é realizado em [8,16], onde somente o emprego de modelos dinâmicos detalhados de todos os componentes do sistema é considerado satisfatório.

Os equipamentos de controle de tensão de um sistema elétrico que desempenham papel importante no desencadeamento do colapso têm sido também objeto de estudos. Alguns pesquisadores consideram os reguladores primários de tensão (AVR - “Automatic Voltage Regulator”) [7]; outros consideram os transformadores com mudança de tap sob carga (LTC - “Load Tap Changer”) [9].

Outros pesquisadores [12-15] preferem as vantagens de utilização do método estático, apesar de compreenderem a importância da análise dinâmica do problema.

Propostas têm sido apresentadas por alguns pesquisadores no sentido de se determinar quão propenso está um sistema ao colapso de tensão. Disto resulta a obtenção dos denominados indicadores de proximidade de colapso de tensão, do inglês VCPI (“Voltage Collapse Proximity Indicators”), ou, simplesmente, coeficientes de sensibilidade.

Carpentier et al [16] definiram um indicador de proximidade do colapso de tensão para um barramento ou área, ou o sistema completo, como um vetor de razões  $dQ/dD$ , onde  $dQ$  é o incremento da potência reativa gerado quando é dado um aumento da potência reativa de

carga, expresso por  $dD$ . Quando um elemento desse vetor torna-se infinito, ocorre o colapso de tensão.

Tiranuchit e Thomas [21] propuseram o mínimo valor singular do Jacobiano das equações que descrevem a rede como um índice de segurança de tensão. Baseia-se no fato do colapso de tensão ocorrer quando o Jacobiano de um fluxo de carga torna-se singular. Quanto menor seu valor, mais próximo o sistema está do colapso. Quando o mínimo valor singular atinge zero, o Jacobiano torna-se singular e o sistema está em colapso.

Observa-se que a busca de indicadores (VCPI's) cada vez mais precisos é um tema de muitos estudos na área de estabilidade de tensão, abordado com bastante interesse por diversos pesquisadores.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é composto por seis capítulos. O primeiro capítulo descreve os objetivos pretendidos, apresenta uma breve revisão bibliográfica e mostra a estrutura da dissertação.

O capítulo II dá uma visão global do problema de instabilidade e colapso de tensão, descrevendo seus mecanismos e apontando para os elementos do sistema elétrico que exibem um importante papel na configuração de um cenário propício à ocorrência destes fenômenos.

O capítulo III trata da descrição dos VCPI's desenvolvidos neste trabalho. Para isto, é feito o desenvolvimento matemático destes indicadores, tratando inicialmente da singularidade da matriz Jacobiana de um sistema, usada na formulação dos indicadores, os quais são representados pelos mínimos autovalores da matriz Jacobiana e de suas submatrizes, resultantes da partição desta, denominadas de L (composta pelos elementos  $\partial Q/\partial V$ ) e N (composta pelos elementos  $\partial P/\partial V$ ).

No capítulo IV, é apresentado o programa digital utilizado para simulação computacional do problema de estabilidade de tensão e para a implementação dos indicadores de proximidade do colapso. São mostradas, ainda, algumas modificações e implementações introduzidas no programa, no sentido de tornar possível a realização deste trabalho.

No capítulo V são mostrados os resultados das simulações utilizando o programa de estabilidade modificado (com implementação dos VCPI's representados pelos mínimos autovalores da matriz Jacobiana, da submatriz L da matriz Jacobiana e da submatriz N da matriz Jacobiana) e dados provenientes dos sistemas elétricos utilizados. Com base nestes resultados, é feita uma avaliação do desempenho de cada VCPI implementado no programa e uma comparação entre estes índices, no sentido de se determinar qual seria o mais eficiente na indicação do colapso de tensão. Neste capítulo, são também investigados os efeitos da limitação no suprimento de reativos nos resultados de simulação do colapso de tensão.

Finalmente, o capítulo VI mostra as principais conclusões sobre a realização deste trabalho e fornece sugestões para trabalhos futuros dentro do assunto de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência.

## **CAPÍTULO II**

# **MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM PROBLEMA DE INSTABILIDADE DE TENSÃO (COLAPSO)**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

O interesse com relação ao tópico sobre instabilidade de tensão tem aumentado ao longo dos últimos anos, mesmo tendo sido um assunto há muito tempo estudado pelos engenheiros de sistemas de potência. Isto porque tem havido um crescimento na carga total dos sistemas em geral sem que, no entanto, a capacidade de geração e transmissão tenha acompanhado proporcionalmente este aumento, seja por motivos econômicos ou políticos.

Isto tudo, aliado ao problema do suporte de reativos ser insuficiente para garantir um perfil de tensão satisfatório para o sistema face a acréscimos de demanda (sendo este problema detectado em vários sistemas do mundo), tem levado muitos sistemas a operarem próximos dos seus limites de estabilidade de tensão. Quando este estrangulamento do suprimento de reativos acontece, o fenômeno denominado de “Colapso de Tensão” pode ser desencadeado.

Pode-se concluir daí que o fenômeno está intimamente associado com um sistema que possui uma insuficiente reserva de reativos[1,2] para atender às solicitações crescentes de potência das cargas.

Um dos fatores importantes para a caracterização do colapso é a influência dos reguladores de tensão (AVR's) das máquinas síncronas quando estas atingem seus limites máximos de fornecimento de reativos, criando um cenário propício ao colapso de tensão. Transformadores com mudança de tap sob carga ("Load Tap Changer - LTC") também se enquadram dentro dos equipamentos que, conforme o instante da mudança de tap, melhoram ou pioram a situação do sistema quanto à estabilidade de tensão.

A partir destas constatações, estudos têm sido feitos para se determinar qual é o limite no qual o sistema conserva a estabilidade de tensão (o qual depende da potência máxima transmissível a cada barra de carga) e se, uma vez violado, o mesmo resulta em colapso. As características das cargas têm sido apontadas como fatores importantes na definição do comportamento do sistema quando da ocorrência de um colapso de tensão.

A compreensão do fenômeno de colapso possibilita que medidas preventivas sejam tomadas para que a possibilidade de ocorrência deste seja reduzida ou mesmo eliminada. Esta compreensão consiste no objetivo primário deste capítulo, onde é apresentada uma descrição do problema de colapso de tensão, indicando seu mecanismo e as influências dos controladores de tensão e das cargas na determinação do mesmo.

## **2.2 DESCRIÇÃO DE UM PROBLEMA DE COLAPSO DE TENSÃO**

Muitos dos fenômenos que acontecem nos sistemas elétricos, que ocasionam perda de uma região ou “black-out” do sistema, estão relacionados com a impossibilidade de manter a tensão controlada pelos mecanismos disponíveis para isto. Estes são caracterizados em geral por uma queda súbita de tensão, sendo, por consequência, referidos por colapso de tensão.

Este tipo de fenômeno é usualmente mais complexo do que uma simples instabilidade de tensão, pois pode ser iniciado por vários meios diferentes. Pode ocorrer que, depois de distúrbios que resultam em acréscimos de demanda de cargas, a tensão de uma ou mais barras do sistema venha a sofrer reduções até atingir o ponto em que as proteções do sistema atuam isolando (ilhando) parte do sistema, ou mesmo, provocando um “black-out”.

Esses decréscimos na tensão podem ser causados pela desconexão de alguns dos componentes do sistema (através da atuação da proteção por sobrecarga de um gerador ou de uma linha), pela ação dos limitadores de corrente de campo de algumas máquinas, pela mudança automática (inconveniente) de tap's de transformadores sob carga (LTC's do inglês “Load Tap Changer”), ou pela incapacidade de geração de potência reativa de bancos de capacitores devido a diminuição da tensão.

Levando tudo isto em consideração, pretende-se, a seguir, dar uma descrição matemática mais detalhada do mecanismo pelo qual uma instabilidade de tensão e colapso ocorrem, ilustrando o fenômeno através de um exemplo prático.

### **2.3 O MECANISMO DO COLAPSO DE TENSÃO**

Conforme observado através dos estudos sobre os fenômenos de colapso de tensão mencionados na literatura, os mesmos demonstram ser de desenvolvimento inicial relativamente lento. A princípio pensou-se, então, que o mais óbvio era monitorar continuamente as tensões dos sistemas e, a partir do momento em que as mesmas atingissem, perigosamente, valores abaixo de limites predeterminados, seriam tomadas as devidas providências. No entanto, mais tarde verificou-se que tal medida não era suficiente, uma vez que o colapso poderia surgir mesmo em barras onde as tensões se mostravam dentro de limites de operação aceitáveis. Foi também observado que as medidas corretivas poderiam não ser satisfatórias para conter o fenômeno do colapso, uma vez que este tenha sido desencadeado.

Levando tudo isto em consideração, concluiu-se ser necessário compreender melhor o mecanismo do colapso de tensão para, somente então, estabelecer as medidas preventivas necessárias para evitar sua ocorrência. Para tanto, é utilizado o circuito elétrico simples da figura 2.1.

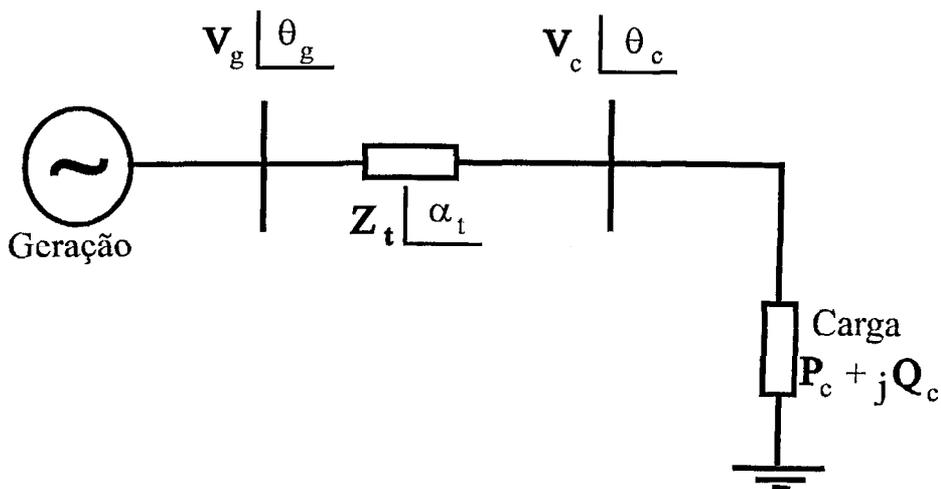


Figura 2.1 - Diagrama unifilar de um sistema elétrico simplificado

As equações das potências ativa ( $P_c$ ) e reativa ( $Q_c$ ) absorvidas pela carga da figura 2.1 são dadas pelas equações (2.1) e (2.2), respectivamente.

$$P_c = \frac{V_g V_c}{Z_t} \cos(\alpha_t - \Delta\theta) - \frac{V_c^2}{Z_t} \cos \alpha_t \quad (2.1)$$

$$Q_c = \frac{V_g V_c}{Z_t} \text{sen}(\alpha_t - \Delta\theta) - \frac{V_c^2}{Z_t} \text{sen} \alpha_t \quad (2.2)$$

sendo:

$V_g, V_c$  - magnitude das tensões das barras de geração e de carga, respectivamente;

$Z_t$  - impedância da linha de conexão entre as barras de geração e carga;

$\alpha_t$  - ângulo da impedância da linha ou ângulo de transmissão;

$P_c, Q_c$  - potências ativa e reativa, respectivamente, consumidas pela carga;

$\Delta\theta$  - defasagem entre os ângulos das tensões das barras de geração ( $\theta_g$ ) e de carga ( $\theta_c$ ) ( $\Delta\theta = \theta_g - \theta_c$ ).

Para o cálculo do limite de estabilidade de tensão, seja inicialmente a determinação do limite de estabilidade estática (de regime permanente) do sistema da figura 2.1. Para tanto considera-se que a linha de transmissão da figura 2.1 apresenta perdas, as tensões  $V_g$  e  $V_c$  são controladas e a carga é do tipo impedância constante. Para efeito de simplificação, para uma linha com perdas, considera-se que o limite de estabilidade estática representa a potência máxima transmissível.

### 2.3.1 Cálculo do limite de estabilidade estática

Partindo das equações (2.1) e (2.2) e fazendo as operações de derivação em relação ao ângulo  $\Delta\theta$  para obtenção do ponto de potência ativa máxima, obtém-se dois valores:  $\Delta\theta = \alpha_t$  e  $\Delta\theta = \alpha_t - 180^\circ$ . Note que  $\Delta\theta = \alpha_t - 180^\circ$  é desconsiderado aqui, pois resulta num ponto mínimo de  $P_c$  que corresponde a um valor negativo, indicando uma inversão indesejável do sentido de transmissão de potência ativa.

Substituindo  $\Delta\theta = \alpha_t$  nas equações (2.1) e (2.2) determina-se  $P_{c\max}$  e o valor de  $Q_c$  no qual  $P_c$  é máximo, isto é:

$$P_{c\max} = \frac{V_c V_g}{Z_t} - \frac{V_c^2}{Z_t} \cos \alpha_t \quad (2.3)$$

$$Q_c = - \frac{V_c^2}{Z_t} \sin \alpha_t \quad (2.4)$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Observa-se que, para uma linha de transmissão normal ( $\alpha_t < 90^\circ$ ),  $P_{c \max}$  pode ocorrer somente se a rede for suprida com potência reativa proveniente da carga.

Procedendo-se da mesma forma para a obtenção de  $Q_{c \max}$ , chega-se também em dois pontos. O primeiro,  $\Delta\theta = \alpha_t - 90^\circ$ , fornece:

$$Q_{c \max} = \frac{V_c V_g}{Z_t} - \frac{V_c^2}{Z_t} \text{sen } \alpha_t \quad (2.5)$$

$$P_c = - \frac{V_c^2}{Z_t} \text{cos } \alpha_t \quad (2.6)$$

Para o segundo ponto,  $\Delta\theta = \alpha_t + 90^\circ$ , tem-se que:

$$Q_{c \max} = - \left( \frac{V_c V_g}{Z_t} + \frac{V_c^2}{Z_t} \text{sen } \alpha_t \right) \quad (2.7)$$

$$P_c = - \frac{V_c^2}{Z_t} \text{cos } \alpha_t \quad (2.8)$$

Pode-se observar que os valores extremos de potência reativa somente ocorrerão se  $P_c$  tornar-se negativo, isto é, substituindo a carga da figura 2.1 por um gerador. Isto não acarreta qualquer interesse prático neste trabalho.

Já da equação (2.3), conclui-se que, estando a tensão  $V_g$  fixa, para cada valor de tensão  $V_c$  está associado uma potência máxima transmissível ou um limite de estabilidade estática e que, neste limite,  $\Delta\theta$  é sempre igual a  $\alpha_t$ , independente de  $V_c$ .

### 2.3.2 Cálculo do limite de estabilidade de tensão - Análise I

Pode-se, então, determinar o maior valor entre as potências ativas transmissíveis máximas ou o limite de estabilidade estática máxima. Este limite, como será visto, corresponde ao limite de estabilidade de tensão, associado a um valor de tensão  $V_c$ . Derivando  $P_{c \max}$  da equação (2.3) em relação a  $V_c$  e igualando o resultado a zero, chega-se a:

$$V_c = \frac{V_g}{2 \cos \alpha_t} \quad (2.9)$$

Levando (2.9) em (2.3) obtém-se:

$$P_{c \max \max} = \frac{V_g^2}{2 Z_t \cos \alpha_t} - \frac{V_g^2}{4 Z_t \cos \alpha_t}$$

ou:

$$P_{c \max \max} = \frac{V_g^2}{4 Z_t \cos \alpha_t} \quad (2.10)$$

A equação (2.10) mostra a máxima potência que chega a uma dada barra de carga através de uma linha de impedância  $Z_t$  e ângulo de transmissão  $\alpha_t$ .

A potência absorvida pela carga pode ser expressa em função da impedância de carga  $Z_c \angle \varphi_c$ , a qual representa a carga líquida total relativa ao barramento ( $\cos \varphi_c$  representa o fator de potência da carga).

Assim, tomando-se o mesmo  $V_c$  da equação (2.9), calcula-se a máxima potência absorvida pela barra de carga, dada por:

$$P_{c \max \max} = \frac{V_c^2}{Z_c} \cos \varphi_c$$

Substituindo o valor de  $V_c$  de (2.9), obtém-se:

$$P_{c \max \max} = \frac{V_g^2}{4 Z_c} \frac{\cos \varphi_c}{\cos^2 \alpha_t} \quad (2.11)$$

Da igualdade entre as expressões (2.10) e (2.11), obtém-se:

$$Z_t \cos \varphi_c = Z_c \cos \alpha_t \quad (2.12)$$

Pelo teorema da máxima transferência de potência, a máxima absorção de potência ativa por uma impedância de carga ocorre quando esta impedância é igual em módulo e tem seu ângulo conjugado em relação à impedância série da linha de transmissão. Esta informação está de acordo com a equação (2.12).

Assim, tem-se:

$$Z_c = Z_t \quad (2.13)$$

$$\varphi_c = -\alpha_t \quad (2.14)$$

A equação (2.14) indica que a condição de máxima absorção de potência ativa só é alcançada se a carga tiver caráter capacitivo (já que  $\alpha_t > 0$  normalmente).

Finalizando, obtém-se então a potência reativa associada ao limite máximo de potência ativa transferida à carga, substituindo (2.9) em (2.4). Esta é dada por:

$$Q_c = - \frac{V_g^2}{4 Z_t} \sec \alpha_t \operatorname{tg} \alpha_t \quad (2.15)$$

Uma vez definidas as equações que regem o conceito da estabilidade estática, procede-se, a seguir, os fundamentos da estabilidade de tensão. Para tanto, será considerada novamente a figura 2.1, em que a tensão da barra de carga  $V_c$  agora não é mais controlada. Nesta análise, a instabilidade de tensão ocorre após aumentos progressivos de pequenos montantes de carga, podendo ser considerada como um fenômeno associado à operação com sucessivos regimes permanentes.

O entendimento do problema de estabilidade de tensão é iniciado a partir da curva de Potência versus Tensão ( $P_c \times V_c$ ) mostrada na figura 2.2, que relaciona a potência ativa consumida pela carga da figura 2.1 e a tensão no seu barramento. O fator de potência da carga ( $\cos \phi_c$ ) é considerado constante para qualquer valor de potência  $P_c$  ( $P_c/S_c = \text{constante}$ ). Esta curva é construída variando-se a magnitude da impedância que representa a carga, desde infinito (correspondendo a um circuito aberto) até zero (que representa a condição de curto-circuito).

