



**Luís Fernando Ferreira**

**Simulação Estática e Dinâmica do  
Controle de Tensão por Geradores**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro

Julho de 2006



**Luís Fernando Ferreira**

## **Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por Geradores**

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

**Prof. Ricardo Bernardo Prada**  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Júlio César Rezende Ferraz**  
CEPEL

**Prof. Carlos Henrique Costa Guimarães**  
UFF

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 13 de julho de 2006

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

## **Luís Fernando Ferreira**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de São João Del Rei em 2003. Atualmente é consultor na área de energia da ICF International.

### Ficha catalográfica

Ferreira, Luís Fernando

Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por Geradores/ Luís Fernando Ferreira; Orientador: Ricardo Bernardo Prada. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

126 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Segurança de tensão. 3. Estabilidade de tensão. 4. Colapso de tensão. 5. Geradores. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha querida mãe, Efigênia Ferreira  
pelo amor, apoio, dedicação e confiança

## Agradecimentos

A Deus.

A minha mãe Efigênia Ferreira, por seus bons conselhos, infinito amor, apoio econômico e por estar sempre a meu lado, sem ela seria impossível terminar o mestrado.

A meu pai Nelson Ferreira, por me cuidar e me guiar nesta vida, a minha avó Holanda, a minha tia Elizabeth e ao meu avô Geraldo que mesmo sem sua presença física, já me basta às recordações.

Muito especialmente, agradeço ao meu orientador Ricardo Bernardo Prada pelo permanente apoio nas diferentes etapas do desenvolvimento nesta dissertação, por sua atenção e paciência na discussão dos diferentes aspectos relacionados ao tema de pesquisa.

Agradeço também a Luis Cláudio Ferreira (ONS), João Passos Filho e Ricardo Henriques (CEPEL) pelas inestimáveis colaborações para o desenvolvimento da tese.

Ao CNPQ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À Bianca pelo amor e amizade. A todos os amigos da ICF e do curso de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica, muito especialmente ao amigo Carlos Portugal.

## Resumo

Ferreira, Luís Fernando; Prada, Ricardo Bernardo (Orientador). **Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por Geradores**. Rio de Janeiro, 2006. 126p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O problema tratado nesta dissertação é a relação oposta entre a tensão de excitação de geradores e compensadores síncronos e a tensão controlada, quando o sistema de transmissão da área encontra-se muito carregado. Neste caso, a capacidade nominal de um gerador / compensador não seria útil para manter a tensão controlada. Devido à relação oposta, uma maior excitação da máquina iria abaixar a tensão controlada. O controle automático iria continuar agindo, abaixando ainda mais a tensão. Este mecanismo pode levar o sistema ao colapso e foi verificado em ponto de operação real do sistema brasileiro. Esse fenômeno ocorre quando a injeção de potência na rede de transmissão ou distribuição é elevada. Com o advento da geração distribuída, co-geração e produtores independentes, usualmente conectados à rede existente em níveis de tensão mais baixas, têm-se observado ocorrências do fenômeno. O objetivo do trabalho é então entender melhor as situações operativas reais que levam à ocorrência do fenômeno, principalmente quando existem vários equipamentos de controle de tensão ao redor do gerador em análise. A abordagem do problema baseou-se na verificação do comportamento do gerador / compensador como dispositivo de controle de tensão, no domínio do tempo e em regime permanente. Avaliaram-se as ações de controle do mesmo a partir de sete tipos de análise distintas para pontos de operação na região normal e anormal da curva SV. A real existência do fenômeno foi comprovada através de algumas destas análises. Porém, conclui-se que nem todas as formas de análise no domínio do tempo fazem uma avaliação completa do fenômeno. Dentre essas, estão a análise dinâmica agregada e a análise dinâmica agregada sob influência dos equipamentos de controle de tensão, que para pontos de operação na região anormal da curva SV não responderam em concordância com os outros tipos de análise.

## Palavras-chave

Estabilidade de tensão, controle de tensão, segurança de tensão, simulação no domínio do tempo e simulação em regime permanente.

