



**Fábio Bicalho de Araújo**

**Impacto da Geração Distribuída nas Condições de  
Estabilidade de Tensão**

**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  
Dezembro de 2010



**Fábio Bicalho de Araujo**

**Impacto da Geração Distribuída nas  
Condições de Estabilidade de Tensão**

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. Walmir de Freitas Filho**  
Universidade Estadual de Campinas

**Prof. Jorgeson Oliveira Rodrigues dos Santos**  
Universidade Federal de São João Del Rei

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de dezembro de 2010

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

## Fábio Bicalho de Araújo

Ex-aluno do Colégio Pedro II e técnico em Telecomunicações pelo CEFET/RJ graduou-se em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio. Durante a graduação foi membro do Conselho de Ensino e Pesquisa da PUC-Rio, bolsista de iniciação científica pelo CNPq, monitor de cálculo I, além de outras atividades acadêmicas. Atualmente, dedica-se a atividades voltadas para o mercado de engenharia elétrica e ao setor elétrico.

### Ficha Catalográfica

Araújo, Fábio Bicalho de

Impacto da geração distribuída nas condições de estabilidade de tensão / Fábio Bicalho de Araújo ; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2010.

147 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Segurança de tensão. 3. Estabilidade de tensão. 4. Controle de tensão. 5. Colapso de tensão. 6. Barras de tensão controlada. 7. Geração distribuída. 8. Compensador síncrono. 9. Fluxo de potência. 10. Sistemas de distribuição. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Dedico este trabalho à minha mãe, Nádia Santoro Bicalho. Em especial, dedico aos meus avôs maternos Ciro e Magda Bicalho e paternos, Mario e Ruth Barros de Araujo. Obrigado por tudo! Sem vocês não seria possível este sonho se realizar.

## Agradecimentos

Sou eternamente grato à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pela maneira como fui acolhido ao iniciar o curso de graduação e posteriormente na pós-graduação. Sua política de bolsas de estudo para alunos carentes foi essencial para a minha formação como engenheiro. Não tenho palavras para descrever o orgulho que sinto por ter estudado e ter feito parte desta universidade. Sua contribuição para o ensino, pesquisa e para sociedade como um todo, é inestimável.

Gostaria de agradecer pela orientação e paciência despendidas pelo professor Ricardo B. Prada. Sua ajuda foi essencial para a consolidação dos meus conhecimentos de engenharia, sistematização e domínio do tema escolhido. Sou-lhe eternamente grato pela oportunidade de desenvolver esta dissertação e pelas perspectivas que se abrem após a conclusão deste trabalho.

Um espaço muito especial deve ser reservado à minha família. Instituição pela qual devo todos os agradecimentos possíveis que possam existir neste mundo. Todos foram, são, e continuarão sendo muito importantes nesta jornada e na minha vida.

Finalmente, agradeço aos meus amigos e a todas as outras pessoas que contribuíram de alguma forma para o êxito deste trabalho: principalmente aos amigos, funcionários e pesquisadores do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica da PUC-Rio e de todo o Campus.

Agradeço ao CEPEL pelo uso do programa ANAREDE, à CAPES e à FAPERJ pelas bolsas de estudo.

Neste exato momento em que escrevo, lembrando de todas as dificuldades, alegrias, medos, e felicidades que tive nestes oito anos de graduação e pós-graduação, me sinto emocionado. Valeu o esforço. Muito obrigado!

