

TESE DE DOUTORADO

SEGURANÇA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA EM REGIME
TRANSITÓRIO CONSIDERANDO INCERTEZAS

Marcelos Groetaers dos Santos

Dezembro/2009

MARCELOS GROETAERS DOS SANTOS

SEGURANÇA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA EM REGIME
TRANSITÓRIO CONSIDERANDO INCERTEZAS

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Computação da Universidade Federal
Fluminense. Área de Concentração: Aplicações.
Sub-área: Computação em Potência.

Orientadores: Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.

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

Niterói, RJ – Brasil

2009

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

S337 Santos, Marcelos Groetaers dos.
Segurança de sistemas de potência em regime transitório
considerando incertezas / Marcelos Groetaers dos Santos. – Niterói,
RJ : [s.n.], 2009.
301 f.

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

Tese (Doutor em Ciências) - Universidade Federal Fluminense,
2009.

1. Sistema elétrico de potência. 2. Sistema de energia elétrica. 3.
Estabilidade (Engenharia elétrica). 4. Confiabilidade (Engenharia).
I. Título.

CDD 621.3191

MARCELOS GROETAERS DOS SANTOS

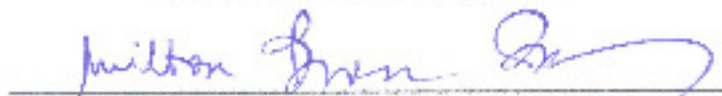
SEGURANÇA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA EM REGIME TRANSITÓRIO
CONSIDERANDO INCERTEZAS

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

Aprovada em 16 de Dezembro de 2009.

BANCA EXAMINADORA

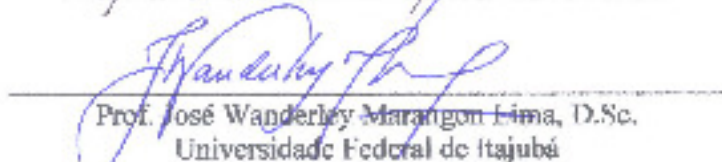

Prof. Marcus Theodor Schilling, D.Sc. - Orientador
Universidade Federal Fluminense


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


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


Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Ricardo Bernardo Prada, Ph.D.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro


Prof. José Wanderley Marangon Lima, D.Sc.
Universidade Federal de Itajubá

Este trabalho é dedicado aos meus pais
João Baptista e Pedrina, à minha esposa Marcia,
a minhas filhas Carolina e Renata.
Sem seu apoio jamais
teria chegado até aqui.
A vocês meu reconhecimento e gratidão.

AGRADECIMENTOS

A meus pais João e Pedrina, minha esposa Marcia e minhas filhas Carolina e Renata, pela compreensão e carinho mostrados durante todo o tempo de nosso convívio.

Meu especial agradecimento aos orientadores deste trabalho, Prof. Marcus Theodor Schilling e Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, cujas dedicações, paciência e apoio demonstrados em vários momentos, além das palavras encorajadoras e companheirismo, permitiram a elaboração desta Tese.

Ao Engº Saulo José Nascimento Cisneiros, ao Dr. Paulo Gomes e ao Dr. Roberto Nogueira Fontoura Filho, meus antigos e atual gerentes, por me indicarem para curso de Doutorado e pelo continuado apoio e incentivo. Também ao diretor geral do ONS, Engº Hermes Jorge Chipp e ao diretor do ONS, Engº Darico Pedro Livi, ao assessor Engº István Gárdos e ao assistente Engº João Severino Filho, pelo apoio e interesse demonstrados durante o trabalho.

Aos colegas, Dr. Jorge Luiz de Araújo Jardim (Nexant), Engº Flávio Antônio Farina Pazo Blanco (ONS), Engº Paulo Abreu Leitão de Almeida (ONS), Engº José Antônio Oliveira Ribeiro Gonçalves (ONS), Engº Carlos Alberto da Silva Neto (ONS), Engº Maurício Campos Passaro (ONS) e Dr. Zulmar Machado Soares Júnior (ONS), pelo apoio técnico e profissional ao longo da preparação desta Tese.

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, pela oportunidade de cursar o Doutorado. Aos professores do curso de Doutorado do IC-UFF, pelo conhecimento transmitido. Aos amigos de toda a vida que me ajudaram e incentivaram a percorrer esse longo e atribulado caminho. A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente à equipe de coordenação (ONS e IAG/PUC-Rio) e aos colegas do CAISE 2009 pelo incentivo em horas difíceis.

Finalmente, à Dra. Amélia Yukie Takahata, cuja Tese de Doutorado serviu de base e inspiração para a elaboração desta.

Nota: A elaboração deste trabalho contou com o auxílio indireto do CNPq, FAPERJ (PRONEX) e INERGE (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia Elétrica).

Resumo da Tese apresentada ao IC/UFF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

SEGURANÇA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA EM REGIME TRANSITÓRIO CONSIDERANDO INCERTEZAS

Marcelos Groetaers dos Santos

Dezembro / 2009

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

Esta Tese apresenta uma nova metodologia para a análise dinâmica transitória de sistemas de potência, submetidos a diferentes tipos de incertezas representadas probabilisticamente. Os fenômenos dinâmicos de natureza eletromecânica, envolvendo modelos completos de geradores e reguladores de tensão, são tratados por um modelo de máquina equivalente singular (“SIME – single machine equivalent”), conjugando benefícios de precisão e rapidez de cálculo. As incertezas do sistema são distingüidas em duas classes (e.g. cenários e distúrbios), ambas tratadas por enumeração. As incertezas do tipo *cenário* estão associadas a configurações topológicas degradadas, patamares de carga e modos de intercâmbio entre áreas. As incertezas do tipo *distúrbio* representam defeitos de grande impacto (e.g. curtos-circuitos), cujas características (e.g. tipo, local, duração) são modeladas probabilisticamente. São admitidas análises abrangendo incertezas apenas em cenários, apenas em distúrbios e o caso *híbrido*, combinando incertezas em cenários e distúrbios, simultaneamente. Um modelo probabilístico simplificado de medida corretiva, associado ao religamento rápido do circuito defeituoso, também é considerado. A metodologia proposta permite a obtenção de uma coleção de novos indicadores probabilísticos de confiabilidade, associados ao modo de falha de segurança de sistemas de potência. O aplicativo computacional desenvolvido (FORTRAN 95) foi submetido a uma ampla bateria de testes usando sistemas de 4, 9 e 39 barras. *A principal contribuição da Tese reside na conjugação de uma representação dinâmica acurada de sistemas de potência, via SIME, com um inédito tratamento desacoplado de incertezas que têm efetiva influência na segurança do sistema.* A nova metodologia tem grande potencial de uso em ambiente de operação de curto prazo e também no planejamento da expansão.

Palavras-chave: *confiabilidade, dinâmica, estabilidade, incerteza, probabilidade, risco, segurança, sistema de potência, transitório.*

Abstract of Thesis presented to IC/UFF as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.).

POWER SYSTEMS TRANSIENT SECURITY CONSIDERING UNCERTAINTIES

Marcelos Groetaers dos Santos

December / 2009

Supervisors: Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.
Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc.

This Thesis presents a new methodology for transient dynamic analysis of power systems, submitted to different types of uncertainties represented probabilistically. The dynamic phenomena of electromechanical nature, involving advanced models of generators and automatic voltage regulators, are dealt with by a model based on a single machine equivalent (“SIME”), conjugating benefits of precision and speed of calculation. The uncertainties of the system are distinguished in two classes (e.g scenarios and disturbances), both treated by enumeration. The uncertainties of the type *scenario* are associated to degraded topological configurations, load levels and modes of interchange between areas. The uncertainties of the type *disturbance* represent faults of great impact (e.g short-circuits), whose characteristics (e.g type, location, duration) are probabilistically modeled. It is possible to perform analyses enclosing uncertainties only in scenarios, only in disturbances and the *hybrid* case, combining uncertainties in scenarios and disturbances, simultaneously. A simplified probabilistic model of corrective measure, associated to the fast reclosing of the defective circuit is also considered. The methodology proposed allows the attainment of a collection of new probabilistic indices of reliability, associated to the failure mode of security of power systems. The computational program developed (FORTRAN 95) was submitted to a comprehensive set of tests using systems of 4, 9 and 39 buses. *The main contribution of the Thesis is the conjunction of an accurate dynamic representation of power system, via SIME, with a unique decoupled treatment of uncertainties that have effective influence in the security of the system.* The new methodology also has great potential of use in the short term operation environment and in expansion planning.

Keywords: *dynamics, power systems, probability, reliability, risk, security, stability, transient, uncertainty.*

Sumário

Capítulo I	Introdução	1
I.1	Considerações Preliminares	1
I.2	Objetivo da Tese	3
I.3	Estrutura	3
I.4	Publicações.....	5
Capítulo II	Revisão Bibliográfica	7
II.1	Introdução	7
II.2	Premissas da Pesquisa	7
II.3	Revisão Bibliográfica.....	8
II.4	Sumário	38
Capítulo III	Tratamento de Incertezas sob Regime Transitório	39
III.1	Introdução	39
III.2	Discriminando Incertezas.....	40
III.2.1	Incetezas como Processos Estocásticos	40
III.2.2	Modelagem de Incertezas Estacionárias	41
III.2.3	Combinação de Incertezas para Estudos de Adequação e Segurança	48
III.2.4	O Problema da Geração de Estados Inviáveis.....	49
III.3	Avaliação da Segurança de Estados Probabilísticos	49
III.4	Índices de Segurança Probabilística.....	52
III.4.1	Probabilidade de Ocorrência de Instabilidade – <i>POI</i>	52
III.4.2	Probabilidade de Ocorrência de Estabilidade – <i>POE</i>	53
III.4.3	Probabilidade de Margem Insuficiente – <i>PMI</i>	54
III.4.4	Expectância de Margem Negativa – <i>EMN</i>	54
III.4.5	Expectância de Probabilidade Ocorrência de Instabilidade – <i>EPI</i>	55
III.4.6	Índice de Estabilidade Aparente – <i>IEA</i>	56
III.5	Fluxograma Conceitual da Metodologia Proposta.....	57
III.6	Sumário	62
Capítulo IV	Avaliação da Segurança – O Método da Máquina Equivalente (SIME)	63
IV.1	Introdução	63
IV.2	O Método SIME.....	64
IV.2.1	Análise de Segurança Dinâmica Determinística via SIME.....	65

	IV.2.2	Formulação Geral do Método SIME.....	67
	IV.3	Exemplo	71
	IV.4	Considerações Sobre a Existência e Valor das Margens de Estabilidade	74
	IV.5	Sumário	75
Capítulo V		Protótipo Computacional	77
	V.1	Introdução	77
	V.2	Estrutura Lógica do Protótipo Computacional.....	77
	V.2.1	Tratamento Computacional Apenas para Incertezas em Cenários	80
	V.2.2	Tratamento Computacional Apenas para Incertezas do Tipo Distúrbio.....	81
	V.2.3	Tratamento Computacional para a Combinação de Incertezas em Cenários e Distúrbios (Evento Híbrido).....	82
	V.3	Fluxograma Detalhado	84
	V.3.1	Início do Processamento	84
	V.3.2	Leitura de Dados Para Processamento Estocástico.....	86
	V.3.3	Estudo de Cenários.....	89
	V.3.4	Estudo de Distúrbios	104
	V.3.5	Estudo de Cenários e Distúrbios (Casos Híbridos)	109
	V.3.6	Avaliação Dinâmica do Estado Selecionado.....	109
	V.3.7	Cálculo dos Índices Probabilísticos e Tabulação de Resultados.....	115
	V.4	Sumário	116
Capítulo VI		Aplicação e Resultados	119
	VI.1	Introdução	119
	VI.2	Convenções e Premissas Gerais	119
	VI.3	Aspectos de Modelagem	120
	VI.4	Aplicações Didáticas a um Sistema-teste de 4 Barras	123
	VI.4.1	Estudos com Cenário Determinístico e Variação Singular Probabilística nos Distúrbios	123
	VI.4.2	Estudos com Distúrbios Determinísticos e Variação Singular Probabilística nos Cenários.....	150
	VI.4.3	Estudos com Cenário Determinístico e Variações Múltiplas Probabilísticas dos Distúrbios	156

VI.4.4	Estudos com Distúrbio Determinístico e Variações Múltiplas Probabilísticas de Cenários.....	161
VI.4.5	Estudo com Modelo Probabilístico Híbrido.....	164
VI.4.6	Efeito da Incerteza em Medida Corretiva	167
VI.5	Aplicações ao Sistema-teste de 9 Barras.....	172
VI.6	Aplicações ao Sistema-teste de 39 Barras.....	185
VI.7	Desempenho Computacional	217
VI.8	Sumário	218
Capítulo VII	Conclusões	219
VII.1	Introdução	219
VII.2	Principais Contribuições	220
VII.3	Sugestões para Aperfeiçoamentos.....	222
Referências		227
Anexo A	Dados Elétricos dos Sistemas-Testes	241
A.1	Introdução	241
A.2	Sistema-Teste de 4 Barras.....	242
A.2.1	Sistema-teste de 4 Barras: Dados de Linhas	243
A.2.2	Sistema-teste de 4 Barras: Dados de Geradores	243
A.2.3	Sistema-teste de 4 Barras: Solução do Fluxo de Potência	243
A.3	Sistema-Teste de 9 Barras.....	250
A.3.1	Sistema-teste de 9 Barras: Dados de Linhas	250
A.3.2	Sistema-teste de 9 Barras: Dados de Geradores	251
A.3.3	Sistema-teste de 9 Barras: Solução do Fluxo de Potência	251
A.3.4	Sistema-teste de 9 Barras: Probabilidades de Ocorrência e Impedâncias de Defeito	258
A.4	Sistema-Teste de 39 Barras.....	258
A.4.1	Sistema-teste de 39 Barras: Dados de Linhas	259
A.4.2	Sistema-teste de 39 Barras: Dados de Geradores	261
A.4.3	Sistema-teste de 39 Barras: Solução do Fluxo de Potência	261
A.5	Dados de Controles dos Geradores	276
Anexo B	Manual de Utilização do Programa ASTP Versão 1.0 (Análise de Segurança Transitória Probabilística)	279
B.1	Introdução	279
B.2	Manual de Utilização	279

B.2.1	Dados de Entrada	279
B.3	Funções de processamento executadas pelo programa	280
B.4	Função de Fluxo de Potência	280
B.4.1	Título do Estudo	281
B.4.2	Dados de Linhas	282
B.4.3	Dados de Barras	282
B.4.4	Dados de Áreas	284
B.4.5	Execução do Caso de Fluxo de Potência.....	284
B.5	Função de Estabilidade Eletromecânica.....	284
B.5.1	Dados do Fluxo de Potência Convergado (ponto de operação).....	285
B.5.2	Dados Dinâmicos	285
B.6	Função de Avaliação Probabilística	290
B.7	Exemplos de Arquivos de Dados	298

Anexo C

Módulo Executável do Programa ASTP – Avaliação de Segurança Transitória Probabilística e Arquivos de Interesse

301

C.1	Conteúdo do CD de Instalação.....	301
C.2	Módulo Executável	301
C.3	Arquivos de Interesse	301