## Abstract

Ferreira, Luís Fernando; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Static and Dynamic Simulation for Generator Voltage Control**. Rio de Janeiro, 2006. 126p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The problem addressed in this research is the opposite relationship between the , synchronous generator / compensator excitation voltage and the controlled voltage when nearby network is heavily loaded. In this situation, the nominal capacity of a generator / compensator would not keep the voltage controlled. Due to the opposite relationship, the higher the excitation voltage the lower is the controlled voltage. So, the automatic control would continue acting lowering the voltage. This mechanism, verified in a real operational point of the Brazilian Electric System, can lead the system to collapse. This phenomenon occurs when the power injection into the network is high. It is prone to occur in the new scenario of distributed generation connected to already existing low voltage networks. The objective of this work is to understand the actual operative situations that lead to the occurrence of the phenomenon, mainly when there are several voltage control devices nearby the generator. The analysis of the problem was based on the verification of the generator behaviour as a voltage control device, in time domain simulation and in steady state. The control actions were evaluated from seven different ways for operating points in the normal and the abnormal region of the SV curve. The actual existence of the phenomenon was proven through some of these analyses. However, some of the time domain simulations did not evaluated the phenomenon completely. Among them, the aggregated dynamic analysis and the aggregated dynamic analysis under influence of other voltage control devices have not got the expected responses for the abnormal region of the SV curve, in comparison with other analysis.

## Keywords

Voltage stability, voltage control, voltage security, time domain simulation, steady state simulation.

# Sumário

1. Introdução	16
1.1. Considerações Gerais	16
1.2. Objetivo	17
1.3. Estrutura da Dissertação	17
2. Estabilidade de Tensão	18
2.1. Introdução	18
2.2. Caracterização do Fenômeno da Estabilidade de Tensão: A Máxima Potência Transmitida	18
2.3. Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão: Efeitos Opostos das Ações de Controle de Tensão	27
2.4. Índices de Avaliação das Condições de Segurança de Tensão	30
2.4.1. Módulo do Determinante da Matriz[D']	31
2.4.1.1. Sistema de Duas Barras	32
2.4.1.2. Sistema Multi-Nó	34
2.4.2. Sinal do Determinante da Matriz [D']	36
2.4.3. Margem de Potência	38
2.5. Conceituação do Fenômeno de Relações Opostas Envolvendo a Tensão	39
2.5.1. Potência Reativa Gerada x Tensão Terminal para o Controle de Tensão	39
2.5.2. Tensão Interna x Tensão Terminal para o Controle de Tensão	41
2.6. Conclusões	44
3. Avaliação da Existência do Fenômeno	45
3.1. Descrição e Importância do Problema	45
3.2. Índices de Estabilidade de Tensão	46
3.3. Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga	48
3.4. Análise da Tensão de Excitação x Tensão Terminal	51
3.5. Análise Dinâmica	54
3.5.1. Análise Dinâmica Agregada	59
3.6. Simulador Numérico para Análise no Domínio do Tempo	63
3.6.1. Introdução	63
3.6.2. Desenvolvimento	63
3.6.3. Resultados	65
3.7. Conclusões	78
4. Análise em Regime Permanente e no Domínio do Tempo de Problemas de Estabilidade de Tensão em Sistemas Reais	81
4.1. Introdução	81
4.2. Índices de Estabilidade de Tensão	81
4.3. Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga	83
4.4. Análise da Tensão de Excitação x Tensão Terminal	85
4.5. Análise Dinâmica	86
4.5.1. Análise Dinâmica Agregada	92
4.5.2. Análise Dinâmica Agregada sob Influência dos Equipamentos de Controle de Tensão	96
4.5.3. Comportamento dos Equipamentos de Controle de Tensão	99



4.5.3.1. Funcionamento dos LTCs	99
4.5.3.2. Funcionamento do Compensador Síncrono	104
4.5.3.3. Funcionamento do Compensador Estático	106
4.6. Conclusões	107
5. Conclusões	110
6. Referências Bibliográficas	113
Apêndice A – Metodologia Utilizada para a Construção da Ferramenta de Simulação Dinâmica	115

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Ponto de Operação na Região Normal da Curva SV	47
Tabela 3.2 - Ponto de Operação na Região Anormal da Curva SV	47
Tabela 3.3 - Índices de Estabilidade de Tensão na Região Normal da Curva SV	48
Tabela 3.4 - Índices de Estabilidade de Tensão na Região Anormal da Curva SV	48
Tabela 3.5 - Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga na Região Normal de Operação	49
Tabela 3.6 - Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga na Região Anormal de Operação	49
Tabela 3.7 - Tensão de Excitação e Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Normal de Operação	52
Tabela 3.8 - Tensão de Excitação e Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Anormal de Operação	52
Tabela 3.9 - Análise Conclusiva dos Testes Realizados	78
Tabela 3.10- Análise Comparativa dos Testes	80
Tabela 4.1 - Relatório do EstabTen para a Região Normal da Curva SV	82
Tabela 4.2 - Relatório do EstabTen para a Região Normal da Curva SV	82
Tabela 4.3 - Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga na Região Normal de Operação	83
Tabela 4.4 - Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga na Região Anormal de Operação	83
Tabela 4.5 - Tensão de Excitação e Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Normal de Operação	87
Tabela 4.6 - Tensão de Excitação e Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Anormal de Operação	87
Tabela 4.7 - Análise Conclusiva dos Testes Realizados	108

