

WASCHINGTON FERNANDES ALVES

**PROPOSIÇÃO DE SISTEMAS-TESTE PARA ANÁLISE
COMPUTACIONAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre, Área de concentração: Aplicações (Computação em Potência).

Orientadores:

Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc.

Niterói, RJ - Brasil
2007

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

A474 Alves, Waschington Fernandes.

Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência / Waschington Fernandes Alves. – Niterói, RJ : [s.n.], 2007.
332f.

Orientadores: Marcus Theodor Schilling, Milton Brown Do Coutto Filho.

Dissertação (Mestrado em Computação) - Universidade Federal Fluminense, 2007.

1 Sistema de energia elétrica. 2. Sistemas de potência. 3. Curto circuito. I. Título.

CDD 621.3191

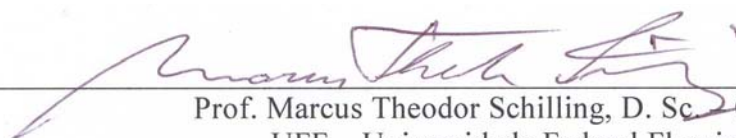
WASCHINGTON FERNANDES ALVES

**PROPOSIÇÃO DE SISTEMAS-TESTE PARA ANÁLISE
COMPUTACIONAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre, Área de concentração: Aplicações (Computação em Potência).

Aprovada em 14 de Agosto de 2007.

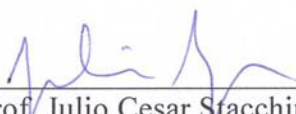
BANCA EXAMINADORA



Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc. – Orientador
UFF – Universidade Federal Fluminense



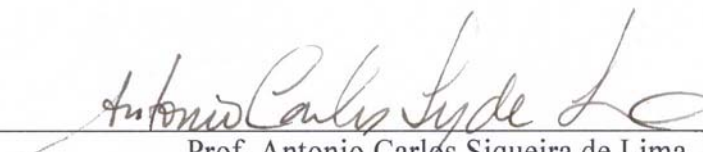
Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc. – Orientador
UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D. Sc.
UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D. Sc.
UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico esta Dissertação de
Mestrado à minha filha
Mariana.

AGRADECIMENTOS

É muito difícil agradecer nominalmente a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para concretização deste trabalho. Por isso, agradeço a todos que, de alguma forma, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

Em especial agradeço ao Dr. Eng. Antonio Luiz Bergamo do Bomfim (Eletrobrás), grande colaborador na elaboração deste trabalho, me ajudando na organização dos estudos e nas análises dos resultados.

Também agradeço ao Eng. Johann Michael Steinberg, M. Sc. (Eletrobrás) pela sua ajuda na parte de curto-circuito, no elo de corrente contínua e pelas discussões técnicas que foram importantes para a realização deste trabalho.

Registro ainda meu reconhecimento ao Eng. Venilton Rodrigues de Oliveira (ONS) pela ajuda essencial na tarefa de levantamento de dados.

Agradeço à minha esposa e à minha filha, que souberam compreender a importância profissional e pessoal da execução deste trabalho, incentivando e me apoiando nos momentos mais difíceis.

À minha mãe, pelo carinho e atenção, que me ajudou no meu desenvolvimento pessoal e na busca de um crescimento profissional.

Aos meus orientadores, Prof. Marcus Theodor Schilling e Prof. Milton Brown Do Coutto Filho pelo apoio, estímulo e pela orientação técnica, que se traduziram num aprendizado contínuo durante o período de desenvolvimento deste trabalho, além da significativa contribuição à minha formação acadêmica.

À Eletrobrás, por permitir o uso das ferramentas computacionais essenciais para a confecção deste trabalho, aos meus colegas de trabalho que me apoiaram e ajudaram na sua execução e aos meus superiores Eng. Paulo Cesar de Almeida, M. Sc. (Eletrobrás) e Eng^a. Elizabeth Almeida Franceschett (Eletrobrás) que proporcionaram condições para que eu realizasse esse trabalho.