* * *

Lista de Figuras

Figura III.1	– Tipologia de incertezas	43
Figura III.2	– Intensidades de transição para cenários e distúrbios	46
Figura III.2.1	– Composição das expectativas de margens negativas	56
Figura III.3	– Fluxograma conceitual da metodologia proposta	58
Figura III.4	– Modelo para tratamento desacoplado de incertezas	60
Figura IV.1	– Trajetória típica de um OMIB e grandezas associadas	65
Figura IV.2	– SIME - Curto-circuito 3F na barra 9 eliminado em 100 ms pela abertura do circuito [4]	71
Figura IV.3	– SIME: Curto-circuito 3F na barra 9 eliminado em 150 ms pela abertura do circuito [4]	72
Figura IV.4	– Curto-circuito 3F na barra 9 eliminado em 300 ms pela abertura do circuito [4] – instabilidade do Tipo 2	73
Figura V.1	– Fluxograma para opções de composição das incertezas	78
Figura V.2	– Sequência básica de distúrbio sugerida	81
Figura V.3	– Fluxograma para direcionamento inicial do processamento	85
Figura V.4	– Fluxograma para leitura de dados para processamento estocástico	87
Figura V.5	– Fluxograma para configuração do estudo de cenários	89
Figura V.6	– Fluxograma para tratamento de incertezas em topologias	91
Figura V.7	– Fluxograma para tratamento de incertezas em patamares de carga	93
Figura V.8	– Fluxograma para tratamento de incertezas em modos de intercâmbio	95
Figura V.9	– Fluxograma para tratamento de incertezas em topologias e patamares de carga	96
Figura V.10	– Fluxograma para tratamento de incertezas em topologias e modos de intercâmbio	98
Figura V.11	– Fluxograma para tratamento de incertezas em patamares de carga e modos de intercâmbio	101
Figura V.12	– Fluxograma para tratamento de incertezas em topologias, patamares de carga e modos de intercâmbio	103
Figura V.13	– Fluxograma para configuração do estudo de distúrbios	104
Figura V.14	– Fluxograma para tratamento de incertezas em distúrbios	107
Figura V.15	– Fluxograma geral da avaliação dinâmica	110
Figura V.16	– Processamento do equivalente crítico e diagnóstico da simulação	114
Figura V.17	– Fluxograma para cálculo dos índices probabilísticos, tabulação e impressão de resultados	115
Figura VI.1	– Modelo de distúrbios	122
Figura VI.2	– Caso 1: Ângulos dos rotores - defeito 1F com duração de 70 ms	128
Figura VI.3	– Caso 1: OMIB – representações típicas - defeito 1F com duração de 70 ms -	128
Figura VI.4	– (a) δ_r – Ângulo de retorno, curva $\delta \times t$ (b) δ_r – Ângulo de retorno, curva $P \times \delta$	129
Figura VI.5	– Caso 1: Ângulos dos rotores - defeito 3F com duração de 70 ms	129
Figura VI.6	– Caso 1: OMIB - defeito 3F com duração de 70 ms	131

Figura VI.7	– Caso 2: OMIB – condições de estabilidade para defeito 3F com duração de 100 ms	135
Figura VI.8	– Caso 2: Cabeçalho do arquivo de resultados da avaliação dos estados probabilísticos	136
Figura VI.9	– Caso 2: Corpo do arquivo de resultados da avaliação dos estados probabilísticos	137
Figura VI.10	– Caso 4: Tempo crítico para defeito 3F em d_1	146
Figura VI.11	– Caso 4: Tempo crítico para defeito 3F em d_2	147
Figura VI.12	– Caso 4: Tempo crítico para defeito 3F em d_3	147
Figura VI.13	– Probabilidades acumuladas	148
Figura VI.14	– Modelo probabilístico das proteções	149
Figura VI.15	– Seqüência básica de eventos para simulação de estabilidade	169
Figura VI.16	– Caso 14: Comportamento dinâmico dos casos instáveis. - estados topológicos 5 e 21 -	199
Figura VI.17	– Caso 16(a): Sensibilidade dos índices de segurança com relação a variação da carga.	210
Figura VI.18	– Caso 17(a): Índices de segurança para os reforços concorrentes.	215
Figura VI.19	– Caso 17(b): Índices de segurança para os desligamentos concorrentes.	216
Figura A.1	– Sistema-teste de 4 barras	242
Figura A.2	– Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 4 barras	244
Figura A.3	– Sistema-teste de 9 barras	250
Figura A.4	– Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 9 barras	252
Figura A.5	– Sistema-teste de 39 barras	259
Figura A.6	– Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras	262
Figura A.7	– Regulador de tensão com excitatriz rotativa	276
Figura B.1	– Arquivo de dados de fluxo de potência (.dat)	298
Figura B.2	– Arquivo de dados de estabilidade (.stb)	299
Figura B.3	– Arquivo de dados probabilísticos (.prb)	299
Figura B.3	– Arquivo de dados probabilísticos (.prb) – final -	300

* * *

Lista de Tabelas e Quadros

Tabela III.1	–Espaços probabilísticos de estados: adequação vs. segurança	42
Tabela III.2	–Disponibilidade de dados para estudos de adequação e segurança	45
Tabela III.3	–Comparando combinações de incertezas para adequação e segurança	48
Tabela III.4	–Medidas corretivas e funções objetivo para segurança sistêmica	51
Tabela III.5	–Natureza de índices probabilísticos para análise da adequação e segurança	52
Tabela V.2	–Processos componentes dos fluxos de processamento de cenários	90
Tabela V.3	–Tratamento da estatística de defeitos e das tempos de eliminação	105
Quadro VI.1	–Resumo do relatório da simulação convencional Caso 1: defeito 1F com duração de 70 ms	126
Quadro VI.2	–Resumo do relatório da simulação convencional Caso 1: defeito 3F com duração de 70 ms	130
Tabela VI.1	–OMIB – comparação entre defeitos 1F e 3F - duração 70 ms -	131
Tabela VI.2	–OMIB – comparação entre defeitos 1F e 3F - duração 100 ms -	134
Quadro VI.3	–Resumo do estudo e tabela de contabilização de índices Caso 2: defeito 3F com Duração de 100 ms	138
Tabela VI.3	–Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – - Caso 2 - (duração 100 ms)	139
Tabela VI.4	–Índices de segurança do sistema - Caso 2 - (duração 100 ms)	139
Tabela VI.5	–Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 3F – - Caso 3- locais d_1 (70 ms) e d_3 (150 ms)	142
Tabela VI.6	–Índices de segurança do sistema – Caso 3 –	142
Tabela VI.6.1	–Impacto da variação da incerteza do distúrbio	143
Tabela VI.7	–Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 3F – - Caso 3 (a) - locais d_1 (70 ms) e d_3 (150 ms)	144
Tabela VI.8	–Índices de segurança do sistema – Caso 3 (a) –	144
Tabela VI.9	–Caso 4: Tempos críticos para eliminação dos defeitos e probabilidades de ocorrência	147
Tabela VI.10	–Caso 5: Margens de estabilidade	151
Tabela VI.11	–Índices de segurança do sistema – Caso 5: incertezas em topologia – Índices de Segurança (globais)	152
Tabela VI.12	–Caso 6: Margens de estabilidade	153
Tabela VI.13	–Índices de segurança do sistema – Caso 6: incertezas em patamar de carga –	154
Tabela VI.14	–Caso 7: Margens de estabilidade	155
Tabela VI.15	–Índices de segurança do sistema – Caso 7: incertezas em modo de intercâmbio –	156
Tabela VI.16	–Variação do número de estados segundo o grau de detalhamento da representação probabilística dos distúrbios	157
Tabela VI.17	–Índices de segurança do sistema. Caso 8(a): incertezas em tipo e local do defeito- 16 estados -	158

Tabela VI.18	–Índices de Segurança do Sistema. Caso 8(b): incertezas em tipo e local do defeito - 32 estados -	158
Tabela VI.19	–Índices de segurança do sistema. Caso 8(c): incertezas em tipo e local do defeito - 48 estados -	159
Quadro VI.4	–Resultados das avaliações dos modelos de 16, 32 e 48 estados Caso 8: incertezas em tipo e local do defeito	160
Tabela VI.20	–Probabilidades e margens de estabilidade - Caso 9: incertezas em patamar de carga e topologia -	163
Tabela VI.21	–Índices de Segurança do Sistema Caso 9: incertezas em patamar de carga e topologia	164
Tabela VI.22	–Estados enumerados para o espaço híbrido	166
Tabela VI.23	–Índices de Segurança do Sistema Caso 10: incertezas em distúrbios e cenários	167
Tabela VI.24	–Índices de segurança - Caso 11 – Idem Caso 3, com religamento	170
Tabela VI.25	–Índices de Segurança do Sistema– Comparação: Caso 11 e Caso 3	171
Tabela VI.26	–Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – para duração de defeito de 100 ms – sem RAT	173
Tabela VI.27	–Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – para duração de defeito de 100 ms – com RAT	174
Tabela VI.28	–Índices de segurança do sistema – Caso 12 – defeitos 1F e 3F em ambos os terminais de cada circuito, com durações iguais a 100 ms, sem religamento	174
Tabela VI.29	–Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – para duração de defeito de 100 ms – sem RAT – atuação do religamento	176
Tabela VI.30	–Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – para duração de defeito de 100 ms – com RAT – atuação do religamento	177
Tabela VI.31	–Índices de segurança do sistema – Caso 12(a) – defeitos 1F e 3F em ambos os terminais de cada circuito, com durações iguais a 100 ms – com religamento	178
Quadro VI.5	–Sensibilidade quanto à variação das probabilidades de sucesso e insucesso na atuação da medida corretiva. Caso 12(b): Defeitos 1F e 3F em ambos os terminais de cada circuito, com durações iguais a 100 ms - Sem regulador automático de tensão -	180
Quadro VI.6	–Sensibilidade quanto à variação das probabilidades de sucesso e insucesso na atuação da medida corretiva. Caso 12(b): Defeitos 1F e 3F em ambos os terminais de cada circuito, com durações iguais a 100 ms - Com regulador automático de tensão -	184
Tabela VI.33	–Desempenho estatístico no Brasil: linhas e transformadores	188
Tabela VI.34	–Dados estocásticos dos circuitos - Sistema de 39 barras -	189
Tabela VI.36	–Probabilidades e margens para os estados enumerados - Sistema de 39 barras -	192 192
Tabela VI.38	–Taxa de falha e tempo médio de reparo – topologias equiprováveis –	196 196
Tabela VI.39	–Estados topológicos e margens associadas - defeito 3F em [19]M, duração 80 ms - topologias equiprováveis (n-1)-	197

Tabela VI.40	–Estados topológicos e margens associadas - topologias com probabilidades oriundas das taxas de falha - defeito 3F em [19]M, duração 80 ms -	198
Tabela VI.41	–Comparação dos índices de segurança - topologias equiprováveis e oriundas das falhas nos circuitos -	200
Quadro VI.7	–Caso 15: Modos de intercâmbio para modelagem de cenários.	203
Tabela VI.42	–Probabilidades e margens para os estados enumerados - Modelagem híbrida de incertezas (distúrbios e cenários)	204
Tabela VI.43	–Comparação dos índices de segurança - Modelagem de distúrbios para cada cenário -	205
Tabela VI.44	–Comparação dos índices de segurança - Modelagem híbrida de distúrbios e cenários –	206
Tabela VI.45	–Despachos de geração e níveis de carga	207
Quadro VI.8	–Caso 16(a): Sensibilidade dos índices de segurança com relação a variação da carga.	209
Tabela A.1	–Dados de linhas	243
Tabela A.2	–Sistema de 4 barras: dados de geradores	243
Tabela A.3	–Sistema de 9 barras: dados de linhas e transformadores	251
Tabela A.4	–Sistema de 9 barras: dados de geradores	251
Tabela A.4.1	–Sistema de 9 barras: probabilidades de ocorrência de defeitos	258
Tabela A.4.2	–Sistema de 9 barras: impedâncias de defeito	258
Tabela A.5	–Sistema de 39 barras: dados de linhas e transformadores	260
Tabela A.6	–Sistema de 39 barras: dados de geradores	261
Tabela A.7	–Sistema de 4 barras: dados do regulador com excitatriz rotativa	276
Tabela A.8	–Sistema de 9 barras: dados do regulador com excitatriz rotativa	276
Tabela A.9	–Sistema de 39 barras: dados do regulador com excitatriz rotativa	277
Tabela B.1	–DCTS: Dados estocásticos de circuitos	293
Tabela B.2	–DMDG: Dados de geradores	295
Tabela B.3	–DRGT MD01: Dados de reguladores de tensão com excitatriz rotativa	296
Tabela B.4	–DRGT MD02: Dados de reguladores de tensão com excitatriz estática	297
Tabela B.5	–DCST: Dados de curvas de saturação para excitatrizes rotativas	297
Tabela B.6	–DEVT: Dados do evento determinístico	297

* * *

Lista de Abreviaturas e Símbolos

A_{ace}	– área acelerante
A_{des}	– área desacelerante
Anarede	– Análise de Redes Elétricas
ASTP	– Avaliação de Segurança Transitória Probabilística
B	– susceptância
d_1, d_2, d_3	– locais de ocorrência de defeitos
$dot2$	– produto interno entre as potências acelerantes e os ângulos dos rotores
EPI	– expectância de probabilidade de ocorrência de instabilidade
EPRI	– Electric Power Research Institute
EMN	– expectância de margem negativa
$\bar{E}(M^-)$	– expectância de margem negativa
E'_q	– tensão proporcional ao enlace de fluxo de eixo em quadratura
pE'_q	– derivada da tensão proporcional ao enlace de fluxo de eixo em quadratura
Hz	– hertz
IEA	– índice de estabilidade aparente
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV	– quilovolt
ℓ	– comprimento de uma LT
L	– carga
LT	– Linha de Transmissão
M	– coeficiente de inércia
M_C	– coeficiente de inércia das máquinas críticas
M_N	– coeficiente de inércia das máquinas não-críticas
MVA	– megavolt-ampère
Mvar	– megavolt-ampère reativo
MW	– megawatt
n	– número de elementos da rede elétrica; número de estados probabilísticos
n-1	– rede elétrica em contingência simples
n-2	– rede elétrica em contingência dupla
n_e	– número total de estados probabilísticos
N_{cen}	– número total de estados de cenários
N_{circ}	– número total de circuitos da rede elétrica
$N_d; n_d$	– número total de estados de tipos de defeitos
N_{dis}	– número total de estados de distúrbios
$N_l; n_l$	– número total de estados de localizações de defeitos
N_m	– número total de estados de modos de intercâmbio
N_p	– número total de estados de patamares de carga
N_t	– número total de estados de topologias
$N(\mu, \sigma)$	– distribuição normal com parâmetros μ e σ
OMIB	– “one machine infinite bus”
P	– probabilidade; operador derivada em relação ao tempo
P_a	– potência acelerante

$\dot{P}_a; \frac{dP_a}{dt}$	– derivada da potência acelerante em relação ao tempo
P_{ar}	– potência acelerante em $\delta = \delta_r$
P_e	– potência elétrica
P, P_m	– potência mecânica
P_{max}	– potência elétrica máxima
$P_{a\ min}$	– potência acelerante mínima durante o transitório
PMI	– probabilidade de margem insuficiente
POE	– probabilidade de ocorrência de estabilidade
POI	– probabilidade de ocorrência de instabilidade
p.u.	– por unidade
q	– probabilidade
RAT	– Regulador Automático de Tensão
s	– segundo
SIME	– Single Machine Equivalent
$S(t)$	– função segurança
t	– instante de tempo
t_c	– instante de tempo crítico
t_e	– instante de eliminação do defeito
t'_e	– instante da nova eliminação do defeito após religamento malsucedido
t_f	– instante final da simulação
t_n	– instante de tempo atual da simulação
t_{n-1}	– instante de tempo da simulação imediatamente anterior ao atual
Δt	– intervalo de integração
t_r	– instante de retorno (do ângulo de oscilação); instante de religamento
t_u	– instante de instabilidade
T	– aproximação triangular da margem de estabilidade
W	– watt; aproximação por mínimos quadrados da margem de estabilidade
X	– reatância
δ	– ângulo do rotor
δ_0	– ângulo inicial (pré-defeito) do rotor
δ_e	– ângulo de eliminação do defeito
δ_c	– centro de ângulos das máquinas críticas
δ_N	– centro de ângulos das máquinas não-críticas
δ_r	– ângulo de retorno do rotor
δ_u	– ângulo de instabilidade
Δ	– variação
λ	– intensidade ou taxa de falha
λ_d	– intensidade de um distúrbio específico
μ	– intensidade ou taxa de reparo; média da distribuição
η	– margem de estabilidade (na listagem de saída do programa leia-se NETA ou ETA)
η_e	– margem de estabilidade estável (ou positiva)
η_u	– margem de estabilidade instável (ou negativa)
η_e	– margem de estabilidade estável (ou positiva)
σ	– desvio padrão da distribuição

v	– deslocamento de fase
ω	– velocidade angular do rotor
E	– conjunto de estados estáveis do espaço probabilístico
I	– conjunto de estados instáveis do espaço probabilístico
N	– conjunto de estados do espaço probabilístico com margem $\leq \eta_{min}$
1F	– defeito monofásico
FF	– defeito fase-fase
2F	– defeito fase-fase-terra
3F	– defeito trifásico
OT	– defeito de outros tipos

* * *

Capítulo I Introdução

“When you have set your goal, never harbor a thought of fear or failure, but cultivate an attitude of invincible determination to accomplish your object despite all obstacles, holding the thought of success constantly.”.