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Sistema-Teste de Duas Barras	18
Figura 2.2 - Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Todos os Níveis de Potência Ativa Constante e para Alguns Níveis de Potência Reativa Constante	24
Figura 2.3 - Gráfico QV com o Lugar Geométrico da Tensão na Carga para P Constante, para Q constante, para $\phi$ constante	25
Figura 2.4 - Curva PV Referente ao Sistema de Duas Barras da Figura 2.1	27
Figura 2.1 - Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra de Carga	28
Figura 2.6 - Curvas PV Antes e Depois da Instalação do Capacitor na Barra de Carga	30
Figura 2.7 - Localização dos Vetores Gradiente de $P_i$ e $Q_i$ no Plano $V\theta$	37
Figura 2.8 - Sinal da Margem na Curva SV	39
Figura 2.9 - Sistema de 3 Barras	41
Figura 3.1 - Sistema de 2 Barras	46
Figura 3.2 - Tensão Terminal x Fluxo de Potência Reativa na Região Normal de Operação	50
Figura 3.3 - Tensão Terminal x Fluxo de Potência Reativa na Região Anormal de Operação	51
Figura 3.4 - Tensão Interna x Tensão Terminal a partir de Um Ponto na Região Normal de Operação	53
Figura 3.5 - Tensão Interna x Tensão Terminal a partir de Um Ponto na Região Anormal de Operação	54
Figura 3.6 - Variação da Tensão na Barra Interna no Tempo	56
Figura 3.7 - Variação da Tensão Terminal do Gerador no Tempo	57
Figura 3.8 - Variação do Fluxo de Potência Reativa que Chega na Barra Terminal no Tempo	57
Figura 3.9 - Variação da Tensão Interna no Tempo	58
Figura 3.10 - Tensão Terminal	58
Figura 3.11 - Variação do Fluxo de Potência Reativa que Chega na Barra Terminal no Tempo	59
Figura 3.12 - Tensão de Excitação	60
Figura 3.13 - Tensão Terminal	60
Figura 3.14 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	61
Figura 3.15 - Tensão de Excitação da Máquina	61
Figura 3.16 - Tensão Terminal	62
Figura 3.17 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	62
Figura 3.18 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	66
Figura 3.19 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	66
Figura 3.20 - Tensão Terminal	67
Figura 3.21 - Tensão Terminal	67
Figura 3.22 - Tensão de Excitação da Máquina	67
Figura 3.23 - Tensão de Excitação da Máquina	68
Figura 3.24 - Tensão de Excitação da Máquina	69
Figura 3.25 - Tensão de Excitação da Máquina	69