Finalmente agradeço a Deus, por sua constante presença em minha vida, dando-me coragem para enfrentar todos os obstáculos.

Nota: A elaboração desta Dissertação foi parcialmente apoiada pelo CNPq e FAPERJ-PRONEX. Todos os resultados numéricos foram obtidos graças aos aplicativos computacionais desenvolvidos pelo CEPEL e disponibilizados para uso legal pela ELETROBRÁS.

Resumo da Dissertação apresentada ao Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense – UFF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

PROPOSIÇÃO DE SISTEMAS-TESTE PARA ANÁLISE COMPUTACIONAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Waschington Fernandes Alves

Agosto, 2007

Orientadores:

Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc.

A análise computacional de sistemas de potência vem se tornando a cada dia mais complexa e abrangente. São inúmeras as dificuldades relacionadas a modelagens de componentes e fenômenos, técnicas numéricas e metodologias diversas. Essas dificuldades demandam um processo de validação de resultados que pode ser facilitado através do uso de sistemas-teste de porte reduzido. Até então, a grande maioria dos sistemas-teste (IEEE, CIGRÉ) utilizados nos mais diversos estudos não reflete algumas características importantes encontradas no sistema elétrico brasileiro. Assim sendo, esta Dissertação propõe sistemas-teste nacionais para referência em estudos de análise computacional de sistemas de potência.

Diversos exemplos didáticos de análises típicas realizadas em cinco novos sistemas elétricos de potência de dimensões reduzidas, chamados de “*sistemas-teste*”, são apresentados. Neles foram simuladas condições operativas de interesse através dos aplicativos computacionais comumente usados no setor elétrico brasileiro, abrangendo problemas de: fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, curto-circuito, estabilidade transitória e estabilidade a pequenas perturbações.

Um dos sistemas-teste é de porte muito reduzido e foi criado visando possibilitar a elaboração de cálculos manuais para fins didáticos. Os demais sistemas-teste foram criados a partir de dados extraídos do sistema elétrico brasileiro, definidos por suas topologias e relação completa dos respectivos parâmetros elétricos. Para cada um dos problemas foram criados casos-base de referência, com premissas minuciosamente definidas, para garantia de total reprodutibilidade de resultados por outros analistas, estudantes e pesquisadores. Para cada aplicativo computacional utilizado, foram criados cenários realistas que evidenciam problemas elétricos tradicionalmente relevantes, como: violações de critérios, colapsos, instabilidade, oscilações etc.

Palavras-chave: *Sistema de energia elétrica, sistema-teste, fluxo de potência, curto-circuito, estabilidade, autovalor, educação, pesquisa.*

* * *

Summary of the Dissertation presented to the Institute of Computation of the Fluminense Federal University – UFF to fulfill the necessary requirements to obtain the Degree of Master in Sciences (M. Sc.).

PROPOSITION OF TEST-SYSTEMS TO POWER SYSTEMS ANALYSIS

Waschington Fernandes Alves

August, 2007

Advisors:

Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc.

The computational analysis of power systems becomes each day wider and more complex. There are several difficulties to model components, phenomena, numerical techniques and methodologies. These difficulties demand a process to validate the results that can be facilitated through the use of test-systems of reduced size. However, the great majority of the test-systems used (IEEE, CIGRÉ) does not reflect the characteristics of the Brazilian system.

This Dissertation presents didactic examples carried out through typical analyses in five new electrical power systems of reduced dimensions, called “*test-systems*”, where operative conditions of interest are used with common computational applications used in the Brazilian electric sector, such as: power flow, optimum power flow, short-circuit, transient stability and small signal stability.

One of the test-system is a reduced one and it was created aiming to make possible the elaboration of manual calculations for didactic purposes. The others test-systems had been created from extracted data of the Brazilian electrical system defined by its topologies and a complete relation of its electric parameters. For each one of the problems a reference “base-case” was created, with minutely defined premises, to guarantee the total reproduction of results by other analysts, students and researchers. Thus, the main contribution of the Dissertation is the proposal of fictitious test-systems, based in the peculiarities of the Brazilian electrical system which constitute a good alternative to the traditional systems of the IEEE and CIGRÉ. For each computational program used, realistic scenarios had been created to evidence traditional electric problems such as: criteria violations, collapses, instability, oscillations, etc.