(Max Heindel)

I.1 Considerações Preliminares

As análises de estabilidade são realizadas com o auxílio de programas complexos de simulação considerando, freqüentemente, que os resultados obtidos são fortemente dependentes do estado operativo, do tipo, local e seqüência exata da perturbação sob estudo. Por causa dessa forte dependência, o método habitual de análise busca examinar o pior estado operativo e/ou a pior perturbação. Esse tipo de abordagem é conhecido como “*análise do pior caso*” e baseia-se no fato de que um sistema que permaneça estável para o “pior caso”, assim permaneça para modificações de seu estado operativo ou quando submetido a perturbações de menor severidade. Além disso, sistemas planejados a partir de critérios que admitam a capacidade de resistir a perturbações severas, normalmente terão qualidades dinâmicas robustas que os ajudarão a sobreviver a distúrbios extremos – embora raros – que poderiam resultar em desligamentos em cascata. A despeito da prática geral de “análise do pior caso”, faz parte do senso comum que é importante ponderar a interpretação dos resultados de acordo com a *probabilidade* da perturbação e da condição do sistema sob estudo. Essa referência à probabilidade é encontrada dentro dos conjuntos de critérios de estudos, por exemplo em relatório de pesquisa do *Electric Power Research Institute (EPRI)* [1] e em documentos do *Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)* [2], que são utilizados na determinação das condições de *adequação* de um sistema de potência. Porém, como não há nenhum mecanismo para computar probabilidades nos programas atuais de análise de estabilidade, as ponderações são realizadas, simplesmente, com base no bom senso ou na experiência.

Ao longo do tempo, tem-se verificado grande interesse com relação aos aspectos probabilísticos da dinâmica dos sistemas de potência *EPRI* [1], *CIGRE* [3], *Schilling, Leite da Silva, Billinton & El-Kady* [4], *Li* [5], *Anders* [6], *Schilling, Billinton & Groetaers dos Santos* [7]. Dois aspectos relativos à avaliação probabilística de estabilidade adquiriram grande relevância. O primeiro foi o reconhecimento amplo de que a probabilidade associada aos eventos que ocorrem em um sistema de potência, comprometendo seu desempenho dinâmico, representa uma medida importante nas avaliações de estabilidade. Esse reconhecimento levou a avaliações de risco, acrescentando uma dimensão de análise pouco explorada nas avaliações tradicionais de estabilidade. O segundo aspecto diz respeito às ferramentas computacionais para análise de estabilidade que deveriam ser desenvolvidas para prover uma avaliação de estabilidade aproximada, computada com pequeno esforço e de forma rápida. Embora aproximadas, as avaliações de estabilidade ganhariam, com essas ferramentas, a possibilidade de incluir uma estimativa de probabilidade. Até o início dos anos 80, a literatura técnica apresenta avaliações probabilísticas de distúrbios baseadas em programas convencionais de estabilidade limitados, por sua natureza, com relação aos modelos probabilísticos adotados *EPRI* [1].

Daquele momento até hoje se verificou um grande avanço tanto nas técnicas de simulação de fenômenos de estabilidade quanto na aplicação de abordagens probabilísticas nas análises de confiabilidade, principalmente no que tange ao aspecto da *adequação IEEE* [8]. Todavia, a avaliação de *segurança probabilística* ainda apresenta grandes desafios.

A abordagem determinística atendeu razoavelmente bem a indústria no passado, tendo resultado em níveis de segurança altos com esforço de estudo minimizado. Porém, sua limitação principal é que a mesma trata todos os cenários limitantes da segurança sem considerar o efeito de incertezas. Também não considera de forma adequada quão prováveis ou improváveis sejam as diferentes contingências. No atual ambiente da indústria de produção elétrica, com uma diversidade de participantes com diferentes interesses de negócio, a abordagem determinística clássica pode evoluir no sentido da inclusão paulatina de modelos representativos de incertezas. Há uma necessidade para

se considerar a natureza probabilística das condições do sistema e dos eventos para se quantificar e administrar o risco. A tendência será ampliar o uso de avaliação de segurança baseada em risco. Nesta abordagem, a probabilidade do sistema tornar-se instável e as conseqüências daí decorrentes são examinadas, sendo calculado o grau de exposição do sistema a distúrbios. Esta abordagem é computacionalmente intensiva, porém possível com os recursos computacionais já disponíveis.

Esta Tese dá continuidade ao trabalho desenvolvido por *Takahata* [9,10], o qual aborda o problema da segurança de sistemas de potência sob a influência de pequenas perturbações e diversos tipos de incertezas na carga e na topologia do sistema. Assim, a presente Tese também *aborda o problema da segurança dos sistemas de potência, porém sob a égide de grandes perturbações e considerando as incertezas relacionadas com as ocorrências dos próprios distúrbios (tipo, local, duração), como também as incertezas associadas às cargas, topologias e intercâmbios do sistema.*

I.2 Objetivo da Tese

O objetivo desta Tese é *apresentar um novo procedimento computacional que auxilie a avaliação da estabilidade transitória de um conjunto variado de cenários de um sistema de potência, sob a influência de grandes perturbações, através de um conjunto de novos índices probabilísticos de segurança dinâmica que bem reflitam a presença de incertezas em cenários e distúrbios.*

I.3 Estrutura

A Tese está organizada em sete capítulos sendo complementada por três anexos.

O Capítulo I dá uma introdução ao conteúdo da Tese e seus objetivos, fornecendo comentários gerais sobre o contexto no qual a mesma se insere e a caracteriza.

O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica sucinta do tema enfocado.

O Capítulo III apresenta um arcabouço para tratamento geral de incertezas em estudos do desempenho do sistema, propondo uma abordagem específica para a avaliação probabilística da estabilidade transitória.

O Capítulo IV apresenta detalhes teóricos relacionados a um método para avaliação de segurança dinâmica baseado em um equivalente generalizado de uma máquina contra barra infinita (método SIME – “*single machine equivalent*”) capaz de atender aos requisitos de eficiência computacional necessários para abordagem probabilística da segurança transitória de sistemas de potência.

O Capítulo V apresenta a metodologia computacional para avaliação da segurança transitória com a consideração de incertezas construída a partir da conjunção do arcabouço para tratamento de incertezas com o método SIME.

O Capítulo VI apresenta resultados da aplicação da metodologia proposta em três sistemas testes de variados portes.

O Capítulo VII registra as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

O Anexo A apresenta os dados dos sistemas utilizados nos testes do protótipo computacional.

O Anexo B apresenta o manual do usuário do protótipo computacional construído para avaliação da segurança transitória de sistemas de potência considerando incertezas.

O Anexo C registra diversos arquivos de interesse incluindo o programa executável.

I.4 Publicações

Ao longo do desenvolvimento desta Tese, os seguintes artigos foram publicados:

- M. Groetaers dos Santos, M. Th. Schilling, M. B. Do Coutto Filho, J. C. Stacchini de Souza, P. Gomes. *Panorama Dos Estudos De Regime Dinâmico No Brasil*. **IX SEPOPE**, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- J. L. Jardim, C. A. Neto, M. Groetaers dos Santos, P. Gomes. *Design Features Of A Dynamic Security Assessment System*. **IX SEPOPE**, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- M. Th. Schilling, J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, A. Y. Takahata, M. Groetaers dos Santos. *Confiabilidade Estendida De Sistemas De Potência: Segurança Probabilística*. **X SEPOPE**, Florianópolis, Brasil, 2006.
- M. Groetaers dos Santos, J. L. A. Jardim, F. F. Pazo Blanco, M. Th. Schilling, M. B. Do Coutto Filho, J. C. Stacchini de Souza. *Nova Metodologia Para Análise De Segurança Probabilística De Sistemas De Potência*. **X SEPOPE**, Florianópolis, Brasil, 2006.
- M. Groetaers dos Santos, M. Th. Schilling, M. B. Do Coutto Filho, J. C. Stacchini de Souza. *Análise De Segurança Probabilística Via Equivalente Por Máquina Singular*. **XVI CBA**, Salvador, 3-6 de Outubro, 2006.
- M. Th. Schilling, M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, A. Y. Takahata, M. Groetaers dos Santos, G. N. Taranto. *Subsídios para a Análise de Desempenho Generalizado de Sistemas de Potência sob Incertezas*. **XII ERIAC**, Foz do Iguaçu, Brasil, 2007.
- M. Th. Schilling, R. Billinton, M. Groetaers dos Santos. *Bibliography on Power Systems Probabilistic Security Analysis 1968-2008*. **International Journal of Emerging Electric Power Systems**, Vol. 10, Iss. 3, Article 1, 2009.

* * *

Capítulo II Revisão Bibliográfica

II.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma visão dos aspectos mais significativos que vêm sendo propostos na literatura da área relacionada à análise da estabilidade de sistemas de potência, considerando a influência de incertezas. O foco da pesquisa fixou-se nas abordagens probabilísticas das *avaliações de estabilidade transitória e de segurança dinâmica* de sistemas de potência.

II.2 Premissas da Pesquisa

O levantamento bibliográfico realizado tomou como base um significativo conjunto de periódicos, livros-texto, anais de congressos e conferências, relatórios, dissertações, teses e portais relacionados aos sistemas de potência. A detecção do material de interesse foi principalmente determinada, entre outros aspectos, pela presença das seguintes palavras-chave: *confiabilidade, dinâmica, estabilidade, incerteza, probabilidade, segurança, risco, transitório*.

Não houve restrição de idioma ou localização geográfica e o período abrangido cobriu os anos entre 1968 e 2009 inclusive.

Dado o grande volume de material e a inacessibilidade de vários itens, optou-se pela exegese de apenas um conjunto especialmente selecionado, seja pela frequência de citação, incontestável relevância ou originalidade de tratamento.

A literatura comentada neste capítulo está complementada por uma extensão da pesquisa bibliográfica consubstanciada em *Schilling, Billinton & Groetaers dos Santos* [7].

II.3 Revisão Bibliográfica

As abordagens probabilísticas dos estudos de avaliação do desempenho do sistema de potência têm estado presentes nas pesquisas, aplicações reais da indústria e diferentes áreas de abrangência da engenharia de sistemas elétricos *Schilling et alii* [4].

Um dos primeiros trabalhos abordando explicitamente a análise dinâmica de sistemas de potência em associação com aspectos probabilísticos foi publicado por *Light* [11], em 1977. Nesse trabalho, o autor discorre sobre os critérios de estabilidade utilizados no sistema inglês (CEGB) voltados para a manutenção da confiabilidade do sistema. Esses critérios são descritos e sua aplicação comentada. *Light* apresenta uma classificação dos defeitos segundo um grau decrescente na ordem de severidade. Apresenta, também, uma estatística da incidência dos diferentes tipos de defeito, englobando diversas categorias de equipamentos, no período entre 1968 e 1974, comentando sobre a incerteza dos dados em função de erros de diagnóstico de defeitos e/ou de relato ou mesmo devido ao período de tempo de observação. Esses dados podem, todavia, servir de base para uma avaliação de risco associado ao desempenho dinâmico do sistema. Outras dificuldades são comentadas no que tange à aplicação desses dados face às diferenças construtivas ou ambientais de diferentes sistemas. *Light* identifica os defeitos de maior e menor incidência e suas possíveis origens, destacando o critério então adotado na CEGB para dimensionamento e avaliação de estabilidade do sistema. Tal critério considerava, de forma conservativa, uma combinação de fenômenos que resultasse nos maiores tempos de detecção, operação dos relés e abertura dos disjuntores. Quanto a considerações sobre a localização dos defeitos, seria esperado que a severidade do impacto resultante diminuísse com o afastamento entre o local de defeito e os geradores. Entretanto, defeitos distantes implicam em maiores tempos de detecção de tal sorte que defeitos muito afastados das fontes podem ser mais severos. Os fatores que influem no comportamento transitório do sistema incluem a potência gerada e o fator de potência de cada gerador, bem como o nível de demanda do sistema. *Light* comenta, também, sobre o risco residual representado pela possibilidade de falha das proteções principais ou dos disjuntores acarretando na atuação das proteções de retaguarda, com conseqüentes aumentos nos tempos de eliminação do defeito. A avaliação probabilística, portanto, envolve estudos intensivos de estabilidade para a série de

possíveis defeitos e condições de carregamento. Incertezas aparecem, em particular, em relação às hipóteses relativas ao tipo de defeito, na medida em que os dados disponíveis nas estatísticas podem não ser aplicáveis a incidentes que envolvam tempos longos de eliminação quando, então, existe a possibilidade de que o defeito se estenda para duas ou mais fases. Além dos aspectos relacionados ao tempo de eliminação dos defeitos, um risco residual também aparece com relação a incidentes que envolvam desligamentos múltiplos e, também, quando uma ou mais seções de uma barra são desligadas. No caso de desligamentos múltiplos de circuitos, os riscos são significativamente reduzidos pela instalação de esquemas de religamento automático.

Outra linha de abordagem da estabilidade transitória sob enfoque probabilístico pode ser identificada em uma série de artigos publicados entre o fim da década de 1970 e início da década de 1980, por *Billinton e Kuruganty* [12-20]. Nessa série de artigos, os autores abordam metodologias para a inclusão de considerações probabilísticas nos estudos de estabilidade transitória. São apresentados resultados partindo-se de um sistema simples máquina vs. barra infinita [12], chegando-se a aplicações em sistemas de várias máquinas [13,14,19]. São apresentados e propostos índices globais - ou sistêmicos - como, por exemplo, a probabilidade de estabilidade do sistema [12,13,15] e também índices locais - ou individuais - que podem ser associados, por exemplo, à probabilidade de estabilidade para um determinado tipo de defeito em diferentes localizações de uma mesma linha de transmissão [18-20]. Outros aspectos relevantes para a avaliação probabilística da estabilidade são apresentados e comentados pelos autores. A necessidade de investigação de métodos rápidos para estabilidade [12,19,20], a extensão do espaço probabilístico pela consideração de outros tipos de incertezas associadas a eventos relevantes para a estabilidade [13,16,18], a sensibilidade dos índices probabilísticos com relação aos parâmetros e configurações do sistema [12], o efeito sobre os índices de probabilidade do grau de detalhe de representação do sistema [17] e as modelagens probabilísticas dos tempos de eliminação dos defeitos e da confiabilidade das proteções [16,18,20] compõem um quadro de aspectos considerados pelos autores nesse conjunto importante de artigos sobre a avaliação probabilística da estabilidade transitória.