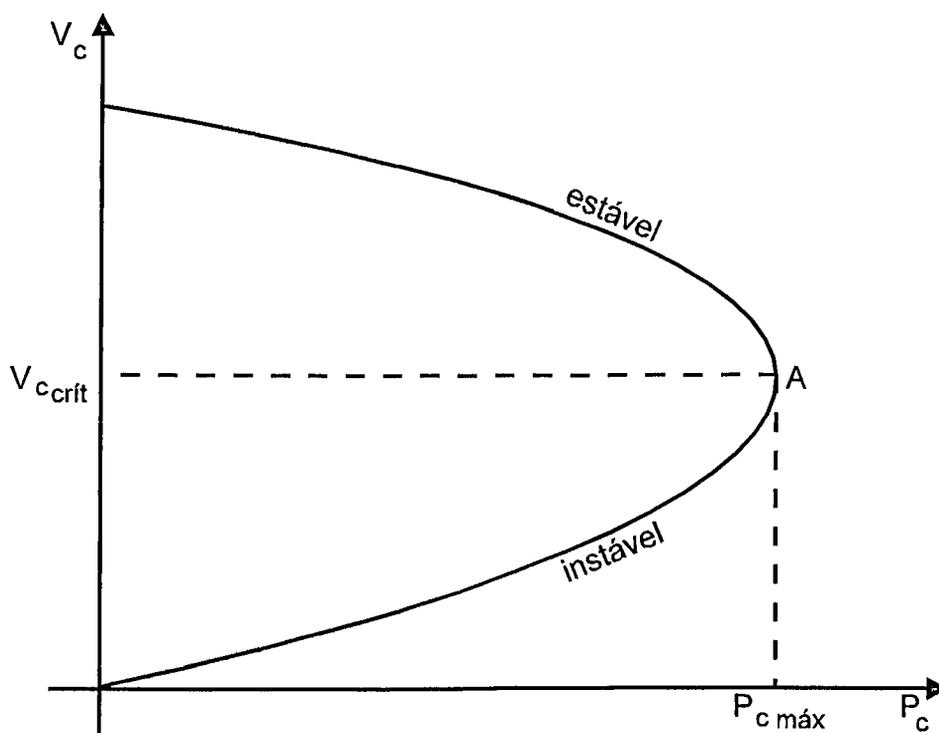


Figura 2.2 - Característica  $P_c \times V_c$  para uma barra de carga

Pela figura 2.2, verifica-se que existe uma potência máxima transmissível e apenas um fator de potência ( $\cos\phi_c$ ) associado a esta. Na situação em que a tensão  $V_g$  é fixa, existem potências máximas transmissíveis associadas às tensões  $V_c$  distintas, cada uma relativa a um determinado  $\cos\phi_c$ .

Como no estudo de estabilidade estática, aqui também existe um máximo valor para a potência transmissível máxima (o máximo das potências máximas).

Analisando-se a curva mostrada pela figura 2.2, pode-se observar que na parte superior (até  $P_{c \text{ máx}}$ ) a potência efetiva  $P_c$  ( $P_c = V_c I \cos\phi$ ) aumenta devido ao aumento da corrente  $I$ , em maior proporção do que a redução da tensão  $V_c$ . Já na parte inferior (abaixo de  $P_{c \text{ máx}}$ ),  $P_c$  diminui, pois a redução da tensão  $V_c$  (com  $\cos\phi$  constante) se sobrepõe ao aumento de  $I$ .

O ponto A, mostrado na curva da figura 2.2, representa o limite de estabilidade de tensão. No ponto A, o requerimento de potência reativa é muito alto para se manter as tensões constantes nas barras emissora e receptora. A geração procura suprir esta exigência por um curto tempo, durante oscilações de potência (regime transitório), mas existem muito poucas situações nas quais isto pode ser mantido por um espaço de tempo maior.

Numa situação realista de suporte de potência reativa, este suprimento será limitado e a tensão irá entrar em colapso muito antes do ângulo de regime permanente ( $\Delta\theta$ ) atingir  $90^\circ$ . Em decorrência do colapso, a capacidade do sistema de transferir potência desaparece, pois  $P_c$  torna-se nula (vide equação (2.1)), havendo uma subsequente perda de sincronismo entre os geradores. Deste fato, constata-se uma importante característica deste tipo de fenômeno que é a perda de sincronismo de geradores como uma conseqüência e não uma causa do colapso de tensão. Neste caso, o colapso pode ocorrer para ângulos de rotor extremamente baixos, quando o sistema é fortemente sobrecompensado na barra receptora [1].

### 2.3.3 Cálculo do limite de estabilidade de tensão - Análise II

Para se estabelecer o limite de estabilidade de tensão matematicamente, utiliza-se as equações (2.16) a (2.19), extraídas da análise do circuito elétrico da figura 2.3, onde a carga é representada por uma impedância  $Z_c \angle \varphi_c$ .

$$\dot{V}_c = (Z_c \angle \varphi_c) \dot{I} \quad (2.16)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_g}{Z_t \angle \alpha_t + Z_c \angle \varphi_c} \quad (2.17)$$

$$P_c = Z_c I^2 \cos \varphi_c \quad (2.18)$$

$$Q_c = Z_c I^2 \text{ sen } \varphi_c \quad (2.19)$$

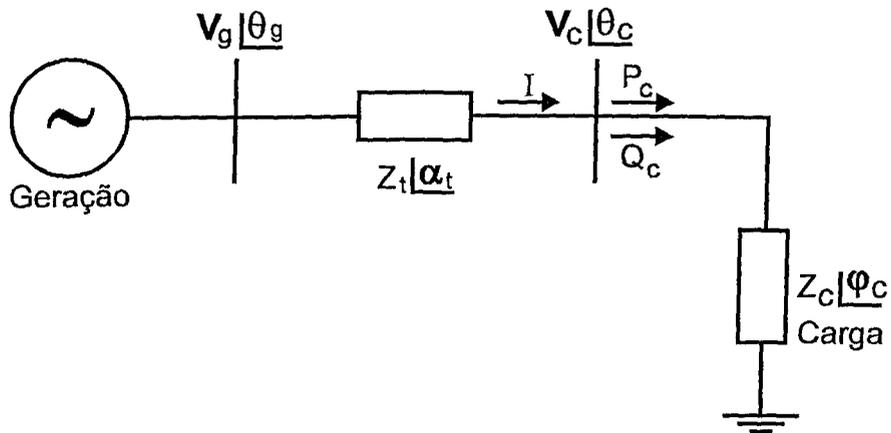


Figura 2.3 - Sistema elétrico para obtenção dos limites de estabilidade de tensão

Após as devidas manipulações com as expressões (2.16) a (2.19) e utilizando a igualdade  $Z_c = Z_t$  na condição de potência ativa máxima, pode-se obter a equação para  $P_{c_{\max}}$  e a respectiva potência reativa associada a esse ponto (equações (2.20) e (2.21)).

$$P_{c_{\max}} = \frac{V_g^2 \cos \varphi_c}{2Z_t [1 + \cos(\alpha_t - \varphi_c)]} \quad (2.20)$$

$$Q_c = \frac{V_g^2 \text{ sen } \varphi_c}{2Z_t [1 + \cos(\alpha_t - \varphi_c)]} \quad (2.21)$$

Para o cálculo da potência reativa máxima  $Q_{c \max}$ , procede-se de maneira análoga e conclui-se que  $Q_{c \max} = Q_c$  (equação (2.21)) e que as potências máximas  $P_{c \max}$  e  $Q_{c \max}$  ocorrem simultaneamente [3]. Associada a estas potências existe uma tensão  $V_c$ , denominada tensão de carga crítica ( $V_{c \text{ cr}}$ ), dada por:

$$V_{c \text{ cr}} = \frac{P_{c \max}}{I_{\text{cr}} \cos \varphi_c} \quad (2.22)$$

Da análise do circuito da figura 2.3, pode-se obter a corrente absorvida pela carga na condição crítica, expressa por:

$$I_{\text{cr}} = \frac{V_g}{Z_t \sqrt{2[1 + \cos(\alpha_t - \varphi_c)]}} \quad (2.23)$$

Substituindo-se  $I_{c \text{ cr}}$  na expressão de  $V_{c \text{ cr}}$ , obtém-se:

$$V_{c \text{ cr}} = \frac{V_g}{2 \cos\left(\frac{\alpha_t - \varphi_c}{2}\right)} \quad (2.24)$$

Das equações (2.22), (2.23) e (2.24) conclui-se que existe uma potência  $P_{c \max}$  e uma tensão  $V_{c \text{ cr}}$  associadas ao fator de potência ( $\cos \varphi_c$ ). Além disso, os módulos das impedâncias da carga e da linha devem ser iguais ( $Z_c = Z_t$ ) para todos os limites de estabilidade.

A potência reativa  $Q_c$  associada à potência  $P_{c \max}$  também é máxima e pode ser indutiva ou capacitiva.

Neste instante, vale ressaltar que o interesse maior está na obtenção do máximo valor de potência entre as potências máximas transmissíveis. Esta potência representa o limite máximo de estabilidade de tensão e para isso é necessário derivar a equação (2.20) em relação ao ângulo do fator de potência da carga ( $\varphi_c$ ) e obter o ponto de máximo, resultando daí a relação  $\varphi_c = -\alpha_t$ . Disto resulta a equação (2.25).

$$P_{c \text{ m a x m a x}} = \frac{V_g^2}{4 Z_t \cos \alpha_t} \quad (2.25)$$

Para obtenção de  $V_{c \text{ cr}}$  e  $Q_{c \text{ max}}$ , quando  $\varphi_c = -\alpha_t$ , utiliza-se as equações (2.21) e (2.24), resultando em:

$$Q_{c \text{ m a x m a x}} = - \frac{V_g^2}{4 Z_t} \sec \alpha_t \operatorname{tg} \alpha_t \quad (2.26)$$

$$V_{c \text{ cr}} = \frac{V_g}{2 \cos \alpha_t} \quad (2.27)$$

Uma vez obtidos os valores para os limites de estabilidade de tensão, pode-se agora mostrar uma família de curvas que representam o comportamento do sistema elétrico (figura 2.3) em várias situações de fatores de potência da carga. Para isto, parte-se novamente das equações elementares deste circuito elétrico e obtém-se a relação de  $P_c \times Z_c$  para um determinado fator de potência  $\cos \varphi_c$ .

$$P_c = \frac{Z_c V_g^2 \cos \varphi_c}{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \varphi_c)} \quad (2.28)$$

As equações (2.16) e (2.17) obtidas da análise do circuito elétrico da figura 2.3 permitem a determinação de expressões para os módulos da tensão e a corrente de carga, como sendo:

$$V_c = Z_c I$$

$$I = \frac{V_g}{\sqrt{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \varphi_c)}}$$

Substituindo a corrente I em  $V_c$ , obtém-se:

$$V_c = \frac{Z_c V_g}{\sqrt{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \varphi_c)}} \quad (2.29)$$

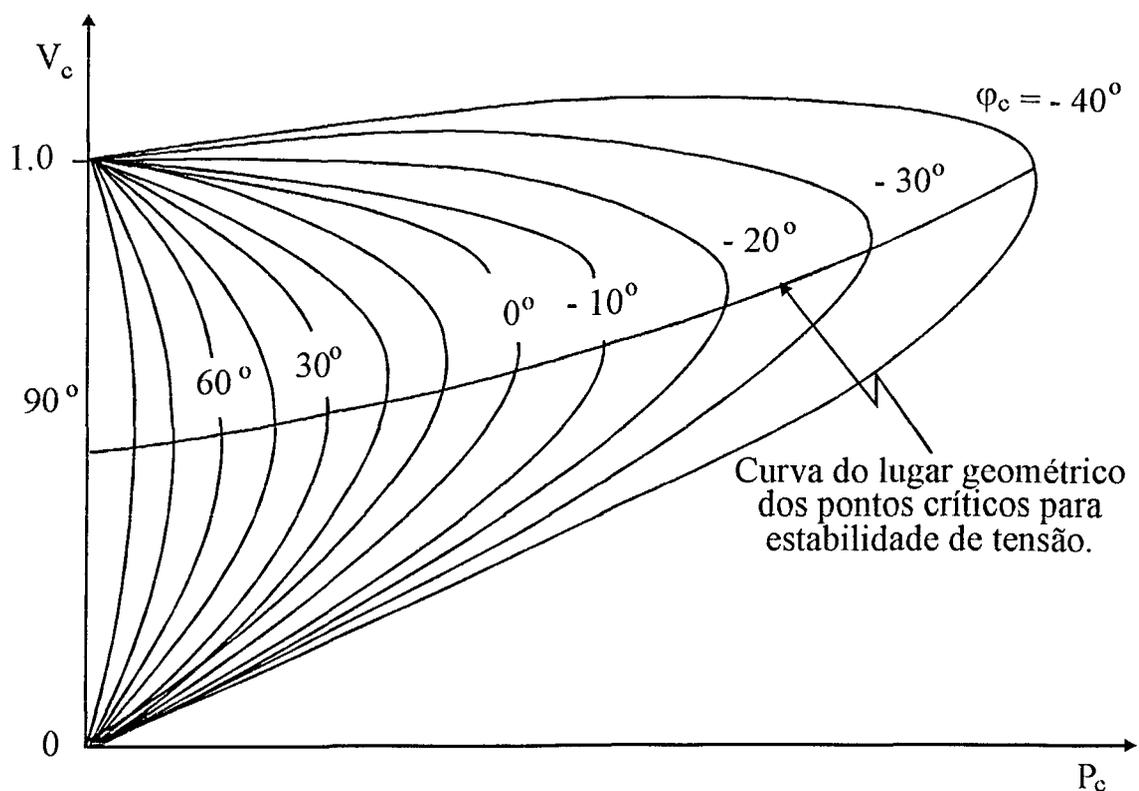


Figura 2.4 - Família de curvas  $P_c \times V_c$  para o sistema da figura 2.3 para cada ângulo de fator de potência da carga ( $\varphi_c$ ).

A equação (2.29) fornece a relação  $V_c \times Z_c$  para um determinado  $\cos\varphi_c$ . De posse das equações (2.28) e (2.29) pode-se agora, tomando  $\cos\varphi_c$  como parâmetro, variar a impedância  $Z_c$  de infinito a zero (circuito aberto até curto-circuito) para obter a família de curvas mostrada na figura 2.4. Cada curva indicada possui uma potência ativa  $P_{c \max}$ , uma potência reativa  $Q_{c \max}$  e uma tensão  $V_{c \text{ cr}}$ , sendo que, entre estes valores encontrados, está o limite de estabilidade de tensão máximo definido pelas potências  $P_{c \max \max}$ ,  $Q_{c \max \max}$  e a tensão  $V_{c \text{ cr}}$  associada a estas potências máximas, para o sistema em questão.

Algumas conclusões podem ser obtidas das equações (2.20) a (2.29):

- para todo limite de estabilidade de tensão, independente de  $\cos\varphi_c$ , tem-se  $Z_c = Z_t$ .
- no limite de estabilidade, o ângulo da impedância de carga ( $\varphi_c$ ) e o ângulo obtido da diferença entre os ângulos das tensões de barra ( $\Delta\theta$ ) são iguais e conjugados do ângulo da impedância da linha de transmissão ( $\alpha_t$ ).
- para  $\alpha_t = 90^\circ$  (ou próximo deste valor), à medida que a carga líquida torna-se mais capacitiva,  $P_{c\max}$  e  $V_{c\text{cr}}$  aumentam. De maneira análoga, à medida que a carga torna-se mais indutiva,  $P_{c\max}$  e  $V_{c\text{cr}}$  diminuem.  $V_{c\text{cr}}$  atinge o valor mínimo ( $V_{c\text{cr}} \rightarrow V_g/2$ ) quando  $\varphi_c = 90^\circ$  (carga puramente indutiva).

Outra verificação obtida através da análise da figura 2.4, juntamente com as equações (2.28) e (2.29), é que cada limite de estabilidade de tensão apresenta as relações  $dP/dZ_c = 0$ , conforme usado para encontrar a equação (2.29), e  $dP/dV_c = 0$  [3].

A partir das equações do circuito elétrico da figura 2.3, pode-se também obter uma equação para a potência reativa  $Q_c$ , em função da impedância de carga, como indicado na expressão (2.30):

$$Q_c = \frac{Z_c V_g^2 \sin \varphi_c}{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \varphi_c)} \quad (2.30)$$

Analisando-se agora as equações (2.28), (2.29) e (2.30) no ponto onde é observado o limite de estabilidade de tensão máximo, além das relações  $dP/dZ_c = 0$  e  $dP/dV_c = 0$ , tem-se

também que  $dQ_c/dZ_c = 0$  (o que resultou na equação (2.21)) e  $dP_c/d\phi_c = 0$  (que proporcionou a dedução das equações (2.25), (2.26) e (2.27) [3].

Do que foi apresentado em relação à estabilidade estática e de tensão, pode-se concluir que a instabilidade estática ocorre quando há uma transgressão no limite de fornecimento de potência pelo sistema à barra de carga, sendo que, nesta barra, há uma devida compensação reativa para manter a tensão constante. Variando-se a tensão controlada nesta barra, obtém-se vários limites de estabilidade estática mas, para todos estes, só ocorre o limite quando a diferença entre os ângulos das tensões for igual ao negativo do ângulo da impedância entre estas barras. Dentre estes limites obtidos existe um que é o máximo que se pode extrair.

A instabilidade de tensão ocorre pelo mesmo motivo da superação do limite de transmissão de potência, mas a tensão na barra de carga cai continuamente devido à insuficiência da compensação reativa para manter a tensão nesta barra constante. O limite de estabilidade de tensão é atingido quando o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância entre as barras correspondentes à fonte e à carga.

Variando-se o suporte reativo no lado da carga ( $\cos\phi_c$ ) e mantendo-se a tensão na fonte fixa, obtém-se vários limites de estabilidade de tensão. Dentre estes, existe um que é máximo. Neste ponto, além dos módulos das impedâncias serem iguais, o ângulo correspondente à diferença entre os ângulos das tensões das barras e o ângulo de impedância são iguais ao conjugado do ângulo de transmissão. Este ponto é o único em que os limites de estabilidade estática e de tensão coincidem.

## **2.4 INFLUÊNCIA DOS REGULADORES AUTOMÁTICOS DE TENSÃO (AVR's)**

A atuação do AVR é decorrente da necessidade de suprir a demanda de reativos, que cresce à medida que as solicitações de potência de uma dada carga (que não possui suporte local de reativos) aumenta. Quando o AVR atinge seu limite máximo de fornecimento de reativos, a queda de tensão observada entre a geração remota e a carga tende a tornar-se cada vez mais acentuada, se novos acréscimos de demanda ocorrerem, proporcionado assim um cenário propício ao desencadeamento de um colapso de tensão. Este aspecto de atuação do AVR foi apontado na seção anterior através do exemplo ilustrado. Pode-se afirmar que se a excitação de campo de um gerador pudesse ser ilimitada haveria pouca possibilidade da ocorrência de uma instabilidade e colapso de tensão [4].

## **2.5 INFLUÊNCIA DOS TRANSFORMADORES COMUTADORES DE TAP SOB CARGA ("OLTC's")**

Observando a figura 2.1, considera-se agora que entre a barra e a carga seja colocado um transformador comutador de tap sob carga ("OLTC"), conforme ilustrado na figura 2.5 [5]. Quando o sistema atinge o ponto crítico de solicitação de potência, o controle do OLTC acusa a baixa tensão decorrente da redução de tensão na barra de carga, então o mesmo é chamado para atuar. Quando da mudança de tap, elevando a tensão na carga, a solicitação de reativos aumenta e o mesmo ocorre com a corrente na linha. Este acréscimo de corrente ocasiona nova queda de tensão na barra de carga, que é novamente detectada pelo controle do OLTC, fazendo com que todo o processo se repita, podendo levar o sistema mais rapidamente

ao colapso [6]. Portanto, a ação do OLTC pode ser, e na maioria das vezes o é, prejudicial à estabilidade de tensão, acelerando o processo que leva ao colapso.

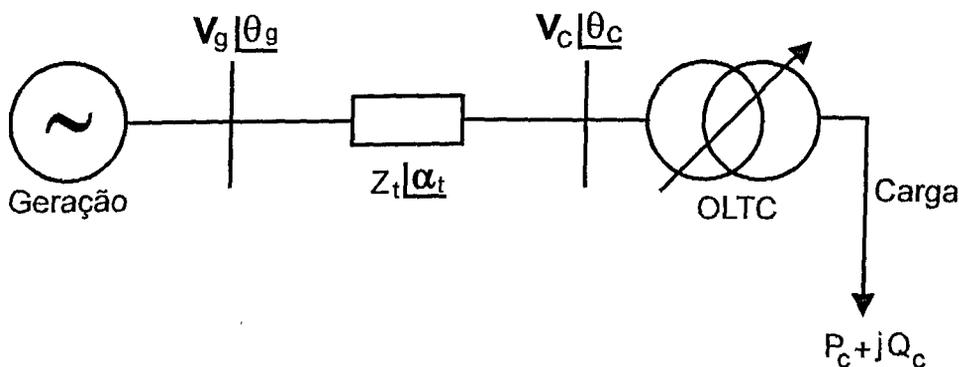


Figura 2.5 - Sistema elétrico simplificado com a carga suprida através de um transformador comutador de tap (“OLTC”).