Key-words: *Electric energy system, test-system, power flow, short-circuit, stability, eigenvalue, education, research.*

* * *

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Considerações Preliminares	1
1.2 - Objetivo	2
1.3 - Estrutura da Dissertação	3
Capítulo 2 - Características do Sistema de Potência Brasileiro	5
2.1 - Introdução	5
2.2 - Fontes Primárias de Energia	6
2.3 - Parque Gerador e Capacidade Instalada	9
2.4 - Topologia da Transmissão	9
2.5 - Carga	12
2.6 - Sumário	13
Capítulo 3 - Proposição dos Sistemas-Teste	14
3.1 - Introdução	14
3.2 - Diretrizes Para a Concepção dos Sistemas-Teste	15
3.3 - Sistema-Teste Brasileiro de 9 Barras (STB-9)	17
3.4 - Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras (STB-16)	18
3.5 - Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras (STB-33)	19
3.6 - Sistema-Teste Brasileiro de 65 Barras (STB-65)	21
3.7 - Sistema-Teste Brasileiro de 107 Barras – CA (STB-107CA)	23
3.8 - Sistema-Teste Brasileiro de 107 Barras – Híbrido (STB-107H)	25
3.9 - Sumário	27
Adendo I - Dados do Sistema-Teste Brasileiro de 9 Barras	28
Adendo II - Dados do Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras	35
Adendo III - Dados do Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras	45
Adendo IV - Dados do Sistema-Teste Brasileiro de 65 Barras	53
Adendo V - Dados do Sistema-Teste Brasileiro de 107 Barras – CA	64
Adendo VI - Dados do Sistema-Teste Brasileiro de 107 Barras – Híbrido	132
Capítulo 4 - Análise do Regime Estático em Condição Normal	139
4.1 - Introdução	139
4.2 - Ferramenta Computacional	140
4.3 - Procedimentos	141
4.3.1 - Modelos e representações de cargas	142
4.3.2 - Múltiplas barras de referência	143
4.3.3 - Ponto de operação de difícil convergência	143
4.3.4 - Controle de tensão	143
4.3.5 - Violações de limites	144
4.4 - Estudos de Problemas Típicos	145
4.4.1 - Montagem, ajuste e análise do caso base	145

4.4.2 - <i>Análise de curva e patamares de carga</i>	150
4.4.3 - <i>Análise de contingência simples (N-1)</i>	154
4.4.4 - <i>Ajuste em tape de transformador</i>	172
4.4.5 - <i>Adição de um elo de corrente contínua no sistema-teste 107 barras</i>	177
4.5 - Sumário	181
Capítulo 5 - Análise do Regime Estático em Condição Otimizada	183
5.1 - Introdução	183
5.2 - Ferramenta Computacional	184
5.3 - Procedimentos	185
5.4 - Estudos de Problemas Típicos	186
5.4.1 - <i>Comparação de ajuste de casos</i>	186
5.4.2 - <i>Realização de ajuste para suportar contingência</i>	192
5.4.3 - <i>Minimização de perdas elétricas no sistema</i>	195
5.4.4 - <i>Minimização de perdas elétricas com restrição na área Sudeste</i>	197
5.4.5 - <i>Minimização de perdas elétricas com restrição na área Sul</i>	198
5.4.6 - <i>Maximização de intercâmbio entre áreas</i>	200
5.5 - Sumário	205
Capítulo 6 - Análise do Regime Estático em Condição Anormal	206
6.1 - Introdução	206
6.2 - Ferramenta Computacional	207
6.3 - Procedimentos	208
6.3.1 - <i>Localização do curto</i>	210
6.3.2 - <i>Tipos de curto</i>	210
6.3.3 - <i>Duração do curto</i>	211
6.3.4 - <i>Sensibilidade à localização do defeito</i>	211
6.3.5 - <i>Sensibilidade a tipo de defeito</i>	211
6.4 - Estudos de Problemas Típicos	212
6.4.1 - <i>Comparação dos níveis de curto-circuito</i>	212
6.4.2 - <i>Verificação da capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito</i>	215
6.4.3 - <i>Cálculo do reator de curto para uso nas simulações de estabilidade</i>	220
6.4.4 - <i>Curto-circuito em linha paralela</i>	223
6.4.5 - <i>Comparação entre curto-bifásico e curto bifásico-terra</i>	225
6.5 - Sumário	226
Capítulo 7 - Análise do Regime Dinâmico	228
7.1 - Introdução	228
7.2 - Ferramenta Computacional	229
7.3 - Procedimentos	229
7.3.1 - <i>Caso de fluxo de potência</i>	230
7.3.2 - <i>Banco de dados dinâmicos</i>	230
7.3.3 - <i>Compatibilização do número de máquinas</i>	231
7.3.4 - <i>Preparação do arquivo para simulação</i>	232