Também na linha da abordagem da dinâmica sob pequenas perturbações, *Burchett & Heydt* [21] apresentam, em 1978, o que chamaram de método generalizado para análise estocástica de estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência. A avaliação da estabilidade dinâmica apresentada incorpora as incertezas nos parâmetros do sistema de modo a obter a probabilidade de estabilidade dinâmica. Essa linha de investigação vem sendo aprofundada por *Takahata* [9,10], porém limita-se à modelagem de pequenas perturbações.

Loparo e Blankenship [22], em 1979, relatam resultados baseados na matemática de processos estocásticos para a descrição de um mecanismo capaz de conduzir o sistema de potência a instabilidade, em função de comportamentos oscilatórios em condições de normalidade e carga moderada. Afirmam que as hipóteses necessárias para que o modelo reproduza esse comportamento são simples, flexíveis e consistentes com condições de operação possíveis em um sistema de potência real. A técnica se aplica à análise de pontos de operação sob a ótica da detecção de amortecimento nulo, para pequenas perturbações devidas a variações paramétricas, de carga e de características da transmissão. A abordagem estocástica apresentada neste artigo restringe-se ao comportamento do sistema frente a perturbações em torno do ponto de operação, não se aplicando a avaliações de estabilidade transitória.

Doraiswami, Borenstein, Brasil Camargo & Marques [23] apresentam, em 1981, um interessante artigo no qual propõem uma avaliação probabilística da segurança através de uma metodologia que incorpora um processo probabilístico de seleção de contingências a partir de um universo pré-escolhido. O índice probabilístico de segurança proposto é capaz de ponderar os diversos aspectos (estático, transitório e dinâmico) envolvidos com a estabilidade do sistema. Os autores estabeleceram critério para garantir a convexidade do espaço de estados e aplicaram o segundo método de Lyapunov para a análise da estabilidade transitória. Uma limitação inerente ao método proposto relaciona-se à dificuldade de incorporação de modelos dinâmicos mais completos de máquinas, reguladores e outros que podem influenciar decisivamente no comportamento transitório eletromecânico do sistema.

Uma proposta de arcabouço conceitual para a abordagem da avaliação probabilística da estabilidade transitória de um sistema de potência é apresentada por *Anderson & Bose* [24], em 1983. O procedimento proposto contemplava o cálculo do modelo estocástico de cada processo envolvido na determinação da estabilidade, levando a uma transformação que seria capaz de produzir a distribuição de probabilidade de estabilidade ou instabilidade. O problema não-linear da estabilidade transitória foi tratado probabilisticamente através de duas abordagens: (a) transformação direta, via processos estocásticos; (b) simulação probabilística, via Monte Carlo. Para a avaliação da estabilidade transitória os autores adotaram o cálculo de funções de energia, baseado no modelo clássico. Nas discussões do artigo surgem alguns comentários acerca da abordagem através de simulação Monte Carlo. No caso de instabilidade para um distúrbio particular foi sugerida a adoção de uma distribuição de probabilidade para o “tempo para restauração de um sistema instável” evitando, assim, a simulação de defeitos adicionais durante o período de restauração, o que seria irreal. Outra dificuldade da simulação Monte Carlo sugerida no artigo refere-se ao fato de que a precisão dos resultados depende do período total de simulação considerado na avaliação da estabilidade transitória de cada cenário, com impacto direto sobre o esforço computacional necessário. Mesmo para se obter uma idéia aproximada da estabilidade de um sistema é necessária a investigação de vários cenários através de simulação Monte Carlo, com um tempo computacional proibitivo para qualquer sistema prático.

Grigg, Tsai & Smith [25], em artigo de 1983, descrevem técnicas para a avaliação do risco operacional devido à (falta de) confiabilidade da transmissão. As técnicas consideravam incertezas em fatores tais como probabilidade de ocorrência de um defeito, variação do tipo de defeito e localização do defeito, para uma estratégia operacional especificada. Os autores definiram o risco operacional como sendo a probabilidade de ocorrência de vários eventos indesejáveis tais como blecautes, cortes de carga, abertura de interligações, etc. O trabalho focou na análise da degradação da confiabilidade do sistema resultante de distúrbios causados por perda de segurança. A medida ou avaliação desses eventos é feita em termos de sua frequência de ocorrência e de sua severidade (energia não suprida). Um aspecto apontado pelos autores diz respeito ao fato de que distúrbios sistêmicos raramente ocorrem durante a operação normal, concluindo que para uma grande percentagem do tempo a probabilidade de instabilidade é igual a zero ou extremamente baixa, sendo atribuível apenas a defeitos que excedam o

critério de planejamento. Porém, há ocasiões em que as condições normais de operação não se verificam. Por exemplo, quando o sistema está sendo recomposto após uma contingência. A análise computacional da combinação de todas as contingências que poderiam afetar a segurança seria proibitiva através de análises clássicas de estabilidade. Argumentando que a simulação do sistema multimáquina para cada uma dessas contingências provê muito mais informação do que a que é necessária para uma avaliação probabilística, os autores propuseram uma abordagem através da aplicação do critério das áreas iguais para um sistema equivalente de duas máquinas, variante com a parte do sistema sob análise e restringido pelos limites operacionais obtidos por uma simulação completa. Tal abordagem, segundo os autores, é capaz de conduzir a resultados muito precisos com esforço computacional mínimo. No núcleo do método proposto pelos autores está o desenvolvimento de técnicas que simulam o efeito de contingências às quais o sistema sobrevive, porém com um grau reduzido de segurança. Através da técnica de programação linear os autores propõem um algoritmo para preparar o sistema durante sua recomposição após a primeira contingência. Fatores de prioridade são atribuídos às gerações e um novo ponto de operação é obtido respeitando-se os limites de sobrecarga. Contingências de segunda ordem são simuladas, sendo calculados os cortes de carga necessários no caso de sobrecargas. Para a aplicação da técnica os autores se valeram de estatísticas do sistema da empresa Ontario Hydro de modo a poder calcular a frequência e a duração de várias contingências e combiná-las com a probabilidade de instabilidade obtendo, assim, os diversos índices que medem o risco operacional. Nas conclusões do artigo reforça-se a afirmação de que uma representação multimáquina altamente precisa pode não ser necessária obtendo-se, assim, economia significativa de esforço computacional. Indica-se, também, que trabalhos mais aprofundados são necessários para tratamento da questão do estabelecimento de um critério de risco para a operação do sistema.

Em 1983, o *EPRI* [1] publicou relatório de projeto de pesquisa apresentando as investigações realizadas quanto à aplicação de métodos probabilísticos para uso na análise de sistemas de potência, especialmente no tocante à estabilidade e a sua probabilidade de ocorrência. O trabalho explorou métodos para a representação probabilística de distúrbios e para abordagem probabilística dos sistemas de proteção e de seu desempenho. Não obstante o amplo trabalho realizado, o relatório concluía que, frente à complexidade do tema muito ainda restaria a ser feito na direção da obtenção de

um ambiente funcional de simulação. A abordagem inicial que considerava que todas as dimensões do problema seriam probabilísticas deu lugar a uma formulação mais simplificada, na qual algumas dimensões foram consideradas determinísticas (p.ex., carregamento inicial do sistema e topologia da rede). Investiu-se na dimensão probabilística da representação de distúrbios (tipo, localização e sequência), sua distribuição estatística, nas configurações dos sistemas de proteção e na determinação da distribuição estatística da estabilidade. As investigações de métodos para cálculo de estabilidade foram preliminares, gerando indicação de necessidade de maior aprofundamento na busca e teste de métodos diretos ou de transformações diretas de probabilidade.

Uma análise detalhada da confiabilidade de sistemas de proteção e de seus impactos sobre a estabilidade foi apresentada por *Anderson* [26], em 1984. Iniciando com uma visão sintética dos sistemas de proteção e de suas características e funções básicas, o autor conceitua o sistema de proteção a partir de seus subsistemas principais, quais sejam o sistema de relés e o sistema do disjuntor. As imperfeições inerentes a esses subsistemas implicam em que sejam providos meios para proteção contra falhas em qualquer um deles. Esquemas contra falha de disjuntor e redundância de relés são soluções para essa finalidade. A análise de confiabilidade desenvolvida abarca ambos os subsistemas *de per si* e, também, sua atuação conjunta. O procedimento desenvolvido representa um método para a análise da confiabilidade de sistemas de proteção, provendo uma medida probabilística do sucesso da função de proteção pretendida. O autor, finalmente, aponta para a dependência da confiabilidade de vários componentes para sucesso do sistema de proteção e a forma pela qual essa confiabilidade pode ser melhorada pela redundância. O autor mostra, também, o efeito dos vários esquemas de arranjo de barras que aumentam a probabilidade de eliminação mal sucedida de defeitos melhorando, porém, a conectividade do sistema.

Wu, Tsai e Yu [27] apresentam, em 1988, através de uma proposta conceitual, abordagem inédita para a avaliação probabilística de segurança estática e dinâmica de forma unificada. Neste artigo os autores propõem um índice de segurança baseado no conceito de tempo para a instabilidade. A sofisticação matemática da abordagem coloca dificuldades de natureza computacional para a determinação das fronteiras das regiões

de segurança estática e dinâmica. A realização bem sucedida da proposta dos autores dependeria da disponibilização de suficiente poder computacional, não disponível à época. A função de segurança proposta visa à avaliação do estado presente de segurança do sistema e para a previsão de um horizonte temporal no qual o nível de segurança estaria garantido, entendida essa previsão dentro de uma perspectiva probabilística. Todavia, a informação obtida não incorpora nenhuma indicação sobre como melhorar a segurança. Tal dificuldade deriva da grande diferença entre os distúrbios considerados sob as diferentes óticas da estabilidade estática e da estabilidade dinâmica, fazendo com que o conhecimento sobre qual é a natureza do problema indispensável para uma adequada resposta do operador diante de uma condição de segurança insuficiente.

Em 1988, um estudo de estabilidade transitória com abordagem probabilística para o sistema de Taiwan é apresentado por *Hsu & Chang* [28]. O estudo contempla a natureza estocástica do carregamento pré-distúrbio do sistema bem como outros fatores como o número de circuitos sob defeito, a localização e o tipo dos defeitos. Esses fatores são utilizados para o cômputo de um índice probabilístico de estabilidade utilizando o conceito de probabilidade condicional. Os autores consideraram, também, o efeito de incertezas nos patamares de carga. O método proposto baseia-se na obtenção dos tempos críticos de eliminação dos defeitos através de simulações de estabilidade com grau detalhado de modelagem, feitas em lote e controladas por um procedimento de controle de tarefas (*batch*). Uma vez obtidos, a distribuição dos tempos críticos e suas respectivas funções de probabilidade devidas aos eventos de defeito podem ser analisadas através de uma abordagem condicionada. Assim, a probabilidade de instabilidade e as probabilidades de instabilidade condicionadas são calculadas para um tempo fixo de eliminação do defeito. As contribuições dos vários eventos de distúrbios para a instabilidade do sistema são obtidas pela aplicação do Teorema de Bayes¹. Os autores concluem que para que um evento de distúrbio seja significativamente importante para a instabilidade do sistema, o mesmo deve ser de severidade tal que represente um grande impacto sobre a dinâmica do sistema, bem como tenha uma

¹ O teorema de Bayes relaciona as probabilidades de A e B com as respectivas probabilidades condicionadas mútuas. Este teorema afirma que:

$$P(B|A) = P(A|B) \frac{P(B)}{P(A)}$$

grande frequência de ocorrência. Embora não explicitado pelos autores, essa conclusão embute um conceito de risco.

Em 1990, *Anders* [6] publica livro sobre aplicações de conceitos probabilísticos aos sistemas de potência. Em seu capítulo dedicado ao estudo da estabilidade probabilística, *Anders* conclui pela necessidade de maior aprofundamento nos desenvolvimentos relativos ao tema. O autor reconhece, similarmente ao estudo do EPRI [1], que transformações de estabilidade são complexas e que o cálculo computacional das densidades correspondentes a cada variável aleatória intermediária representa grande desafio, possivelmente impossibilitando essa abordagem como um processo geral. *Anders* indica a futuros pesquisadores a busca por meios de extrair informações do rico processo de estabilidade dos sistemas de potência. Um primeiro passo seria o cálculo ou a estimativa de médias e variâncias de margens de estabilidade. *Anders* reconhecia o surgimento de um campo aberto de novidades no que se relacionava à análise probabilística da estabilidade de sistemas de potência: a avaliação probabilística de segurança dinâmica e de regime permanente.

Porretta, Kiguel, Hamoud & Neudorf [29], escrevem em 1991 um interessante artigo abordando uma modelagem probabilística abrangente da adequação e da segurança. No artigo, os autores comentam sobre aspectos relevantes da modelagem, conceitos, limitações e dificuldades. Para a avaliação de segurança os autores destacam a exigência de uma avaliação do desempenho do sistema durante o período transitório (T), entre os pontos de operação pré e pós-distúrbio. Para a correta avaliação desse desempenho, a análise teria de ser repetida para todos os estados significativos iniciais. A análise da condição inicial de um estado deve ser repetida para cada sequência de falha. Cada combinação de condição inicial com sequência de falha deve ser analisada em diferentes pontos no tempo para incluir o impacto de fatores dependentes do tempo, como aumento ou redução da carga. A análise é ainda mais complicada porque tem de lidar com transientes e, assim, todos os fatores dependentes do tempo devem ser modelados como avaliações limitadas no tempo, incluindo controle automático de geração, operação de proteções e comportamento transitório de geradores. Os autores reconheciam tal tarefa como sendo impossível de solução probabilística com os recursos então disponíveis. Para contornar essa dificuldade, os autores propõem um método que

capta o impacto de falhas de segurança sem a necessidade de uma análise transitória de todas as muitas situações acima descritas. Isto é feito através da emulação da prática operativa do sistema. Ou seja, o sistema é operado dentro dos limites de segurança e isso garante a segurança em face das contingências incluídas nos critérios de avaliação (contingências de projeto) em todos os momentos, para qualquer condição inicial e para qualquer sequência de falha incluída no critério de análise. Portanto, a segurança pode ser quantificada através da avaliação da capacidade do sistema de operar dentro dos limites de segurança no estado *estacionário*. *Essa é uma consideração que contorna o problema real da avaliação de segurança através de uma premissa (critério) nem sempre observada(o) na operação do sistema.*

Em 1992, *Billinton & Khan* [30] propõem uma metodologia para inclusão de considerações de segurança em análises de confiabilidade composta. A abordagem baseia-se no modelo de transição do sistema entre os diversos estados operativos que caracterizam a condição de segurança. Os autores, diferentemente da classificação usual, sugerem uma possibilidade de transição entre o estado normal e o de emergência extrema. Conforme os próprios autores afirmam as condições dinâmicas do sistema não são consideradas, fato pontuado nos comentários do artigo e tomado como uma indicação de que o método proposto limita-se ao domínio da adequação. Os autores defendem-se afirmando que a metodologia proposta permite a inclusão de restrições de segurança sem dificuldades.