## 2.6 INFLUÊNCIA DAS CARGAS

As características das cargas têm sido apontadas como fator importante na definição do comportamento do sistema frente ao colapso de tensão [7,8]. Por exemplo, a presença de cargas de potência constante, na sua totalidade ou como uma composição da carga total, tende a piorar a situação do sistema quanto à estabilidade de tensão. Isto pode ser facilmente visualizado, pois acréscimos de carga tipo potência constante em uma barra faz com que a corrente correspondente seja incrementada. Este aumento é traduzido em forma de queda de tensão na linha, abaixando a tensão ainda mais. Se a carga continua aumentando, o sistema pode não ter condições de atender a esta solicitação de potência e tenderá ao colapso. Este tipo de carga, pelos motivos já citados, apresenta-se como o pior caso para a estabilidade de tensão.

Para cargas com características tipo impedância constante o inverso acontece. Quando de um aumento de carga, a tensão na barra de carga tende a acompanhar a variação de corrente na linha, atenuando a queda de tensão nesta. Deste modo, o sistema “adapta-se” a uma nova situação, sem que a barra de carga entre em colapso. Neste caso, existe apenas a superação da máxima potência transmissível, mas não se pode falar em limite de estabilidade de tensão. Este tipo de carga representa a situação menos desfavorável, em termos de estabilidade do sistema. Estudos considerando-se a carga como tendo característica dinâmica têm sido realizados [7]. Estes indicam que, considerando-se as cargas possuindo apenas característica estática, pode-se obter resultados otimistas e, portanto, não confiáveis.

## **2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram apresentados vários aspectos sobre a modelagem matemática do problema da instabilidade e colapso de tensão. Neste sentido, foi feita uma descrição do mecanismo através do qual o fenômeno se desenvolve. Utilizando um sistema elétrico simplificado, várias equações foram derivadas para auxiliar a explicação e o entendimento do efeito. Os controladores de tensão, tais como os reguladores automáticos de tensão e os transformadores comutadores de tap sob carga, bem como as características das cargas, foram identificados como elementos importantes que poderiam ter efeitos adversos na estabilidade de tensão de um sistema.

Do que foi apresentado em relação à estabilidade estática e de tensão pode-se concluir que a instabilidade estática e a instabilidade de tensão ocorrem quando há uma transgressão no limite de fornecimento de potência pelo sistema à barra de carga, sendo que para o

primeiro caso a barra possui a devida compensação reativa para manter a tensão constante. Para o segundo isto não ocorre, conseqüentemente haverá uma queda contínua da tensão na barra.

O limite de estabilidade estática só ocorre quando a diferença entre os ângulos das tensões for igual ao negativo do ângulo da impedância entre as barras. O limite de estabilidade de tensão é atingido quando o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância entre as barras correspondentes à fonte e à carga.

Variando-se o suporte reativo no lado da carga ( $\cos\phi_c$ ) e mantendo-se a tensão na fonte fixa, obtém-se vários limites de estabilidade de tensão. Dentre estes, existe um que é máximo. Neste ponto, além dos módulos das impedâncias serem iguais, o ângulo correspondente à diferença entre os ângulos das tensões das barras e o ângulo de impedância da carga são iguais ao conjugado do ângulo de transmissão. Este ponto é o único em que os limites de estabilidade estática e de tensão coincidem.

Os controladores de tensão, tais como os reguladores automáticos de tensão e os transformadores comutadores de tap sob carga, bem como as características das cargas são elementos de grande importância e podem ter efeitos adversos na estabilidade de tensão de um sistema. Pode-se concluir daí que o fenômeno do colapso de tensão está intimamente associado com a insuficiência da reserva de reativos de um sistema, os quais são requeridos quando de solicitações de potência pelas cargas [9].

## **CAPÍTULO III**

### **INDICADORES DE PROXIMIDADE DE COLAPSO DE TENSÃO**

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Quando um Sistema de Potência está operando em condições de máximo carregamento, o ponto de operação fica próximo do limite de estabilidade. Tais situações, observadas no sistema brasileiro atual e em sistemas de vários outros países, criam um cenário propício para a ocorrência de instabilidade (e colapso) de tensão. A prevenção deste fenômeno tem sido, então, uma das preocupações operacionais mais importantes do momento. Isto tem levado à necessidade de estudos dos sistemas elétricos com vistas à obtenção de coeficientes de sensibilidade (ou indicadores), que possibilitem a tomada de decisões para amenizar os efeitos e, se possível, evitar o colapso de tensão, tanto em planejamento quanto na operação. Neste sentido, este capítulo tem por meta examinar vários dos principais coeficientes de sensibilidade encontrados na literatura técnica atinente ao assunto.

### **3.2 FORMAS DE ANÁLISE DO FENÔMENO DE COLAPSO DE TENSÃO**

A literatura especializada mostra duas maneiras distintas pelas quais o estudo do colapso de tensão pode ser realizado: os métodos estático e dinâmico. O método estático consiste em se utilizar um programa de fluxo de carga modificado, de tal maneira a obter vários pontos de operação do sistema, à medida que acréscimos de potência são realizados em uma ou mais barras de carga, de preferência aquelas que são mais críticas. Esta forma de análise permite o desenvolvimento de ferramentas analíticas simples e índices quantitativos (coeficientes de sensibilidade) para detectar os pontos ou áreas propensas à instabilidade de tensão nos sistemas elétricos.

A segunda forma - método dinâmico - utiliza um programa de análise de estabilidade dinâmica para determinar o quanto o sistema se encontra próximo ao limite de estabilidade, a partir de simulações de perturbações que podem levar o sistema a quedas de tensão e, eventualmente, ao colapso. Neste caso, podem ser consideradas de grande importância na análise da estabilidade do sistema as influências: os transformadores com mudança automática de tap (“On-Load Tap Changers” - OLTC’s), o suprimento de reativos do sistema e os tipos de carga. De fato, o programa de estabilidade possibilita que todos esses equipamentos e fatores sejam representados com os detalhes necessários.

Este trabalho consiste em avaliar a eficácia de alguns indicadores de proximidade do colapso de tensão (“Voltage Collapse Proximity Indicators” - VCPI’s) já utilizados em análise estática e agora implementados no referido programa de análise de estabilidade dinâmica, com o intuito de validar a utilização destes no programa de fluxo de carga. Para tanto, o

entendimento e a formulação matemática destes indicadores é assunto das próximas seções deste capítulo, tratando inicialmente da utilização da singularidade da matriz Jacobiana do sistema para este propósito.

### **3.3 UTILIZAÇÃO DA SINGULARIDADE DA MATRIZ JACOBIANA NA INDICAÇÃO DO COLAPSO DE TENSÃO**

A utilização da singularidade da matriz Jacobiana de um sistema elétrico é apontada como uma forma de indicação da proximidade do colapso de tensão. O Jacobiano do fluxo de potência pode fornecer informações a respeito da existência do ponto de equilíbrio para um especificado nível de carga e carregamento.

O limite de estabilidade de tensão de um sistema de potência pode ser interpretado como o ponto onde a matriz Jacobiana de um fluxo de carga padrão da rede torna-se singular [10]. A tendência à singularidade implica, por sua vez, que o autovalor mínimo da matriz Jacobiana aproxima-se de zero.

Neste trabalho, a matriz Jacobiana de um Sistema de Potência é analisada em um programa de estabilidade em vários pontos de operação, desde a condição inicial do sistema, a fim de estabelecer a relação dos autovalores da matriz com o ponto de instabilidade.

Um sistema de potência pode ser descrito pelas seguintes equações básicas do fluxo de carga:

$$P_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad (3.1)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k [G_{ik} \text{sen}(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \text{cos}(\theta_i - \theta_k)] \quad (3.2)$$

sendo:

$P_i$  - injeção de potência ativa na barra  $i$ ;

$Q_i$  - injeção de potência reativa na barra  $i$ ;

$G_{ik}$  e  $B_{ik}$  - elementos (condutância e susceptância) da matriz admitância de barras;

$V_i$  e  $\theta_i$  - magnitude e ângulo, respectivamente, da tensão na barra  $i$ , representando o estado do sistema;

$n$  - número total de barras

Nas redes elétricas, os valores das injeções de potência são conhecidos e, através deles, define-se o estado do sistema. As equações (3.1) e (3.2) são resolvidas usando-se os métodos de fluxo de carga. Destas equações do fluxo de potência, linearizado em torno do ponto de operação [20], tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

sendo  $P$ ,  $Q$ ,  $V$  e  $\theta$  vetores correspondentes às variáveis empregadas em (3.1) e (3.2);  $H$ ,  $N$ ,  $M$  e  $L$  são submatrizes da matriz Jacobiana, definida como:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

As submatrizes H, N, M, e L são obtidas tomando-se as derivadas parciais de (3.1) e (3.2) em relação a V e  $\theta$ .

Pode-se obter um valor atualizado do estado do sistema calculando-se inicialmente a mudança neste, isto é:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Quando a rede está próxima do colapso de tensão, a matriz J aproxima-se da singularidade[12], e a equação (3.5) não pode ser mais aplicada. A proximidade da singularidade da matriz Jacobiana implica em que seu autovalor mínimo torna-se próximo de zero. Assim, para avaliar a condição de estabilidade de tensão, pode-se computar o mínimo autovalor de J.

Na seção 3.4.1, a determinação dos mínimos autovalores da matriz Jacobiana de um sistema, a cada condição operativa, é utilizada como um dos métodos possíveis para indicar a proximidade de ocorrência do colapso de tensão.

### 3.4 COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE E/OU INDICADORES DO COLAPSO DE TENSÃO (VCPI's)

Como mencionado, existe uma preocupação por parte dos analistas de sistemas no sentido de obter índices seguros e de fácil determinação para medir quão propenso está uma

barra do sistema, uma região ou o sistema inteiro à instabilidade ou colapso de tensão. Estes são geralmente referidos por fatores, coeficientes ou indicadores de sensibilidade ao colapso de tensão, e consistem em valiosas ferramentas para se tomar medidas preventivas, tal como alívio de carga.

Tendo isto em mente, realizou-se um levantamento bibliográfico dos principais coeficientes mencionados na literatura atual, com o intuito de se estudar e analisar quais os mais indicados no estudo de prevenção do colapso através da análise dinâmica.

O mínimo autovalor do Jacobiano é bastante sensível aos ajustes de potência nas proximidades do limite de estabilidade. Isto contribui para sua implementação e utilização neste trabalho, para investigar os fenômenos relativos à estabilidade de tensão. Um outro coeficiente, previamente implementado em outro trabalho [05], foi também considerado devido ao acoplamento entre potência reativa e tensão. Os resultados deste serão utilizados para comparação com aqueles obtidos neste trabalho.

Sendo assim, alguns dos principais coeficientes de sensibilidade (VCPI's) são abordados a seguir.

#### **3.4.1 Coeficiente de sensibilidade representado pelo mínimo autovalor da matriz Jacobiana (CSJ)**

O mínimo autovalor da matriz Jacobiana tem sido apontado por alguns pesquisadores (Tiranuchit e Thomas [21], Vargas [14] e Löf [15]) como sendo um dos coeficientes de sensibilidade mais confiáveis e eficientes na indicação da proximidade do colapso de tensão de um sistema elétrico.

Inicialmente, é necessário calcular todos os autovalores da matriz Jacobiana do sistema, sendo a técnica utilizada para tanto bastante conhecida no meio científico. Assim, esta é resumida neste trabalho.

Supondo uma matriz quadrada  $A$  e utilizando a equação (3.6), em que  $I$  representa uma matriz identidade de mesma ordem de  $A$ ,  $\lambda$  um vetor desconhecido também de mesma ordem de  $A$  e  $\det$  o determinante da expressão matricial obtida, os valores de  $\lambda$  para os quais existe a solução desta equação são chamados de autovalores ou valores característicos da matriz  $A$ .

$$\det (A - \lambda I) = 0 \quad (3.6)$$

Para se obter o mínimo autovalor da matriz Jacobiana, referido aqui por CSJ, pode-se utilizar do procedimento descrito por Vargas [14] e mostrado pela equação (3.7).

$$CSJ \equiv \text{Min}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad (3.7)$$

sendo:

$\lambda_i$  - autovalor  $i$  da matriz estudada  $A$ ;

$n$  - ordem da matriz  $A$ .

Um outro artifício utilizado por Vargas & Quintana[14] para tornar mais rápido o cálculo dos autovalores e, conseqüentemente, do mínimo autovalor é a partição do sistema elétrico de grande porte em subsistemas menores  $N_1, N_2, \dots, N_k$ , com número de nós  $n_1, n_2, \dots, n_k$ , respectivamente, sendo  $k$  o número de subsistemas.

A partição do sistema consiste no “corte” de algumas linhas da rede, de forma que se obtenha um conjunto de subsistemas isolados. Os critérios utilizados para se fazer os “cortes” no sistema são muito importantes, e os de melhor desempenho empregam métodos que se valem de considerações físicas e matemáticas.

Chamando de  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$  os mínimos autovalores de cada subsistema calculados pela equação (3.7), pode-se determinar o mínimo dos mínimos autovalores, como mostrado pela equação (3.8).

$$\lambda_1 \approx \text{CSJ} \equiv \text{Min}\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\} \quad (3.8)$$

### **3.4.2 Coeficientes de sensibilidade em função dos mínimos autovalores das submatrizes L e N da matriz Jacobiana (CSL e CSN, respectivamente)**

Estes dois coeficientes são obtidos pelas mesmas técnicas utilizadas na seção anterior. No entanto, as submatrizes aqui utilizadas são partes da matriz Jacobiana, ou seja, a variação da potência reativa em função da tensão (submatriz L) e a variação da potência ativa em função da tensão (submatriz N), que significa simplesmente uma tangente à curva P-V [14]:

$$L = \partial Q / \partial V$$

$$N = \partial P / \partial V$$

Chamando de  $\beta_i$  os autovalores da submatriz L e  $\rho_i$  os autovalores da submatriz N da matriz Jacobiana, tem-se:

$$CSL \equiv \text{Min}\{\beta_i\} \quad (3.9)$$

$$CSN \equiv \text{Min}\{\rho_i\} \quad (3.10)$$

### 3.4.3 Coeficiente de sensibilidade em função da variação da magnitude da tensão da barra de carga (CS)

Inicialmente, tem-se o coeficiente de sensibilidade proposto por Carpentier em [16], que é bastante intuitivo, pois leva em consideração o acoplamento existente entre a potência reativa e a tensão. Este é expresso pelo quociente da variação da tensão na barra de carga pela variação da potência reativa consumida pela barra de carga em estudo, como pode ser observado a partir da equação abaixo:

$$CS_0 = \frac{\Delta V_i}{\Delta Q_{c_i}}$$

Por questões de praticidade, isto é, para efeito de comparação com outros coeficientes, optou-se por utilizar a formulação inversa para este coeficiente, como mostrado na equação (3.11), forma esta utilizada por Abrão em [05].

$$CS = \frac{\Delta Q_{c_i}}{\Delta V_i} \quad (3.11)$$

### **3.4.4 Outros coeficientes de sensibilidade**

Outros coeficientes de sensibilidade, como ilustrado a seguir, são os principais tipos propostos por Vargas e Quintana [14], os quais podem ser explanados com o auxílio da curva P-V da figura 3.1.

Na figura 3.1 tem-se a seguinte notação:

$V'$  - tensão de operação inicial na barra de carga da curva P-V, para uma potência  $P_0$  inicial;

$V''$  - tensão inicial do lado inferior da curva P-V, para uma potência  $P_0$  inicial;

$P_0$  - potência inicial da barra de carga;

$P_{\text{máx}}$  - potência máxima consumida na barra de carga.

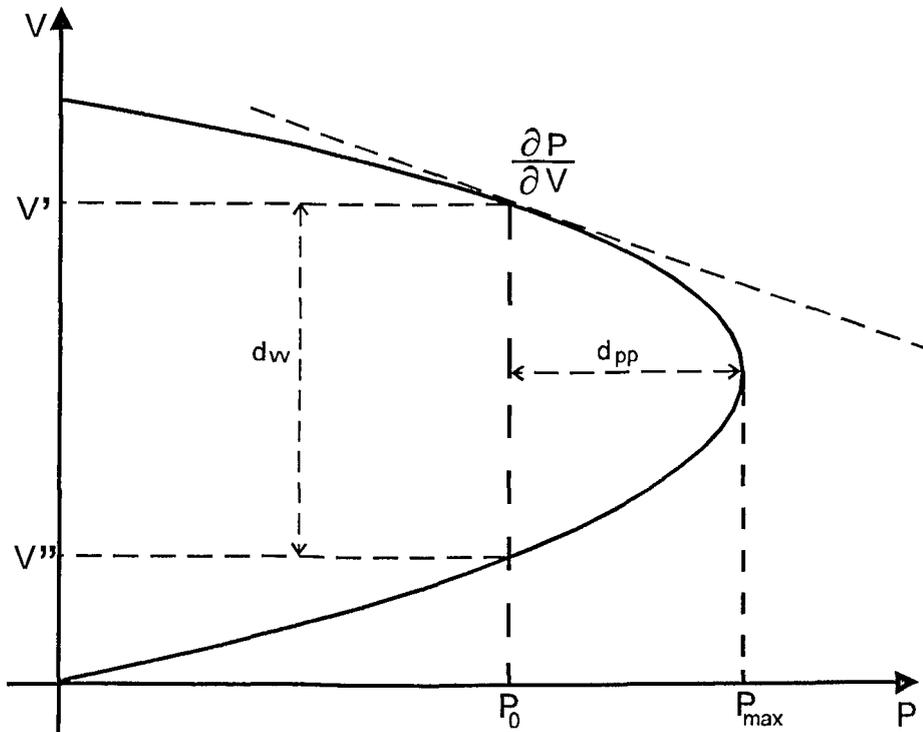


Figura 3.1 - Característica P-V para uma barra de carga mostrando os índices de proximidade de colapso propostos em [14]

Os dois primeiros coeficientes de sensibilidade, representados pelas equações (3.12) e (3.13), envolvem procedimentos iterativos para avaliar as variáveis elétricas de tensão e potência ativa no ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) ou ponto de carregamento máximo, para se obter a diferença de tensão  $d_{vV}$  ou a diferença de potência  $d_{pP}$ .

$$d_{vV} = V' - V'' \quad (3.12)$$

$$d_{pP} = P_{max} - P_0 \quad (3.13)$$

O índice definido pela equação (3.12) mede a proximidade da distância entre as partes superior e inferior da curva P-V para zero. No ponto crítico tem-se que  $d_{vV} = 0$ .

Já o indicador proposto pela equação (3.13) mede a proximidade da diferença  $d_{pp}$  para zero. Similarmente, um outro indicador poderia ser obtido usando-se a diferença entre potências reativas ( $Q_{max} - Q_0$ ), ou a diferença entre potências aparentes ( $S_{max} - S_0$ ). Tais coeficientes são conhecidos também como “Índices do Tipo Margem”, porque determinam um valor que expressa a margem dada pela diferença desse valor para zero (ponto onde ocorre o colapso).

