



**Jorge Leonidas Lafitte Vega**

**Avaliação e Reforço das Condições de  
Estabilidade de Tensão em Barras de Tensão  
Controlada por Geradores e Compensadores  
Síncronos**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro

Abril de 2009



**Jorge Leonidas Lafitte Vega**

**Avaliação e Reforço das Condições de  
Estabilidade de Tensão em Barras de Tensão  
Controlada por Geradores e Compensadores  
Síncronos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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.

**Dr. Ricardo Bernardo Prada**  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. João Alberto Passos Filho**  
CEPEL

**Dr. Luiz Cláudio de Araújo Ferreira**  
ONS

**Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza**  
UNIFEI

**Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva**  
UNICAMP

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

Rio de Janeiro, 03 de abril de 2009

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

### **Jorge Leonidas Lafitte Vega**

Graduado em Engenharia Mecânica - Elétrica na Universidade Nacional de Engenharia de Lima (UNI, Peru) em 2002. Mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio, Brasil) em 2005. Dedicado a tempo integral à pesquisa em Sistemas de Energia Elétrica na PUC-Rio.

#### Ficha catalográfica

Vega, Jorge Leonidas Lafitte

Avaliação e reforço das condições de estabilidade de tensão em barras de tensão controlada por geradores e compensadores síncronos / Jorge Leonidas Lafitte Vega; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2009.

259 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

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. Gerador síncrono. 8. Compensador síncrono. 9. Adequação do controle de tensão. 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, Regina Vega Reyna  
pelo amor, apoio e confiança.

## Agradecimentos

A Deus.

A minha mãe Regina Mirian Vega Reyna, por seus bons conselhos, infinito amor e por estar sempre a meu lado, sem ela seria impossível terminar o doutorado.

A meu pai Jorge Lafitte Roldán, por me cuidar e me guiar nesta vida, sua presença física não está mais comigo mas sua presença espiritual é suficiente para seguir adiante.

Ao meu bebê Priscila Crystal fruto do meu amor com minha querida esposa Gabriela a quem também dedico esta tese, assim como, a toda minha bela família.

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

Ao CEPEL pela licença de uso dos programas computacionais ANAREDE e FLUPOT.

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

A todos os amigos do curso de Pós - Graduação em Engenharia Elétrica, muito especialmente a Elias Ferroa, Vanessa Campos, Carlos Portugal, José Choque, Gustavo Ortega, Gian Ramalho, Felipe Lamm, Alex Paz, Yuri Molina, Mauricio Villanueva, Lindomar de Souza, Marcelo Araújo, Fernando Machado, Marcel Vasconcelos e Marcelo de Melo.

## Resumo

Vega, Jorge Leonidas Lafitte; Prada, Ricardo Bernardo (Orientador). **Avaliação e Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão em Barras de Tensão Controlada por Geradores e Compensadores Síncronos**. Rio de Janeiro, 2009. 259p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Após a incidência de alguns colapsos de tensão em sistemas de transmissão de energia a nível mundial, a segurança de tensão tornou-se um assunto de muito interesse nos últimos anos devido à importância do seu impacto. O fenômeno de estabilidade de tensão deve-se a fluxos de potência ativa e reativa excessivos na rede de transmissão e está associado às restrições ambientais e econômicas que impedem a expansão da rede. Atualmente, sabe-se da existência de uma máxima carga que pode ser alimentada pela rede e é a manifestação mais conhecida do fenômeno mas, também, é possível que o problema manifeste-se pela existência de uma máxima injeção de potência ativa e reativa na rede por geradores e compensadores síncronos. E mais, em situações de carregamento elevado da rede, é possível que ações de controle de tensão tenham efeito oposto ao usual. É apresentado um método sequencial iterativo de avaliação e reforço para as condições de carregamento da rede em barras de tensão controlada, embora na literatura somente as barras de carga são analisadas. A verificação do comportamento do gerador e compensador síncrono como dispositivo de controle torna-se necessária já que, se funcionar de forma inversa, poderá levar o sistema ao colapso por problemas de tensão. Uma vez que a avaliação do carregamento da rede de transmissão detectou uma barra de geração crítica em um determinado ponto de operação, o reforço consiste do cálculo de ações de controle para aumentar a distância ou margem de potência entre a geração daquela barra e o novo máximo permitido. Muitas vezes isso pode ser conseguido através da alteração do perfil de tensão com a conseqüente redução nas perdas. Muitas outras vezes, o redespacho de potência ativa torna-se necessário. As etapas do método são: identificar a barra crítica, identificar a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa dessa barra para as cargas, nessa sub-rede determinar o caminho e ramo mais carregados e, desviar o fluxo de potência do ramo mais carregado para outros. A seqüência é repetida até que as novas margens de potência sejam consideradas aceitáveis. Exemplos numéricos ilustrativos reais com o sistema brasileiro são apresentados. É verificado que o método proposto realmente produz os resultados desejados.