Leite da Silva, Endrenyi & Wang [31] apresentam, em 1993, mais uma proposta de abordagem conjunta dos problemas de adequação e segurança. Os autores apresentam a classificação do sistema de acordo com suas possíveis transições entre estados operativos, propondo, também, uma classificação das possíveis consequências dos distúrbios nos sistemas elétricos de potência. Uma contribuição importante do artigo diz respeito à modelagem dos componentes para os estudos conjuntos de adequação e segurança. Nessa modelagem, os autores introduzem uma representação de falha de componente capaz de acomodar efeitos estáticos e dinâmicos, através de um modelo fundamental de três estados (*UP* – operação normal; *DS* – falha estática; *DD* – falha dinâmica), podendo esse modelo ser expandido de forma a representar diferentes tipos de defeitos. Com base nessa modelagem os autores derivam índices probabilísticos de

segurança como, por exemplo, a probabilidade de instabilidade e o tempo médio para a instabilidade. As aplicações numéricas apresentadas são feitas sobre um sistema de cinco barras com representação dinâmica simplificada (modelo clássico de máquina).

Chiodo, Gagliardi & Lauria [32], em artigo de setembro de 1994, apresentam uma abordagem analítica para análise probabilística da estabilidade transitória. Embora a proposição de abordagem analítica para o problema não fosse inédita e suas qualidades e desvantagens conhecidas (vide *EPRI* [1] e *Anders* [6]), os autores apresentaram sua proposta como uma nova metodologia analítica adequada para o tratamento probabilístico da estabilidade transitória. Nessa abordagem, os autores contemplam a natureza probabilística, tanto da demanda de carga quanto do tempo de atuação do disjuntor na eliminação do defeito. O núcleo do método proposto é o cálculo analítico da função de distribuição do tempo crítico em termos da distribuição da carga, que pode ser assumida conhecida a partir dos dados estatísticos sobre a demanda de energia. Em particular, como um horizonte de planejamento relativamente longo é analisado, a demanda de carga é descrita através de um processo estocástico para o qual o valor máximo da carga ao longo do horizonte de planejamento é considerado sob a justificativa de que os valores de pico de carga são mais críticos para a estabilidade do sistema. A metodologia permite a avaliação analítica da probabilidade de instabilidade com um grau satisfatório de aproximação, verificada através do emprego de testes estatísticos adequados. Segundo os autores, a expressão analítica da distribuição de tempo crítico e da probabilidade de instabilidade em termos dos parâmetros do sistema pode ser de grande ajuda na realização de análise da estabilidade e de seu controle, evitando os inconvenientes de simulação de Monte Carlo. O artigo ilustra a aplicação da metodologia para um sistema muito simples, de apenas um gerador, e os autores informavam que a extensão do método para os sistemas de vários geradores estava em estudo.

Ainda em novembro de 1994, *Chiodo & Lauria* [33] retomam a abordagem probabilística da estabilidade transitória - aplicando-a a um sistema de vários geradores - apresentando uma proposta de avaliação dinâmica através do critério estendido das áreas iguais (vide *Xue, Van Cutsem & Ribbens-Pavella* [102]). Nesse artigo, os autores ampliam a aplicação dos conceitos previamente apresentados em [32],

utilizando o critério estendido de áreas iguais como um modo eficiente de avaliação da estabilidade e obtenção dos tempos críticos de eliminação dos defeitos, passo importante na derivação analítica proposta pelos autores.

Billinton & Aboreshaid [34,35,36], 1995, retomam a proposição apresentada em *Billinton & Khan* [30]. No novo artigo, um arcabouço para avaliação de segurança de um sistema de energia composto é proposto, incorporando tanto o estado estacionário quanto o estado transitório. A estrutura de avaliação de segurança proposta pode ser utilizada em estudos de planejamento do sistema de potência. A técnica aplicada baseia-se na abordagem analítica, valendo-se do teorema da probabilidade condicional (vide nota de rodapé nº 1). Os conceitos apresentados no artigo são ilustrados através da aplicação a um sistema de teste hipotético. Comparativamente a *Billinton & Khan* [30], o arcabouço é ampliado pela inclusão do desenvolvimento de um novo conjunto de índices de confiabilidade do sistema de potência, incluindo restrições de estabilidade transitória no processo de avaliação de segurança e a modelagem estocástica do religamento rápido de linhas de transmissão. As restrições são obtidas separadamente e incorporadas a um programa convencional de cálculo de adequação.

Schilling, Do Couto Filho, Leite da Silva, Billinton & Allan [37], em 1995, apresentam artigo com uma estruturação rigorosa visando unificar, classificar e estender algumas idéias fundamentais e aspectos controversos de forma a dar sustentação teórica e prática aos estudos de avaliação de confiabilidade de sistemas de potência. O arcabouço conceitual daí resultante estabelece as bases de uma taxionomia a ser utilizada no desenvolvimento e comparação de diferentes técnicas e programas computacionais utilizados para estudos de confiabilidade. Para os autores as avaliações de confiabilidade representam um tema de crescente importância, suficientemente debatido em muitos artigos. Todavia, o uso prático dessas técnicas apresenta várias alternativas e proposições, permanecendo cercado por dúvidas e controvérsias, especialmente pela falta de abordagens padronizadas para grande parte dos problemas de confiabilidade. Assim, os autores procuraram contribuir com a proposição de um arcabouço conceitual capaz de servir como um guia de referência nos diferentes estudos de confiabilidade em engenharia, que envolvam projeto, desenvolvimento e comparação. Muitas das idéias apresentadas nesse artigo serviram de base para a metodologia proposta nesta Tese.

O método da bisseção foi utilizado em 1996 por *Aboreshaid, Billinton & Fotuhi-Firuzabad* [38] como uma ferramenta útil na predição do número de simulações de estabilidade requerido para o cálculo de índices de estabilidade para uma dada localização do sistema, uma dada linha de transmissão ou para o sistema como um todo. Por exemplo, o cálculo convencional do tempo crítico de eliminação do defeito através do aumento do tempo de duração do defeito requer uma considerável quantidade de simulações e de tempo de computação. O método da bisseção permite uma redução considerável desse tempo. De posse do intervalo de confiança para a distribuição de probabilidade do tempo de eliminação do defeito, os limites desse intervalo são utilizados em um algoritmo de bisseção de modo a se obter o tempo crítico de eliminação de um dado defeito, dentro de uma tolerância especificada. Os autores demonstram a eficiência desse método através de sua aplicação a um sistema-teste com dois geradores e seis barras, em particular na avaliação analítica dos tempos críticos de eliminação dos defeitos que está na base da maior parte dos índices de estabilidade. Os conceitos apresentados pelos autores podem ser estendidos para incluir outros tipos de incertezas consideradas nas atuais práticas de análise probabilística de sistemas de potência. O artigo representa mais uma contribuição na linha analítica percorrida por *Hsu & Chang* [28], passando por *Billinton & Khan* [30] e *Billinton & Aboreshaid* [34,35, 36].

McCalley, Fouad, Agrawal & Farmer [39], em 1997, apresentam um artigo propondo um índice de risco compondo a probabilidade e o impacto da instabilidade, e mostram sua utilidade na determinação de limites de operação do sistema. A aplicação apresentada no artigo é feita sobre um equivalente do sistema do Arizona. O procedimento adotado pelos autores baseia-se nas ferramentas tradicionais da abordagem determinística, estendendo-a com o cálculo de risco que inclui a probabilidade e o impacto dos eventos de instabilidade. As demonstrações feitas pelos autores incluíram modos de falha associados à instabilidade transitória e oscilatória, destacando dois atributos principais do índice proposto: *o índice é influenciado por todas as contingências definidas*, não apenas pela mais limitante, *levando, também, informação sobre a variação de tipos de defeito e sua localização*, ao contrário dos estudos clássicos determinísticos que se focam em um cenário de distúrbio associado ao “pior caso”. Um dos desafios enfrentados pelos autores correspondeu à identificação de contornos de risco constante em função de parâmetros utilizados na monitoração dos

níveis de segurança. Tal desafio correspondeu a uma afirmação dos autores da necessidade de maior investigação com relação à identificação de um limite de risco específico, com o objetivo de estabelecer as bases de um arcabouço geral de avaliação de segurança baseado em risco. Obtida essa referência, o benefício econômico de um ponto de operação poderia ser comparado com seu risco de modo a se atingir uma estratégia ótima de operação do sistema. Os autores apontaram o grande interesse em um arcabouço dessa natureza em função do ambiente competitivo no qual a indústria de energia elétrica passou a operar.

Rei [40] apresenta, em 1997, uma metodologia baseada em um processo de simulação sequencial – que estende o conceito e as técnicas de avaliação da confiabilidade composta – permitindo representar os possíveis desdobramentos de estados instáveis e processos não-Markovianos, como os processos de restauração, em avaliações de segurança probabilística. Um conjunto de índices para medição do nível de segurança do sistema é apresentado. A metodologia permite incorporar a avaliação do desempenho dos sistemas de proteção, esquemas de emergência e dos processos de restauração. O modelo dinâmico utilizado ainda é simplificado, com consideração apenas de defeitos trifásicos. *Rei* indica, ainda, que a modelagem precisa do comportamento dinâmico implica em esforço computacional que pode inviabilizar o método e sugere a pesquisa de mecanismos que permitam acelerar o processo de avaliação dinâmica como, por exemplo, a utilização de processamento paralelo.

Irizarry-Rivera, McCalley & Vittal [41] retomam, em 1997, a linha de estudos apresentada por *McCalley, Fouad, Agrawal & Farmer* [39]. O ponto central do artigo é o estudo de métodos capazes de contribuir para o estabelecimento de um arcabouço unificado para a identificação de pontos de operação, de modo a possibilitar a obtenção de um balanceamento adequado entre economia da operação do sistema elétrico e o risco de insegurança, levando em consideração a natureza aleatória dos distúrbios que conduzem a violações dos critérios de segurança. A exemplo de [39], os autores utilizaram um equivalente do sistema da costa oeste dos EUA, representativa do estado do Arizona. O artigo apresenta uma fundamentação teórica ancorada na teoria das probabilidades para propor uma metodologia de avaliação de segurança baseada em risco através de duas abordagens, uma utilizando teoria Bayesiana e a outra, produtos

cartesianos (enumeração). Segundo os autores, ambas as abordagens levam ao mesmo valor de probabilidade de instabilidade. Os autores indicam, também, a possibilidade de aplicação da metodologia à análise probabilística de outros modos de falha além do associado à instabilidade transitória, como, por exemplo, modos de falha associados a problemas de limites térmicos ou de tensão.

Aboreshaid & Billinton [42], apresentam em 1999, uma artigo tratando da avaliação de bem-estar² de um sistema de potência através de uma abordagem orientada à segurança. Os índices de bem-estar são avaliados considerando três conjuntos de restrições associados a regime permanente, estabilidade de tensão e estabilidade transitória. Índices individuais (e.g. estabilidade de tensão) podem ser agregados de forma a produzir índices sistêmicos. O desempenho do sistema como um todo é tratado pela inclusão de uma restrição de estabilidade transitória de forma a se obter uma avaliação mais precisa da condição de bem-estar global do sistema.

Em 1999, *Vittal, McCalley, Van Acker, Fu & Abi-Samra* [44] apresentam uma proposta de avaliação do risco de instabilidade transitória para o ponto de operação do sistema. O cálculo do risco é feito através do produto da probabilidade de instabilidade pelo custo da consequência no caso de ocorrer instabilidade. Os autores destacavam a qualidade desse índice, pois o mesmo faz uma combinação dos aspectos de segurança com economia, dando uma idéia objetiva do grau de risco associado a cada ponto de operação do sistema. No estudo apresentado, os autores levaram em conta a presença e atuação de sistemas especiais de proteção, demonstrando sua proposta para um esquema do tipo corte de geração. Para o fim de determinação dos custos, os autores propuseram a divisão do custo de corte de geração em três parcelas, a saber: (i) custo da substituição da geração cortada por outra de maior custo; (ii) custos de reparo e re-sincronização, representado pelo reparo e volta à operação da geração cortada, e; (iii) custo de interrupção dos consumidores ocasionado por corte de carga por subfrequência decorrente do corte de geração. Os autores consideram três tipos de incertezas em seu estudo, envolvendo a atuação do sistema especial de proteção, a ocorrência do defeito e

² O conceito de *bem-estar (well-being)* em sistemas de potência está relacionado à avaliação do desempenho do sistema a partir de critérios determinísticos aceitos na prática com a quantificação do desempenho através de índices probabilísticos. Uma das primeiras aplicações desse conceito pode ser encontrada em *Billinton & Fotuhi-Firuzabad* [43].

seu tipo. O tempo de eliminação é considerado fixo, embora seja destacado que o mesmo também pode ser tratado de forma probabilística. Os exemplos são apresentados sobre o sistema-teste RTS IEEE³.

Ainda em 1999, *McCalley, Vittal, & Abi-Samra* [46], apresentam artigo no qual descrevem as fragilidades dos métodos determinísticos aplicados à avaliação de segurança dos grandes sistemas de potência, apresentando, paralelamente, motivações para o uso de índices de risco probabilístico. Como benefícios das avaliações probabilísticas (e índices de risco probabilístico) sobre as determinísticas, os autores citam: a capacidade de fazer a ligação entre risco e economia; o índice é capaz de orientar uma decisão “agora” com vistas ao futuro; o risco é interpretado como uma função do ponto de operação com significado para os operadores; o risco pode ser atribuído aos elementos que mais o influenciam; o índice carrega informação de caráter abrangente sobre a segurança considerando os efeitos compostos de todas as contingências com todos os problemas de segurança resultantes; o risco pode ser calculado para uma série de condições de operação e acumulado ao longo do tempo, podendo, assim, ser útil na avaliação da influência de um determinado plano de evolução (expansão, reforço) do sistema sobre o risco; riscos preferenciais podem ser utilizados em processos de análise de decisões sobre o grau de exposição do sistema a riscos de segurança.

Momoh, Elfayoumy, Mittelstadt, & Makarov [47], em 1999, apresentam novos desenvolvimentos em torno da obtenção de um índice de risco associado à estabilidade angular de um sistema de potência. O índice foi chamado pelos autores de expectância de margem de estabilidade angular (em inglês, *EASM – expected angle stability margin*), cujo cálculo baseava-se em margens de estabilidade obtidas através de funções transitórias de energia. Segundo os autores o novo índice agregado seria capaz de prover uma característica de estabilidade angular comum sobre um conjunto possível de configurações e demandas do sistema. As contingências cobertas pelo índice poderiam ser escolhidas de acordo com as probabilidades e valor econômico, social e sistêmico de diferentes configurações do sistema. A técnica proposta baseia-se em abordagem

³ Esse sistema é descrito em *Albrecht & alii* [45], em trabalho realizado no contexto da *Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee*, do IEEE.

probabilística discreta, explorando as características aleatórias das cargas e contingências. Os autores utilizaram a formulação probabilística associada a definições determinísticas como forma de reduzir a complexidade do problema e aumentar a velocidade do cálculo computacional. Um resultado numérico foi apresentado para o sistema-teste de 25 barras do IEEE.

Leite da Silva, Jardim, Rei & Mello [48], retomam, em 1999, idéias apresentadas em *Leite da Silva, Endrenyi & Wang* [31], *Rei* [40] e *Jardim* [49] discutindo-as à luz de arcabouços teóricos de avaliação de risco incluindo avaliações determinísticas de risco em tempo real, risco de colapso de tensão e risco probabilístico de confiabilidade. Os autores discutem esses temas do ponto de vista da crescente importância das avaliações de segurança na medida em que o nível de utilização dos sistemas de potência cresce e a desregulamentação traz mais incertezas para o ambiente de operação, destacando a importância da utilização de índices probabilísticos e os benefícios por eles agregados às análises de segurança dos sistemas de potência.