## Resumo

Araújo, Fábio Bicalho de; Prada, Ricardo Bernardo (Orientador). **Impacto da Geração Distribuída nas Condições de Estabilidade de Tensão**. Rio de Janeiro, 2010. 147p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Após a incidência de inúmeros colapsos de tensão em sistemas elétricos de potência por todo o mundo, a segurança de tensão tornou-se um assunto de extrema importância. O fenômeno de estabilidade de tensão deve-se à operação do sistema com carregamento elevado e se manifesta pela existência de uma máxima transferência de potência pela rede e ações de controle de tensão tendo efeito oposto ao usual. Com o aumento da inserção de geração distribuída, usualmente conectada à rede de distribuição existente e em tensões mais baixas, a possibilidade de ocorrência do fenômeno precisa ser investigada. É demonstrada a possibilidade de ocorrência em barras com geradores ou compensadores síncronos, onde a máxima potência gerada poderia estar limitada e o controle de tensão poderia ter o efeito oposto ao esperado. É apresentado o ferramental utilizado na avaliação das condições de estabilidade de tensão composto de índices com significado físico e matemático. Estabeleceu-se um procedimento para realizar simulações nos sistemas-teste IEEE 34 Barras e 70 Barras. É analisado o impacto do gerador nas condições de estabilidade de tensão, no perfil de tensão em regime permanente e nas perdas de potência ativa. Concluiu-se que, nos testes realizados, a injeção de potência ativa pelo gerador foi limitada por tensões fora da faixa permitida e não por problemas de estabilidade de tensão.

## Palavras chave

Segurança de tensão, estabilidade de tensão, controle de tensão, colapso de tensão, barras de tensão controlada, geração distribuída, compensador síncrono, fluxo de potência, sistemas de distribuição.

## Abstract

Araújo, Fábio Bicalho de; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Distributed Generation Impact on Voltage Stability Conditions**. Rio de Janeiro, 2010. 147p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

After several incidence of voltage collapse in electric power systems around the world, the voltage security has become a matter of utmost importance. The phenomenon of voltage stability is due to the operation of the system with high loading and is manifested by the existence of a maximum power transfer over the network and efforts to control voltage having the opposite effect than usual. With increased integration of distributed generation, usually connected to the existing distribution network at lower voltages, the possibility of occurrence of the phenomenon should be investigated. It is demonstrated the possibility of occurrence in buses of synchronous generators or synchronous condensers, where the maximum generated power could be limited and the voltage control could have the opposite effect. It presented the tools used in assessing the conditions of voltage stability composite indexes with physical and mathematical meaning. It was established a procedure for performing simulations on IEEE 34 bus and 70 bus test systems. It analyzed the impact of the generator under the conditions of voltage stability, voltage profile in the steady state and the power losses. It was concluded that, in tests, the injection of active power from the generator was limited by voltage out of range allowed and not by voltage stability problems.

## Keywords

Voltage security, voltage stability, voltage control, voltage collapse, voltage controlled bus, distributed generation, synchronous condenser, power flow, distribution systems.

# Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Considerações Gerais .....	15
1.2. Objetivo.....	16
1.3. Estrutura da Dissertação .....	17
2. INTRODUÇÃO AO FENÔMENO DE ESTABILIDADE DE TENSÃO .....	20
2.1. Introdução.....	20
2.2. Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão.....	21
2.2.1. Análise Gráfica do Fenômeno .....	22
2.2.2. Impedância da Carga no Máximo Carregamento.....	29
2.2.3. Limite de Estabilidade de Tensão - LET.....	31
2.2.4. Capacitor em Paralelo na Barra de Carga.....	34
2.2.5. Exemplo da Saturação da Elevação da Tensão e do Aumento da Capacidade de Transmissão .....	39
2.3. Conclusões .....	41
3. ESTUDO DA BARRA DE GERAÇÃO [1] .....	42
3.1. Introdução.....	42
3.2. Potência Ativa e Reativa Saindo da Barra de Geração.....	42
3.3. Tensão Crítica na Barra de Geração.....	44
3.4. Avaliação das Condições de Estabilidade de Barras de Tensão Controlada .....	47
3.5. Conclusões .....	49
4. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO [7] [8].....	51
4.1. Método de Análise .....	51
4.2. Magnitude do Determinante da Matriz [D'] .....	53
4.2.1. Sistema de Duas Barras [6].....	53
4.2.2. Sistema Multi-Nó .....	55
4.2.3. Sinal do Determinante da Matriz [D'].....	57
4.2.4. Margem de Potência.....	59
4.2.5. Índice de Influência [1].....	60
4.3. Conclusões .....	62
5. CONTROLE DE TENSÃO EM REDES ELÉTRICAS .....	64
5.1. Introdução.....	64
5.2. Motivações para o Controle de Tensão.....	65
5.3. Variação na Tensão pela Conexão de Geradores Eólicos .....	66
5.4. Impactos da Integração de Turbinas Eólicas.....	68
5.5. Topologias de Turbinas Eólicas e Controle de Tensão [11] [12] .....	69
5.5.1. Controle de Potência da Turbina .....	69
5.5.2. Turbina Eólica Com Velocidade Constante e Gerador de Indução .....	70
5.5.3. Turbinas com Velocidade Variável .....	72
5.6. Conclusões .....	76
6. ESTUDO DE CASO - SISTEMA RADIAL DE 3 BARRAS .....	78
6.1. Introdução.....	78
6.2. Conexão de Gerador sem Controle de Tensão.....	78
6.3. Conexão de Gerador com Controle de Tensão.....	82
6.4. Conexão de Compensador Síncrono na Barra de Carga .....	84