## Palavras-chave

Segurança de tensão, estabilidade de tensão, controle de tensão, colapso de tensão, barras de tensão controlada, gerador síncrono, compensador síncrono, adequação do controle de tensão.

## Abstract

Vega, Jorge Leonidas Lafitte; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Voltage Stability Assessment and Enhancement in Voltage-Controlled Buses by Synchronous Generators and Compensators**. Rio de Janeiro, 2009. 259p. Doctorate Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

After the incidence of some voltage collapses in the energy transmission systems in the world, the voltage security became an issue of great interest in the last years due to the importance of its impact. The phenomenon of voltage stability is due to the excessive active and reactive power flow in the electrical transmission network and has been associated with environment questions and lack of financial resources for transmission system expansion. Nowadays, it is well-known that there is a maximum power that the network can transmit to a load bus and is the best known manifestation of the phenomenon, but, is not familiar to many that there is a maximum power that can be injected by generators and synchronous compensators into the network. Moreover, in heavy loading conditions is possible that voltage control actions would have the inverse effect. It is shown a sequential iterative method for assessment and voltage security reinforcement in voltage-controlled buses, although the literature only the load buses are analyzed. The verification of the behaviour of the generator and synchronous compensator as control device becomes necessary since, if it works in an inverse way, it can take the system to the voltage collapse. Once the assessment is performed and is detected one generation critical bus in some operating point, the objective of the reinforcement function is to calculate adequate control actions in order to increase the distance or power margin between the actual generation and the new maximum power flow. Several times this may be achieved by voltage profile changes and consequent loss reduction. Sometimes that procedure is not enough and active generation rescheduling is recommended. The stages of the method are: identify the critical bus, identify the sub-network used to transmit active power flow from this bus to load buses, in this sub-network the critical transmission path and critical branch are determined and redirect the power flow from the branch more loaded to others. The sequence is repeated until resultant power margins are judged suitable. Illustrative real life numerical examples with the Brazilian system are provided. It is verified that the proposed method really produces the desired results.

## Keywords

Voltage security, voltage stability, voltage control, voltage collapse, voltage-controlled buses, synchronous generator, synchronous compensator, voltage control sensitivity.

