

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**João Magalhães Dahl**

**Cálculo de Índices de Segurança em Sistemas  
de Energia Elétrica Baseado em Simulação  
no Domínio do Tempo**

**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. Eduardo José Siqueira Pires de Souza

Rio de Janeiro

Abril de 2006



**João Magalhães Dahl**

**Cálculo de Índices de Segurança em Sistemas  
de Energia Elétrica Baseado em Simulação  
no Domínio do Tempo**

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. Eduardo José Siqueira Pires de Souza**  
**Orientador**  
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. Paulo Gomes**  
ONS

**Prof. Eduardo Jorge Pires Pacheco**  
Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

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

Rio de Janeiro, 05 de abril de 2006

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

## João Magalhães Dahl

Profissional com 7 anos de atuação no setor elétrico. Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica – PUC-RIO/2000, trabalhou durante 2 anos na Eletrobrás no Departamento de Distribuição de Energia. Há 5 anos trabalha no ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico na Diretoria de Administração dos Serviços da Transmissão. De 2001 a 2005 realizando estudos de planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional (Plano de Ampliações e Reforços da Rede Básica) e atualmente trabalha na gestão de contratos de uso e conexão das instalações de transmissão.

### Ficha Catalográfica

Dahl, João Magalhães

Cálculo de índices de segurança em sistemas de energia elétrica baseado em simulação no domínio do tempo / João Magalhães Dahl ; orientador: Eduardo José Siqueira Pires de Souza . – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

109 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade transitória. 3. Avaliação da segurança dinâmica. 4. Classificação de contingências. 5. Índices de segurança. 6. Simulação no domínio do tempo. I. Souza, Eduardo José Siqueira Pires de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

A Deus, pela generosidade.

Ao orientador Professor Eduardo José Siqueira Pires de Souza, pelos ensinamentos para a realização deste trabalho.

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

À Mariana Abreu, pelo amor e compreensão durante este período.

À Leda Spinardi e Nina Spinardi, pelo carinho.

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

A todos os professores e funcionários do Departamento, pela ajuda.

Para meus pais, Gustavo Dahl e Ana Maria Portinho Magalhães  
Com todo amor.

## Resumo

Dahl, João Magalhães; Pires de Souza, Eduardo José Siqueira (Orientador). **Cálculo de Índices de Segurança em Sistemas de Energia Elétrica Baseado em Simulação no Domínio do Tempo**. Rio de Janeiro, 2006. 109p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os sistemas de energia elétrica estão operando atualmente próximos dos limites de estabilidade, comprometendo a segurança. Este fato tem sido evidenciado por diversos “blackouts” no mundo inteiro. A avaliação da segurança dinâmica torna-se, então, fundamental. O objetivo é a busca de um método rápido e, sobretudo, confiável, para analisar o comportamento dinâmico de um sistema de energia elétrica. Esta dissertação trata, portanto, do problema da avaliação da segurança dinâmica de sistemas de energia elétrica. A avaliação é realizada através da determinação das margens de estabilidade, utilizando os resultados de simulações no domínio do tempo, que fornece informações qualitativas a respeito da estabilidade na primeira oscilação. O grupo de geradores severamente perturbados é determinado e a margem de estabilidade de cada um deles é calculada. O gerador que apresentar a menor margem determina a margem de estabilidade do sistema. Quando a margem de estabilidade assume valor nulo, o tempo crítico de eliminação da falta é obtido. Estes resultados são comparados com aqueles determinados pelo método de tentativa e erro, utilizando um programa convencional de estabilidade transitória. Desta forma, as contingências são classificadas em função dos tempos críticos de eliminação de falta, de acordo com o nível de severidade. Essa classificação permite reduzir o conjunto de contingências a ser estudado. A contribuição deste trabalho é mostrar que o critério baseado na aceleração imediatamente após a eliminação da falta é mais eficaz que aquele baseado na aceleração imediatamente após a ocorrência da falta para a indicação do grupo de geradores severamente perturbados.

## Palavras-chave

Estabilidade Transitória, Avaliação da Segurança Dinâmica, Classificação de Contingências, Índices de Segurança, Simulação no Domínio do Tempo.