7.3.5 - Principais grandezas monitoradas	233
7.4 - Estudos de Problemas Típicos	234
7.4.1 - Análise de contingência simples (N-1)	234
7.4.2 - Estudo do fenômeno do colapso de tensão	244
7.4.3 - Estudo de máxima transferência de potência	255
7.4.4 - Influência dos controladores na estabilidade do sistema	259
7.5 - Sumário	268
Capítulo 8 - Análise do Regime Dinâmico a Pequenas Perturbações	269
8.1 - Introdução	269
8.2 - Ferramenta Computacional	270
8.3 - Procedimentos	271
8.4 - Estudos de Problemas Típicos	274
8.4.1 - Avaliação do sistema-teste de 9 barras	274
8.4.2 - Identificação dos modos eletromecânicos	281
8.4.3 - Análise do melhor local para instalação de estabilizador	289
8.5 - Sumário	289
Capítulo 9 - Conclusões	291
9.1 - Conclusões	291
9.2 - Complementação Futura	291
Referências Bibliográficas	293
Apêndice A - Resultados do Item 8.4.3	296
Anexo I - Pontos de Operação dos Sistemas-Teste Propostos	302
Anexo II - Níveis de Curto-Circuito dos Sistemas-Teste Propostos	327
Nota 1: Esta Dissertação é acompanhada por um CD contendo informações e dados sobre os sistemas-teste propostos.	
Nota 2: O conteúdo do CD pode ser publicamente acessado nos seguintes portais:	
<i>http://www.ic.uff.br/PosGraduacao/lista_dissertacao.php?ano=2007</i>	
<i>http://br.geocities.com/washingtonalves/</i>	
Nota 3: Endereço para contato:	
<i>Eng. Waschington Fernandes Alves</i>	
<i>Eletróbras – Centrais Elétricas Brasileiras S.A</i>	
<i>Av. Marechal Floriano, 19 – 14º andar</i>	
<i>Centro – Rio de Janeiro – RJ, Brasil</i>	
<i>Tel.: (0xx21) 2514-5017</i>	
<i>C-ele: waschin@eletrobras.com</i>	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Matriz elétrica brasileira – 2005	7
Figura 2.2	– Matriz energética brasileira – 2005	7
Figura 2.3	– Mapa do sistema elétrico brasileiro – configuração 2016	11
Figura 3.1	– Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 9 barras	18
Figura 3.2	– Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 16 barras	19
Figura 3.3	– Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 33 barras	20
Figura 3.4	– Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 65 barras	22
Figura 3.5	– Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 107 barras – CA	24
Figura 3.6	– Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 107 barras – Híbrido	26
Figura 3.7	– Diagrama unifilar da configuração do elo cc	132
Figura 4.1	– Dados do caso base	146
Figura 4.2	– Relatório completo do caso base	147
Figura 4.3	– Diagrama unifilar do sistema com informações do caso base	149
Figura 4.4	– Diagrama unifilar do sistema com informações do caso após ajuste	150
Figura 4.5	– Curva de demanda diária verificada no SIN	152
Figura 4.6	– Curva de demanda do período afetado pela realização do jogo	152
Figura 4.7	– Diagrama unifilar do sistema com o ponto de operação a ser estudado	155
Figura 4.8	– Dados de intercâmbio entre as áreas	156
Figura 4.9	– Relatório de monitoração de fluxo	157
Figura 4.10	– Fluxo na LT 230kV Cascavel-Salto Osório	161
Figura 4.11	– Relatório de barras sem medida	163
Figura 4.12	– Relatório de barras com medida	163
Figura 4.13	– Relatório de monitoração de tensão	164
Figura 4.14	– Relatório de monitoração de tensão com inserção de capacitores	165
Figura 4.15	– Relatório de barras com inserção de capacitores	165
Figura 4.16	– Relatório de monitoração de tensão	166
Figura 4.17	– Relatório de barra	166
Figura 4.18	– Relatório de monitoração de tensão	167
Figura 4.19	– Relatório de monitoração de tensão	168
Figura 4.20	– Relatório de monitoração de tensão	170
Figura 4.21	– Relatório de monitoração de geração reativa	170
Figura 4.22	– Relatório de monitoração de fluxo	170
Figura 4.23	– Posição inicial do tape no transformador LTC	174
Figura 4.24	– Condições com os tapes iguais	175
Figura 4.25	– Condições com os tapes diferentes	176
Figura 4.26	– Condições com os tapes nos extremos opostos	177
Figura 4.27	– Intercâmbio entre as áreas Sul e Sudeste com o elo CC	178
Figura 4.28	– Fluxo na interligação sentido área Sul para área Sudeste com o elo CC	179
Figura 4.29	– Fluxo na interligação sentido área Sul para área Sudeste sem o elo CC	180