A dificuldade a ser transposta quando se pretende utilizar algum desses dois coeficientes de sensibilidade apresentados,  $d_{vv}$  e  $d_{pp}$ , reside na necessidade dos dados da curva P-V total. Para tanto, além do tempo gasto para a construção ser muito grande, há ainda a exigência de métodos matemáticos mais sofisticados os quais tendem a inviabilizar a utilização destes índices.

Para se resolver o problema de obtenção da curva P-V total, um dos métodos explorados na literatura é o Método da Continuação [13], usado na determinação do ponto de colapso.

Outro coeficiente, proposto em [10] e indicado na equação (3.14), é baseado na técnica do vetor tangente e identifica a barra crítica do sistema.

$$dx/d\lambda = [J^{-1}] df/d\lambda \quad (3.14)$$

onde:

- x - módulo ou ângulo de tensão;
- f - carga (potência ativa ou reativa);
- $\lambda$  - parâmetro de incremento de carga.

Cada barra de carga tem duas entradas no vetor tangente, uma associada ao ângulo de fase e outra ao nível de tensão. A maior entrada nesse vetor identifica a variável que mais se modifica com uma variação de carga, ou seja, aquela associada à barra crítica.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram abordados vários dos principais coeficientes de sensibilidade ao colapso de tensão referidos na literatura. Apresentou-se as duas formas de análise de estabilidade (ou instabilidade) de tensão, destacando-se que a análise dinâmica é aquela adotada neste trabalho, o qual utiliza um programa de estabilidade modificado, onde são incorporados três coeficientes de sensibilidade para servirem de parâmetros indicativos da ocorrência do fenômeno de colapso.

Os três indicadores implementados estão diretamente relacionados com o Jacobiano do fluxo de potência, que fornece informações a respeito da existência do ponto de equilíbrio em regime permanente para um especificado nível de carga [12].

Observa-se que o coeficiente CSJ utiliza todas as submatrizes (H, L, M e N) da matriz Jacobiana na análise do fenômeno, enquanto os coeficientes CSL e CSN trabalham apenas com as submatrizes L e N, respectivamente.

Espera-se que o coeficiente CSJ seja mais eficiente na indicação da proximidade do colapso, visto que ele trabalha com a matriz Jacobiana total (sensibilidades  $\partial P/\partial \theta$ ,  $\partial P/\partial V$ ,  $\partial Q/\partial \theta$  e  $\partial Q/\partial V$ ).

A implementação destes coeficientes de sensibilidade e a análise comparativa com relação a outro coeficiente já existente no programa de estabilidade original é assunto para o próximo capítulo desta dissertação.

## CAPÍTULO IV

### **IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS INDICADORES DE PROXIMIDADE DE COLAPSO DE TENSÃO**

#### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Este capítulo pretende dar uma descrição sucinta do programa digital de simulação dinâmica de estabilidade (e colapso) de tensão, o qual é derivado de aprimoramentos realizados no programa de estabilidade da Universidade Federal de Uberlândia (TRANSUFU [17]). São destacadas as modificações nas subrotinas MONLOP e SYSTEM e a implementação da subrotina AUTOV, necessárias para a obtenção dos coeficientes de sensibilidade, atendendo assim ao objetivo principal deste trabalho de pesquisa, que consiste em analisar a eficácia destes coeficientes na indicação da proximidade do colapso de tensão de um sistema elétrico.

Estes indicadores (autovalores) são extraídos da matriz Jacobiana e de suas submatrizes L ( $\partial Q/\partial V$ ) e N ( $\partial P/\partial V$ ), as quais são calculadas a partir da subrotina MONLOP.

A escolha da matriz Jacobiana completa e de partes desta na indicação da proximidade do colapso é feita com o intuito de verificar se as análises das sensibilidades  $\partial Q/\partial V$  e  $\partial P/\partial V$  são tão eficazes quanto a análise da matriz Jacobiana no estudo do colapso de tensão.

## **4.2 PROGRAMA DIGITAL DE ESTABILIDADE DINÂMICA - TRANSUFU**

Como mencionado, partiu-se inicialmente de um programa de estabilidade transitória existente, denominado TRANSUFU, o qual já havia sido modificado, em pesquisa anterior [18], para análise da influência de novos modelos de carga na estabilidade de tensão. Este programa, desde seu princípio, foi concebido de forma modular, ou seja, à medida que novos modelos mais completos de componentes do sistema elétrico são desenvolvidos, pode-se adicioná-los através de novas subrotinas ao programa.

Outro fator que permite o uso deste programa para simulação dinâmica (processos de longo prazo) é o emprego do método trapezoidal implícito para integração numérica das equações diferenciais, o qual é numericamente estável. Como resultado, o programa trabalha satisfatoriamente, mesmo quando as máquinas ou seus sistemas de controle tenham pequenas constantes de tempo, sem a necessidade de diminuir demasiadamente o passo de integração.

Tomando-se como ponto de partida uma condição equilibrada de operação do sistema, ou seja, supondo que antes de um distúrbio o sistema estava em um ponto de operação estável, obtém-se as condições iniciais para o programa de estabilidade dinâmica. Estas são geradas através de um programa de fluxo de carga, que resolve as equações de rede através do método de Newton-Raphson.

### **4.2.1 Modelos existentes no programa original**

Esta seção tem por finalidade dar uma descrição geral dos principais modelos de componentes do sistema elétrico previamente implementados no programa de estabilidade, os quais são também elementos importantes na composição final do programa de estabilidade dinâmica utilizado nesta pesquisa.

#### **4.2.1.1 Máquinas síncronas, reguladores de tensão e de velocidade**

O programa contém quatro modelos diferentes de máquinas síncronas, sendo que o mais complexo incorpora o efeito da saliência transitória, subtransitória e saturação. De acordo com os dados de entrada fornecido pelo usuário, o programa seleciona automaticamente o modelo mais conveniente.

Para o regulador de tensão (AVR), o programa utiliza a representação geral da figura 4.1, sendo que, de acordo com as informações de entrada, adota-se o modelo que convém, desde um modelo mais simplificado até o mais complexo (incluindo a modelagem da saturação, do filtro de entrada e da malha de estabilização como um modelo de segunda ordem). Adicionalmente, os modelos I e II do IEEE estão incluídos no diagrama de blocos da figura 4.1 e podem ser selecionados por uma opção apropriada dentro do arquivo de dados do programa.

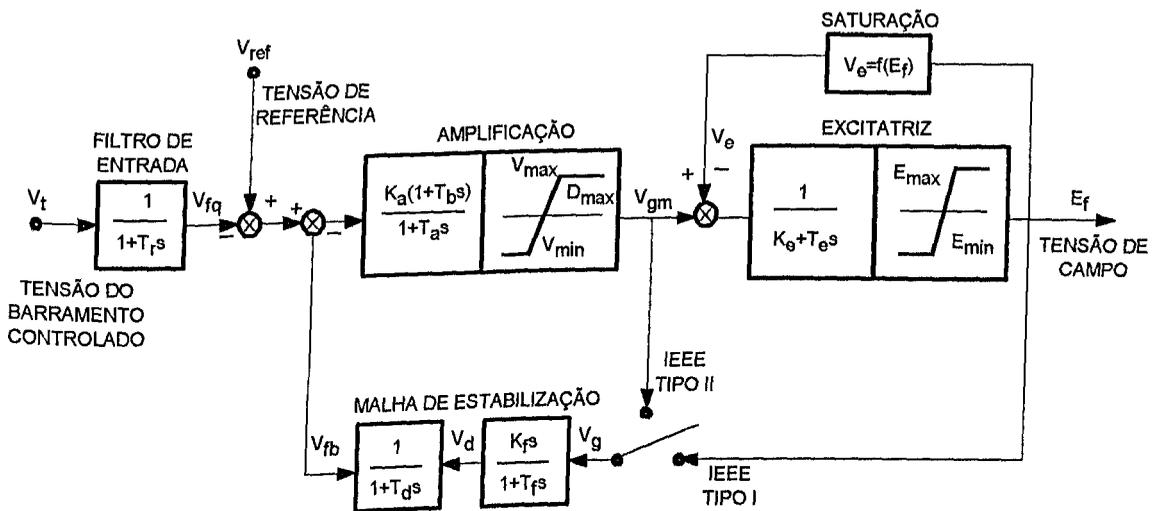


Figura 4.1 - Modelo geral de regulador de tensão (AVR)

Para o regulador de velocidade, o modelo utilizado no programa permite simular tanto uma turbina térmica quanto uma hidráulica (figura 4.2), sendo a escolha definida pelos dados de entrada pela constante de tempo  $T_4$  ( $T_4 = 0$  para turbina térmica).

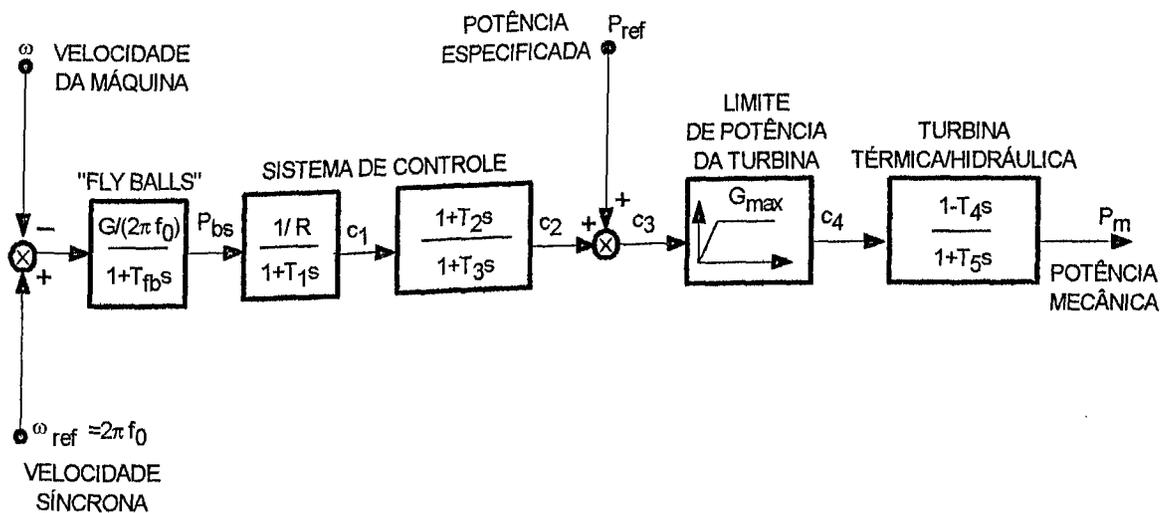


Figura 4.2 - Modelo de um regulador de velocidade de turbina térmica/hidráulica

(Nota: Turbina Térmica  $\rightarrow T_4 = 0$ )

#### 4.2.1.2 Motores de indução

Os motores de indução são representados por um modelo dinâmico que, dependendo dos dados disponíveis, pode simular desde o tipo com rotor de gaiola simples até aquele com rotor de gaiola dupla ou profunda, incorporando, assim, os efeitos transitórios da posição das barras do rotor. Pode-se ainda especificar vários tipos de características de torque de carga em função da velocidade, utilizando para tanto o modelo quadrático indicado pela equação (4.1).

$$T_m = K_a \omega^2 + K_b \omega + K_c \quad (4.1)$$

#### 4.2.1.3 Linhas de transmissão e transformadores

Linhas de transmissão e transformadores com tap fora do nominal (em fase) são representados por seus circuitos  $\pi$  equivalentes. O programa atualmente efetua a mudança de tap através de um instante de tempo previamente definido, simulando, assim, uma intervenção manual de um operador na rede.

#### 4.2.1.4 Cargas Estáticas

O programa inclui o modelo polinomial convencional de uma carga estática, também conhecido por "ZIP" (Z, I, e P representando, respectivamente, impedância, corrente e potência constantes [19]), descrito pelas seguintes equações de potências ativa (P) e reativa (Q):

$$P = P_0 (A + BV + CV^2) \quad (4.2)$$

$$Q = Q_0 (D + EV + FV^2) \quad (4.3)$$

sendo:

- V - Tensão da barra onde a carga está conectada;
- P<sub>0</sub> - Potência Ativa da carga à tensão de 1.0 pu;
- Q<sub>0</sub> - Potência Reativa da carga à tensão de 1.0 pu;
- A - Parcela da carga ativa correspondente à potência constante;
- B - Parcela da carga ativa correspondente à corrente constante;
- C - Parcela da carga ativa correspondente à impedância constante;
- D - Parcela da carga reativa correspondente à potência constante;
- E - Parcela da carga reativa correspondente à corrente constante;
- F - Parcela da carga reativa correspondente à impedância constante.

#### 4.2.1.5 Indicadores de proximidade do colapso de tensão (VCPI's)

Para um dos indicadores, usa-se uma metodologia de cálculo baseada na aproximação sugerida por [05], que é o tratamento dos elementos diferenciais como aproximação para um intervalo maior. Por exemplo, para a potência ativa da barra de carga da equação (3.14), o elemento  $\delta P$  (diferencial) pode ser aproximado por  $\Delta P$  (incremento, desvio ou variação de P).

Estas aproximações introduzem um erro muito pequeno devido ao passo de integração ser da faixa de 0.001 a 0.005 para todos os casos simulados neste trabalho.

O cálculo dos mínimos autovalores da matriz Jacobiana como índice de colapso de tensão é desenvolvido neste trabalho. O mesmo estudo é feito para as submatrizes L e N da matriz Jacobiana ( $\partial Q/\partial V$  e  $\partial P/\partial V$ , respectivamente) [22].

### **4.3 ESTRUTURA INICIAL DO PROGRAMA DE ESTABILIDADE (TRANSUFU)**

O programa original, onde foram implementados os coeficientes de sensibilidade apresentados no capítulo 3, era composto inicialmente de 89 subrotinas, as quais são descritas nas tabelas 4.1a, 4.1b e 4.1c.

Tabela 4.1a - Subrotinas do programa de estabilidade original

SUBROTINA	FUNÇÃO
01 - ABRE	Rotina auxiliar
02 - AVRCON	Cálculo das "constantes" das equações trapezoidais do AVR
03 - AVREXT	Extrapolação as variáveis não-integráveis do AVR
04 - AVRINC	Inicialização das variáveis do AVR
05 - AVRIP	Leitura e impressão dos dados do AVR
06 - AVROP	Impressão dos resultados do AVR
07 - AVRSOL	Solução das variáveis não-integráveis do AVR
08 - AVRTRA	Solução das equações trapezoidais do AVR
09 - BIFAI	Solução do sistema pela eliminação sequencial ordenada
10 - BIFA2	Solução do sistema pela eliminação sequencial ordenada
11 - BIFA3	Solução do sistema pela eliminação ordenada
12 - BIFA4	Solução do sistema pela eliminação ordenada
13 - BUSOP	Impressão dos estados das barras em um arquivo temporário
14 - BUSOUT	Impressão dos estados (resultados) das barras no arquivo de saída
15 - CASWIP	Entrada dos dados para chaveamento de cargas
16 - CIFER	Rotina auxiliar
17 - CIMPMA	Impressão de matrizes complexas
18 - CMUL	Rotina auxiliar
19 - COMP8	Rotina auxiliar
20 - CONST	Transformação de equações diferenciais em equações algébricas
21 - COPY8	Rotina auxiliar
22 - CORSOL	Cálculo da corrente injetada na barra pela carga tipo corrente constante
23 - EXPSOL	Cálculo de corrente injetada na barra pela carga tipo função exponencial
24 - EXTRA	Extrapolação de variáveis não-integráveis
25 - FREQUO	Impressão dos valores de frequência em um arquivo temporário
26 - FREQUE	Impressão dos valores de frequência de todas as barras de geração
27 - GAUSS	Solução de equação matricial pelo Método de Gauss
28 - GENIP	Leitura de dados de máquinas síncronas
29 - GENOP	Impressão dos dados de gerador
30 - GERNOM	Rotina auxiliar
31 - GERSW	Execução de chaveamento de gerador
32 - GERWIP	Entrada de dados para chaveamento de gerador
33 - GOVCON	Cálculo das "constantes" das equações trapezoidais da turbina/regulador de velocidade
34 - GOVEXT	Extrapolação das variáveis não-integráveis da turbina/regulador de velocidade
35 - GOVINC	Inicialização das variáveis da turbina/regulador de velocidade
36 - GOVIP	Entrada de dados da turbina/regulador de velocidade
37 - GOVOP	Impressão dos resultados da turbina/regulador de velocidade a cada iteração
38 - GOVSOL	Solução variáveis não-integráveis da turbina/regulador de velocidade
39 - GOVTRA	Solução das equações trapezoidais da turbina/regulador de velocidade
40 - GRAF	Rotina gráfica

Tabela 4.1b - Subrotinas do programa de estabilidade original (continuação)

SUBROTINA	FUNÇÃO
41 - IMPMAT	Impressão de matrizes reais
42 - IMPSOL	Transformação da carga shunt do tipo impedância constante em impedância
43 - INERCI	Cálculo da constante de inércia devido a chaveamento de ramo
44 - INICAL	Inicialização das tensões e ângulos das máquinas
45 - INVERT	Inversão de matrizes complexas
46 - LINEOU	Impressão do estado da linha monitorada
47 - LOADIP	Leitura dos dados de composição da carga
48 - LOADSH	Rejeição (sub-frequência) e restauração (sobre-frequência) de carga
49 - MACHOU	Impressão dos resultados de saída de uma máquina (motor/gerador)
50 - MAIN	Rotina principal
51 - MATOPR	Manipulação de vetores e matrizes
52 - MONLIP	Entrada de dados da linha monitorada
53 - MONLOP	Impressão de fluxo de linhas especificadas
54 - MOSTOR	Estado inicial de motores de indução
55 - MOSWIP	Dados de entrada para chaveamento de motores
56 - MOTCON	Cálculo das "constantes" das equações trapezoidais do motor
57 - MOTEXT	Extrapolação das variáveis não-integráveis do motor
58 - MOTINC	Inicialização das variáveis do motor
59 - MOTIP	Leitura de dados do motor de indução
60 - MOTOP	Impressão dos resultados de saída dos motores de indução
61 - MOTPB	Verificação do balanço de potência do motor
62 - MOTRAP	Solução das equações trapezoidais do motor
63 - MOTSOL	Solução das variáveis não-integráveis do motor
64 - MOTSW	Chaveamento de motores
65 - ORDER	Ordenação de vetores e matrizes do sistema
66 - PARAL	Colocação de linhas consecutivas em paralelo
67 - PLOTA	Rotina gráfica
68 - POLSOL3	Cálculo de correntes injetadas por cargas shunt tipo função polinomial
69 - POTSOL	Cálculo de correntes injetadas por cargas shunt tipo potência constante
70 - POWBAL	Verificação do balanço de potência para os dados de entrada
71 - PRINTO	Verificação da necessidade de impressão
72 - PROTEC	Teste do limite de chaveamentos devido a sobre ou subtensão
73 - SAIDA	Verificação se a saída é requerida
74 - SATN	Solução iterativa dos eixos D e Q dentro do laço de iteração principal
75 - SBTIT1	Segunda linha de título, no gráfico, usada pela MACHOU
76 - SHUNT	Cálculo cargas shunt (carga shunt = total - motores)
77 - SHUNT1	Divide a carga shunt total em: carga tipo Impedância, Corrente, e Potência. constante
78 - SOL	Solução de variáveis integráveis e não-integráveis, simultaneamente
79 - STEP	Definição do tamanho do passo de integração
80 - STORE	Armazenagem das condições iniciais

Tabela 4.1c - Subrotinas do programa de estabilidade original (continuação)

SUBROTINA	FUNÇÃO
81 - SUAV	Inicialização das correntes injetadas, a cada novo intervalo de integração
82 - SWITCH	Modificação do sistema, se requerido (chaveamento de linha ou shunt)
83 - SWITIP	Leitura dos dados de chaveamento de linhas
84 - SYSTEM	Leitura dos dados de sistema e da rede
85 - TRANSF	Rotina auxiliar
86 - TRAP	Execução da integração usando a regra trapezoidal
87 - VCINI	Transformação da carga shunt do tipo impedância constante em impedância
88 - VCIP	Leitura de dados para o VCPI (CS) usado no capítulo 3 (seção 3.4.3)
89 - VCOP	Cálculo do VCPI (CS)

#### 4.4 ESTRUTURA FINAL DO PROGRAMA DE ESTABILIDADE

Os coeficientes de sensibilidade desenvolvidos neste trabalho estão diretamente relacionados com os autovalores da matriz Jacobiana do fluxo de carga. Desta forma, a estrutura do programa de estabilidade original foi alterada, com a inclusão de uma nova subrotina (necessária para o cálculo dos autovalores). Além disso, outras subrotinas precisaram ser modificadas para permitir a integração com todo o programa.