Em 2000, o *EPRI* [50] apresenta um relatório de projeto de pesquisa voltada para avaliação de risco em tempo real. Embora a tônica do projeto esteja centrada nas avaliações de segurança, as metodologias e análises apresentadas são essencialmente de natureza estática. O projeto produziu um programa que foi implementado com a utilização de técnicas de processamento distribuído de forma a melhorar o desempenho computacional do modelo. O projeto indicou como uma área de interesse de investigação a de avaliação de risco considerando a dinâmica do sistema. Segundo os autores do relatório do projeto, foram conduzidas pesquisas nessa área e uma expressão para o risco de instabilidade transitória (primeira oscilação) foi desenvolvida (não apresentada no relatório). Foi apontado como elemento chave dessa análise o desempenho computacional das avaliações de estabilidade transitória, para cuja solução um modo eficiente de realização foi identificado (também não mostrado no relatório). Os autores indicam que não realizaram investigações no âmbito de problemas oscilatórios (amortecimento), que também fazem parte da avaliação de segurança dinâmica.

Low & Goel [51], 2000, fazem um estudo no qual incluem restrições de segurança em avaliações de bem-estar, aplicando sua metodologia a um sistema hipotético de cinco barras e dois geradores. Muito das idéias apresentadas baseiam-se em contribuições anteriores de *Billinton & Khan* [30], *Billinton & Aboreshaid* [34,35,36] e *Aboreshaid & Billinton* [42]. O método proposto pelos autores é construído em torno de um algoritmo que determina a probabilidade do primeiro estado saudável para uma lista de contingências, cujo detalhamento pode ser ajustado de acordo com as limitações computacionais existentes. A probabilidade desse estado saudável representa um índice que pode ser utilizado por planejadores e projetistas, como auxílio à decisão sobre se o sistema é o não capaz sobreviver a contingências não previstas sem violação de restrições específicas. A avaliação dessa capacidade é feita com base em critérios determinísticos. Segundo os autores, esse tipo de avaliação de bem-estar, combinada com o risco e a probabilidade do estado marginal, pode fornecer uma visão mais abrangente da *confiabilidade* do sistema de potência.

Hiskens, Pai & Nguyen [52], apresentam em 2000, um artigo no qual tratam das incertezas dos parâmetros (e.g. carga, tapes de transformadores, referências de reguladores, e outros) de um sistema de potência e sua influência sobre as simulações dinâmicas. Os autores propõem uma abordagem para quantificar as incertezas (associadas aos parâmetros) em uma simulação do comportamento dinâmico do sistema. No método proposto, são utilizadas sensibilidades das trajetórias para gerar uma aproximação de primeira ordem da trajetória correspondente a um conjunto de perturbações nos parâmetros. Diante do baixo custo computacional desse cálculo, é viável a geração de muitas trajetórias aproximadas a partir de um único caso inicial de referência. A quantificação do efeito das incertezas dos parâmetros sobre o caso de referência é feita através da geração de conjuntos aleatórios de parâmetros, de acordo com suas distribuições estatísticas inerentes. Para cada conjunto gerado é obtida uma trajetória aproximada, e a coleção de trajetórias delimita uma região dentro da qual o comportamento dinâmico real do sistema deverá se encontrar. As distribuições estatísticas dos parâmetros nos exemplos apresentados pelos autores foram consideradas uniformes e as fronteiras de erro em torno de uma trajetória de referência obtidas por um processo de Monte Carlo. Uma possível dificuldade para aplicação do método reside na determinação da distribuição que melhor reflita o comportamento aleatório dos parâmetros de interesse.

Em 2000, *Vaahedi, Li, Chia & Dommel* [53] apresentam artigo no qual descrevem os procedimentos adotados para um estudo de avaliação probabilística de segurança com enfoque sobre a estabilidade transitória do sistema. O estudo foi feito para um sistema real (B. C. Hydro, Canadá) e levou em conta em a avaliação da atuação de um esquema de corte de geração sobre a segurança. Nesse estudo, os autores utilizaram o histórico estatístico do sistema para gerar estados probabilísticos de níveis de carga, tipos, localizações e durações dos defeitos, bem como para simular probabilisticamente a atuação do religamento automático de circuitos. As avaliações de estabilidade foram feitas, para cada estudo, com base em um conjunto de 1000 casos gerados para os quais os estados probabilísticos associados às incertezas consideradas foram obtidos via simulação de Monte Carlo. Um programa comercial foi utilizado (PSS/E) em conjunto com uma interface modificada incluindo o método do “segundo impulso” (*second kick method* [54,55]) para cálculo de margens de estabilidade. Os autores concluem que a abordagem probabilística foi capaz de dar um entendimento mais profundo sobre os limites do sistema, enquanto que os critérios determinísticos mostraram-se muito conservativos. Os autores comentam que o cálculo do risco poderia ser mais preciso se o número casos estudados fosse aumentado (10.000 ou mesmo 100.000 casos). A implementação bem sucedida do método com um universo de casos ampliado depende, também, de eficiência computacional, indicando a necessidade de aplicação de métodos rápidos de avaliação de estabilidade, bem como da implementação de critérios de convergência para método de Monte Carlo, de forma a parar os sorteios quando o critério tenha sido atingido. Os autores sugerem a aplicação de um critério que use índices relacionados às curvas de distribuição de probabilidade dos limites do sistema, porém não demonstram sua aplicação. Os autores apontam, também, a necessidade de desenvolvimento de novas melhorias associadas à determinação do valor do risco para a empresa de energia e à modelagem física e probabilística de outros equipamentos importantes par segurança dos sistema (e.g. religadores, resistores de freio e relés de proteção).

Allan & Billinton [56], em 2000, apresentam trabalho analisando abordagens atuais de avaliação de confiabilidade e seu uso e adaptação para atender a natureza competitiva dos sistemas de energia modernos. Em particular, os autores trataram de três áreas muito importantes para o desenvolvimento da aplicação de métodos de avaliação probabilística: a) confiabilidade e economia; b) a capacidade eliminar o fosso entre as

abordagens determinísticas probabilísticas para o planejamento e operação do sistema, em lugar de considerá-las como alternativas mutuamente exclusivas; c) o efeito da geração distribuída, em geral, de pequena escala, intermitente (por exemplo, a energia eólica), e ligada em partes fracas da rede. Os autores apontam o já longo tempo de existência das abordagens probabilísticas, embora elas não sejam utilizadas extensivamente. Todavia, a expectativa dos autores é a de que estes métodos tornem-se cada vez mais importantes face ao ambiente competitivo que se implanta na gestão e operação dos sistemas de potência e da necessidade de melhor balanceamento entre risco e o custo/benefício de investimentos na segurança do sistema, dado que critérios determinísticos de são percebidos como muito conservadores.

Rei, Leite da Silva, Jardim, & Mello [57] retornam, em 2000, à linha de *Leite da Silva, Jardim, Rei & Mello* [48], apresentando resultados das pesquisas anteriormente conduzidas em torno de conceitos e técnicas para avaliação de adequação e segurança para um sistema composto geração e transmissão. Os autores apresentam uma nova metodologia permitindo essa abordagem conjunta, com modelos que permitem distinguir entre efeitos estáticos e dinâmicos das falhas de componentes. Utilizam nessa metodologia a técnica de simulação de Monte Carlo sequencial e apresentam novos índices probabilísticos associados à segurança dinâmica do sistema. Comentam sobre o esforço computacional necessário para essas análises, destacando a dificuldade devida à avaliação da estabilidade transitória, visto que os fenômenos de instabilidade são raros (dificultando a convergência da simulação de Monte Carlo) e que a modelagem dinâmica é complexa. Finalmente, concluem que as avaliações de segurança podem prover informação de valor para os estudos de expansão e de operação do sistema, especialmente na avaliação do desempenho de proteções sistêmicas convencionais e de sistemas especiais de proteção.

Em 2001, *Machado Ferreira, Dias Pinto & Maciel Barbosa* [58], apresentam um estudo da segurança dinâmica para um sistema de potência usando uma abordagem combinada Monte Carlo-estabilidade transitória híbrida (via método da máquina equivalente singular - SIME). Os resultados mostraram a viabilidade da técnica para considerar a natureza probabilística da rede de potência em estudos de estabilidade transitória, fornecendo uma avaliação mais profunda do desempenho do sistema. O

método híbrido mostrou-se uma ferramenta muito eficiente para avaliação rápida dos tempos críticos de eliminação de defeitos e das margens de estabilidade. Este método pode acomodar facilmente modelos detalhados dos dispositivos da rede e dos esquemas de proteção. A aplicação da técnica de Monte Carlo requer um grande esforço computacional a fim obter resultados significativos. O uso do método do híbrido abrevia consideravelmente a avaliação da estabilidade transitória para cada cenário, conduzindo a um tempo total de simulação aceitável. As probabilidades de instabilidade podem ser avaliadas usando a técnica proposta de simulação Monte Carlo. Embora os autores apresentem em detalhe o modelo probabilístico utilizado para a consideração de incertezas relativas à localização e tipo de defeito e para o tratamento da sequência de distúrbio, não comentam sobre a modelagem de incertezas em topologias, patamares de carga e modos de intercâmbio, além dos detalhes relativos aos efeitos dinâmicos associados aos geradores e seus controles. Também, nada comentam sobre o critério de convergência adotado para a simulação de Monte Carlo, deixando dúvidas quanto à adequada cobertura do espaço probabilístico e seus reflexos sobre os índices obtidos. Os autores apresentam como índices as probabilidade de estabilidade para linhas de transmissão especificadas para os diferentes tipos de defeito considerados. Essa probabilidade é, também, calculada para o sistema como um todo. Apresentam, também, um histograma da margem de estabilidade transitória e complementam a análise com uma avaliação da sensibilidade da probabilidade de instabilidade em relação ao nível de carregamento do sistema. Embora comentado no artigo, o uso e interpretação de outros índices, que não aqueles associados às probabilidades de instabilidade, não foi apresentado.

Em 2001, *Levi, Nahman & Nedjic* [59], trabalham sobre a proposta de *Billinton & Khan* [30] e evoluem na proposição de uma metodologia para inclusão de considerações de segurança em análises de confiabilidade composta. Apresentam o desenvolvimento e resultados da aplicação de uma proposta conceitual de procedimento computacional para esse fim, na qual incluem a consideração de proteções, controles automáticos, ações locais de operadores, bem como decisões descentralizadas adotadas por operadores sistêmicos. Segundo os autores, em sua proposta de procedimento computacional podem ser considerados fenômenos associados à estabilidade transitória, variação de frequência durante a atuação de reguladores de velocidade, proteções normais e de emergência de níveis térmicos de linhas de transmissão, controle

automático de geração, remanejamento de carga e despacho econômico. Esses são os principais aspectos de segurança que podem ser diretamente incorporados no modelo híbrido para avaliação da confiabilidade dos diferentes estados operativos [30]. O ponto central da proposta dos autores reside na definição e adoção de uma seqüência de eventos verificando a evolução do sistema após uma contingência e eventual surgimento de fenômenos críticos para a segurança. Ao longo da seqüência e para cada fenômeno em separado adotam-se premissas de análise e de abordagem matemática de acordo com a evolução obtida para o desempenho do sistema. Por exemplo, as avaliações de estabilidade transitória são feitas a partir de uma modelagem simplificada que adota como premissa que o distúrbio se origina de um defeito trifásico em uma linha de transmissão próximo aos terminais de um gerador, sendo capaz de reproduzir com boa precisão o comportamento transitório durante a primeira oscilação. Tendo sobrevivido a esse impacto, assume-se que o sistema possui amortecimento suficiente para eliminar as oscilações entre geradores sendo capaz de atingir um regime de operação com frequência uniforme. O procedimento pós-distúrbio proposto pode ser incorporado no modelo híbrido apresentado em [30] para a extração de índices de confiabilidade com a consideração dos aspectos de segurança.

Em artigo de 2002, *Ming & Sheng-hu* [60] discorrem sobre projeto de pesquisa relacionado à avaliação probabilística integrada como uma tendência na análise da confiabilidade de sistemas de potência. Justificam o interesse da pesquisa na constatação de que a modelagem matemática unificada, através de algoritmos capazes de produzir índices sistêmicos, é de grande valor para a análise de desempenho de um sistema de potência. Os autores sustentam que o estudo apresentado justifica o trabalho e que o objetivo buscado é viável.

Ferreira [61] apresenta, em 2002, proposta de metodologia para avaliação de confiabilidade composta considerando aspectos dinâmicos. A proposição representa uma linha de desenvolvimento similar à apresentada por *Rei* [44], incluindo evoluções na representação do desempenho dinâmico através da utilização de métodos híbridos. A eficiência computacional seria aumentada, também, pela utilização de técnicas de processamento paralelo.

Huang, & Li [62] apresentam, em 2002, um método para avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência. Nesse método, os autores abordam tanto processos estáticos quanto dinâmicos através de uma simulação Monte Carlo sequencial. Apresentam tratamento probabilístico para defeitos permanentes e transitórios propondo uma modificação no modelo de dois estados para os componentes do sistema elétrico para esse fim (essa proposta guarda similaridade com a apresentada em [40]). Para refletir os efeitos dinâmicos e a importância dos defeitos transitórios, os autores apresentam novos índices associados à estabilidade transitória na avaliação de confiabilidade integrada: (a) Taxa média de ocorrência de instabilidade (oc./ano) e; (b) Perda média de carga durante a recomposição (MW/oc.). Através da aplicação do método proposto a um estudo com um sistema de 9 barras os autores sustentam a viabilidade da abordagem apresentada.

Em 2002, Kim & Singh [63] propõem um novo método probabilístico para avaliação de segurança em sistemas de potência, envolvendo estabilidade transitória e estabilidade de tensão, através da combinação de simulação Monte Carlo e mapas auto-organizáveis (SOM – *self organizing map*). Segundo os autores essa abordagem contorna o problema da grande quantidade de tempo de computação necessário para a simulação de Monte Carlo. A rede neuronal associada aprende a reconhecer grupos de vetores de entrada semelhantes de tal modo que os neurônios fisicamente próximos respondem a vetores similares de entrada. A classificação de dados via SOM pode reduzir a amostragem de dados, o que reduz o tempo de cálculo para o índice de confiabilidade de segurança. Os autores apresentam resultados da metodologia proposta para um estudo de caso sobre o sistema-teste de confiabilidade do IEEE.

Em artigo de 2003, Allella, Chiodo & Lauria [64], apresentam um método geral de análise para a avaliação probabilística de estabilidade transitória de sistemas de potência e discorrem sobre uma nova abordagem de inferência estatística para essa avaliação. Em particular, a probabilidade de estabilidade transitória é definida e avaliada tendo em conta a natureza aleatória das cargas do sistema e dos tempos de eliminação do defeito. O artigo está centrado sobre o aspecto da estimativa estatística da probabilidade de estabilidade transitória. A fim de mostrar a viabilidade da abordagem proposta, uma aplicação numérica para o sistema-teste Cigre é ilustrada. A aplicação do método é

ilustrada e executada usando o método de superfície limite de energia potencial. Os autores destacam que a implementação da metodologia independe do método adotado para a avaliação de estabilidade transitória.

Em 2003, *Berizzi, Bovo, Fumagalli & Grimaldi* [65], apresentam um estudo comparativo de diferentes métodos e propostas de avaliação de segurança baseados em abordagens probabilísticas. No artigo os autores discutem algumas dessas abordagens para determinação do risco de segurança probabilística, destacando sua fundamentação, aplicabilidade, qualidades e limitações.

Ming, McCalley, Vittal, Greene, Chee-Wooi Ten, Ganugula, & Tayyib [66], em artigo de 2003, descrevem a implementação de um modelo computacional para avaliação em tempo real do risco de segurança. Os índices são calculados com base no risco probabilístico, para uso por operadores da sala de controle, servindo para avaliação dos níveis de segurança do sistema em função das condições existentes e de futuro próximo. O documento concentra-se em técnicas de aprimoramento de velocidade, que são essenciais para a aplicação em tempo real, e em métodos de visualização de resultados que oferecem formas claras e compreensíveis para aumentar a assimilação e compreensão humana dos níveis de segurança obtidos. São apresentados resultados dos testes para uma série de casos de fluxo de potência obtidos a partir do sistema de gerenciamento de energia de uma grande empresa americana, com um sistema de 1600 barras, ilustrando os benefícios da adoção do modelo computacional implementado. Dentre os aspectos de segurança incorporados nas análises realizadas com auxílio do modelo, não consta a avaliação de risco de estabilidade.