# Sumário

1	Introdução.....	21
1.1	Considerações Gerais .....	21
1.2	Trabalhos Anteriores.....	23
1.3	Objetivos deste Trabalho.....	24
1.4	Importância do Tema.....	25
1.5	Revisão Bibliográfica .....	28
1.6	Comparação do Método Proposto .....	47
1.7	Estrutura do Trabalho .....	50
2	Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão.....	53
2.1	Introdução.....	53
2.2	Equações de Fluxo de Potência Ativa e Reativa Injetada na Barra de Carga.....	53
2.3	Curvas P, Q e $\phi$ Constantes .....	55
2.4	O Limite de Estabilidade de Tensão (LET).....	57
2.5	A Existência da Potência Transmitida "Maximum Maximorum" .....	62
2.6	O Porquê da Potência Transmitida Máxima para a Carga .....	66
2.7	O Porquê da Introdução de um Capacitor pode Diminuir a Tensão .....	70
3	Estudo da Barra de Geração .....	74
3.1	Introdução.....	74
3.2	Potência Ativa e Reativa Saindo da Barra de Geração .....	74
3.3	Tensão Crítica na Barra de Geração.....	76
3.3.1	Análise das Soluções de Ângulo na Barra Terminal de Geração .....	79
3.3.1.1	Primeiro Caso.....	79
3.3.1.2	Segundo Caso.....	81
3.4	Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão em Barras de Tensão Controlada.....	85
3.5	Simultaneidade da Máxima Geração e da Máxima Carga .....	87
4	Índices de Avaliação das Condições de Segurança de Tensão.....	92
4.1	Introdução.....	92
4.2	A Ferramenta Analítica .....	92
4.2.1	Magnitude do Determinante da Matriz [D'].....	94
4.2.1.1	Sistema Duas Barras .....	94
4.2.1.2	Sistema Multi-Nó .....	95
4.2.2	Sinal do Determinante da Matriz [D'].....	97
4.2.3	Margem de Potência .....	99
4.2.4	Índice de Influência .....	101
4.3	O Papel do Gerador <i>Swing</i> .....	103
4.3.1	Localização e Importância.....	103
4.3.2	A Similaridade com Barras PV .....	104
4.4	Ordenação de Barras Críticas .....	104
5	Efeito Contrário de Ações de Controle de Tensão .....	108
5.1	Introdução.....	108
5.2	O Porquê da Relação Oposta entre a Tensão de Excitação e a Tensão Terminal .....	109
5.2.1	Exemplo Numérico .....	110



5.3	Índice: Tensão Interna x Terminal .....	113
5.3.1	Exemplo Numérico .....	114
6	Cálculo de Ações de Controle para Reforço das Condições de Segurança de Tensão .....	117
6.1	Introdução .....	117
6.2	Identificação da Sub-Rede .....	121
6.3	Identificação dos Caminhos de Transmissão .....	122
6.4	Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado .....	123
6.5	Identificação do Ramo de Transmissão Crítico .....	124
6.6	Processo de Otimização .....	124
6.6.1	Máxima Transferência de Potência - MXTR .....	125
6.6.2	Desvio de Potência Ativa - DGMW .....	126
6.7	Critério de Parada para Estudos de Reforço da Segurança de Tensão [ONS, 2002] .....	127
6.7.1	Critério para Condição Normal de Operação .....	127
6.7.2	Critério para Condição de Contingência Simples .....	128
7	Exemplo Numérico .....	129
7.1	Introdução .....	129
7.2	Sistema-teste de 34 Barras .....	129
7.3	Identificação da Barra de Geração Crítica .....	132
7.4	Identificação da Sub-Rede .....	134
7.5	Identificação dos Caminhos de Transmissão e do Caminho mais Carregado .....	135
7.6	Determinação do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado .....	140
7.7	Minimização do Fluxo de Potência no Ramo Crítico de Transmissão .....	143
7.7.1	Função MXTR .....	144
7.7.1.1	Minimização do Fluxo em Termos de MW .....	145
7.7.2	Função DGMW .....	168
7.7.2.1	Minimização do Fluxo em Termos de MVA .....	169
7.8	Análise da Influência do LTC e CS no Meio do Caminho de Transmissão .....	185
7.8.1	LTC no meio do Caminho de Transmissão .....	185
7.8.2	CS no Meio do Caminho de Transmissão .....	194
8	Aplicação no Sistema Brasileiro .....	200
8.1	Introdução .....	200
8.2	Cenário em Estudo: Máxima Injeção de Potência nos Geradores da UTE Mário Lago Alimentando Acréscimo de Carga em Vitória .....	201
8.3	Identificação da Barra de Geração Crítica .....	207
8.4	Eliminação de Restrições Violadas .....	207
8.5	Identificação da Sub-Rede .....	210
8.6	Identificação dos Caminhos de Transmissão e do Caminho mais Carregado .....	211
8.7	Determinação do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado .....	213
8.8	Diminuição do Fluxo de Potência Ativa no Ramo Crítico de Transmissão .....	216
8.8.1	Diminuição do Fluxo em Termos de MW .....	216
8.8.2	Diminuição do Fluxo em Termos de MVA .....	224
8.9	Reforço das Condições de Segurança de Tensão na Barra de Geração 1107 - ITAIPU60-9GR .....	232
8.9.1	Função-Objetivo MXTR e Diminuição do Fluxo em Termos de MW .....	232
8.9.2	Função-Objetivo DGMW e Diminuição do Fluxo em Termos de MVA .....	234