A seguir, apresenta-se uma descrição resumida de cada subrotina alterada:

**MONLOP** Faz o monitoramento dos ramos do sistema, fornecendo o estado dos ramos a cada passo de iteração. Nesta subrotina, foi implementado o cálculo e formação das submatrizes que formam a matriz Jacobiana do fluxo de carga, isto é, submatrizes  $H$  ( $\partial P/\partial \theta$ ),  $L$  ( $\partial Q/\partial V$ ),  $M$  ( $\partial Q/\partial \theta$ ) e  $N$  ( $\partial P/\partial V$ ), utilizando informações fornecidas por esta (potência ativa e reativa) e pela subrotina SYSTEM (tipo de barra, ângulo de fase e módulo de tensão). Além disso, também foi implementado o cálculo do mínimo autovalor da matriz Jacobiana e de suas submatrizes  $L$  e  $N$ . Para facilidade de comparação entre as respostas dos coeficientes de sensibilidade implementados, os valores iniciais foram normalizados para 1.0 pu, fazendo com que todos partissem de um mesmo ponto de referência. Para permitir fácil visualização da queda de tensão percentual da barra de carga enfocada para análise de colapso, a magnitude inicial de tensão também foi normalizada para 1.0 pu.

SYSTEM Faz a leitura dos dados iniciais provenientes do programa de fluxo de carga, incluindo os parâmetros das linhas de transmissão e transformadores. Para atender aos objetivos deste trabalho, foi inserido no cartão de entrada dos dados de barra um campo para informar o tipo da barra (barra de carga, de geração ou barra *swing*). O motivo desta implementação é que a barra *swing* ou de referência deve ser omitida na formação da matriz Jacobiana [22]. No cartão de entrada dos dados de linha, incluiu-se também um campo de leitura do tipo de linha (linha de transmissão, transformador comutador em fase ou transformador defasador). Esta informação é necessária para o cálculo dos elementos da matriz admitância de barra, que também foi implementado nesta subrotina. As partes real e imaginária desta matriz são utilizadas na formação das submatrizes H, L, M e N da matriz Jacobiana [22]. Todas as modificações realizadas nesta subrotina visam fornecer subsídios para a montagem da matriz Jacobiana do sistema a cada intervalo de impressão, através da subrotina MONLOP.

Uma nova subrotina foi implementada para atender aos objetivos deste trabalho de pesquisa; esta é descrita a seguir:

AUTOV Esta subrotina foi implementada exclusivamente para, utilizando as submatrizes H, L, M e N geradas na subrotina MONLOP, calcular os autovalores da matriz Jacobiana e de suas submatrizes L e N, os quais são definidos pela equação (3.6). Os valores de  $\lambda$  desta equação para os quais existe sua solução são chamados de autovalores ou valores característicos da matriz. Estes valores são levados à subrotina MONLOP para determinação do mínimo autovalor, tanto para a matriz Jacobiana completa quanto para suas duas submatrizes L e N.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi mostrado, de forma sucinta, o programa de estabilidade dinâmica original, no qual já se encontravam modelados os principais componentes que constituem o sistema (por exemplo, máquinas síncronas, reguladores de tensão e velocidade, linhas de transmissão, transformadores fixos e com tap variável sob carga, entre outros) e, além disso, já incluía também um fator de sensibilidade CS (equação 3.11). Foi mostrado ainda a implementação de três coeficientes de sensibilidade (CSJ, CSL e CSN) neste programa.

O programa modificado fornece o estado de operação de um sistema a cada incremento de potência (ativa e/ou reativa) em uma barra de carga previamente escolhida. O objetivo destes incrementos é testar a estabilidade de tensão do sistema com respeito a esta barra de carga. A proximidade ou ocorrência do colapso fica caracterizada pela divergência do programa.

Descreveu-se as subrotinas que foram modificadas no programa original, de forma a possibilitar a implementação dos coeficientes de sensibilidade e, finalmente, comentou-se sobre a subrotina AUTOV, implementada para calcular os autovalores da matriz Jacobiana e de suas submatrizes L e N.

No próximo capítulo, serão mostrados os resultados das simulações envolvendo os novos coeficientes de sensibilidade estabelecendo, inicialmente, comparações de desempenho entre estes e o fator "CS".

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS DE SIMULAÇÕES**

#### **5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O objetivo deste capítulo é analisar, através do programa de estabilidade dinâmica, a eficácia dos coeficientes de sensibilidade implementados neste programa, quando um sistema é submetido a algum distúrbio que conduza à instabilidade e/ou colapso de tensão. Para tanto, são utilizados dois sistemas, nos quais é selecionada uma barra de carga para sofrer acréscimos sucessivos de potência em determinados intervalos de tempo, até que o colapso de tensão ocorra. Nos estudos relatados neste capítulo, os tipos de modelagem de carga utilizados são:

- impedância constante;
- potência constante;
- carga mista;
- motor de indução.

Os indicadores de proximidade do colapso de tensão (VCPI's) analisados neste capítulo são aqueles baseados nas equações (3.8), (3.9), (3.10) e (3.11) do capítulo III. Como salientado anteriormente, estes surgiram dos estudos realizados por Vargas & Quintana [14], que aponta estes indicadores entre aqueles mais eficientes na prevenção do colapso, dentre os coeficientes relatados na literatura atual. Tendo em vista uma maior concentração na meta principal deste trabalho, resolveu-se não testar outros modelos de cargas além daqueles mencionados acima, os quais acredita-se serem suficientes para substanciar as conclusões obtidas.

Deve-se salientar também que, para facilidade de comparação entre os coeficientes, estes são multiplicados por um fator constante, a fim de que todos assumam o mesmo valor inicial (1.0), sem prejuízo para as análises que serão realizadas a partir das curvas obtidas.

Para apresentação dos resultados dos casos simulados a partir do programa de análise de estabilidade, com os coeficientes de sensibilidade indicados no capítulo III já implementados, cada curva associada ao seu respectivo coeficiente recebe uma identificação apropriada em todos os gráficos deste capítulo, de acordo com a seguinte notação:

- CSJ** - autovalores da matriz Jacobiana;
- CSL** - autovalores da submatriz L da matriz Jacobiana;
- CSN** - autovalores da submatriz N da matriz Jacobiana;
- CS** - variação da potência reativa pela tensão na barra de carga.

## **5.2 ESTUDOS ENVOLVENDO O SISTEMA ELÉTRICO DE 3 BARRAS: SP-1**

A figura 5.1 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico SP-1 utilizado nos primeiros estudos [06]. Ele é composto de três barras e dois ramos, correspondente a uma linha de transmissão e um transformador. O emprego deste sistema bastante simplificado se justifica no sentido de facilitar a análise do comportamento dos diferentes coeficientes de sensibilidade durante os estudos de estabilidade de tensão.

As condições iniciais de entrada do programa de estabilidade dinâmica foram obtidas executando-se um programa de fluxo de carga e estão mostradas nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 [06]. A primeira, tabela 5.1, apresenta as condições iniciais de operação do gerador G1 do sistema SP-1.

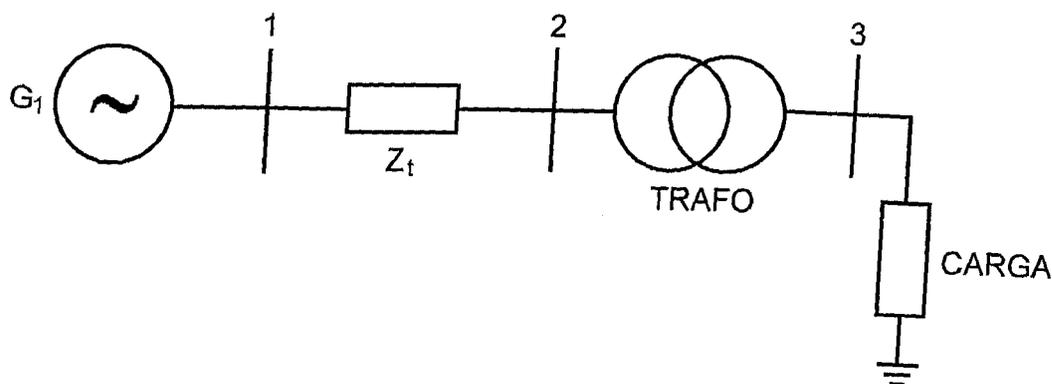


Figura 5.1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico SP-1

Tabela 5.1 - Condições iniciais da máquina síncrona G1 do sistema SP-1

Nome da barra	Máq. Nº	Potência de saída da máquina	
		MW	MVAr
Barra 01	1	2.178	1.178

Na tabela 5.2 são mostradas as condições iniciais de regime permanente das barras do sistema SP-1, observando-se que o programa de fluxo de carga adota a seguinte convenção para o tipo de barra de um sistema elétrico:

- Barra tipo 1 - barra PQ ou barra de carga;
- Barra tipo 2 - barra PV ou barra de tensão controlada;
- Barra tipo 3 - barra de referência e de folga ou de balanço ("swing").

Tabela 5.2 - Dados das barras do sistema SP-1

Barra Nº	Barra Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	P gerado MW	Q gerado MVAr	P consumido MW	Q consumido MVAr
01	3	1.000	0.000	2.178	1.178	0.000	0.000
02	1	0.978	-1.444	0.000	0.000	0.000	0.000
03	1	0.972	-2.088	0.000	0.000	2.158	1.068

Na tabela 5.3 encontram-se os valores dos parâmetros associados à linha e ao transformador do sistema SP-1 da figura 5.1, observando-se que o programa de fluxo de carga adota a seguinte convenção para o tipo de ramo de um sistema elétrico:

- Ramo tipo 1 - linha de transmissão;
- Ramo tipo 2 - transformador comutador de tap;
- Ramo tipo 3 - transformador defasador.

Tabela 5.3 - Dados dos ramos do sistema SP-1

Barra Emissora N°	Barra Receptora N°	Ramo Tipo	Resistência série (pu)	Reatância série (pu)	Susceptância shunt total (pu)	Posição do tap (pu)
01	02	1	0.031	0.13	0.00	-
02	03	2	0.001	0.05	0.00	1.00

Na tabela 5.4 encontram-se os parâmetros da máquina síncrona do sistema SP-1.

Tabela 5.4 - Parâmetros do gerador G1 do sistema SP-1

Máq N°	Constante de Inércia H (s)	$X'_d$ (pu)	$X'_q$ (pu)	$X_d$ (pu)	$X_q$ (pu)	$X''_d$ (pu)	$X''_q$ (pu)	$T'_d$ (s)	$T'_q$ (s)	$T''_d$ (s)	$T''_q$ (s)
1	1.904	0.23	0.75	1.31	0.75	0.23	0.75	3.59	0.00	0.00	0.00

Nota: O valores em pu são relativos à potência nominal do gerador de 5 MVA

Na tabela 5.5 são fornecidos os parâmetros do regulador de velocidade do gerador G1 do sistema SP-1. O modelo de regulador de velocidade adotado é aquele correspondente ao diagrama de blocos da figura 4.2 do capítulo IV.

Tabela 5.5 - Parâmetros do regulador de velocidade do gerador G1 do sistema SP-1

Máq N°	Ganho Flyball (pu)	Regulação (pu)	$T_{fb}$ (s)	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)	$T_5$ (s)
1	1.00	0.05	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3

Na tabela 5.6 são fornecidos os parâmetros do regulador de tensão do gerador G1 do sistema SP-1. O modelo de regulador de tensão adotado está indicado no diagrama de blocos da figura 4.1 do capítulo IV.

Tabela 5.6 - Parâmetros do regulador de tensão do gerador G1 do sistema SP-1

Máq N°	$K_a$ (pu)	$T_a$ (s)	$K_f$ (pu)	$T_f$ (s)	$K_c$ (pu)	$T_c$ (s)	$V_{max}$ (pu)	$V_{min}$ (pu)	$E_{max}$ (pu)	$E_{min}$ (pu)	SE $0.75E_{max}$	$SE_{max}$
1	400	0.02	0.03	1.0	1.0	0.8	5.7	0.2	2.19	0.2	1.5	1.6

Para os casos em que se utiliza o regulador de tensão sem limites no fornecimento de reativos, os parâmetros  $V_{max}$ ,  $V_{min}$ ,  $E_{max}$  e  $E_{min}$  assumem valores nulos.

### 5.3 RESULTADOS OBTIDOS COM O SISTEMA ELÉTRICO SP-1

Esta seção se divide em quatro subseções. Nas duas primeiras subseções, são apresentados os resultados de simulação de colapso de tensão sem e com limites do AVR, respectivamente. Isto é feito com o objetivo de verificar as influências do fornecimento de reativo no comportamento da tensão. Além disso, diferentes modelagens de carga são empregadas no sentido de observar o comportamento do sistema quando as características da carga são alteradas. A seguir, é realizada na terceira subseção uma comparação entre as respostas obtidas com um dado coeficiente, utilizando diferentes modelagens de carga. Finalmente, a última subseção é usada para estabelecer uma comparação entre os comportamentos de um coeficiente obtidos com os programas de fluxo de carga e de estabilidade.

Nas duas primeiras subseções, o sistema SP-1 da figura 5.1 é submetido a aumentos sucessivos de carga na barra 03 (carga esta representada por potência constante, carga mista, impedância constante ou por modelo dinâmico de motor de indução). No caso de incrementos de carga estática, o primeiro acréscimo de carga é feito somente após um intervalo de tempo de 1 segundo para verificação do regime permanente do sistema. O segundo acréscimo acontece aos 4 s. Daí por diante, os chaveamentos são realizados em intervalos de tempo de 3 segundos, até que ocorra o colapso. Todos os incrementos de carga estática são de 0.3 MW e 0.3 MVar, sendo estes valores e o intervalo de tempo citado definidos no intuito de reduzir o número de chaveamentos e o tempo de simulação necessários para desencadear o colapso.

No caso de incrementos de carga dinâmica, isto é, através de partidas de motores de indução, o primeiro motor parte após o instante correspondente a 1 segundo e os demais são chaveados em intervalos de tempo de 10 segundos, até que ocorra o colapso. Todos os motores são de 1.33 MVA. A potência ativa de entrada dos motores é de 0.90 MW, sendo seus parâmetros dados na tabela 5.7.

Para a comparação da resposta dos coeficientes para as diferentes modelagens de carga, são feitos incrementos de carga estática e dinâmica (motores de indução) de 5 em 5 segundos, até que ocorra o colapso.

Tabela 5.7 - Parâmetros dos motores da barra 3 do sistema SP-1

Inércia (s)	Nº de polos	$R_s$ (pu)	$X_s$ (pu)	$X_m$ (pu)	$R_r$ (pu)	$X_r$ (pu)
0.28	2	0.33	0.076	2.4	0.048	0.062

Nota: O valores em pu são relativos à potência nominal do motor de 1.33 MVA

**OBS.:** Para a modelagem mista, a representação da carga foi feita considerando a parte ativa da mesma como sendo do tipo potência constante e a parte reativa como corrente constante.

### 5.3.1 Resultados para o gerador sem limitação de reativos (AVR sem limites)

Nos estudos deste caso, o AVR do gerador G1 da figura 5.1 não tem nenhuma restrição quanto ao fornecimento de reativos para atender às solicitações crescentes da carga. As curvas correspondentes ao comportamento da tensão na barra 3 e dos coeficientes CSJ, CSL, CSN e CS (em função do tempo) estão mostradas nas figuras 5.2 a 5.4, sendo a carga representada pelos modelos de potência constante, carga mista e motor de indução, respectivamente.

**Modelagem: Potência Constante  
(gerador sem limites de reativo)**

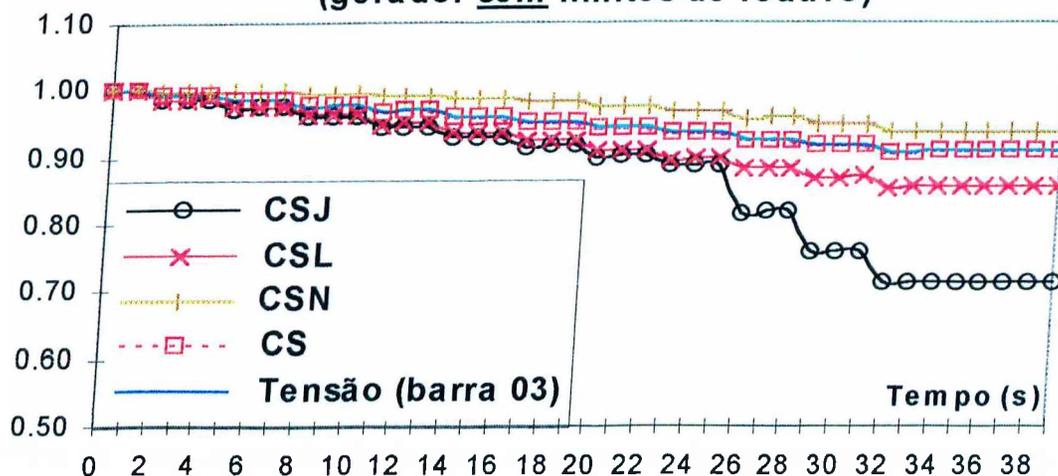


Figura 5.2 Incrementos de carga de potência constante na barra 03  
(Sistema de 03 barras e 02 ramos)

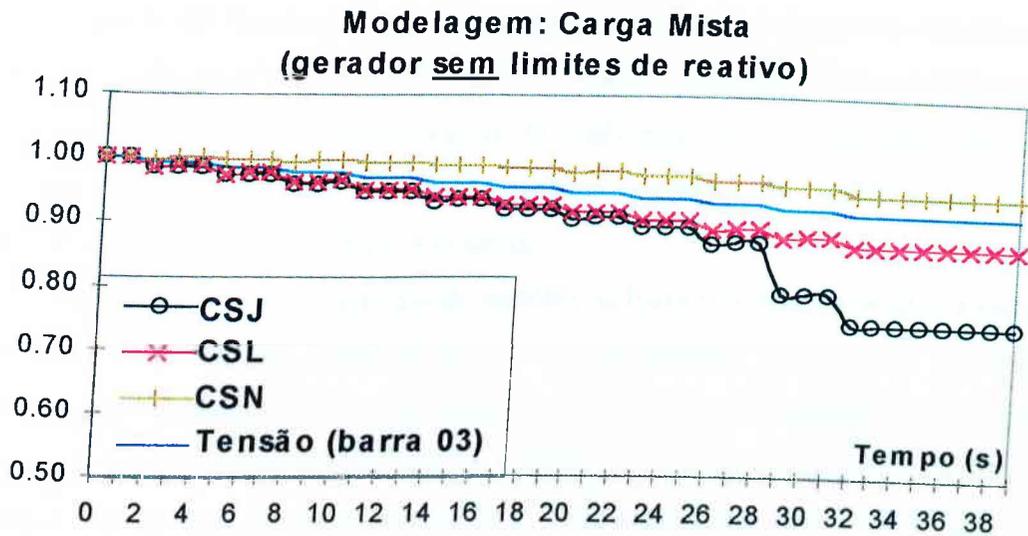


Figura 5.3 Incrementos de carga mista na barra 03  
(Sistema de 03 barras e 02 ramos)

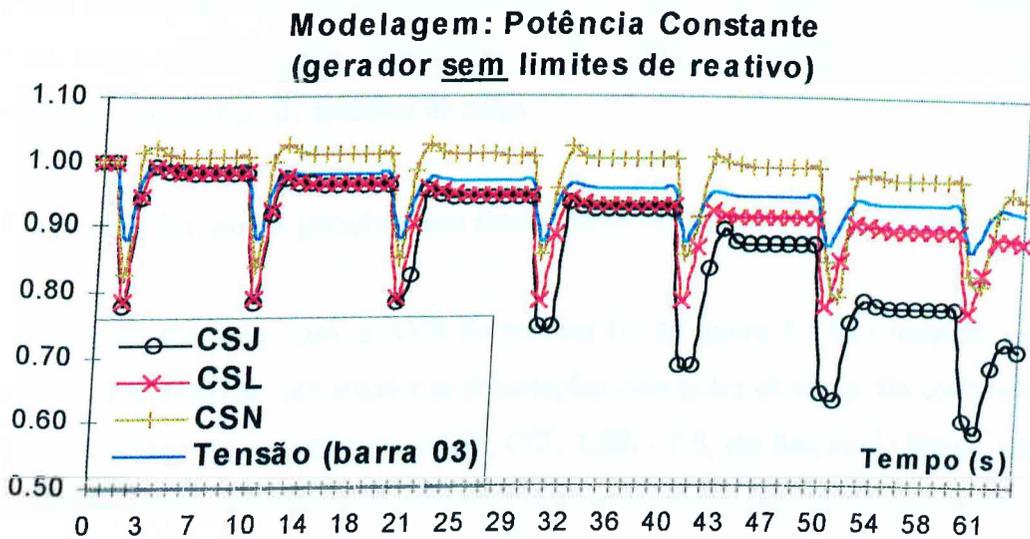


Figura 5.4 Partidas de motores na barra 03  
(Sistema de 03 barras e 02 ramos)

No caso em que o regulador de tensão não possui limites de excitação e são realizados incrementos de carga e partidas de motores na barra 03 (figuras 5.2 a 5.4), o colapso não ocorre, uma vez que a máquina síncrona é capaz de fornecer todo o reativo exigido pela carga. O sistema tende a encontrar um ponto de equilíbrio e se “adaptar” a este, mesmo que a tensão seja baixa.