Em 2004, *Adapa* [67] relata projeto de pesquisa do EPRI que apresentada como principal objetivo o de desenvolver um arcabouço conceitual integrado para lidar com avaliações de valor da confiabilidade em sistemas de potência limitados por estabilidade. A técnica de avaliação desenvolvida deve ser capaz de tratar a natureza probabilística do comportamento do sistema, as falhas dos componentes, as variações de carga e as diferentes configurações do sistema. O relatório apresenta uma boa resenha bibliografia, em especial daquela voltada para aplicação de métodos probabilísticos em avaliações de risco incluindo o comportamento transitório eletromecânico do sistema.

Do ponto de vista das avaliações determinísticas de estabilidade, o trabalho comenta sobre as duas grandes linhas de abordagem constituídas por métodos de simulação no domínio do tempo e os métodos diretos, como Liapunov, superfície limite de energia potencial e controle do ponto de equilíbrio instável. O trabalho destaca os progressos feitos na análise de estabilidade transitória de sistemas multi-máquinas através de métodos diretos. A utilização das funções de energia transitória para a estabilidade de “primeira oscilação” de sistemas de médio porte sido investigada com um bom grau de sucesso. Esse progresso pode ser largamente atribuído ao desenvolvimento de funções que descrevem adequadamente a energia transitória, responsável pela separação de um ou mais geradores do resto do sistema, e uma melhor estimativa da energia crítica necessária para levarem esses geradores a perder o sincronismo com o sistema. A última questão, freqüentemente citada na literatura como a determinação da “região de estabilidade”, é apontada como de considerável interesse prático. Do ponto de vista das avaliações probabilísticas da estabilidade transitória, é destacada a indicação da *Power Engineering Society*, do IEEE, no sentido de que a atual abordagem determinística para avaliação de segurança resulta, muitas vezes, em restrições de operação dispendiosas que não são justificadas pelo baixo nível de risco correspondente. Prevê-se que a abordagem probabilística pode conduzir a uma melhor avaliação de segurança com base na quantificação da magnitude do risco associado a um distúrbio específico. A literatura sobre a abordagem probabilística de estabilidade transitória mostra uma variedade de técnicas que podem ser classificados em duas categorias da seguinte forma: (i) determinação da probabilidade de instabilidade, por exemplo, na linha de *Billinton & Kuruganty* [12-20], e; (ii) avaliação probabilística de margens de estabilidade, por exemplo, na linha de *McCalley et alii* [39]. O relatório representa uma investigação bastante detalhada do estado da arte em avaliação de segurança probabilística, sendo suas conclusões e recomendações ainda muito atuais.

Amjady [68] apresenta, em artigo de 2004, uma abordagem voltada para avaliações de segurança probabilística em tempo real. A metodologia apresentada aplica técnicas de inteligência computacional – redes neurais e conjuntos difusos – de forma a produzir um ambiente de cálculo viável de ser aplicado em tempo real e capaz de abarcar o cálculo de índices probabilísticos associados à estabilidade transitória e à estabilidade de tensão em sistemas de potência, sendo a demonstração da viabilidade de seu uso através da apresentação de resultados de sua aplicação a um sistema real.

Kirschen, Jayaweera, Nedic, & Allan [69], em 2004, partem da argumentação de que a análise de segurança determinística fornece apenas uma indicação binária e, portanto, muito limitada, sobre a segurança do sistema. Propõem, assim, uma nova abordagem complementar à análise determinística, agregando uma indicação contínua de estresse do sistema, tendo em conta a natureza probabilística do problema, através de uma abordagem de regime permanente. É proposta uma técnica para calcular um indicador probabilístico do nível de estresse em um sistema de potência. Esta técnica é baseada no estabelecimento de uma escala calibrada de casos de referência e no uso de amostras correlacionadas em uma simulação de Monte Carlo. São apresentados resultados de testes para um sistema de grande porte.

Hockenberry & Lesieutre [70], apresentam, em 2004, uma aplicação do chamado *Método da Colocação Probabilística* (em inglês, *Probabilistic Collocation Method – PCM*) para a avaliação do efeito das incertezas em parâmetros do sistema de potência sobre o comportamento esperado de variáveis de interesse do sistema elétrico de potência (tensões, ângulos, etc.). O PCM, essencialmente, cria modelos polinomiais que relacionam os parâmetros incertos do sistema com as saídas de interesse. O poder do método reside na sua capacidade de selecionar pontos de simulação adequados para criar um modelo polinomial que tem os mesmos momentos que um modelo de ordem superior. Um mesmo conjunto de simulações é usado para ajustar todos os modelos polinomiais para uma simulação particular, portanto, o método é mais flexível e menos custoso computacionalmente do que métodos tradicionais como, por exemplo, técnicas de redução de variância. Os modelos polinomiais são criados com base em simulações cuidadosamente selecionados e não são aproximações locais, como é o caso das aproximações por expansão em série de Taylor. Os autores afirmam que os resultados apresentados no artigo levariam meses para serem obtidos com outros métodos padrão e que o método da colocação probabilística representa uma grande promessa para implementação de modelos de avaliação probabilística de sistemas de potência sob o enfoque dinâmico.

Kim & Singh [71], em 2005, apresentam trabalho com proposta de um método para avaliação da segurança do sistema de potência baseada em um classificador de Bayes. O método pode ser aplicado para calcular índices de segurança probabilística, bem como

para a avaliação de segurança em tempo real. Em geral, a determinação do estado de segurança é um processo complexo e demorado devido processo dinâmico envolvido com o comportamento do sistema. Estes efeitos podem ser incorporados para considerar estabilidade transitória, o atendimento à carga do sistema sem violação de restrições e os estudos de estabilidade de tensão. As variações da carga do sistema bem como as contingências podem afetar o sistema levando-o a um ponto de operação diferente. É impraticável, se não impossível, avaliar todas essas situações, tais como contingências resultantes da variação da carga. A simulação de Monte Carlo, um dos métodos possíveis de análise de confiabilidade do sistema, requer a avaliação de cada amostra do estado operacional do sistema, sendo de computação intensiva. No método proposto, primeiramente, obtém-se a distribuição de probabilidade conjunta dos vetores de características através de alguns dados de treinamento. Uma vez que esta distribuição conjunta é obtida, o classificador de Bayes prevê a avaliação da segurança do sistema sem análises de contingência complicadas, podendo reduzir a carga computacional.

Li [5] publica, em 2005, um livro dedicado a modelos, métodos e critérios para a avaliação de risco em sistemas de potência. Reconhecida como importante componente do risco em um sistema de potência, a avaliação probabilística de estabilidade transitória recebe atenção nesta publicação. *Li* discorre sobre critério de seleção de estados pré-defeito, modelos de distúrbios, simulação Monte Carlo e simulação da estabilidade transitória. Sugere, também, abordagens específicas para estudos de planejamento e de operação, com diferenciações na construção e consideração de incertezas em cenários. Através de exemplos de aplicação de avaliações de risco a sistemas reais, *Li* conclui que as avaliações de risco (probabilístico) de estabilidade transitória podem contribuir para complementar e melhorar as análises de estabilidade transitória realizadas pelas empresas de energia elétrica.

Yu & Singh [72], publicam em 2006, um artigo no qual propõem um algoritmo para incorporar restrições de segurança no cálculo da capacidade de carregamento de um sistema de potência. A simulação de Monte Carlo é utilizada para possibilitar o cálculo probabilístico da capacidade de carregamento considerando as características estocásticas da estabilidade transitória. Um exemplo de aplicação ao sistema-teste de nove barras do WSCC é apresentado. Na avaliação da estabilidade transitória os autores

utilizam um tempo de simulação de 1 a 1,5 segundos (cobrindo somente o período aproximado da primeira oscilação), não consideram a atuação de controles e utilizam como critério de estabilidade a excursão angular do rotor (acima de 180° o sistema é considerado inseguro), sem cálculo de margens. As incertezas consideradas na análise de segurança compreendem o *tipo de defeito* (considerado sempre como trifásico), a *localização do defeito* (as probabilidade de falha das linhas de transmissão são obtidas da estatística e a localização na linha obedece a uma distribuição uniforme), *tempo de eliminação do defeito* (obedecendo a uma distribuição normal), o *tempo de religamento* (obedecendo a uma distribuição normal) e a *duração do defeito* (obedecendo a uma distribuição Rayleigh. Os autores concluem que a análise probabilística da estabilidade é capaz de fornecer resultados mais esclarecedores nos cálculos de capacidade de carregamento do sistema. Adicionalmente, a informação estatística da distribuição de probabilidade da capacidade de carregamento pode ser um guia claro para a operação do sistema de potência.

Song, He, Zhang & Guo [73], apresentam em 2006, a proposição de um arcabouço abrangente para avaliação de segurança probabilística em sistemas de potência considerando perdas em cascata, através de uma abordagem por enumeração. Os autores apresentam um estudo de caso para o sistema IEEE-RTS. Os autores não esclarecem os detalhes da simulação de estabilidade, especialmente o modo de detecção de instabilidade. Embora proponham um cálculo de risco com base no conceito do produto da probabilidade do evento por sua consequência, os autores não apresentam esses índices, tampouco o cálculo da severidade que lhes dá origem.

Em 2006, *Hiskens & Alseddiqui* [74], retomam e estendem a linha de pesquisa apresentada por *Hiskens, Pai & Nguyen* [52]. Naquele trabalho foi apresentada uma discussão sobre uma abordagem para aproximação dos efeitos das incertezas em parâmetros baseada em sensibilidade de trajetória. Parâmetros de modelos de sistemas podem, muitas vezes, nunca pode ser conhecidos exatamente. Modelos compostos de carga são particularmente desafiadores para se parametrizar devido à sua natureza estocástica. Sendo, também, o caso para a geração distribuída de alta penetração. Apesar disso, os resultados dos estudos de simulação do sistema de potência são rotineiramente utilizados no planejamento e em decisões operacionais. Portanto, é importante

quantificar os erros introduzidos pelas incertezas nos parâmetros. O artigo fornece técnicas para, aproximadamente, delimitar esses erros.

Em 2007, *Anghel, Werley & Motter* [75] introduzem um modelo estocástico que descreve a *dinâmica quase-estática* de uma rede de transmissão elétrica no âmbito de perturbações aleatórias introduzidas pelas flutuações de carga, remoção de componentes do sistema e reparo. Os autores utilizaram uma aproximação linear das equações de fluxo de potência e aplicaram técnicas de programação linear para otimizar o despacho de geradores e cargas, a fim de eliminar sobrecargas na rede associadas a falhas no sistema.

Ali, Dong, Zhang & Li [76], em 2007, aplicam técnicas de computação de alto desempenho para uma abordagem probabilística da estabilidade transitória. O artigo propõe um novo método para análise de estabilidade transitória através da obtenção do tempo crítico de eliminação do defeito usando computação de alto desempenho. A análise probabilística da estabilidade transitória é um problema que requer um alto poder de computação sendo recomendado o uso de computação de alto desempenho para sua solução. O artigo apresenta um protótipo desenvolvido com essa técnica e os resultados de sua aplicação a um estudo de estabilidade transitória probabilística para o sistema New England (39 barras). Os autores abordaram o problema via simulação no tempo, observando apenas a estabilidade de primeira oscilação, com modelagem dinâmica muito simplificada, e consideraram como única incerteza a carga do sistema.

Schilling, Stacchini de Souza & Do Coutto Filho [77], em 2008, apresentam um detalhado panorama dos estudos de confiabilidade probabilística e dos procedimentos adotados no Brasil para este fim. Os procedimentos apresentados são utilizados pelo operador do sistema elétrico brasileiro, tendo sido tornados mandatórios pelo órgão regulador. O artigo apresenta alguns detalhes da metodologia aplicada no ciclo de monitoração da confiabilidade e os critérios correntemente em uso no Brasil. Os procedimentos representam a prática atual do operador do sistema, sendo a informação divulgada no artigo destinada a servir como referência de comparação de práticas com outras empresas no Brasil, bem como com as adotadas por empresas de outros países. Não são apresentados resultados numéricos da aplicação dos procedimentos descritos.

Os autores discorrem sobre a tipologia dos estudos e premissas adotadas. Continuam sua exposição descrevendo e comentando sobre a modelagem aplicada aos estudos de confiabilidade, envolvendo as fontes primárias de energia, fenômenos ambientais, parque gerador, topologia, sistema de distribuição, carga e práticas operativas. Discorrem, também, sobre a representação das incertezas associadas aos elementos de transmissão. Especial atenção é dada ao procedimento de simulação computacional, com a descrição das diversas etapas envolvidas na produção de um resultado de avaliação de confiabilidade. Esse procedimento envolve etapas de *pré-processamento* (correspondendo à preparação de um caso convergido de fluxo de potência sem violações e dados adicionais); *obtenção do caso base de confiabilidade* (um caso por nível de carga); *composição do espaço probabilístico de estados* (incluindo, nos estudos de referência, todas as linhas de transmissão, transformadores da rede básica e transformadores de fronteira); *avaliação da confiabilidade* (composta de três passos que envolvem a seleção dos estados do sistema, a análise dos estados selecionados e a avaliação dos índices de confiabilidade). Finalmente, os autores descrevem e comentam os índices utilizados nas análises de confiabilidade para o sistema brasileiro.

Na sequência de artigos (todos publicados em 2009) que finaliza essa revisão bibliográfica são encontrados aspectos e análises importantes relacionados ao estudo de fenômenos dinâmicos em sistemas de potência. Nenhum deles trata da questão de aplicação de técnicas probabilísticas, mas podem servir como fonte de referência para a *identificação de modos de falha dinâmicos*, *seleção de indicadores de segurança* e *aplicações de métodos avançados para a avaliação de estabilidade*. Todos são temas de grande interesse e relevância para a implementação de um arcabouço para avaliação de segurança transitória probabilística de sistemas de potência.

Allen, Keri, DeGroff, Kosterev & Tatro [78], destacam a importância dos fenômenos de estabilidade dinâmica para o planejamento de sistemas de potência. Itens importantes na realização desses estudos são as avaliações de fenômenos como a instabilidade de primeira oscilação, oscilações não amortecidas e o desempenho sob ilhamento. Os autores destacam a necessidade de que esses estudos sejam realizados em horizonte de planejamento, quando há tempo suficiente para o projeto de medidas preventivas que garantirão a segurança futura do sistema. De grande importância é, também, a

existência de modelos e dados precisos para as avaliações de estabilidade, dado que o uso de dados e modelos não validados em estudos de estabilidade representa apenas a realização de um exercício acadêmico.

Pizano-Martinez, Fuerte-Esquivel & Ruiz-Vega [79], aplicam o método SIME para incluir restrições de segurança na análise de fluxo de potência ótimo. Para controle da estabilidade transitória, os autores propõem uma restrição dinâmica que limita o desvio angular do OMIB⁴ em um passo de integração determinado. Com base nessa restrição, deriva-se uma estabilização transitória do sistema utilizando-se um fluxo de potência ótimo reformulado, com restrição de estabilidade transitória. A potencialidade e as principais características do método proposto são apresentadas através de um exemplo numérico de aplicação a um sistema de nove barras.