Figura 4.30	– Fluxo na interligação sentido área Sudeste para área Sul com o elo CC	180
Figura 4.31	– Fluxo na interligação sentido área Sudeste para área Sul sem o elo CC	181
Figura 5.1	– Diagrama simplificado do processo utilizado para otimização	185
Figura 5.2	– Dados de otimização e função objetivo	187
Figura 5.3	– Sumário do caso	188
Figura 5.4	– Relatório de barras do sistema	188
Figura 5.5	– Relatório de linhas do sistema	189
Figura 5.6	– Sumário do caso	190
Figura 5.7	– Relatório de barras do sistema	190
Figura 5.8	– Relatório de linhas do sistema	191
Figura 5.9	– Sumário do caso	193
Figura 5.10	– Potência reativa alocada	193
Figura 5.11	– Sumário do caso	194
Figura 5.12	– Potência reativa alocada	194
Figura 5.13	– Relatório de totais de área do caso inicial	196
Figura 5.14	– Sumário do caso	196
Figura 5.15	– Relatório de totais de área do caso otimizado	197
Figura 5.16	– Sumário do caso	198
Figura 5.17	– Relatório de totais de área do caso otimizado	198
Figura 5.18	– Sumário do caso	199
Figura 5.19	– Relatório de totais de área do caso otimizado	199
Figura 5.20	– Dados de otimização e função objetivo	202
Figura 5.21	– Sumário do caso	203
Figura 5.22	– Intercâmbio máximo obtido	203
Figura 5.23	– Grandezas no limite	204
Figura 5.24	– Redespacho de geração e variação dos controles	204
Figura 6.1	– Representação de transformador elevador de usina no fluxo de potência	208
Figura 6.2	– Representação de transformador elevador de usina no curto-circuito	209
Figura 6.3	– Representação de transformador de três enrolamentos	209
Figura 6.4	– Curto na barra de 500kV de Marimbondo	218
Figura 6.5	– Curto depois do disjuntor nº 5 da LT 500kV Marimbondo-Araraquara	219
Figura 6.6	– LT 500kV Cachoeira Paulista-Adrianópolis C.1 e C.2 em operação	223
Figura 6.7	– LT 500kV Cachoeira Paulista-Adrianópolis C.2 em manutenção	223
Figura 6.8	– Tensão e corrente induzidas pela LT 500kV C.Paulista-Adrianópolis C.1	224
Figura 6.9	– Tensão e corrente para curto bifásico na barra 9 – fases B e C	225
Figura 6.10	– Tensão e corrente para curto bifásico-terra na barra 9 – fases B e C	226
Figura 7.1	– Defasamento angular entre as máquinas do sistema em relação a G.B.Munhoz	236
Figura 7.2	– Módulo da tensão nos barramentos de 500kV de Areia, Caxias, S. Santiago e S. Caxias e nos barramentos de 230kV de Cascavel e Cascavel do Oeste	236
Figura 7.3	– Módulo do fluxo de potência no circuito S.Segredo-Areia 500 kV	237
Figura 7.4	– Defasamento angular das máquinas S.Caxias e S.Osório em relação a G.B.M	238
Figura 7.5	– Defasamento angular das máquinas S.Caxias e S.Osório em relação a G.B.M	239