A partir das figuras 5.2 e 5.3 (incrementos de carga na barra 03) observa-se que os coeficientes CSL ( $\partial Q/\partial V$ ), CSN ( $\partial P/\partial V$ ) e CS ( $\Delta Q_{ci}/\Delta V_i$ ) acompanham o comportamento da tensão, sem sofrer variações consideráveis. O coeficiente CSJ (mínimo autovalor da matriz Jacobiana) sofre uma variação maior, embora também não significativa, já que o fornecimento de reativos pelo AVR é ilimitado.

A partir da figura 5.4 (partidas de motores na barra 03) observa-se que, a cada partida de motor, é requerido um adicional de reativo significativo, ocasionando um desbalanço instantâneo na relação entre o total de potência reativa gerada pelo sistema e a consumida pela carga, resultando nos picos dos indicadores. Como acontece nos casos anteriores (incrementos de carga), o ponto de colapso não é atingido e o sistema tenta se adaptar a um novo valor de tensão, abaixo do valor inicial de estudo.

**OBS:** O comportamento do indicador CS será mostrado apenas quando se empregar a modelagem de potência constante (ver figura 5.2), pois entende-se que esta representa a situação mais severa com relação ao fenômeno de colapso de tensão. Como o coeficiente CS não foi muito sensível neste caso, optou-se por omitir sua representação para os estudos envolvendo outros tipos de modelos de carga.

### **5.3.2 Resultados para o gerador com limitação de reativos (AVR com limites)**

Nos estudos deste caso, o AVR do gerador G1 da figura 5.1 tem restrição quanto ao fornecimento de reativos para atender às solicitações crescentes da carga. Os comportamentos da tensão na barra 3 e dos coeficientes CSJ, CSL, CSN e CS, em função do tempo, utilizando as modelagens de carga do tipo potência constante, carga mista, impedância constante e motor de indução, estão indicados nas figuras 5.5 a 5.8, respectivamente.

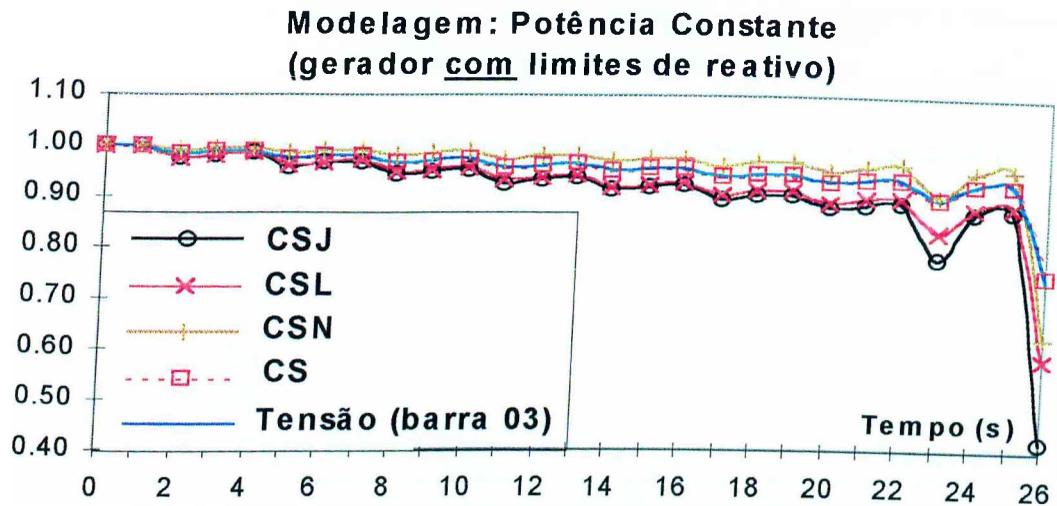


Figura 5.5 Incrementos de carga de potência constante na barra 03  
(Sistema de 03 barras e 02 ramos)

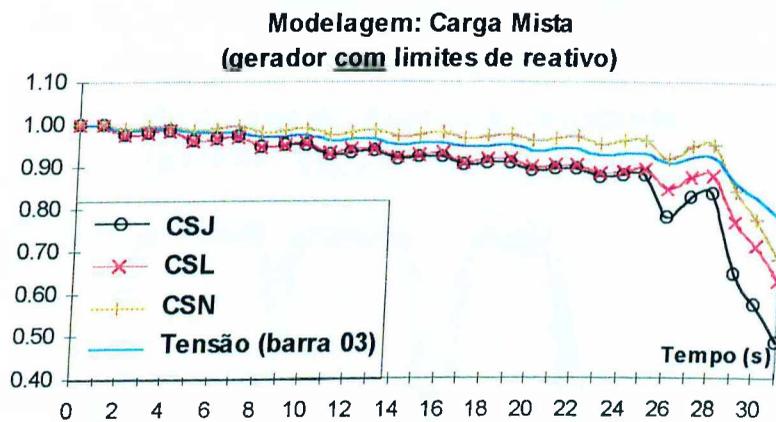


Figura 5.6 Incrementos de carga mista na barra 03  
(Sistema de 03 barras e 02 ramos)

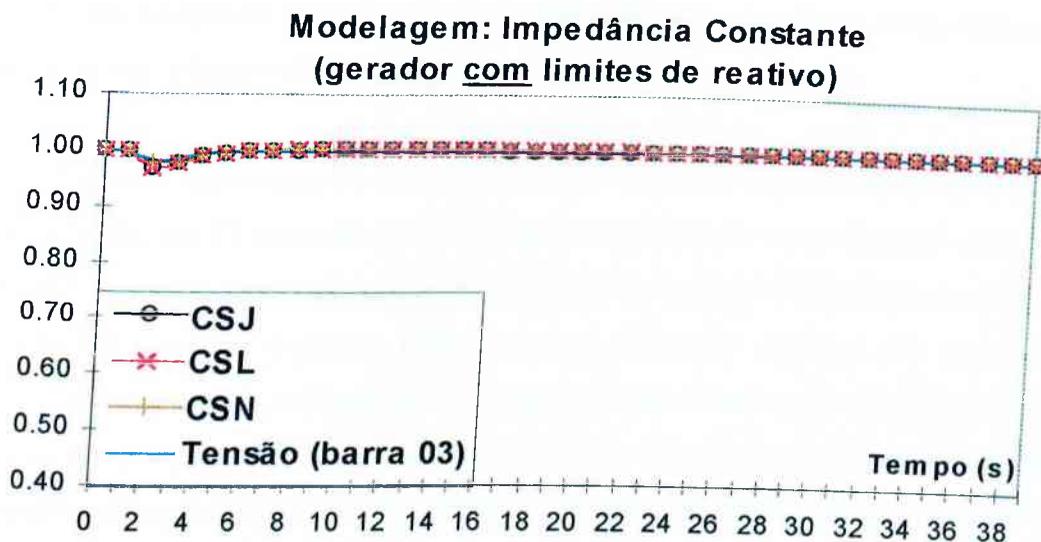


Figura 5.7 Incrementos de carga de impedância constante na barra 03  
(Sistema de 03 barras e 02 ramos)

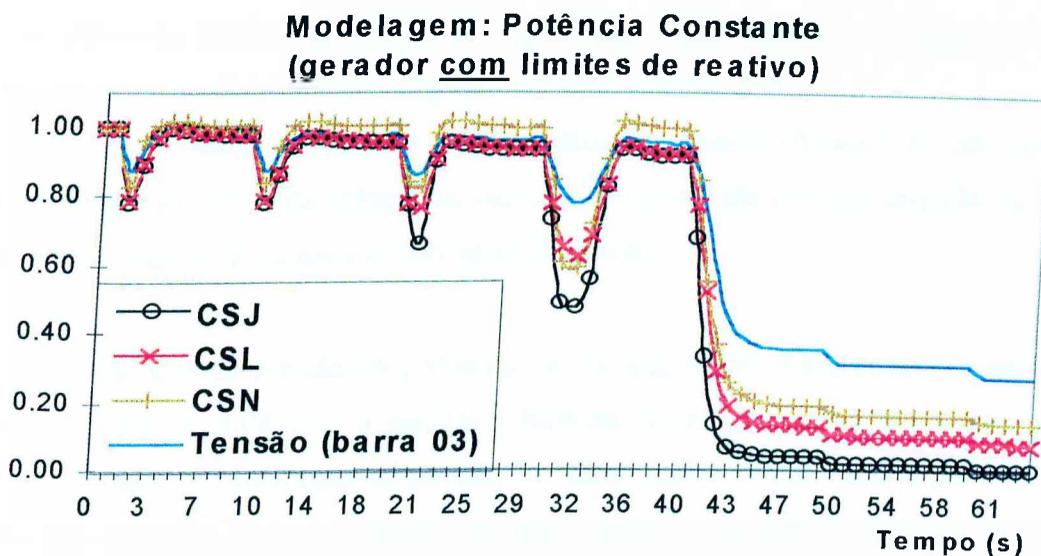


Figura 5.8 Partidas de motores na barra 03  
(Sistema de 03 barras e 02 ramos)

Quando o AVR do gerador síncrono possui restrições no suprimento de reativo e são realizados incrementos de carga estática (figuras 5.5 a 5.7) e partidas de motores na barra 03 (figura 5.8), o regulador tenta suprir o reativo necessário para compensar este aumento de

carga. Quando o limite no fornecimento de reativo é atingido, a tensão na carga começa a cair e o fenômeno do colapso é desencadeado.

No caso da modelagem de carga por potência constante (figura 5.5), observa-se que o colapso se inicia aos 22 segundos na tensão de 0.93 pu, quando os coeficientes sofrem uma queda mais brusca. A tensão atinge, no instante final de estudo (26 s), o valor de 0.75 pu. O coeficiente CS apresenta o mesmo comportamento observado na figura 5.2 (gerador sem limites de reativo), ou seja, acompanha a variação da tensão. Dentre os coeficientes CSJ, CSL e CSN, aquele que indicou de forma mais acentuada a proximidade do sistema ao colapso, ou seja, aquele que apresentou o menor autovalor no final do estudo foi o coeficiente CSJ, atingindo um valor final de 0.42.

No caso da modelagem por carga mista (figura 5.6), observa-se que o colapso se inicia aos 25 segundos na tensão de 0.92 pu e a tensão cai para 0.78 pu no instante final de estudo (31 s). Dentre os coeficientes CSJ, CSL e CSN, aquele que apresentou melhor desempenho foi novamente o coeficiente CSJ, atingindo um valor final de 0.49.

Quando a carga é modelada por impedância constante (figura 5.7), não ocorre um colapso de tensão, pois uma redução na tensão é acompanhada por uma redução na corrente no mesmo sentido, o que atenua as oscilações de tensão.

Quando a carga é modelada por motor de indução (figura 5.8), verifica-se que, a cada partida de motor, o AVR leva o gerador a fornecer mais reativo para compensar a queda brusca de tensão. No momento da partida do quinto motor (40 s - tensão de 0.95 pu), o gerador não consegue fornecer o reativo necessário para que os motores retornem à condição normal de operação e a tensão cai para 0.28 pu, indicando a ocorrência do colapso. Os coeficientes CSJ, CSL e CSN caem para os valores finais de 0.01, 0.08 e 0.14, respectivamente. Neste caso, assim como nos casos anteriores, o coeficiente CSJ foi o que apresentou melhor desempenho na indicação do colapso, como era de se esperar, haja visto que este coeficiente utiliza a matriz Jacobiana completa, e não apenas partes desta, como é o caso dos coeficientes CSL e CSN.

Como foi observado na seção 5.1, quando o AVR não limita o fornecimento de reativos pelo gerador, o ponto de colapso não é atingido. Por este motivo, não será mais feito este tipo de análise para o sistema de maior porte (figura 5.12) a ser estudado nas seções 5.4 e 5.5.

### 5.3.3 Comparação entre as respostas obtidas com o coeficiente CSJ para as diferentes modelagens de carga

Nesta seção são comparadas as respostas do coeficiente CSJ para as modelagens de carga do tipo potência constante (curva CSJ1), carga mista (curva CSJ2) e motor de indução (curva CSJ3), com incrementos de carga estática (potência constante e carga mista) de 0.3 MW e partidas de motores de 0.3 MW, a partir do instante de 1 segundo e repetindo-se em intervalos de 6 segundos (figura 5.9).

Modelagens: Pot. Constante (CSJ1), Carga Mista (CSJ2) e Motor de Indução (CSJ3)  
(gerador com limites de reativo)

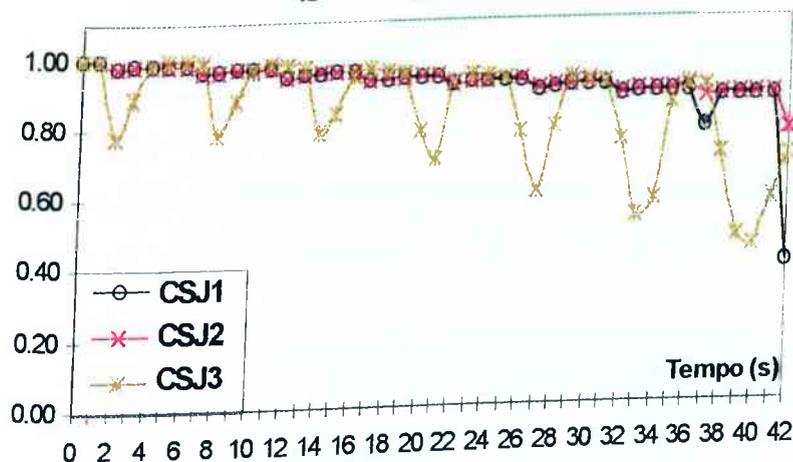


Figura 5.9 Comparação entre CSJ1, CSJ2 e CSJ3  
(Sistema de 03 barras e 02 ramos)

Pela figura 5.9 observa-se que, sob o ponto de vista da estabilidade do sistema, a representação da carga por potência constante apresenta uma maior proximidade do coeficiente CSJ para zero. Isto é explicado pelo fato de que, sendo a potência efetiva da barra

de carga de um sistema elétrico representado pela equação  $P_c = V_c \cdot I \cdot \cos\phi$ , uma queda de tensão causa um aumento na corrente de carga, resultando numa queda de tensão ainda maior.

### 5.3.4 Comparação entre as respostas obtidas com o coeficiente CSJ através dos programas de fluxo de carga e de estabilidade

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações realizadas no programa de fluxo de carga VCFLOW [20] e no programa de estabilidade UFUSTAB [18], no sentido de validar a análise do coeficiente mais efetivo (CSJ) através do programa de estabilidade. Para isto, utilizou-se o sistema elétrico simplificado SP-1 da figura 5.1.

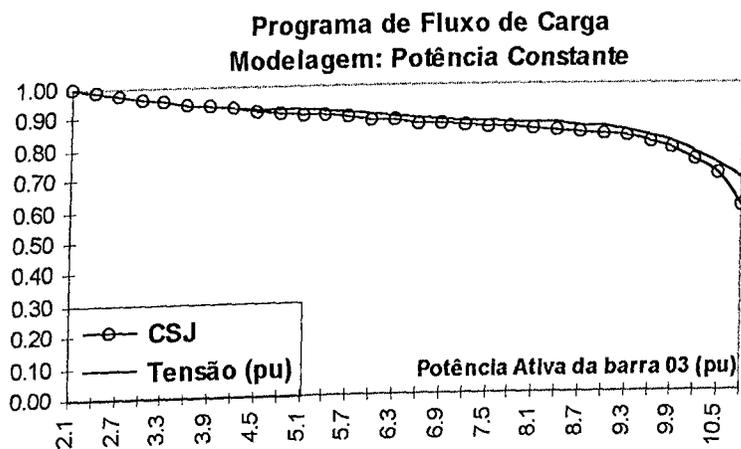


Figura 5.10 Análise de CSJ pelo programa de fluxo de carga VCFLOW (Sistema de 03 barras e 02 ramos)

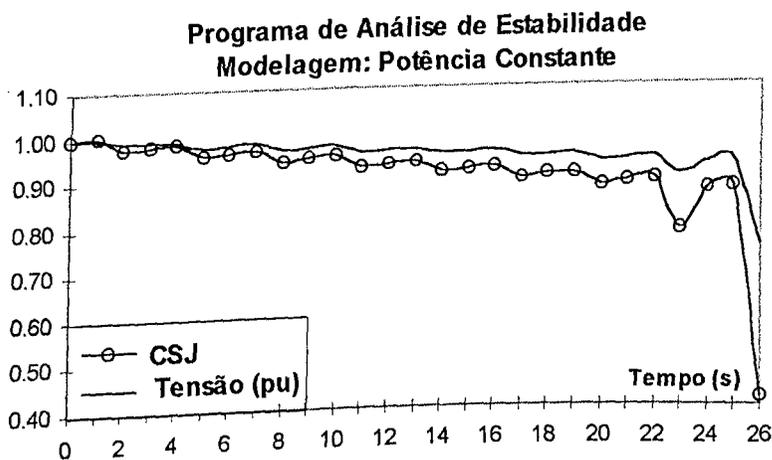


Figura 5.11 Análise de CSJ pelo programa de Estabilidade Transitória UFUSTAB (Sistema de 03 barras e 02 ramos)

Através das figuras 5.10 e 5.11, verifica-se que o coeficiente CSJ teve um comportamento satisfatório no programa de fluxo de carga e também no programa de estabilidade, mostrando o fenômeno do colapso de tensão.