9	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	237
10	Referências bibliográficas .....	241
	Apêndice A - O Limite Estático de Estabilidade Angular (LEA).....	249
	Apêndice B - Cálculo do Ângulo Crítico da Tensão na Barra de Geração .....	252
	Apêndice C - Sistema-Teste de 34 Barras Desenvolvido pelo CEPEL .....	259

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Sistema Série de Duas Barras .....	54
Figura 2.2 - Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo Fator de Potência .....	56
Figura 2.3 - Curva para Fator de Potência Constante na Barra de Carga no Plano SV .....	57
Figura 2.4 - Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga .....	58
Figura 2.5 - Limite de Estabilidade de Tensão no Plano SV .....	62
Figura 2.6 - Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Todos os Possíveis Diferentes Níveis de Potência Ativa Constante e Para Alguns Níveis de Potência Reativa Constante .....	63
Figura 2.7 - Aumento e Diminuição da Tensão Respectivamente na Região Superior e Inferior da Curva com a Introdução de um Capacitor ....	64
Figura 2.8 - Potência Ativa Consumida na Carga com Fator de Potência Constante .....	69
Figura 2.9 - Circuito sem Capacitor .....	70
Figura 2.10 - Circuito com Capacitor .....	70
Figura 3.1 - Potência Ativa e Reativa Saindo da Barra de Geração num Circuito de Duas Barras .....	75
Figura 3.2 - Gradientes $\nabla P_{GL}$ e $\nabla Q_{GL}$ alinhados no Máximo Carregamento .....	77
Figura 3.3 - Caso 1: Ponto de Máximo no Plano PV .....	80
Figura 3.4 - Caso 1: Candidatos a Ponto de Máximo no Plano $\theta V$ .....	80
Figura 3.5 - Caso 2: Ponto de Máximo no Plano PV .....	82
Figura 3.6 - Caso 2: Candidatos a Ponto de Máximo no Plano $\theta V$ .....	83
Figura 3.7 - Localização do Ponto de Operação na Parte Superior da Curva SV .....	87
Figura 3.8 - Localização do Ponto de Operação na Parte Inferior da Curva SV .....	87
Figura 3.9 - Máxima Carga Limitada pela Potência que Chega na Barra de Carga .....	88
Figura 3.10 - Máxima Carga Limitada Simultaneamente pela Potência que Sai da Barra de Geração e pela que Chega na Barra de Carga .....	89
Figura 3.11 - Máxima Carga Limitada pela Potência que Sai da Barra de Geração .....	90
Figura 4.1 - Localização do Vetor Gradiente de $P_i$ e $Q_i$ no Plano $\theta V$ .....	99
Figura 4.2 - Sinal da Margem na Curva SV .....	100
Figura 4.3 - Movimento dos Pontos de Operação Correspondendo à Deterioração da Margem .....	102
Figura 4.4 - Curva SV para Análise do Índice de Influência .....	102
Figura 4.5 - Ordenação das Barras Críticas .....	107

