



**Marcel René Vasconcelos de Castro**

**Modelagem do Controle de Tensão por Geradores  
e de Múltiplas Barras *Swing* na Avaliação das  
Condições de Estabilidade de Tensão**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro, 23 de agosto de 2007



**Marcel René Vasconcelos de Castro**

**Modelagem do Controle de Tensão por Geradores  
e de Múltiplas Barras *Swing* na Avaliação das  
Condições de Estabilidade de Tensão**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Ricardo Bernardo Prada**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC - Rio

**Prof. João Alberto Passos Filho**

CEPEL

**Prof. José Eduardo Onoda Pessanha**

UFMA

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de agosto de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Marcel René Vasconcelos de Castro**

Graduou-se em Engenharia Elétrica, com habilitação em Sistemas de Potência pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2005. Atualmente é engenheiro do Departamento de Gestão do Programa de Universalização de Energia da ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

#### Ficha Catalográfica

Castro, Marcel René Vasconcelos de

Modelagem do controle de tensão por geradores e de múltiplas barras swing na avaliação das condições de estabilidade de tensão / Marcel René Vasconcelos de Castro ; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2007.

124 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Segurança de tensão. 3. Estabilidade de tensão. 4. Controle de tensão local. 5. Controle de tensão remoto. 6. Múltiplas barras swing. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para minha mãe, Maélia de Vasconcelos,  
minha avó, Amélia de Vasconcelos e  
ao meu melhor amigo, Snoopy (em memória)  
pelo amor, apoio e confiança.

## Agradecimentos

A Deus, acima de tudo.

Ao meu orientador Professor Ricardo Bernardo Prada pela paciência, compreensão, participação e, sobretudo, companheirismo durante a elaboração deste trabalho.

Ao CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – por permitir o uso do programa ANAREDE, fundamental para a realização deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro concedido durante a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, Gian Ramalho, Bruno Pontes, Armando Leite, Jorge Vega, Marcelo Araújo, pelo apoio, colaboração e incentivo.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

A todos os amigos do curso de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica, pelo apoio e pela amizade.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica pelos ensinamentos e colaboração.

A todos que participaram durante mais esta etapa da minha vida, muito obrigado. Vocês foram muito importantes.

## Resumo

Castro, Marcel René Vasconcelos. **Modelagem do Controle de Tensão por Geradores e de Múltiplas Barras *Swing* na Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão**. Rio de Janeiro, 2007. 124p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O crescente aumento da complexidade dos sistemas elétricos de potência gera a necessidade de desenvolvimento de ferramentas que melhorem as condições de análise.

O objetivo deste trabalho é aprimorar a ferramenta computacional de avaliação das condições de segurança (ou estabilidade) de tensão. No que diz respeito às barras associadas ao controle remoto de tensão por geração de potência reativa, são propostos novos modelos que representam mais adequadamente as condições operativas no momento do cálculo dos índices de segurança de tensão. Em relação à barra associada ao controle local de tensão por geração de potência reativa é proposta nova modelagem, aplicável tanto no problema de fluxo de potência, utilizando o método de Newton-Raphson, quanto no cálculo dos índices de segurança de tensão. Este modelo, mais robusto e flexível, inclui o controle de tensão local da barra no problema geral de fluxo de potência, formando um sistema de equações de ordem  $(2 \cdot n^{\circ} \text{ de barras} + n^{\circ} \text{ de barras controladas localmente})$ . Para o tratamento de múltiplas barras *swing*, é proposto um novo modelo, de novo para representar mais adequadamente as condições operativas. É aplicável tanto no problema básico de fluxo de potência, como no cálculo dos índices de segurança de tensão. O modelo proposto considera que apenas o ângulo de uma barra *swing* é especificado, com os ângulos das demais barras *swing* livres para variar.

Testes numéricos com sistemas-teste (5 e 6 barras) comprovam a aplicabilidade e adequação dos modelos propostos comparando-os aos modelos usados atualmente.

### Palavras - chave

Segurança de tensão, estabilidade de tensão, controle de tensão local, controle de tensão remoto, múltiplas barras *swing*

## Abstract

Castro, Marcel René Vasconcelos. **Modeling of Voltage Control and Multiple *Swing* Buses in Voltage Stability Assessment**. Rio de Janeiro, 2007. 124p. Master Dissertation – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The crescent increase of the complexity of the electric power systems generates the need of development of tools to improve the analysis conditions.

The objective of this work is to improve the computational tool of voltage security (stability) conditions assessment. As regards to the buses associated to remote voltage control by reactive power generation, new models that represent more appropriately the operative conditions at the moment of the calculations of the voltage security indexes, are proposed. As regards to the bus associated to local voltage control by reactive power generation, it is proposed a new modeling, applicable as much in the power flow problem, using the Newton-Raphson method, as in the calculation of the voltage security indexes. This model, more robust and flexible, includes the local voltage control of the bus in the general power flow problem, constituting an equations system of order ( $2 \times$  number of system buses + number of buses with local voltage control). As regard to the multiples *swing* buses, it is proposed a new model, again to represents more appropriately the operative conditions. It is applicable as much in the basic power flow problem, as in the calculation of the voltage security indexes. The proposed model considers that just one *swing* bus has your voltage angle specified and the others *swing* buses of the power system have your voltage angles free to vary.