#### **5.4 ESTUDOS ENVOLVENDO O SISTEMA ELÉTRICO DE 36 BARRAS: SP-2**

Estes estudos destinam-se a verificar os efeitos da instabilidade de tensão em um sistema elétrico de potência de maior porte. Assim, é utilizado o diagrama unifilar do sistema elétrico SP-2, mostrado na figura 5.12, extraído da referência [18], o qual consiste de um sistema industrial de 36 barras e 36 linhas (ramos). Como pode ser observado, existem cargas distribuídas em várias barras do sistema as quais são supridas por 2 grupos geradores conectados às barras 1 e 33. Os parâmetros e dados do sistema e seus componentes, correspondentes a uma condição de operação de regime permanente, estão dispostos em tabelas, mostradas a seguir.

Na tabela 5.8 são indicadas as condições iniciais de operação das diversas barras dos sistema SP-2, sendo estes valores obtidos da solução de um fluxo de carga (programa VCFLOW).

Na tabela 5.9 são mostrados os valores dos parâmetros associados aos ramos do sistema SP-2 da figura 5.12.

Os parâmetros associados às máquinas síncronas e seus reguladores automáticos de velocidade e de tensão são os mesmos utilizados previamente nos estudos relacionados ao sistema elétrico SP-1, encontrando-se, portanto, na seção 5.2.

Nos estudos de estabilidade de tensão as barras de carga que despertam maior interesse são aquelas consideradas mais críticas, isto é, aquelas que se encontram com as menores margens de segurança. Sendo assim, foi construída a tabela 5.10, onde são mostradas as margens de segurança para todas as barras do sistema SP-2, com exceção apenas das barras de geração 1 e 33. Conclui-se pela tabela 5.10 que a barra mais crítica do sistema é a barra 19 e esta será, portanto, investigada posteriormente na seção 5.5.

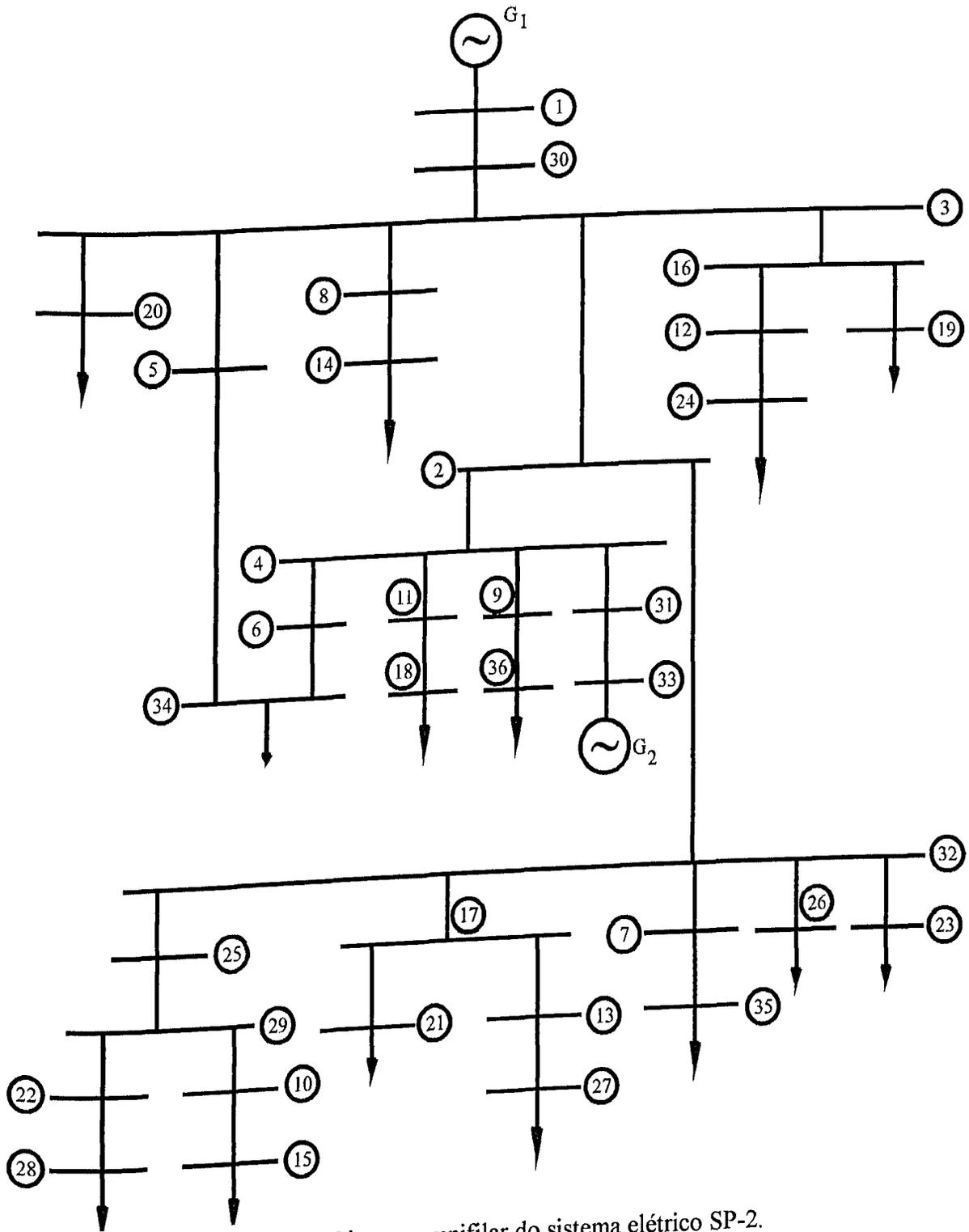


Figura 5.12 - Diagrama unifilar do sistema elétrico SP-2.

Tabela 5.8 - Dados de barra do sistema SP-2

Barra número	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Tensão (pu)	Angulo (Graus)
01	9.7600	7.5870	1.000	0.000
02	0.0000	0.0000	1.000	-0.009
03	0.0000	0.0000	1.000	-0.009
04	0.0000	0.0000	1.000	-0.008
05	-1.5810	-1.3330	0.998	-0.064
06	-1.5330	-1.3050	0.998	-0.062
07	-0.8930	-0.6270	1.000	-0.120
08	-1.6710	-1.1980	1.000	-0.120
09	-0.5390	-0.3680	1.000	-0.009
10	-0.0510	-0.0300	0.995	-0.159
11	-0.1040	-0.1080	0.997	-0.069
12	-0.0340	-0.0210	0.999	-0.020
13	-0.0380	-0.0240	0.999	-0.016
14	-4.4440	-3.4220	0.971	-1.854
15	-0.6160	-0.4630	0.985	-0.844
16	-0.1020	-0.0600	0.999	-0.018
17	-0.0175	-0.0102	0.999	-0.014
18	-2.4300	-1.9350	0.982	-0.544
19	-0.1160	-0.0694	0.996	-0.226
20	0.0000	0.0000	1.000	-0.009
21	-0.0170	-0.0992	0.996	-0.019
22	-0.1120	-0.0660	0.994	-0.178
23	-0.0810	-0.0680	0.999	-0.017
24	-0.1680	-0.1041	0.995	-0.314
25	-0.5360	-0.3660	0.999	-0.011
26	-0.1470	-0.0870	0.995	-0.018
27	-0.1530	-0.0948	0.995	-0.334
28	-0.5900	-0.4440	0.988	-0.550
29	0.0000	0.0000	0.996	-0.116
30	0.0000	0.0000	1.000	-0.007
31	0.0000	0.0000	1.000	-0.005
32	0.0000	0.0000	1.000	-0.011
33	13.000	10.141	1.000	-0.001
34	-4.6740	-3.4360	0.983	-1.020
35	-1.0250	-0.7040	0.990	-0.649
36	-1.0250	-0.7040	0.990	-0.647

Nota: Sinal positivo para potência gerada e negativo para potência absorvida

Tabela 5.9 - Dados de ramos do sistema elétrico SP-2 [18]

Barra inicial	Barra final	Resistência série (pu)	Reatância série (pu)	Susceptância shunt (pu)
25	32	0.0001	0.0005	0.000
32	2	0.0001	0.0005	0.000
2	3	0.0001	0.0005	0.000
29	25	0.0571	0.1167	0.000
29	22	0.1177	0.2402	0.000
29	10	0.0330	0.0674	0.000
2	4	0.0001	0.0005	0.000
32	26	0.0568	0.1161	0.000
32	7	0.0007	0.0015	0.000
32	23	0.1177	0.2402	0.000
32	17	0.0260	0.0532	0.000
3	16	0.0260	0.0532	0.000
3	5	0.0192	0.03960	0.000
3	8	0.0008	0.0017	0.000
4	11	0.0334	0.0681	0.000
4	6	0.0195	0.0399	0.000
4	9	0.0008	0.0016	0.000
3	20	0.0090	0.0092	0.000
16	19	0.5007	3.4090	0.000
17	21	0.5011	3.4227	0.000
22	28	0.0953	1.1510	0.000
10	15	0.0508	0.7369	0.000
11	18	0.5070	0.7342	0.000
8	14	0.5110	0.7409	0.000
5	34	0.0508	0.7369	0.000
6	34	0.0510	0.7395	0.000
30	1	0.0010	0.0020	0.000
3	30	0.0001	0.0005	0.000
31	33	0.0006	0.0013	0.000
4	31	0.0001	0.0005	0.000
12	16	0.0090	0.0185	0.000
12	24	0.4891	3.3440	0.000
13	17	0.0090	0.0185	0.000
13	27	0.5018	3.9180	0.000
7	35	0.1038	1.1460	0.000
9	36	0.1050	1.1470	0.000

Nota: Valores em pu em relação a 100 MVA base

Tabela 5.10 - Margens de segurança para o sistema de 36 barras

Barra número	Carga original (MVA)	Carga final (MVA)	Margem (MVA)	Ordem
2	0.785	43.841	43.056	17
3	1.414	43.841	42.427	15
4	1.414	43.841	42.427	16
5	2.068	45.904	43.836	28
6	2.013	45.847	43.834	26
7	1.091	44.918	43.827	21
8	0.771	44.606	43.835	27
9	0.653	44.482	43.829	23
10	0.059	43.898	43.839	31
11	0.150	43.989	43.839	30
12	0.050	43.878	43.828	22
13	0.047	43.885	43.838	29
14	5.609	32.981	27.372	10
15	2.056	13.113	11.057	05
16	0.050	43.954	43.904	33
17	1.432	43.860	42.428	14
18	3.106	25.664	22.558	07
19	0.135	7.2020	7.0670	01
20	0.016	43.841	43.825	20
21	0.101	7.8170	7.7160	04
22	0.130	43.963	43.833	25
23	0.043	43.946	43.903	32
24	0.198	7.2660	7.0680	02
25	0.649	44.479	43.830	24
26	0.094	43.999	43.905	34
27	0.180	7.2490	7.0690	03
28	0.738	22.136	21.398	06
29	0.141	43.830	43.689	18
30	3.263	43.841	40.578	12
31	3.844	43.841	39.997	11
32	1.414	43.841	42.427	13
34	5.801	49.582	43.781	19
35	1.243	23.851	22.608	08
36	1.243	24.543	23.300	09

## 5.5 RESULTADOS OBTIDOS COM O SISTEMA ELÉTRICO SP-2

Tal como anteriormente, esta seção se divide em quatro subseções, onde as barras 19 e 35 do sistema SP-2 da figura 5.12 são submetidas a aumentos sucessivos de carga estática (modeladas por potência constante e carga mista) e de cargas dinâmicas (motores de indução). Para tanto, após um intervalo de tempo de 1 s para verificação do regime permanente do sistema, é realizado o primeiro acréscimo de carga. O segundo chaveamento para admissão de carga acontece aos 4 segundos. Daí por diante, os chaveamentos e incrementos são realizados em intervalos de tempo de 3 segundos (até ocorrer o colapso).

Todos os acréscimos de carga são de 1.0 MW e 1.0 MVA para os modelos estáticos. Os motores de indução a serem inseridos no sistema operam na sua condição nominal a partir de uma potência de entrada de 1 MW, fator de potência de 0,84. Todos os motores são de 1.54 MVA. A potência ativa de entrada dos motores é de 1.284 MW, sendo seus parâmetros dados na tabela 5.11.

Observa-se que estes valores e o intervalo de tempo supracitado foram definidos com o intuito de se reduzir o número de chaveamentos e o tempo de simulação necessários para desencadear o colapso.

Tabela 5.11 - Parâmetros dos motores das barras 19 e 35 do sistema SP-2

Constante de Inércia H (s)	Nº de pólos	$R_s$ (pu)	$X_s$ (pu)	$X_m$ (pu)	$R_r$ (pu)	$X_r$ (pu)
0.75	2	0.005	0.078	2.94	0.027	0.18

Nota: O valores em pu são relativos à potência nominal do motor de 1.54 MVA

A análise da estabilidade deste segundo sistema foi feita tomando, para estudo dos coeficientes, a barra que tem a menor margem de segurança (barra 19 - tabela 5.10) e a barra mais distante eletricamente da geração (barra 35), para verificar qual barra é verdadeiramente a mais crítica com respeito a estabilidade de tensão.

Em todos os estudos deste caso, os AVR's dos geradores G1 e G2 da figura 5.12 possuem restrição quanto ao fornecimento de reativos para atender às solicitações crescentes

da carga. Sendo assim, os resultados obtidos tornarão mais fácil a tarefa de identificar qual o coeficiente de sensibilidade é mais eficaz na indicação do colapso de tensão.

### 5.5.1 Análise da barra 19 do sistema SP-2

Esta seção visa analisar o comportamento da tensão e dos coeficientes CSJ, CSL e CSN em função do tempo, enquanto são feitos incrementos de carga na barra 19, considerada a mais crítica do sistema SP-2. As figuras 5.13 a 5.15 mostram os resultados obtidos para a representações de carga do tipo potência constante, mista e motor de indução, respectivamente.

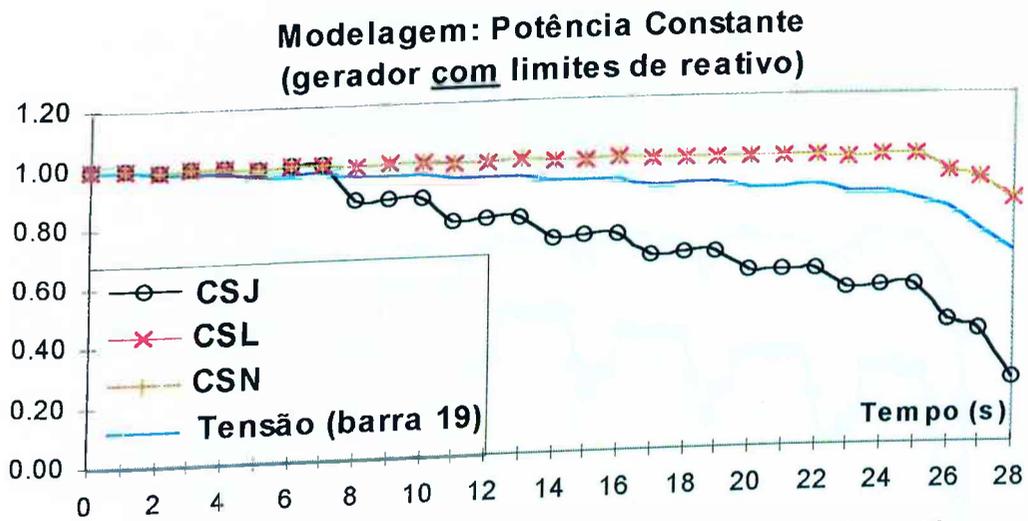


Figura 5.13 Incrementos de carga de potência constante na barra 19  
(Sistema de 36 barras e 36 ramos)

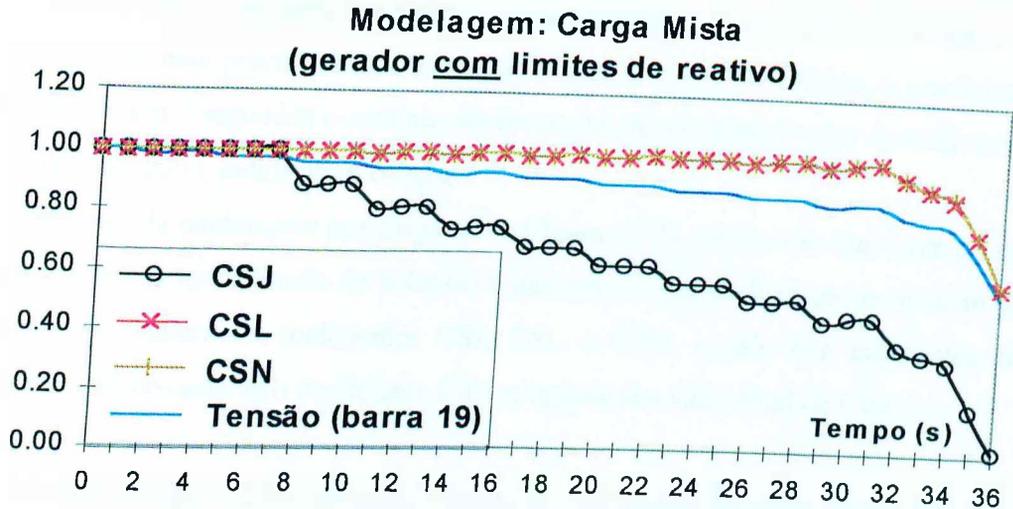


Figura 5.14 Incrementos de carga mista na barra 19  
(Sistema de 36 barras e 36 ramos)

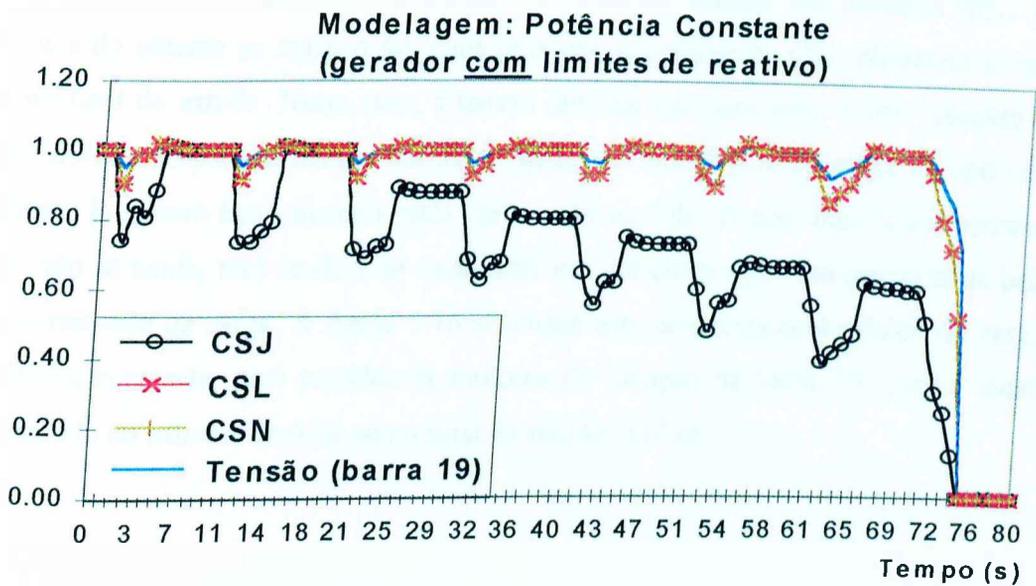


Figura 5.15 Partidas de motores na barra 19  
(Sistema de 36 barras e 36 ramos)

Desde que os geradores síncronos não podem suprir ilimitadamente a demanda de reativos do sistema, quando são realizados os incrementos de carga e partidas de motores na barra 19, cria-se um cenário propício para o desencadeamento do fenômeno do colapso de tensão, como pode ser observado pelos três gráficos (figuras 5.13 a 5.15).