Figura 5.1 - Curvas Tensão de Excitação e Potência Reativa Versus a Tensão Terminal do Gerador .....	108
Figura 5.2 - Modelo do Gerador, Linha de Transmissão e Carga .....	109
Figura 5.3 - Variações das Tensões Interna e Terminal a Partir de Um Ponto na Região Normal de Operação.....	115
Figura 5.4 - Variações das Tensões Interna e Terminal a partir de Um Ponto na Região Anormal de Operação .....	116
Figura 6.1 - Parte da Rede no Entorno da Barra i .....	118
Figura 6.2 - Sistemas Diferentes Alimentando a Mesma Carga.....	118
Figura 6.3 - Caminho de Transmissão Genérico.....	119
Figura 6.4 - Curvas SV para Diferentes Segmentos da Rede .....	120
Figura 7.1 - Sistema-Teste de 34 Barras Modificado .....	130
Figura 7.2 - Característica Tensão Versus Potência Ativa na Barra 29 .....	131
Figura 7.3 - Identificação da Sub-Rede do Sistema-Teste de 34 Barras .....	135
Figura 7.4 - Fluxo no Ramo 28-29 Antes e Após a 1ª Iteração com a Função MXTR .....	145
Figura 7.5 - Identificação da Sub-Rede Após a 1ª Iteração com a Função MXTR .....	146
Figura 7.6 - Fluxo no Ramo 28-29 Antes e Após a 2ª Iteração com a Função MXTR .....	152
Figura 7.7 - Identificação da Sub-Rede Após a 2ª Iteração com a Função MXTR .....	153
Figura 7.8 - Fluxo no Ramo 27-29 Antes e Após a 3ª Iteração com a Função MXTR .....	160
Figura 7.9 - Identificação da Sub-Rede Após a 3ª Iteração com a Função MXTR .....	161
Figura 7.10 - Fluxo no Ramo 28-29 Antes e Após a 1ª Iteração com a Função DGMW.....	169
Figura 7.11 - Identificação da Sub-Rede Após a 1ª Iteração com a Função DGMW.....	170
Figura 7.12 - Fluxo no Ramo 28-29 Antes e Após a 2ª Iteração com a Função DGMW.....	176
Figura 7.13 - Identificação da Sub-Rede Após a 2ª Iteração com a Função DGMW.....	177
Figura 7.14 - Circuito $\pi$ Equivalente de um LTC com Variação de <i>Taps</i> no Primário .....	186
Figura 7.15 - Diagrama Unifilar do Sistema com Gerador, LTC, Linha de Transmissão e Carga .....	186
Figura 7.16 - Curvas $P_{10}$ vs $V_1$ para Diferentes <i>Taps</i> do Transformador.....	189
Figura 7.17 - Diagrama Unifilar do Sistema com Gerador, CS, Linha de Transmissão e Carga .....	194
Figura 7.18 - Curvas $P_{10}$ vs $V_1$ para Diferentes Compensação Reativa na Barra de Carga .....	196

Figura 8.1 - Índice $\beta$ nas Barras da UTE NF e Fluxo entre Adrianópolis e Macaé.....	202
Figura 8.2 - Índice M nas Barras da UTE NF e Fluxo entre Adrianópolis e Macaé.....	203
Figura 8.3 - Índice $\beta$ nas Barras 3977 - M.Lago-12Gr e 3978 - M.Lago-8Gr da UTE Mário Lago.....	203
Figura 8.4 - Índice M nas Barras 3977 - M.Lago-12Gr e 3978 - M.Lago-8Gr da UTE Mário Lago .....	204
Figura 8.5 - Fluxos de Potência Ativa e Reativa Considerando 393,1 MW de Injeção de Potência pela UTE Mário Lago .....	206
Figura 8.6 - Análise de Fluxo de Potência no Ramo de Transmissão 2614-2697, 2697-2616 e 2697-2617 Após a Eliminação das Restrições Violadas.....	216
Figura 8.7 - Fluxos no Ramo 147-175 Antes e Após a 1ª Iteração com a Função-Objetivo MXTR .....	217
Figura 8.8 - Análise de Fluxo de Potência no Ramo de Transmissão 2614-2697, 2697-2616 e 2697-2617 Após a 1ª Iteração com a Função-Objetivo MXTR .....	221
Figura 8.9 - Fluxos no Ramo 147-148 Antes e Após a 2ª Iteração com a Função-Objetivo MXTR .....	221
Figura 8.10 - Fluxos no Ramo 147-175 Antes e Após a 1ª iteração com a Função-Objetivo DGMW .....	224
Figura 8.11 - Análise de Fluxo de Potência no Ramo de Transmissão 2614-2697, 2697-2616 e 2697-2617 Após a 1ª Iteração com a Função-Objetivo DGMW.....	228
Figura 8.12 - Fluxos no Ramo 147-148 Antes e Após a 2ª Iteração com a Função-Objetivo DGMW .....	229