Numerical tests with test-systems (5 and 6 buses) prove the applicability and adequacy of the proposed models comparing them to the models used nowadays.

## Key - Words

Voltage security, voltage stability, local voltage control, remote voltage control, multiples *swing* buses

# Sumário

1	Introdução.....	15
1.1	– Considerações Gerais.....	15
1.2	– Objetivos .....	17
1.3	– Estrutura do Trabalho.....	17
2	Estabilidade de Tensão .....	19
2.1	– Introdução .....	19
2.2	– O Limite de Estabilidade de Tensão (LET).....	19
2.2.1	– Curvas P, Q e $\phi$ Constantes .....	23
2.3	– Máxima Potência Transmitida .....	25
2.4	– Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão.....	28
2.4.1	– Magnitude do Determinante da Matriz [D'].....	30
2.4.1.1	– Sistema de Duas Barras.....	30
2.4.1.2	– Sistema Multi-Nó .....	32
2.4.2	– Sinal do Determinante da Matriz [D'] .....	34
2.4.3	– Margem de Potência.....	37
2.5	– Sumário do Capítulo.....	38
3	Modelagem de Barras Associadas ao Controle de Tensão por Geração de Potência Reativa.....	39
3.1	– Introdução .....	39
3.2	– Sistema - Teste de 5 Barras.....	39
3.2.1	– Análise da barra 5 (tipo PQ).....	41
3.2.2	– Análise da Barra 3 (tipo PQ) .....	44
3.2.3	– Análise da Barra 4 (tipo PQV).....	46
3.2.3.1	– Modelagem Utilizada pelo Programa EstabTen.....	48
3.2.3.2	– Modelagem Proposta .....	52
3.2.3.3	– Comparação entre os Modelos .....	53
3.2.4	– Análise da Barra 2 (tipo P).....	58
3.2.5	– Análise da Barra 1 (Barra <i>Swing</i> ).....	63

3.3 – Sumário do Capítulo.....	65
4 Modelo Proposto para Análise de Barras de Controle Local de Tensão	67
4.1 – Introdução .....	67
4.2 – Tratamento de Barras PV e PQV .....	67
4.3 – Controle de Tensão em Barras Remotas usando a Potência Reativa Gerada como Variável de Estado [Passos Filho, 2000]..	70
4.4 – Implementação Computacional do Fluxo de Potência .....	72
4.4.1 – Montagem da Matriz Jacobiana .....	72
4.4.1.1 – Exemplo Ilustrativo .....	74
4.4.2 – Modelo Proposto.....	77
4.5 – Aplicação da Modelagem Proposta.....	79
4.6 – Análise de Estabilidade de Tensão com a Modelagem Proposta	86
4.6.1 – Barra 1 ( <i>Swing</i> ) .....	87
4.6.2 – Barra 2 (tipo P).....	90
4.6.3 – Barra 4 (tipo PQV) .....	93
4.6.4 – Barra 3 (tipo PQ).....	95
4.6.5 – Barra 5 (tipo PQ).....	98
4.6.6 – Comentário Adicional sobre o Modelo Proposto.....	100
4.7 – Sumário do Capítulo.....	102
5 Modelo Proposto Para o Tratamento de Múltiplas Barras <i>Swing</i> .....	103
5.1 – Introdução .....	103
5.2 – Tratamento de Barras <i>Swing</i> .....	103
5.3 – Múltiplas Barras <i>Swing</i> – Tratamento Clássico .....	104
5.3.1 – Exemplo Ilustrativo.....	104
5.4 – Múltiplas Barras <i>Swing</i> – Modelo Proposto .....	106
5.5 – Aplicação do Modelo Proposto.....	110
5.6 – Análise da Estabilidade de Tensão com o Modelo Proposto ....	114
5.7 – Sumário do Capítulo.....	118
6 Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	120
6.1 – Considerações Gerais.....	120
6.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros .....	122