No caso da modelagem por potência constante (figura 5.13), observa-se que o colapso não é detectado com precisão pelos coeficientes CSL e CSN; no entanto, o coeficiente CSJ começa a cair aos 7 segundos e continua decrescendo até alcançar o valor de 0.22 no instante final de estudo (28 s), indicando o colapso.

No caso da modelagem por carga mista (figura 5.14), observa-se que a tensão cai para 0.85 pu aos 30 segundos (início do colapso) e alcança o valor de 0.55 pu no instante final de estudo (36 s). Dentre os coeficientes CSJ, CSL e CSN, aquele que apresentou melhor desempenho foi novamente o coeficiente CSJ, atingindo um valor final de 0.02.

No caso da figura 5.15, as cargas a serem incrementadas na barra 19 são representadas por motores de indução (figura 5.15), enquanto que as demais barras são modeladas por potência constante. Assim, observa-se que o colapso se inicia aos 73 segundos na tensão de 0.85 pu. Os três índices foram eficientes; no entanto, aquele que mostrou mais cedo a tendência do sistema ao colapso foi, mais uma vez, o coeficiente CSJ, chegando a um valor nulo no final do estudo. Neste caso, a tensão também cai para zero; e isto somente ocorre porque utilizou-se para as demais barras do sistema a modelagem de carga do tipo potência constante. Por outro lado, quando estas cargas são modeladas por impedância constante, a tensão não se anula, mas tende a se estabilizar em um certo valor um pouco mais baixo, a cada incremento de carga. A figura 5.16 confirma este comportamento típico da cargas de impedância constante, para partidas de motores de indução na barra 19, com a tensão se estabilizando no patamar de 0.78 pu no final do estudo (110 s).

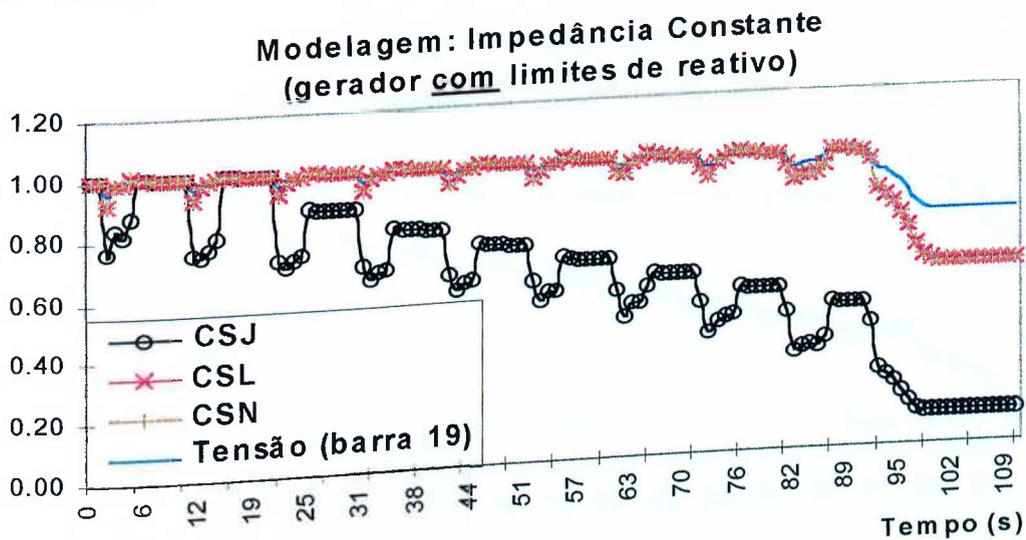


Figura 5.16 Partidas de motores na barra 19  
(Sistema de 36 barras e 36 ramos)

### 5.5.2 Análise da barra 35 do sistema SP-2

Analogamente à seção anterior, as figuras 5.17 a 5.19 referem-se à análise do comportamento da tensão na barra 35 e dos coeficientes CSJ, CSL e CSN em função do tempo, respectivamente, para acréscimos de carga de potência constante, mista e motores de indução na barra 35.

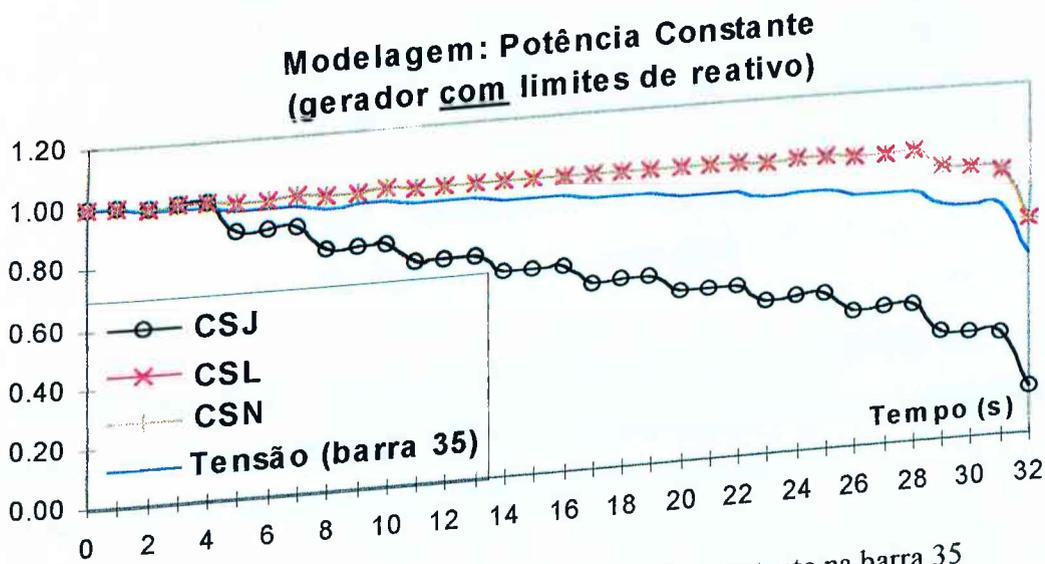


Figura 5.17 Incrementos de carga de potência constante na barra 35  
(Sistema de 36 barras e 36 ramos)

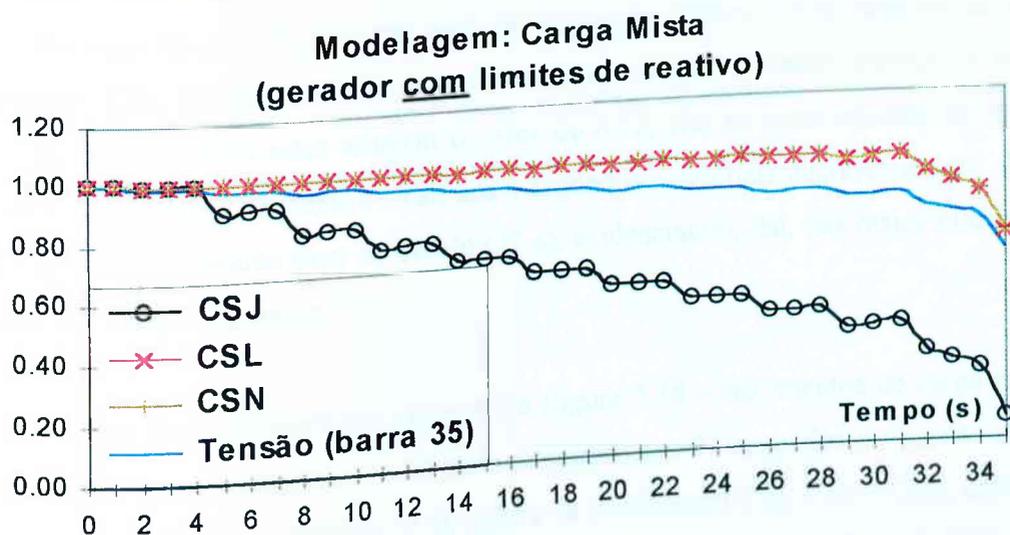


Figura 5.18 Incrementos de carga mista na barra 35  
(Sistema de 36 barras e 36 ramos)

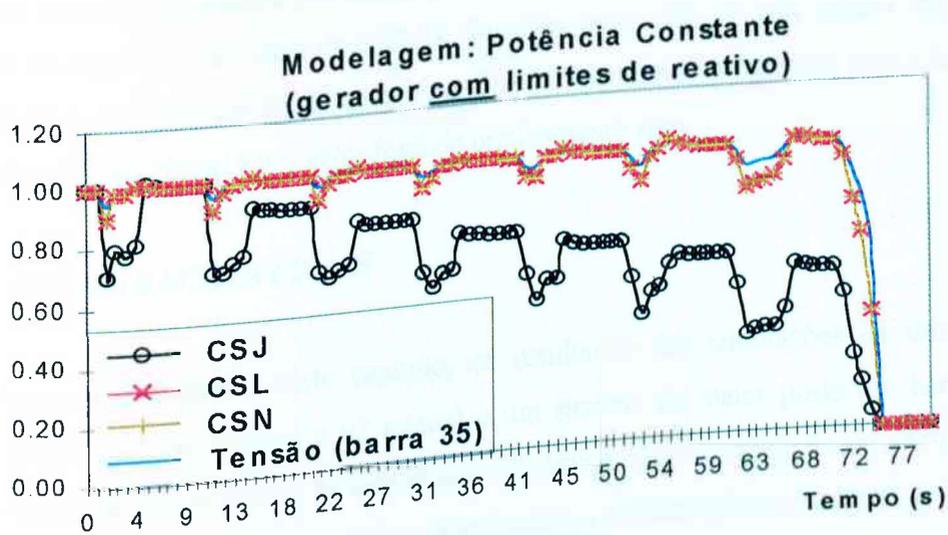


Figura 5.19 Partidas de motores na barra 35  
(Sistema de 36 barras e 36 ramos)

Também neste caso, o fenômeno do colapso de tensão é observado em todas as representações de carga usadas (figuras 5.17 a 5.19), principalmente em consequência do limite no suprimento de reativos pelos geradores impostos pelos AVR's.

No caso da modelagem por potência constante (figura 5.17), observa-se que os coeficientes CSL e CSN caem no mesmo instante em que a tensão começa a ter uma inclinação maior, porém estes atingem o valor de 0.73, não se aproximando de zero. No entanto, o coeficiente CSJ começa a cair aos 4 segundos e continua decrescendo até alcançar o valor de 0.16 no instante final de estudo (32 s), evidenciando, daí, sua maior eficiência na indicação do colapso de tensão.

No caso da modelagem por carga mista (figura 5.18 - incrementos de carga na barra 35), observa-se que o colapso se torna mais acentuado aos 31 segundos e a tensão cai para 0.64 pu no instante final de estudo (35 s). Dentre os coeficientes CSJ, CSL e CSN, aquele que apresentou melhor desempenho foi o coeficiente CSJ, atingindo um valor final de 0.07.

No caso da modelagem por motor de indução (figura 5.19), observa-se que o colapso inicia aos 72 segundos na tensão de 0.89 pu. Também neste caso, os três índices indicaram a proximidade do colapso, porém, o coeficiente CSJ foi o que melhor apontou para a iminência deste fenômeno, ao chegar a um valor final de praticamente zero.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentados, neste capítulo, os resultados das simulações de um sistema elétrico simplificado (03 barras e 02 ramos) e um sistema de maior porte (36 barras e 36 ramos) através de um programa de estabilidade dinâmica, para os quais foram analisados os aspectos do colapso de tensão e avaliados os indicadores apresentados no capítulo 3.

De forma geral, observando os resultados obtidos com o sistema SP-1 de 3 barras, mostrados na seção 5.2, concluiu-se que, dentre os indicadores desenvolvidos, aquele que melhor indicou o colapso, ou seja, aquele que mais se aproximou de zero no final do estudo, foi o indicador representado pelo mínimo autovalor da matriz Jacobiana (CSJ).

Este indicador (CSJ) foi então empregado em outras análises, isto é, primeiramente, foi feita uma comparação do seu comportamento considerando diferentes modelagens de carga. Adicionalmente, comparou-se as respostas obtidas a partir de um programa de fluxo de carga e aquelas provenientes de simulações com o programa de estabilidade dinâmica. Estes

## *CAPÍTULO V - RESULTADOS DE SIMULAÇÕES*

---

últimos estudos foram realizados no sentido de confirmar a eficácia deste coeficiente na indicação da proximidade do fenômeno do colapso de tensão.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Neste trabalho foram levantados aspectos relacionados com a estabilidade de tensão e seu agravante: o colapso de tensão.

Observou-se que, no limite de estabilidade estática, a diferença entre os ângulos das tensões das barras de carga e de geração é igual ao negativo do ângulo da impedância da linha. Conclui-se ainda que o limite de estabilidade de tensão, onde não há suporte de reativos na barra de carga, ocorre quando a magnitude da impedância da linha é igual à magnitude da impedância que representa a carga. Desta forma, chega-se à conclusão de que o colapso de tensão está intimamente ligado com a incapacidade de fornecimento de reativos necessários para manutenção da tensão dentro de limites recomendados.

Foi mostrado que os reguladores de tensão (AVR's) possuem um importante papel na configuração do colapso de tensão, haja visto que, dependendo do ponto de operação do sistema e das condições de fornecimento de reativos do gerador, o colapso pode ser desencadeado antecipadamente. Isto ocorre porque, se o AVR estiver com seu limite de excitação atingido, este não permite que o gerador atenda aos reativos exigidos pela carga, que tende a ser muito alta no período de instabilidade e colapso de tensão.

Foram apresentados ainda alguns indicadores de proximidade do colapso de tensão e o comportamento de três destes indicadores quando implementados num programa de estabilidade transitória. Concluiu-se, a partir desta abordagem, que estes indicadores são tão

eficientes como quando implementados num programa de fluxo de carga, viabilizando assim a utilização destes no estudo da estabilidade de tensão a partir de um programa de fluxo de carga. O indicador que se mostrou mais sensível ao colapso foi aquele representado pelo mínimo autovalor da matriz Jacobiana (CSJ). Portanto, o coeficiente CSJ foi o mais eficiente na indicação deste tipo de fenômeno. Isto mostra que o uso da submatrize L ou N como indicador de proximidade do colapso de tensão pode não ser muito eficaz, pois considera apenas a sensibilidade  $\partial Q/\partial V$  ou  $\partial P/\partial V$  separadamente. Portanto, a análise de estabilidade (e colapso) de tensão deve usar sempre a matriz que considera as sensibilidades  $\partial P/\partial \theta$ ,  $\partial P/\partial V$ ,  $\partial Q/\partial \theta$  e  $\partial Q/\partial V$ , ou seja, a matriz Jacobiana completa [23].

Tais conclusões são fundamentadas nos estudos realizados com dois sistemas elétricos, um sistema reduzido (sistema SP-1, de 3 barras) e outro maior (sistema SP-2, de 36 barras).

### 6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como primeira sugestão, recomenda-se investigar a estabilidade de tensão utilizando a técnica do vetor tangente, o qual, segundo várias referências, permite identificar a barra crítica do sistema num determinado ponto de operação e apontar a proximidade do colapso.

Adicionalmente, recomenda-se analisar a estabilidade de tensão e colapso de sistemas elétricos empregando técnicas de inteligência artificial para identificação de barras mais susceptíveis ao colapso e, se possível, verificação dos coeficientes de sensibilidade mais adequados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] Christensen, J., Gainger, A. W., Santagostino, G., Stube, M., Verseille, J. - CIGRÉ Study Committee 38 Working Group 01 Task Force 03 - **Planning Against Voltage Collapse**, *Electra*, Nº 111, pp. 55-75, Março/1987.
- [02] Cutsem, T. V., **Voltage Collapse Mechanisms : a Case Study**, Proc. of International Workshop on Bulk Power System Voltage Phenomena, Voltage Stability and Security, Deep Creek Lake, Maryland, Agosto/1990.
- [03] Baracho, F. R. A. C., **Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência**, Dissertação de Mestrado, UFMG, Agosto/1992.
- [04] Prada, R., Filho, X. V., Gomes, P., Santos, M. G., **Voltage Stability System Critical Area Identification Based on the Existence of Maximum Power Flow Transmission**, PSCC, França 1993.
- [05] Abrão, P J, **Análise de Indicadores de Colapso de Tensão em Sistemas Elétricos Utilizando um Programa de Estabilidade**, Dissertação de Mestrado, UFU - Uberlândia - 1994.
- [06] Cutsem, T, V., **A Method to Compute Reactive Power Margins with respect to Voltage Collapse**, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 6, nº 6, pp. 145- 156, Fev/1991.
- [07] Pal, M. K., **Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics**, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, nº 1, pp. 243-249, Fev/1992.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [08] Taylor, C. W., **A conceptual Analysis of Voltage Stability as Related to Load Characteristics**, Publish in Reactive Power Compensation and Voltage Stability, Carson Taylor Seminars, 1991, and Survey of Voltage Collapse Phenomena, NERC, 1991.
- [09] Medanic, J., Ilic-Spong, M., Christensen, J., **Discrete Models of Slow Voltage Dynamics for Under Load Tap-Changing Transformer Coordination**, IEEE Trans. Power Systems, Vol. PWRs-2, nº 4, pp. 873-882, Set/1987.
- [10] Ferreira, C., **Verificação Dinâmica de Ponto de Colapso**, Departamento de Eletrotécnica - EFEI.
- [11] Venikov, V. A., Stroeve, V. A., Idelchick, V. I., Tarasov, V. I., **Estimation of Electrical Power System Steady-State Stability in Load Flow Calculations**, IEEE Trans. on Powers Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, nº 3, pp. 1034-1041, Maio/Junho 1975.
- [12] Sauer, P. W., Pai, M. A., **Power System Steady-State Stability and the Load-Flow Jacobian**, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, nº 4, pp. 1374-1383, Nov/1990.
- [13] Ajarapu, V., Christy, C., **The Continuation Power Flow: A Tool for Steady-State Voltage Stability Analysis**, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, nº 1, Pag's 416-423, Fev/1992.
- [14] Vargas, L., Quintana, V. H., **Clustering Techniques for Voltage Collapse Detection**.
- [15] Löf, P-A., Smed, T., Andersson, G., Hill, D. J., **Fast Calculation of a Voltage Stability Index**, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, nº 1, pp. 54-64, Fev/1992.
- [16] Carpentier, J., Girard, R., Scano, E., **Voltage Collapse Proximity Indicators Computed From an Optimal Power Flow**, PSCC, Helsinki, Finlândia, Set/1984

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [17] **Manual do Programa de Estabilidade Transitória (Modificado)**, TRANSUFU, Universidade Federal de Uberlândia.
- [18] Filho, J. D., **Influências de Modelagens de Cargas em Estudos de Colapso de Tensão de Sistemas Elétricos**, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, 1997.
- [19] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, **Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation**, 1994, IEEE.
- [20] Salve, J. C. P., **Análise do Colapso de Tensão de Sistemas Elétricos através de Fluxo de Carga e Coeficiente de Sensibilidade**, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, 1994.
- [21] Tiranuchit, A., Thomas, R. J., **A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems**, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 3, nº 1, pp. 87-93, fev/1988
- [22] Monticelli, Alcir J., **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, São Paulo, SP, 1983.
- [23] Prada, Ricardo B. Greenhalgh, Angela B., **Avaliação da Estabilidade de Tensão: Comparação Entre a Análise por Autovalores/Autovetores e o Determinante da Matriz Reduzida ( $D'$ )**, PUC, Rio de Janeiro, RJ, 1993.

FU-00010047-5