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo Fator de Potência .....	56
Tabela 2.2 - Variações de Tensão, Corrente e Potência na Barra de Carga .....	68
Tabela 2.3 - Pontos de Operação para Avaliar o Aumento ou Decréscimo da Tensão com a Introdução de um Capacitor .....	72
Tabela 3.1 - Pontos de Operação 1, 2 e 3 da Figura 3.9 .....	89
Tabela 3.2 - Pontos de Operação 1, 2 e 3 da Figura 3.10 .....	89
Tabela 3.3 - Pontos de Operação 1, 2 e 3 da Figura 3.11 .....	90
Tabela 5.1 - Ponto de Operação na Região Normal da Curva SV .....	110
Tabela 5.2 - Ponto de Operação na Região Anormal da Curva SV .....	111
Tabela 5.3 - Pontos de Operação para Dois Níveis de Tensão na Barra Terminal do Gerador .....	111
Tabela 7.1 - Índices de Estabilidade de Tensão no Caso-Base para o Ponto de Operação S34_A06 Considerando a Barra 34 <i>Swing</i> .....	132
Tabela 7.2 - Índices de Estabilidade de Tensão no Caso-Base para o Ponto de Operação S34_A06 Considerando a Barra 26 <i>Swing</i> .....	134
Tabela 7.3 - Determinação dos Caminhos de Transmissão e Margens de Potência a Partir do Gerador 34 para o Ponto de Operação S34_A06 .....	136
Tabela 7.4 - Determinação dos Sub-Caminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado e Margens de Potência a partir do Gerador 34 para o Ponto de Operação S34_A06 .....	141
Tabela 7.5 - Índices de Estabilidade de Tensão Após a 1ª Iteração com a Função MXTR .....	146
Tabela 7.6 - Determinação dos Caminhos de Transmissão e Margens de Potência a Partir do Gerador 1 para o Ponto de Operação Após a 1ª Iteração com a Função MXTR .....	147
Tabela 7.7 - Determinação dos Sub-Caminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado e Margens de Potência a partir do Gerador 1 Após a 1ª Iteração com a Função MXTR .....	148
Tabela 7.8 - Índices de Estabilidade de Tensão Após a 2ª Iteração com a Função MXTR .....	153

Tabela 7.9 - Determinação dos Caminhos de Transmissão e Margens de Potência a Partir do Gerador 1 para o Ponto de Operação Após a 2ª Iteração com a Função MXTR.....	154
Tabela 7.10 - Determinação dos Sub-Caminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado e Margens de Potência a partir do Gerador 1 Após a 2ª Iteração com a Função MXTR .....	155
Tabela 7.11 - Índices de Estabilidade de Tensão Após a 3ª Iteração com a Função MXTR .....	160
Tabela 7.12 - Determinação dos Caminhos de Transmissão e Margens de Potência a Partir do Gerador 1 para o Ponto de Operação Após a 3ª Iteração com a Função MXTR.....	161
Tabela 7.13 - Determinação dos Sub-Caminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado e Margens de Potência a partir do Gerador 1 Após a 3ª Iteração com a Função MXTR .....	162
Tabela 7.14 - Caminho Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Após de cada Iteração com a Função MXTR.....	167
Tabela 7.15 - Variação de Geração Ativa e Perdas no Sistema Após cada Iteração com a Função MXTR.....	168
Tabela 7.16 - índices de Estabilidade de Tensão Após a 1ª Iteração com a Função DGMW .....	170
Tabela 7.17 - Determinação dos Caminhos de Transmissão e Margens de Potência a Partir do Gerador 1 para o Ponto de Operação Após a 1ª Iteração com a Função DGMW .....	171
Tabela 7.18 - Determinação dos Sub-Caminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado e Margens de Potência a partir do Gerador 1 Após a 1ª Iteração com a Função DGMW.....	172
Tabela 7.19 - índices de Estabilidade de Tensão Após a 2ª Iteração com a Função DGMW .....	177
Tabela 7.20 - Determinação dos Caminhos de Transmissão e Margens de Potência a Partir do Gerador 1 para o Ponto de Operação Após a 2ª Iteração com a Função DGMW .....	178
Tabela 7.21 - Determinação dos Sub-Caminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado e Margens de Potência a partir do Gerador 1 Após a 2ª Iteração com a Função DGMW.....	179
Tabela 7.22 - Caminho Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Após de cada Iteração com a Função DGMW .....	184