7 Referências Bibliográfias.....123

## Lista de Figuras

Figura 2.1– Circuito de Duas Barras para Deduzir o Limite de Estabilidade de Tensão.....	20
Figura 2.2 – Circuito de Duas Barras para Deduzir as Equações da Potência Injetada na Barra Terminal .....	23
Figura 2.3 – Curvas P e Q Constantes no Plano Defasagem Angular $\theta_1$ Versus Tensão $V_1$ na Barra Terminal .....	26
Figura 2.4 – Curva PV Referente ao Sistema de duas Barras .....	28
Figura 2.5 – Localização do Vetor Gradiente de $P_i$ e $Q_i$ no Plano $V\theta$ .....	36
Figura 2.6 – Sinal da Margem de Potência na Curva SV .....	38
Figura 3.1 – Diagrama Unifilar do Sistema-Teste de 5 Barras .....	40
Figura 3.2 – Curvas SV do Sistema-Exemplo, onde $V_{0A} < V_{0B} < V_{0C} < V_{0D} < V_{0E} < V_{0F} < V_{0G}$ .....	48
Figura 3.3 – Curvas SV da Barra 4, considerando o Modelo do Programa EstabTen .....	56
Figura 3.4 – Curvas SV da Barra 4, considerando o Modelo Proposto .....	57
Figura 4.1 – Diagrama Unifilar do Sistema-Exemplo de 3 Barras e 2 Ramos .....	74
Figura 4.2 – Estrutura da Matriz Jacobiana Completa do Sistema-Exemplo	75
Figura 4.3 – Aplicação das Etapas 2 e 3 do Método da Seção 4.4.1 na Matriz Jacobiana.....	76
Figura 4.4 – Resolução do Sistema-Exemplo pelo Método da Seção 4.4.1	76
Figura 4.5 – Diagrama Unifilar do Sistema-Teste de 5 Barras .....	79
Figura 4.6 – Diagrama Unifilar do Sistema-Teste com os Circuitos Fictícios em Destaque .....	82
Figura 4.7 – Características de Convergência do Sistema-Teste com Carga Leve .....	84
Figura 4.8 – Características de Convergência do Sistema-Teste com Carga Média .....	85
Figura 4.9 – Características de Convergência do Sistema-Teste com Carga Pesada .....	86
Figura 5.1 – Diagrama Unifilar do Sistema-Exemplo de 3 Barras. ....	105

Figura 5.2 – Diagrama Unifilar do Sistema-Teste de 6 Barras .....111

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Dados de Barras do Sistema-Teste de 5 Barras .....	40
Tabela 3.2 – Dados de Linhas do Sistema-Teste de 5 Barras .....	40
Tabela 3.3 – Comparação dos Resultados do Programa EstabTen e do Programa em MATLAB para a Barra 5 .....	43
Tabela 3.4 – Comparação dos Resultados do Programa EstabTen e do Programa em MATLAB para a Barra 3 .....	45
Tabela 3.5 – Relatório de Saída do Programa EstabTen para o Caso 1 ..	50
Tabela 3.6 – Relatório de Saída do Programa EstabTen para o Caso 2 ..	51
Tabela 3.7 – Comparação dos Resultados do Programa EstabTen e do Programa em MATLAB para a Barra 4 .....	54
Tabela 3.8 – Comparação dos Resultados do Programa EstabTen e dos Programas em MATLAB dos Modelos 1 e 2 .....	60
Tabela 3.9 – Tensão e Potência Reativa da Barra 2 para Diferentes Valores de Tensão na Barra 4 .....	62
Tabela 3.10 – Comparação dos Resultados do Programa EstabTen e do Programa em MATLAB para a Barra 1 .....	64
Tabela 4.1 – Dados de Barras do Sistema-Teste de 5 Barras .....	80
Tabela 4.2 – Dados de Linhas do Sistema-Teste de 5 Barras .....	80
Tabela 4.3 – Resultados dos Programas de Fluxo de Carga do ANAREDE e do Modelo Proposto .....	83
Tabela 4.4 – Resultado das Iterações dos Programas de Fluxo de Potência do ANAREDE e do Modelo Proposto para o Sistema-Teste com Carga Leve .....	84
Tabela 4.5 – Resultado das Iterações dos Programas de Fluxo de Potência do ANAREDE e do Modelo Proposto para o Sistema-Teste com Carga Média .....	85
Tabela 4.6 – Resultado das Iterações dos Programas de Fluxo de Potência do ANAREDE e do Modelo Proposto para o Sistema-Teste com Carga Pesada .....	86
Tabela 4.7 – Resultados Obtidos pelo Programa em MATLAB para a Análise da Barra 1 .....	89

Tabela 4.8 – Resultados Obtidos pelo Programa em MATLAB para a Análise da Barra 2 .....	92
Tabela 4.9 – Resultados Obtidos pelo Programa em MATLAB para a Análise da Barra 4 .....	94
Tabela 4.10 – Resultados Obtidos pelo Programa em MATLAB para a Análise da Barra 3 .....	97
Tabela 4.11 – Resultados Obtidos pelo Programa em MATLAB para a Análise da Barra 5 .....	99
Tabela 5.1 – Dados de Barras do Sistema-Teste de 6 Barras Considerando o Modelo Proposto .....	111
Tabela 5.2 – Dados de Linhas do Sistema-Teste de 6 Barras .....	111
Tabela 5.3 – Resultados do Fluxo de Potência dos Modelos Proposto e Clássico .....	113
Tabela 5.4 – Comparação dos Índices de Segurança de Tensão da Barra 5 entre os Modelos Proposto e Clássico, Utilizando os Pontos de Operação do Modelo Proposto .....	116
Tabela 5.5 – Comparação dos Índices de Segurança de Tensão da Barra 5 entre os Modelos Proposto e Clássico, Utilizando os Pontos de Operação do Modelo Clássico .....	117