6.4.1. Esgotamento da Capacidade de Controle de Tensão.....	88
6.4.2. Ponto de Operação na Parte Inferior da Curva $\phi$ Constante no Plano $SV$ .....	91
6.4.3. Atuação do Sistema de Controle do Compensador Síncrono .....	92
6.5. Conclusões.....	94
7. SIMULAÇÃO A - SISTEMA IEEE 34 BARRAS .....	95
7.1. Introdução.....	95
7.2. Simulação 1S - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 23 sem Controle de Tensão e Carregamento do Sistema Constante.....	98
7.3. Simulação 1C - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 23 com Controle de Tensão e Carregamento do Sistema Constante.....	101
7.4. Simulação 2S - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 23 sem Controle de Tensão e Aumento do Carregamento do Sistema.....	105
7.5. Simulação 2C - Inclusão de um Gerador Distribuído na Barra 23 com Controle de Tensão e Aumento do Carregamento do Sistema.....	108
7.6. Avaliação do Impacto da Escolha da Tensão de Referência para Controle de Tensão .....	113
7.7. Conclusões.....	119
8. SIMULAÇÃO B - SISTEMA-TESTE DE 70 BARRAS.....	122
8.1. Introdução.....	122
8.2. Simulação 1S - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 25 sem Controle de Tensão e Carregamento do Sistema Constante.....	124
8.3. Simulação 1C - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 25 com Controle de Tensão e Carregamento do Sistema Constante.....	128
8.4. Simulação 2S - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 25 sem Controle de Tensão e Aumento do Carregamento do Sistema.....	131
8.5. Simulação 2C - Inclusão de Gerador Distribuído na Barra 25 com Controle de Tensão e Aumento do Carregamento do Sistema.....	134
8.6. Conclusões.....	137
9. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	140
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	143
11. APÊNDICE A.....	145