Tabela 7.23 - Variação de Geração Ativa e Perdas no Sistema Após de cada Iteração com a Função DGMW .....	185
Tabela 7.24 - Ponto de Operação onde a Barra de Controlada têm Índices $\beta$ e $M$ positivos .....	190
Tabela 7.25 - Sub-Caminhos de Transmissão para o Sistema de Três Barras com Tensão Controlada por LTC em $V=0,665$ pu na Barra do Meio.....	191
Tabela 7.26 - Sub-Caminhos de Transmissão para o Sistema de Três Barras com Tensão Controlada por LTC em $V=0,745$ pu na Barra do Meio.....	191
Tabela 7.27 - Caminhos de Transmissão a partir das Barras de Tensão Controlada pelo LTC e pelo Gerador Síncrono.....	193
Tabela 7.28 - Sub-Caminhos de Transmissão para o Sistema de Três Barras com Tensão Controlada por CS em $V=0,665$ pu na Barra do Meio .....	197
Tabela 7.29 - Sub-Caminhos de Transmissão para o Sistema de Três Barras com Tensão Controlada por CS em $V=0,745$ pu na Barra do Meio .....	198
Tabela 8.1 - Máxima Injeção de Potência pela UTE Mário Lago Limitado pela Máxima Geração da UTE NF com Índices Positivos.....	205
Tabela 8.2 - Índices das Barras do Tronco de Transmissão entre Adrianópolis e Vitória Considerando Aumento da Geração pela UTE Mário Lago .....	205
Tabela 8.3 - Dados dos Grupos Limites de Tensão .....	209
Tabela 8.4 - Tensões e Índices no Caso-Base e Após a Eliminação de Restrições Violadas devido à Máxima Injeção de Potência pela UTE Mário Lago .....	210
Tabela 8.5 - Tensões e Índices no Caso-Base e Após a Eliminação de Restrições Violadas no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória .....	210
Tabela 8.6 - Caminho Crítico de Transmissão da Barra 3962 - N.Flu-G1-3Gr..	211
Tabela 8.7 - Caminho Crítico de Transmissão da Barra 3963 - N.Flu-V1-1Gr..	212
Tabela 8.8 - Caminho Crítico de Transmissão da Barra 3977 - M.Lago-12Gr ..	212
Tabela 8.9 - Caminho Crítico de Transmissão da Barra 3978 - M.Lago-8Gr ....	213
Tabela 8.10 - Ramo Crítico do Caminho mais Carregado de Transmissão da Barra 3978 - M.Lago-8Gr .....	214



Tabela 8.11 - Tensões e Índices Após a Eliminação de Restrições Violadas e Após a 1ª Iteração nos Geradores da Área 41 e nas Barras de Carga 2625 e 2629 com a Função-Objetivo MXTR .....	217
Tabela 8.12 - Tensões e Índices Após a Eliminação de Restrições Violadas e Após a 1ª Iteração no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória com a Função-Objetivo MXTR.....	217
Tabela 8.13 - Ramo Crítico do Caminho mais Carregado que Sai da Barra 3978 - M.Lago-8Gr .....	218
Tabela 8.14 - Tensões e Índices Após a 1ª Iteração e Após a 2ª Iteração nos Geradores da Área 41 e nas Barras de Carga 2625 e 2629 com a Função-Objetivo MXTR.....	222
Tabela 8.15 - Tensões e Índices Após a 1ª Iteração e Após a 2ª Iteração no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória com a Função-Objetivo MXTR .....	222
Tabela 8.16 - Caminho de Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Antes de cada Iteração com a Função-Objetivo MXTR .....	223
Tabela 8.17 - Variação de Geração Ativa e Perdas no Sistema Após de cada Iteração com a Função-Objetivo MXTR .....	224
Tabela 8.18 - Tensões e Índices Após a Eliminação de Restrições Violadas e Após a 1ª Iteração nos Geradores da Área 41 e nas barras de carga 2625 e 2629 com a Função-Objetivo DGMW.....	225
Tabela 8.19 - Tensões e Índices Após a Eliminação de Restrições Violadas e Após a 1ª Iteração no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória com a Função-Objetivo DGMW .....	225
Tabela 8.20 - Ramo Crítico do Caminho mais Carregado que Sai da Barra 3978 - M.Lago-8Gr .....	226
Tabela 8.21 - Tensões e Índices Após a 1ª Iteração e Após a 2ª Iteração nos Geradores da Área 41 e nas Barras de Carga 2625 e 2629 com a Função-Objetivo DGMW .....	230
Tabela 8.22 - Tensões e Índices Após a 1ª Iteração e Após a 2ª Iteração no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória com a Função-Objetivo DGMW.....	230
Tabela 8.23 - Caminho de Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Antes de cada Iteração com a Função-Objetivo DGMW .....	231
Tabela 8.24 - Variação de Geração Ativa e Perdas no Sistema Após de cada Iteração com a Função-Objetivo DGMW.....	232