## Abstract

Dahl, João Magalhães; Pires de Souza, Eduardo José Siqueira (Advisor). **Calculation of Security Indexes in Power Systems Based on Time Domain Simulation**. Rio de Janeiro, 2006. 109p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Power systems have been operating nowadays near to the stability limits putting security under risk. This is one of the reasons why the dynamic security assessment is a fundamental tool to avoid the occurrence of blackouts in the whole world. The goal is a reliable and fast way to evaluate the dynamic behavior of a power system. This dissertation deals with the problem of dynamic security assessment of power systems. The evaluation is performed based on stability margins calculated from time domain simulation results, providing qualitative information about the first swing stability. The group of severely disturbed machines is defined and the stability margins are determined. The machine with the lowest margin determines the stability margin of the system. When the system margin approaches the zero value, the critical clearing time is obtained. These outcomes are compared with that ones determined by trial and error method using a conventional transient stability program. Having done that, a contingency ranking is defined according to the critical clearing time. The ranking minimizes the number of contingencies that have to be studied. This dissertation shows that the criterion to define the group of severely disturbed machines based on the machine accelerations at the instant immediately after the fault clearing time is more efficient than that one based on the machine accelerations at the instant immediately after the fault occurrence.

## Keywords

Transient Stability, Dynamic Security Assessment, Contingency Ranking, Security Indexes, Time Domain Simulation.

# Sumário

1. Introdução	16
1.1. Considerações Gerais	16
1.2. Desenvolvimento Histórico	18
1.3. Objetivo de Dissertação	19
1.4. Estrutura da Dissertação	20
2. Avaliação da Segurança Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica: Teoria	21
2.1. Introdução	21
2.2. Estabilidade Transitória do Sistema Máquina - Barra infinita	22
2.2.1. Critério das Áreas Iguais	23
2.3. Estabilidade Transitória de um Sistema Multimáquina	25
2.4. Equação de Oscilação de um Gerador - Formulação em Relação ao Centro de Inércia do Sistema	26
2.5. Método para Avaliação da Estabilidade Transitória na Primeira Oscilação	32
2.5.1. Margens de Estabilidade de uma Máquina	33
2.5.2. Interpretação da Margem de Estabilidade Através da Curva Potência - Ângulo	34
2.5.3. Determinação da Margem de Estabilidade em um Sistema Multimáquina	35
2.5.3.1. Identificação do Conjunto de Máquinas Severamente Perturbadas	35
2.5.3.2. Margem de Estabilidade do Sistema	36
2.5.3.3. Determinação dos Tempos Críticos de Eliminação da Falta	37
3. Avaliação da Segurança Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica: Resultados	39
3.1. Introdução	39
3.2. Análise de Desempenho do Método nos Sistemas Avaliados	40
3.2.1. Sistema com Duas Máquinas e Barra Infinita	41
3.2.2. Sistema Cigré	46
3.2.3. Sistema New England	78
3.3. Conclusões	98
4. Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	100
5. Referências bibliográficas	102
Apêndice 1: Dados do Sistema com Duas Máquinas e Barra Infinita.	104
Apêndice 2: Dados do Sistema Cigré	105
Apêndice 3: Dados do Sistema New England	107

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resumo da estabilidade na primeira oscilação	33
Tabela 3.1 – Aceleração dos geradores em $t_0^+$ , para diversos tempos de eliminação da falta	34
Tabela 3.2 – Margens de estabilidade dos geradores 1 e 2 para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-5, para diversos tempos de eliminação da falta	43
Tabela 3.3 – Margens de estabilidade dos geradores 1 e 2 para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado com a remoção do circuito 1 da LT 3-5, para diversos tempos de eliminação de falta	45
Tabela 3.4 – Comparação dos tempos críticos de eliminação da falta para diversas contingências	46
Tabela 3.5 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	48
Tabela 3.6 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	49
Tabela 3.7 – Ângulos dos geradores 1,4 e 6 para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 354 ms	51
Tabela 3.8 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3	53
Tabela 3.9 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3, para diversos tempos de eliminação da falta	53
Tabela 3.10 – Tempos críticos para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3, para diversos passos de integração	56
Tabela 3.11 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 2	57
Tabela 3.12 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 2, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	57
Tabela 3.13 – Grupo de geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 3	59
Tabela 3.14 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	60
Tabela 3.15 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto circuito trifásico na barra 3, eliminado com a remoção da LT 1-3, para diversos tempos de eliminação da falta	61