Figura 7.6	– Defasamento angular das máquinas do sistema	239
Figura 7.7	– Frequência do sistema	240
Figura 7.8	– Defasamento angular das máquinas S.Caxias e S.Osório em relação a G.B.M	241
Figura 7.9	– Fluxo de potência ativo no transformador de Areia e na LT Segredo-Areia	242
Figura 7.10	– Defasamento angular das máquinas do sistema	242
Figura 7.11	– Carregamento na LT 500kV S.Santiago-Itá	243
Figura 7.12	– Defasamento angular das máquinas do sistema	243
Figura 7.13	– Potência elétrica das máquinas do sistema	244
Figura 7.14	– Potência reativa do CS Ibiúna	246
Figura 7.15	– Módulo da tensão nos barramentos da área Um	246
Figura 7.16	– Módulo da tensão nos barramentos de carga da área Um	248
Figura 7.17	– Módulo da tensão em barramentos do sistema	248
Figura 7.18	– Defasamento angular das máquinas da área Um em relação área Dois	249
Figura 7.19	– Defasamento angular das máquinas da área Um em relação área Dois	250
Figura 7.20	– Defasamento angular das máquinas da área Dois	250
Figura 7.21	– Módulo da tensão em barramentos de carga da área Um	251
Figura 7.22	– Potência reativa do CS de Ibiúna	252
Figura 7.23	– Tensão em barras de carga da área Um	252
Figura 7.24	– Potência reativa do CS de Ibiúna	253
Figura 7.25	– Tensão em barras de carga da área Um	253
Figura 7.26	– Potência reativa do CS de Ibiúna	254
Figura 7.27	– Tensão em barras de carga da área Um	254
Figura 7.28	– Variação angular dos rotores de Itumbiara, Marimbondo, Emborcação e Jaguará em relação a G.B.Munhoz	256
Figura 7.29	– Potência elétrica de G.B.Munhoz, S.Santiago, Itumbiara e Marimbondo	256
Figura 7.30	– Tensão em Curitiba, C.Paulista, Campinas e Araraquara	256
Figura 7.31	– Variação angular dos rotores das máquinas do Sudeste em relação a G.B.Munhoz no Sul	256
Figura 7.32	– Variação angular dos rotores das máquinas do Sudeste em relação a Marimbondo no Sudeste	257
Figura 7.33	– Variação angular dos rotores das máquinas do Sul em relação a S.Santiago no Sul ..	257
Figura 7.34	– Variação angular dos rotores de Itumbiara em relação a G.B.Munhoz com e sem esquema	258
Figura 7.35	– Variação angular dos rotores de Itumbiara, Marimbondo, Emborcação e Jaguará em ação a G.B.Munhoz com compensação na interligação	258
Figura 7.36	– Variação angular dos rotores das máquinas 1 e 2 em relação ao centro de massa	260
Figura 7.37	– Tensão nas barras do sistema	260
Figura 7.38	– Variação angular dos rotores da máquina 1 contra a máquina 2	261
Figura 7.39	– Tensão nas barras de carga	261
Figura 7.40	– Tensão de campo das máquinas	261
Figura 7.41	– Frequência do sistema medida nas barras de carga	261
Figura 7.42	– Potência elétrica das máquinas 1 e 2	262
Figura 7.43	– Potência mecânica das máquinas 1 e 2	262