Tabela 8.25 - Tensões e Índices Após Eliminação de Restrições Violadas e Após 1ª e 2ª Iteração no Gerador 1107 - ITAIPU60-9GR e Outros com a Função-Objetivo MXTR.....	233
Tabela 8.26 - Caminho de Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Antes de cada Iteração com a Função-Objetivo MXTR .....	233
Tabela 8.27 - Variação de Geração Ativa, Perdas no Sistema e Variação do Fluxo no Ramo Crítico Após de cada Iteração com a Função-Objetivo MXTR .....	234
Tabela 8.28 - Tensões e Índices Após Eliminação de Restrições Violadas e Após 1ª e 2ª Iteração no Gerador 1107 - ITAIPU60-9GR e Outros com a Função-Objetivo DGMW .....	234
Tabela 8.29 - Caminho de Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Antes de cada Iteração com a Função-Objetivo DGMW.....	235
Tabela 8.30 - Variação de Geração Ativa, Perdas no Sistema e Variação do Fluxo no Ramo Crítico Após de cada Iteração com a Função-Objetivo DGMW.....	236

## Abreviaturas e Siglas

MXTR	Máxima transferência de potência ativa
DGMW	Mínimo desvio de potência ativa
M	Índice de margem de potência em % ou em pu
$\beta$	Índice de ângulo entre os vetores gradientes $\vec{\nabla} P$ e $\vec{\nabla} Q$
II	Índice de influência da ação de controle sobre a margem de potência
$\phi$	Ângulo do fator de potência
$\vec{\nabla} P$	Vetor gradiente de potência ativa
$\vec{\nabla} Q$	Vetor gradiente de potência reativa
LET	Limite de estabilidade de tensão
LEA	Limite estático de estabilidade angular
$Z_t$	Impedância da linha de transmissão
$\alpha_t$	Ângulo da impedância da linha de transmissão
$Z_c$	Impedância de carga
EAT	Extra alta tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema
OPF	Fluxo de potência ótimo
LTC	Transformador com variação automática de <i>taps</i> em carga
CS	Compensador síncrono
$P_i$	Potência ativa injetada na barra $i$ no ponto de operação em análise
$Q_i$	Potência reativa injetada na barra $i$ no ponto de operação em análise
$S_i$	Potência aparente injetada na barra $i$ no ponto de operação em análise
$S_m$	Estimativa da máxima potência aparente que pode ser injetada na barra $i$ no ponto de operação em análise para um sistema multinó.
$S_{io}$	Estimativa da máxima potência aparente que pode ser injetada na barra $i$ para um sistema duas barras
$\Delta \text{det} * V_i$	Relaciona à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra $i$

$\det[D]*V_i$	Indica a distância de $S_i^2$ a $S_{io}^2$ para um sistema de duas barras
$\det[D']*V_i$	Indica a distância de $S_i^2$ a $S_m^2$ para um sistema multi-nó
C	Capacitor
R	Reator
P	Barra de passagem
SVC	Compensador estático de potência reativa
UTE	Usina Termoelétrica
NF	Norte Fluminense
CEPEL	Centro de Pesquisas Elétricas em Brasil
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia
SE	Subestação