Tabela 3.16 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 4	62
Tabela 3.17 – Margens de estabilidade de todos os geradores para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	63
Tabela 3.18 – Margens de estabilidade de todos os geradores para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6, para diversos tempos de eliminação da falta	63
Tabela 3.19 – Ângulos dos geradores para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6, para um tempo de eliminação da falta de 451 ms	66
Tabela 3.20 – Grupo de geradores severamente perturbados para curtos-circuitos trifásicos nas barras 5 e 6, sem a remoção de linha de transmissão	67
Tabela 3.21 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	67
Tabela 3.22 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	68
Tabela 3.23 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	71
Tabela 3.24 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	71
Tabela 3.25 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 8	73
Tabela 3.26 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 8, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	74
Tabela 3.27 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 8, eliminado com a remoção da LT 8-6, para diversos tempos de eliminação da falta	75
Tabela 3.28 – Comparação entre os tempos críticos de eliminação de falta para diversas contingências	77
Tabela 3.29 – Grupo de geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	79
Tabela 3.30 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	79
Tabela 3.31 – Grupo de geradores severamente perturbados para os curtos-circuitos trifásicos na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11	81

Tabela 3.32 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11, para diversos tempos de eliminação da falta	82
Tabela 3.33 – Grupo de geradores severamente perturbados para os curtos-circuitos trifásicos nas barras 19 e 20, eliminados sem a remoção de linha de transmissão	84
Tabela 3.34 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados e dos geradores que perdem a estabilidade, para um curto-circuito trifásico na barra 19, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	85
Tabela 3.35 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 20, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	86
Tabela 3.36 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 23	89
Tabela 3.37 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	89
Tabela 3.38 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado com a remoção da LT 22-23, para diversos tempos de eliminação da falta	90
Tabela 3.39 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 29	93
Tabela 3.40 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta	93
Tabela 3.41 – Margens de estabilidade do gerador severamente perturbado, para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado com a remoção da LT 29-28	94
Tabela 3.42 – Comparação entre os tempos críticos de eliminação de falta para diversas contingências	98

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Procedimento para determinação dos tempos críticos de eliminação da falta	22
Figura 2.2 – Sistema máquina – barra infinita	23
Figura 2.3 – Curva potência – ângulo de um gerador ligado a uma barra infinita	24
Figura 2.4 – Sistema multimáquina	26
Figura 2.5 – Margem de estabilidade interpretada através da curva potência - ângulo de um gerador	34
Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema de potência composto por dois geradores e uma barra infinita	41
Figura 3.2 – Margens de estabilidade dos geradores, para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-5	43
Figura 3.3 – Margens de estabilidade do sistema, para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com e sem a remoção da LT 4-5	44
Figura 3.4 – Margens de estabilidade dos geradores 1 e 2 para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado com a remoção do circuito 1 da LT 3-5	45
Figura 3.5 – Diagrama unifilar do sistema de potência CIGRÉ	47
Figura 3.6 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	50
Figura 3.7 – Ângulos dos geradores 1,4 e 6, para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 355 ms, obtidos com o ANATEM [18]	52
Figura 3.8 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3	54
Figura 3.9 – Margem de estabilidade do sistema, para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3	55
Figura 3.10 – Ângulos dos geradores 1,2,4,5 e 6, para um curto-circuito trifásico na barra 1, com a remoção da LT 1-3, para um tempo de eliminação da falta de 344 ms, obtidos com o ANATEM [18]	56
Figura 3.11 – Margens de estabilidade para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3, para diversos passos de integração	57
Figura 3.12 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 2, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	58
Figura 3.13 – Ângulos dos geradores 1,2,3 e 4, para um curto-circuito trifásico na barra 2, sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 410 ms, obtidos com o ANATEM [18]	59
Figura 3.14 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	60