Figura 7.44	– Tensão de campo das máquinas	263
Figura 7.45	– Comparação da variação angular dos rotores da máquina 1 contra a máquina 2 com e sem regulador de tensão	263
Figura 7.46	– Tensão nas barras de carga	263
Figura 7.47	– Comparação do comportamento da frequência do sistema medida na barra 5 com e sem regulador de tensão	263
Figura 7.48	– Potência elétrica das máquinas 1 e 2	263
Figura 7.49	– Comparação da potência reativa das máquinas 1 e 2 com e sem regulador de Tensão	263
Figura 7.50	– Potência mecânica das máquinas 1 e 2	264
Figura 7.51	– Comparação da frequência do sistema medida na barra 5 com e sem regulador de velocidade	265
Figura 7.52	– Potência mecânica das máquinas 1 e 2	265
Figura 7.53	– Potência elétrica das máquinas 1 e 2	265
Figura 7.54	– Potência acelerante das máquinas 1 e 2	265
Figura 7.55	– Variação angular dos rotores da máquina 1 contra a máquina 2	265
Figura 7.56	– Tensão nas barras de carga	265
Figura 7.57	– Comparação da variação angular dos rotores da máquina 1 versus máquina 2 com e sem estabilizador	266
Figura 7.58	– Comparação da tensão de campo da máquina 1 com e sem o estabilizador	266
Figura 7.59	– Comparação da potência elétrica das máquinas 1 com e sem o estabilizador	267
Figura 7.60	– Comparação da tensão da barra 9 com e sem estabilizador	267
Figura 7.61	– Variação angular dos rotores da máquina 1 versus máquina 2 com ganho do estabilizador normal e elevado	267
Figura 8.1	– Resposta transitória para diferentes localizações de autovalores	273
Figura 8.2	– Mapa de pólos do sistema com RAT	276
Figura 8.3	– Resposta no domínio do tempo: máquina 1 e máquina 2	277
Figura 8.4	– Mapa de pólos do sistema com RAT e RAV	279
Figura 8.5	– Resposta no domínio do tempo: máquina 1 x máquina 2	279
Figura 8.6	– Comparação da resposta no domínio do tempo com e sem o estabilizador nas máquina 1 e 2	281
Figura 8.7	– Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 1	283
Figura 8.8	– Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 3	284
Figura 8.9	– Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 5	285
Figura 8.10	– Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 7	286
Figura 8.11	– Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 9	287
Figura 8.12	– Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 11	288
Figura A.1	– Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 1	298
Figura A.2	– Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 3	299
Figura A.3	– Mapa de pólos e zeros do gerador-1	300
Figura A.4	– Mapa de pólos e zeros do gerador-2	300