## Lista de figuras

Figura 2.1 - Circuito de Duas Barras	21
Figura 2.2 - Curvas no $\theta_1^3$ de $P_1$ como Função de $V_1$ e $\theta_1$	23
Figura 2.3 - Curvas de $V_1$ Constante (= 0,9 pu, 1,2 pu, 1,5 pu e 1,8 pu) no Plano $\theta_1 P_1$	24
Figura 2.4 - $P_1$ Constante no Plano $\theta_1 V_1$ e $Q_1$ Constante no Plano $\theta_1 V_1$ para Diferentes Valores de $P_1$ e $Q_1$ em pu [5]	25
Figura 2.5 - Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo Fator de Potência [1]	27
Figura 2.6 - Curva para Fator de Potência Constante na Barra de Carga no Plano PV [1]	28
Figura 2.7 - Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga [6]	29
Figura 2.8 - Limite de Estabilidade de Tensão sobre as Curvas de $\phi$ Constante no Plano PV [1]	34
Figura 2.9 - Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra Terminal	35
Figura 2.10 - Aumento e Diminuição da Tensão Respectivamente na Região Superior e Inferior da Curva com a Introdução de um Capacitor	37
Figura 2.11 - Diminuição da Tensão na Região Inferior da Curva com a Introdução de um Capacitor	37
Figura 2.12 - $\phi$ Constante e $Z_c$ Constante no Plano PV Com e Sem Capacitor	38
Figura 2.13 - Efeito da Introdução de Muitos Capacitores sobre a Tensão	39
Figura 2.14 - Curvas para $\phi$ Constante e para P Constante	40
Figura 3.1 - Potência Ativa e Reativa Saindo da Barra de Geração num Circuito de Duas Barras	43
Figura 3.2 - Gradientes $\nabla P_{GL}$ e $\nabla Q_{GL}$ alinhados no Máximo Carregamento	45
Figura 3.3 - Localização do Ponto de Operação na Parte Superior da Curva SV	49
Figura 3.4 - Localização do Ponto de Operação na Parte Inferior da Curva SV	49

Figura 4.1 - Localização do Vetor Gradiente de $P_i$ e $Q_i$ no Plano $V\Theta$	58
Figura 4.2 - Sinal da Margem na Curva SV	60
Figura 4.3 - Movimento dos Pontos de Operação Correspondendo à Deterioração da Margem	61
Figura 4.4 - Curva SV para Análise do Índice de Influência	62
Figura 5.1 – Sistema de 2 Barras com Geração Distribuída	67
Figura 5.2 - Configuração do Tipo Gerador de Indução com Rotor Gaiola de Esquilo	71
Figura 5.3 - Dependência da potência ativa e reativa da velocidade do rotor representada pelo escorregamento dada uma certa tensão terminal.	72
Figura 5.4 – Gerador de Indução Duplamente Alimentado	74
Figura 5.5 - Faixa de Operação do Gerador de Indução Duplamente Alimentado	74
Figura 5.6 - Curva de Capabilidade do Gerador Síncrono	76
Figura 6.1 - Diagrama Unifilar do Sistema de 3 Barras	79
Figura 6.2 - Curvas para Fator de Potência Constante para Fatores de Participação Diferentes sem Controle de Tensão na Barra 1	80
Figura 6.3 - Comparação entre as Curvas com Controle ( $V_1$ FIX) e sem Controle ( $V_1$ VAR) de Tensão na Barra 1 para Diferentes Fatores de Participação	83
Figura 6.4 - Sistema de 3 Barras com CS na Barra de Carga	85
Figura 6.5 - Curvas para a Barra 1	86
Figura 6.6 - Curva nos Planos $S_2V_2$ e $S_2Q_{g2}$ (Configuração 0-100%)	87
Figura 6.7 - Ponto A – Região Normal, Ponto B – Região Anormal e Ponto C – Fronteira entre as Regiões de Operação	90
Figura 6.8 - Perda do Controle de Tensão na Barra 2	91
Figura 6.9 - Atuação do Compensador Síncrono no Controle de Tensão da Barra 2	93
Figura 7.1 - Diagrama Unifilar do Sistema-Teste IEEE 34 Barras	95
Figura 7.2 - Fatores de Participação e Geração de Potência Ativa dos Geradores na Simulação 1S	98
Figura 7.3 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 1S	99