Figura 3.26 - Tensão Terminal	70
Figura 3.27 - Tensão Terminal	70
Figura 3.28 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	71
Figura 3.29 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	71
Figura 3.30 - Tensão de Excitação da Máquina	72
Figura 3.31 - Tensão de Excitação da Máquina	72
Figura 3.32 - Tensão Terminal	73
Figura 3.33 - Tensão Terminal	73
Figura 3.34 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	74
Figura 3.35 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	74
Figura 3.36 - Tensão de Excitação da Máquina	75
Figura 3.37 - Tensão de Excitação da Máquina	75
Figura 3.38 - Tensão Terminal	76
Figura 3.39 - Tensão Terminal	76
Figura 3.40 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	77
Figura 3.41 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	77
Figura 4.1 - Tensão Terminal x Fluxo de Potência Reativa na Região Normal de Operação	84
Figura 4.2 - Tensão Terminal x Fluxo de Potência Reativa na Região Anormal de Operação	85
Figura 4.3 - Diagrama Unifilar sem a Representação da Barra Interna 3978	86
Figura 4.4 - Diagrama Unifilar com a Representação da Barra Interna 3978	86
Figura 4.5 - Tensão Interna x Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Normal de Operação	88
Figura 4.6 - Tensão Interna x Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Anormal de Operação	88
Figura 4.7 - Tensão de Excitação da Máquina	90
Figura 4.8 - Tensão Terminal	90
Figura 4.9 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	90
Figura 4.10 - Tensão de Excitação da Máquina	91
Figura 4.11 - Tensão Terminal	91
Figura 4.12 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	92
Figura 4.13 - Tensão de Excitação da Máquina	93
Figura 4.14 - Tensão Terminal	93
Figura 4.15 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	94
Figura 4.16 - Tensão de Excitação da Máquina	94
Figura 4.17 - Tensão Terminal	95
Figura 4.18 - Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal	95
Figura 4.19 - Região de Análise	96
Figura 4.20 - Tensão de Excitação da Máquina	98
Figura 4.21 - Tensão na Barra Terminal 3977	98
Figura 4.22 - Fluxo de Potência Reativa na Barra Terminal 3977	99
Figura 4.23 - Tensão na Barra 175 de Campos	100
Figura 4.24 - Variação do Tap na Barra 175 de Campos	100
Figura 4.25 - Variação da Tensão na Barra 177 de Vitória	101
Figura 4.26 - Variação do Tap na Barra 177 de Vitória	101
Figura 4.27 - Tensão na Barra 3966 de Macaé Merchant	102
Figura 4.28 - Tensão na Barra 140 de Adrianópolis	102
Figura 4.29 - Tensão na Barra 147 de Campos	103
Figura 4.30 - Tensão na Barra 149 de Vitória	103
Figura 4.31 - Tensão na Barra 45 de Vitória	105

Figura 4.32 - Tensão de Excitação da Máquina	105
Figura 4.33 - Potência Reativa na Barra 45 de Vitória	105
Figura 4.34 - Tensão na Barra 46 de Campos	106
Figura 4.35 - Potência Reativa na Barra 46 de Campos	107

## Abreviaturas e Siglas

$H$	Constante de inércia
$D$	Constante de amortecimento
$P_e$	Potência elétrica ativa gerada
$P_m$	Potência mecânica da turbina
$\omega$	Velocidade angular da máquina
$\omega_s$	Velocidade angular síncrona da máquina
$\delta$	Ângulo absoluto do eixo q da máquina
$T_e$	Torque elétrico
$T_M$	Torque mecânico
$S_{AT}$	Saturação da máquina
$T_{q0}''$	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto
$T'_{d0}$	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto
$T''_{d0}$	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto
$L_q$	Indutância síncrona de eixo em quadratura
$L_q''$	Indutância subtransitória de eixo quadratura
$L_d$	Indutância síncrona de eixo direto
$L_d'$	Indutância transitória de eixo direto
$L_d''$	Indutância subtransitória de eixo direto
$L_L$	Indutância de dispersão da armadura
$E_d'$	Tensão transitória da máquina projetada no eixo d
$E_d''$	Tensão subtransitória da máquina projetada no eixo d
$E_q$	Tensão proporcional à corrente de campo da máquina
$E_q'$	Tensão transitória da máquina projetada no eixo q
$E_q''$	Tensão subtransitória da máquina projetada no eixo q
$E_{Fd}$	Tensão de campo da máquina
$I_q$	Corrente da armadura da máquina projetada no eixo q
$I_d$	Corrente de armadura da máquina projetada no eixo d
$I_{Fd}$	Corrente de campo da máquina
$V_{TR}$	Tensão controlada

$V_{SAD}$	Sinal estabilizador aplicado no regulador de tensão
$V_{Ref}$	Sinal de referência
$T_m$	Constante de tempo do transdutor de tensão
$K_a$	Ganho do regulador de tensão
$T_1$	Constante de tempo de avanço do compensador de fase do regulador de tensão
$T_2$	Constante de tempo de atraso do compensador de fase do regulador de tensão
$T_3$	Constante de tempo de avanço do compensador de fase do regulador de tensão
$T_4$	Constante de tempo de atraso do compensador de fase do regulador de tensão
$L_{MIN}$	Limite inferior da tensão de saída do regulador de tensão
$L_{MAX}$	Limite superior da tensão de saída do regulador de tensão
$R_L$	Resistência da linha
$X_L$	Reatância da linha
$LET$	Limite de estabilidade de tensão
$Z_t$	Impedância da linha de transmissão
$\alpha_t$	Ângulo da impedância da linha de transmissão
$Z_c$	Impedância de carga
$P_G$	Potência Ativa Gerada MW
$Q_G$	Potência Reativa Gerada Mvar
$\theta_i$	Ângulo da Tensão na Barra i
$V_i$	Módulo da Tensão na Barra i