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Parque gerador brasileiro	9
Tabela 2.2	– Potência instalada total	9
Tabela 2.3	– Extensão das linhas de transmissão do SIN em km	10
Tabela 2.4	– Consumo por classe em 2005	12
Tabela 2.5	– Consumo de energia no Brasil	12
Tabela 3.1	– Base de dados utilizada	16
Tabela 3.2	– Número de elementos dos sistemas-teste	16
Tabela 3.3	– Capacidade dos sistemas-teste	17
Tabela 3.4	– Estudos realizados	27
Tabela 4.1	– Patamares de carga	153
Tabela 4.2	– Cenários de operação	156
Tabela 4.3	– Limites de tensão	156
Tabela 4.4	– Lista de contingências	157
Tabela 4.5	– Variação da tensão com a representação da carga	158
Tabela 4.6	– Geração ativa na barra de referência	159
Tabela 4.7	– Perdas elétricas no sistema	159
Tabela 4.8	– Variação da carga com a tensão em função da representação	160
Tabela 4.9	– Tensão nas barras de carga após corte de carga	169
Tabela 4.10	– Condição após ajuste no tape ligado na barra de alta tensão	174
Tabela 4.11	– Condição após ajuste no tape ligado na barra de baixa tensão	175
Tabela 4.12	– Condição após ajuste dos casos sem elo CC	179
Tabela 5.1	– Condições iniciais de geração e carga	201
Tabela 5.2	– Intercâmbio e representação de carga	201
Tabela 6.1	– Tipos de defeitos	207
Tabela 6.2	– Tempos típicos de eliminação de defeitos	211
Tabela 6.3	– Níveis de curto-circuito do sistema-teste 107 barras	213
Tabela 6.4	– Potência e corrente de curto-circuito do sistema-teste 107 barras	215
Tabela 6.5	– Contribuição das correntes de curto-circuito para a barra de Marimondo 500kV ...	218
Tabela 6.6	– Impedâncias de curto-circuito do sistema-teste 107 barras	221
Tabela 7.1	– Informações necessárias para simulação	232
Tabela 7.2	– Exemplo de grandezas monitoradas	233
Tabela 7.3	– Lista de contingências	235
Tabela 7.4	– Esquema de corte de carga	247
Tabela 7.5	– Montante de corte da situação-2A	247
Tabela 7.6	– Locais e montantes de capacitores	251
Tabela 7.7	– Lista de simulações	260
Tabela 8.1	– Autovalores do sistema-teste de 9 barras sem controlador	275
Tabela 8.2	– Autovalores do sistema-teste de 9 barras após inclusão do RT	275

Tabela 8.3 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RT e amortecimento de 0,1	277
Tabela 8.4 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RT e amortecimento de 0,2	277
Tabela 8.5 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RT e amortecimento de 0,3	278
Tabela 8.6 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RT após inclusão do RV	278
Tabela 8.7 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RT, RV e ESP	280
Tabela 8.8 – Modos de oscilação eletromecânicos	282
Tabela 8.9 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 1	283
Tabela 8.10 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 3	284
Tabela 8.11 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 5	285
Tabela 8.12 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 7	286
Tabela 8.13 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 9	287
Tabela 8.14 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 11	288
Tabela A.1 – Autovalores do sistema-teste de 16 barras com RT e RV	297
Tabela A.2 – Resíduos do modo de oscilação 1	298
Tabela A.3 – Resíduos do modo de oscilação 3	299

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANAFAS	– Programa de Análise de Falhas Simultâneas
ANAREDE	– Programa de Análise de Redes Elétricas
ANATEM	– Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
ATP	– Alternative Transient Program
CA	– Corrente Alternada
CC	– Corrente Contínua
CDU	– Controlador Desenvolvido pelo Usuário
CEPEL	– Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRÉ	– Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques
CS	– Compensador Síncrono
ECE	– Esquema de Controle de Emergência
Efeito Ferranti	– Este efeito faz com que a tensão aumente ao longo da linha de transmissão. Na ausência de compensação reativa, a tensão de regime no final da linha de transmissão é sempre maior do que no início.
ESP	– Estabilizador de Sistema de Potência
FACTS	– Flexible AC Transmission Systems
FLUPOT	– Programa de Fluxo de Potência Ótimo
Hidraulicidade	– Relação entre as afluências no período observado e as afluências correspondentes a um mesmo período no ano médio
HVDC	– High Voltage Direct Current
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
LT	– Linha de Transmissão
LTC	– Load Tap Changer (transformador com mudança de tape em carga)
ONS	– Operador Nacional do Sistema Elétrico
PACDYN	– Programa de Análise Linear e Controle do Amortecimento de Oscilações em Sistema de Potência
RAT	– Regulador Automático de Tensão
RAV	– Regulador Automático de Velocidade
SCADA	– Supervisory Control and Data Acquisition
SE	– Subestação
SIN	– Sistema Interligado Nacional
SPB	– Sistema de Potência Brasileiro
TCSC	– Thyristor Controlled Series Compensator
tep	– Tonelada Equivalente de Petróleo
UHE	– Usina Hidrelétrica