Figura 7.4 - Perdas de Potência Ativa e Reativa do Sistema na Simulação 1S	100
Figura 7.5 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo $\beta$ por Barra e Caso de Carregamento	101
Figura 7.6 - Fatores de Participação e Geração de Potência Ativa dos Geradores na Simulação 1C	102
Figura 7.7 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 1C	103
Figura 7.8 - Perdas de Potência Ativa do Sistema na Simulação 1C	103
Figura 7.9 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo $\beta$ por Barra e Caso de Carregamento	104
Figura 7.10 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 2S	106
Figura 7.11 - Perdas de Potência Ativa do Sistema na simulação 2S	107
Figura 7.12 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo $\beta$ por Barra e Caso de Carregamento	108
Figura 7.13 - Perfil de tensão do Sistema na Simulação 2C	110
Figura 7.14 - Perdas de Potência Ativa do Sistema na Simulação 2C	111
Figura 7.15 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo $\beta$ por Barra e Caso de Carregamento	113
Figura 7.16 - Perfil de Tensão do Sistema para Diferentes Valores de Tensão Terminal	115
Figura 7.17 - Máxima Carga para Diferentes Valores de Tensão Terminal	116
Figura 7.18 - Geração na Barra 23 para Diferentes Valores de Tensão Terminal	117
Figura 7.19 - Perdas de Potência Ativa para Diferentes Valores de Tensão Terminal	118
Figura 8.1 - Diagrama Unifilar do Sistema-Teste de 70 Barras	122
Figura 8.2 - Distribuição das Cargas pelo Sistema-Teste de 70 Barras	123
Figura 8.3 - Fatores de Participação e Geração de Potência Ativa e Reativa na Simulação 1S	125
Figura 8.4 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 1S	126
Figura 8.5 - Perdas de Potência Ativa do Sistema na Simulação 1S	126

Figura 8.6 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo $\beta$ por Barra e Caso de Carregamento	127
Figura 8.7 - Fatores de Participação e Geração de Potência Ativa na Simulação 1C	128
Figura 8.8 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 1C	129
Figura 8.9 - Perdas de Potência Ativa do Sistema na Simulação 1C	130
Figura 8.10 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo $\beta$ por Barra e Caso de Carregamento	131
Figura 8.11 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 2S	132
Figura 8.12 - Perdas de Potência Ativa do Sistema na Simulação 2S	133
Figura 8.13 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo $\beta$ por Barra e Caso de Carregamento	134
Figura 8.14 - Perfil de Tensão do Sistema na Simulação 2C	135
Figura 8.15 - Perdas de Potência Ativa do Sistema na Simulação 2C	136
Figura 8.16 - (a) Margem de Potência e (b) Ângulo $\beta$ por Barra e Caso de Carregamento	137

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo Fator de Potência	28
Tabela 6.1 - Ponto de Operação do Caso-Base	79
Tabela 6.2 - Ponto de Operação no Máximo Carregamento	80
Tabela 6.3 - Índices de Estabilidade de Tensão das Barras 1 e 2	81
Tabela 6.4 - Ponto de Operação no Máximo Carregamento	82
Tabela 6.5 - Índices de Estabilidade de Tensão para as Barras 1 e 2 (V1 Controlado)	84
Tabela 6.6 - Ponto de Operação do Caso-Base	85
Tabela 6.7 - Pontos de Operação no Máximo Carregamento	86
Tabela 6.8 - Pontos A, B e C e suas Variações	89
Tabela 7.1 - Ponto de Operação do Caso-Base (Sistema-Teste 34 Barras)	97
Tabela 7.2 - Identificação das Simulações com o Sistema-Teste de 34 Barras	97
Tabela 7.3 - Casos de Carregamento da Simulação 2S	105
Tabela 7.4 - Casos de Carregamento da Simulação 2C	109
Tabela 7.5 - Comparação entre as Simulações 2S e 2C	112
Tabela 7.6 - Carga Máxima para Diferentes Valores de Tensão Terminal	116
Tabela 7.7 - Índices de Estabilidade de Tensão para a Barra 23	119
Tabela 8.1 - Ponto de Operação do Caso-Base (Sistema-Teste de 70 Barras)	123
Tabela 8.2 - Identificação das Simulações com o Sistema-Teste de 70 Barras	124
Tabela 8.3 - Síntese dos Resultados das Simulações no Sistema-Teste de 70 Barras	139