Figura 3.15 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado com a remoção da LT 1-3	61
Figura 3.16 – Margens de estabilidade dos geradores, para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	64
Figura 3.17 – Margens de estabilidade de todos os geradores do sistema para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6	64
Figura 3.18 – Ângulos dos geradores para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6, para um tempo de eliminação da falta de 460 ms, obtidos com o ANATEM [18]	66
Figura 3.19 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	68
Figura 3.20 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	69
Figura 3.21 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 354 ms, obtidos com o ANATEM [18]	70
Figura 3.22 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	72
Figura 3.23 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 342 ms, obtidos com o ANATEM [18]	72
Figura 3.24 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 8, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	74
Figura 3.25 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 8, eliminado com a remoção da LT 8-6	75
Figura 3.26 – Diagrama unifilar do sistema New England	78
Figura 3.27 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	79
Figura 3.28 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 237 ms, obtidos com o ANATEM [18]	80
Figura 3.29 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11	82
Figura 3.30 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11, para um tempo de eliminação da falta de 240 ms, obtidos com o ANATEM [18]	83

Figura 3.31 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11, para um tempo de eliminação da falta de 245 ms, obtidos com o ANATEM [18]	83
Figura 3.32 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados e dos geradores que perdem a estabilidade, para um curto-circuito trifásico na barra 19, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	85
Figura 3.33 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 20, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	86
Figura 3.34 – Ângulos dos geradores severamente perturbados e dos geradores que perdem a estabilidade, para um curto-circuito trifásico na barra 19, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 200 ms, obtidos com o ANATEM [18]	87
Figura 3.35 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 20, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 205 ms, obtidos com o ANATEM [18]	88
Figura 3.36 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 23 sem remoção de linha de transmissão	89
Figura 3.37 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado com a remoção da LT 22-23	90
Figura 3.38 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 225 ms, obtidos com o ANATEM [18]	91
Figura 3.39 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado com a remoção da LT 23-22, para um tempo de eliminação da falta de 220 ms, obtidos com o ANATEM [18]	92
Figura 3.40 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado sem a remoção de linha de transmissão	94
Figura 3.41 – Margem de estabilidade do gerador severamente perturbado, para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado com a remoção da LT 29-28	95
Figura 3.42 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 135 ms, obtidos com o ANATEM [18]	96
Figura 3.43 – Ângulo dos geradores severamente perturbados, para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado com a remoção da LT 29-28, para um tempo de eliminação da falta de 50 ms, obtidos com o ANATEM [18]	97

## Abreviaturas e Siglas

$P_e$	Potência elétrica	24
$P_m$	Potência mecânica	24
$\delta$	Ângulo do gerador na referência síncrona	24
$\omega_s$	Velocidade angular síncrona	25
$\omega$	Velocidade angular	25
$E$	Tensão interna do gerador	26
$V$	Tensão terminal do gerador	26
$x'_d$	Reatância transitória	26
$Y_{ii}$	Admitância própria do gerador	27
$Y_{ij}$	Admitância equivalente entre geradores	27
$i$	Indicador de número de gerador	27
$j$	Indicador de número de gerador	27
$I$	Corrente do gerador	28
$B_{ij}$	Susceptância equivalente entre geradores	28
$G_{ii}$	Condutância própria do gerador	28
$G_{ij}$	Condutância equivalente entre geradores	28
$\theta$	Ângulo do gerador em relação ao eixo estacionário	29
$M$	Constante de inércia do gerador	29
COI	Centro de inércia do sistema	30
$P_a$	Potência acelerante	33
$t_{cl}$	Instante de eliminação da falta	33
$t_p$	Instante de tempo em que a velocidade do gerador troca de sinal	33
ME	Margem de estabilidade	34
$P_d$	Potência desacelerante	34
$t_{cr}$	Tempo crítico de eliminação da falta	34
$a$	Aceleração do gerador	36
$\sigma$	Tolerância	36
$t_o$	Instante de ocorrência da falta	39