Tan, Vowles & Zivanovic [80], apresentam mais uma aplicação do método SIME, agora para a determinação de limites de estabilidade transitória utilizando o programa PSS/E⁵. Os autores destacam em suas conclusões a necessidade de aperfeiçoamento na aplicação do critério de parada antecipada de modo a identificar a ocorrência de instabilidade em *backswing*. Também, a técnica para *identificação de grupos de máquinas* requer mais investigação porque houve a indicação de que algumas máquinas foram associadas a um grupo incorreto⁶. Os autores aplicaram uma busca binária-SIME ao modelo simplificado do sistema de potência australiano, para a determinação de seus limites de estabilidade transitória e tempos críticos de eliminação de defeitos. O método proposto foi comparado com o método de busca binária na pesquisa de limites de estabilidade transitória.

Kerin, Bojan & Bizjak [81], fazem uma avaliação da aplicação de índices de estabilidade transitória em estudos dinâmicos de sistemas de potência. Os índices de desempenho são aplicados na análise e classificação de contingências e estão associados à *coerência entre geradores, conversão de energia transitória, produtos escalares* derivados do conceito clássico de função de energia transitória e *desvio*

⁴ One Machine Infinite Bus (vide Capítulo IV).

⁵ Power System Simulator for Engineering.

⁶ Nesta Tese, tanto a identificação de instabilidade em *backswing* quanto a identificação dos grupos crítico e não-crítico de máquinas foram implementadas de forma bem sucedida.

angular de geradores. Tais índices são calculados por meio de uma simulação do sistema de potência no domínio do tempo. Esses índices demonstraram ser uma eficiente ferramenta na avaliação e classificação de contingências, podendo ser implantados em modelos convencionais de simulação no domínio do tempo. O tempo médio necessário para a simulação e cálculo dos índices de um caso foi de 2,6 segundos, sendo uma indicação de que esses índices são adequados para aplicação em tempo real.

Xiao & McCalley [116] apresentam artigo propondo uma nova técnica para avaliação econômica e de segurança de um sistema de potência sob o ótica de sobrecargas e de tensões baixas. A técnica utilizada é uma otimização multiobjetivo baseada em risco de sobrecarga, risco de tensão baixa e custo. Os autores concluem que a técnica utilizada é capaz de identificar soluções de menor risco e custo quando comparada com a técnica convencional de fluxo de potência ótimo com restrições de segurança. Também, segundo os autores, o artigo oferece evidência que as soluções obtidas com controle de segurança mais uniforme são menos expostas a sobrecargas em cascata. Terminam afirmando que é de se esperar que essas soluções apresentem comportamento similar para instabilidade de tensão, instabilidade transitória e oscilatória, embora não tenham modelado esses fenômenos em suas análises.

II.4 Sumário

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica representativa de estudos realizados sobre a análise de estabilidade transitória de sistemas de potência sob o efeito de incertezas.

Verificou-se que a metodologia proposta nesta Tese diferencia-se das soluções apresentadas na literatura pesquisada, principalmente no que concerne à abordagem utilizada para o tratamento de diferentes tipos de incertezas, envolvendo cenários e distúrbios, como também pelo grau de precisão na modelagem da dinâmica do sistema e eficiência no cálculo de índices probabilísticos de segurança.

Uma contribuição adicional deste capítulo está apresentada em Schilling, Billinton & Groetaers dos Santos [7], na forma de levantamento exaustivo da literatura do tema.

* * *

Capítulo III Tratamento de Incertezas sob Regime Transitório

III.1 Introdução

O uso prático das técnicas de análise de confiabilidade em sistema de potência, sob a influência de incertezas, vem sofrendo um lento progresso desde as primeiras tentativas de aplicação, registradas na década de 30 do século passado. O maior avanço vem sendo registrado no que concerne ao aspecto da *monitoração* preditiva numérica. Os aspectos associados à *diagnose* dos índices probabilísticos e uso prático (*gestão*) dos resultados obtidos ainda podem ser considerados pouco difundidos, no Brasil e exterior.

Mesmo a prática da monitoração só encontrou razoável maturidade no que diz respeito à análise em regime estacionário (i.e. *adequação*). No que concerne à análise em regime dinâmico (i.e. *segurança*), o estado-da-arte do tema ainda revela ampla variedade de problemas, de natureza conceitual e prática (vide [4,116,117]), à espera de soluções realistas.

Este capítulo aborda diversos aspectos fundamentais para o desenvolvimento da análise de segurança dinâmica de sistemas de potência com tratamento estocástico de incertezas, objeto desta Tese. Tratados conceitualmente em [37,87,91], tais aspectos são aqui adaptados com o detalhe requerido para a estruturação de um aplicativo computacional proposto no Capítulo V.

Este capítulo faz uso intensivo (ipsis verbis) das referências [10,91,92,93], adaptando-as para o ambiente de grandes distúrbios. Os conceitos válidos tanto para o ambiente de pequenas perturbações, como para o tratamento de grandes distúrbios são, portanto, reproduzidos de forma integral.

III.2 Discriminando Incertezas

III.2.1 Incertezas como Processos Estocásticos

A evolução de incertezas probabilísticas ao longo do tempo requer uma modelagem via processos estocásticos [84]. Sabe-se que a análise da segurança sob incertezas envolve a consideração de dois tipos de comportamento dinâmico [37]: o associado aos fenômenos físicos (eletromecânicos e eletromagnéticos) e aquele relacionado à evolução temporal da própria incerteza. Uma das proposições pioneiras abordando a representação da temporalidade das incertezas foi apresentada por *Patton* [82], através da função segurança $S(t)$, definida como:

$$S(t) = \sum_i p_i(t) q_i(t) \quad (\text{III.0})$$

onde $p_i(t)$ é a probabilidade do sistema residir no estado i no instante t e $q_i(t)$ é a probabilidade de que o estado i constitua, no instante t , um estado cuja contabilização numérica seja do interesse do analista (e.g. represente um modo de falha). O cômputo dos termos exige que as incertezas sejam tratadas via processos estocásticos.

Assim, a análise rotineira da segurança, sob a influência de incertezas, torna-se praticamente inviável se não forem adotadas premissas facilitadoras. Uma primeira hipótese, usualmente adotada, é a que tenta representar a dinâmica das incertezas evoluindo num espaço probabilístico Markoviano⁷, preferivelmente homogêneo (i.e. com intensidades de transições invariantes no tempo). Além dessa, outra hipótese simplificadora e condicionante de todas as considerações levadas a cabo neste capítulo, é a que pressupõe que a influência das incertezas - tratadas como probabilidades - ocorra sempre quando estas já tenham atingido o estado estacionário (i.e. $t \rightarrow \infty$). Essas duas premissas de ordem prática viabilizam uma análise computacional da segurança

⁷ Um processo estocástico é dito Markoviano se a distribuição de probabilidade condicional dos estados futuros do processo, dado o estado presente e todos os estados passados, depende apenas do estado presente e de nenhum dos estados passados, i.e. os estados futuros são condicionalmente independentes dos estados passados (da trajetória do processo) dado o estado presente [84].

probabilística de sistemas de potência, assim como toda a análise convencional da confiabilidade probabilística, no âmbito da adequação [10,91,93].

III.2.2 Modelagem de Incertezas Estacionárias

Enquanto que a clássica análise de adequação restringe-se ao tratamento do sistema em regime estático, a análise de segurança, *stricto sensu*, aborda a representação de fenômenos dinâmicos. Em outras palavras, a adequação reflete um único instante de tempo, enquanto que a segurança está associada à predição da evolução temporal do sistema. A diferença básica entre adequação e segurança, no contexto da modelagem, identifica-se pela ausência, no caso da adequação, de equações diferenciais representativas do comportamento das máquinas elétricas, reguladores e demais equipamentos que afetem de modo intrínseco a dinâmica do sistema.

Um dos mais relevantes problemas com o qual o analista de confiabilidade probabilística se depara é a combinação adequada de horizontes temporais (e.g. curto, médio e longo prazos) com os respectivos fenômenos e efeitos modelados para o horizonte em questão, considerando ainda as incertezas de interesse.

Esse problema é não trivial porque podem ser identificados fenômenos físicos com dinâmicas rápidas e lentas, aos quais podem ser associados certos tipos de incertezas enquanto outras devem ser desprezadas. Isso ocorre porque as próprias incertezas, interpretadas como processos estocásticos, também têm suas “dinâmicas” virtuais [37]. Ou seja, deve ser buscada uma compatibilidade entre as constantes de tempo da dinâmica física com as “constantes de tempo” virtuais relacionadas às incertezas matemáticas. Em geral, quanto mais amplo o horizonte temporal, devem ser consideradas mais incertezas com dinâmicas mais lentas. Em contraposição, quanto mais curto for o horizonte temporal de interesse, perdem relevância as incertezas com dinâmicas muito lentas, ganhando significado as incertezas com dinâmicas rápidas. Por exemplo, em uma análise de segurança probabilística no horizonte de curto prazo da operação diária, as incertezas representativas dos cenários hidrológicos do sistema poderiam ser relegadas a segundo plano.

A seleção e combinação conveniente das incertezas de forma coordenada com os fenômenos e horizontes temporais a serem tratados, gera o problema de composição do denominado espaço probabilístico de estados, sob uma hipótese de comportamento Markoviano homogêneo de transições entre estados probabilísticos sem memória. A Tabela III.1 tece considerações sobre as características dos espaços probabilísticos convencionais gerados nos casos de adequação e segurança e a viabilidade de tratamento computacional simplificado [91,93].

Tabela III.1 – Espaços probabilísticos de estados: adequação vs. segurança

Adequação	Segurança
Espaço probabilístico transcomputacional para sistemas de grande porte. Uma das causas usuais da explosão combinatorial advém da conjunção de parques geradores e topologia, ambos com incertezas representadas. Entretanto, o tratamento computacional convencional ainda é viável por enumeração parcial (contingências simples e, em alguns casos, duplas) ou simulação Monte Carlo independente ou pseudo-seqüencial.	Espaço probabilístico absolutamente transcomputacional de complexidade e porte superior ao gerado para o problema da segurança sob pequenas perturbações. Hiper explosão combinatorial agravada pelas incertezas relacionadas com os tipos, locais e durações dos distúrbios. Possibilidade de tratamento computacional muito preliminar via enumeração simplificada e técnicas de processamento seqüencial convencional. Vislumbra-se que a solução do problema ganhe maturidade com o emprego de tecnologias de processamento paralelo e distribuído, uso intenso de computação evolutiva e avanços conceituais relacionados com o cálculo rápido das condições dinâmicas do sistema

Nota: espaço transcomputacional [83] é aquele teoricamente intratável, mesmo por uma máquina universal (computador ideal) de *Turing*[109]

A composição de um espaço probabilístico de estados, cuja análise seja praticamente factível, constitui então o aspecto mais importante da modelagem para a análise de confiabilidade preditiva probabilística, seja no âmbito da adequação, seja no âmbito da segurança. Em ambos os casos, essa tarefa pode ser facilitada pela proposição de uma tipologia hierarquizada de incertezas, qual seja [91,93]:

- *Incetezas Associadas a Cenários*
 - *Incetezas Associadas a Distúrbios (ou “Grandes” Perturbações)*
 - *Incetezas Associadas a Ruídos e Parâmetros (ou “Pequenas” Perturbações)*
 - *Hipóteses associadas a Pontos de Operação*

A Figura III.1 resume a taxionomia proposta para o tratamento das incertezas de um sistema potência [91,93].

Frequente Disponibilidade de Valores Probabilísticos Discretos baseados em Históricos Estatísticos	Eventual Disponibilidade de Distribuições Probabilísticas Contínuas
CENÁRIOS DISTÚRBIOS (grandes perturbações)	RUÍDOS (pequenas perturbações) PONTOS DE OPERAÇÃO (perfis de tensão, despachos controles, ajustes de proteção)

Figura III.1 – Tipologia de incertezas

III.2.2.1 Modelagem de Cenários

A categoria de incertezas relacionada a *cenários* tem um caráter circunstancial, representativo dos recursos sistêmicos disponíveis para uso. Nela enquadram-se as disponibilidades das fontes primárias de energia, parque gerador, malha de transmissão (ramos e nós) e patamares de carga. Cabe aqui adiantar que as incertezas associadas ao comportamento da carga são representadas pela combinação de patamares de carga e outras categorias de incertezas, aqui denominadas como *ruídos* e que serão adiante sucintamente mencionadas. Nesta Tese os cenários relacionados a fontes primárias, parque gerador e arranjos nodais não serão tratados.

Os cenários associados às fontes primárias de energia podem ser traduzidos na forma de faixas de valores de fluxos nas interligações do sistema e serão doravante referidos como *cenários de intercâmbios*. Por motivo de simplicidade, o protótipo desta Tese contemplará até cinco modos de intercâmbio, associados às suas respectivas probabilidades de ocorrência.

Nos estudos tradicionais de adequação, quando a malha de transmissão é analisada por enumeração, a avaliação restringe-se às contingências simples, pois a enumeração de contingências duplas de sistemas reais de grande porte já pode extrapolar a capacidade computacional usualmente disponível. Também é relevante aqui ressaltar que as contingências simples normalmente tratadas na adequação enfocam apenas os eventos forçados, tipicamente com duração superior a um minuto. Eventos significativos, com duração inferior, quando de interesse, podem ser tratados no âmbito da análise de segurança. Para o problema da análise de segurança dinâmica probabilística, seria em princípio, mais simples limitar a análise, tomando como referência a rede completa submetida tão-somente às contingências forçadas de curta duração (por exemplo, curtos circuitos mono e trifásicos).

A estratégia tradicional de tratamento do comportamento aleatório da carga propõe a composição de dois tipos de incertezas: as associadas a patamares de carga e aquelas relacionadas a *ruídos*. Este segundo tipo de componente será brevemente comentado adiante. Os denominados patamares de carga geram os cenários de carga. A avaliação das probabilidades de ocorrência de cada patamar é obtida através de técnicas tradicionais de agregação estatística. Nesta Tese recomenda-se que uma implementação inicial limitada a cinco (5) cenários de carga, porém em estrita sintonia com os cenários do parque gerador previamente ajustado pelo analista. [10,91,93].

III.2.2.2 Disponibilidade de Dados para Avaliação de Cenários

No Brasil, registram-se, ao longo dos anos, diversos esforços [86,88] visando a obtenção dos dados estatísticos de interesse, o que permite que hoje se realizem estudos clássicos de adequação e se vislumbre a possibilidade de extensão dos estudos para o enfoque de segurança probabilística.

Na Tabela III.2 apresenta-se um panorama sucinto, sob a forma comparativa, da relação dos dados estatísticos necessários para a realização das análises de adequação e segurança. O que se pode aí constatar é a *viabilidade prática da efetivação desses estudos no âmbito da segurança*, pois a maioria dos requisitos estatísticos já é razoavelmente atendida pelas imposições advindas da análise de adequação [91,93].

Observa-se, entretanto, a necessidade de cálculo especializado para as intensidades de transições (λ) entre estados normais e estados com distúrbios, tais como curtos-circuitos monofásicos, trifásicos, etc. (vide Figura III.2). A eventual ausência dessas estatísticas obrigará a recorrência a artifícios para a obtenção de ponderações probabilísticas para os tipos e locais de ocorrências de distúrbios. No que concerne às durações dos distúrbios, as mesmas podem admitir um tratamento aproximado, via discretização de distribuições Gaussianas, ou uma análise por técnicas de sensibilidade [10,91,93].

Tabela III.2 – Disponibilidade de dados para estudos de adequação e segurança

Incerteza	Adequação	Segurança
Intercâmbios	Status estabelecido: São usualmente conhecidas ou estimadas as incertezas de séries hidrológicas (sintéticas ou históricas).	Os cenários de intercâmbios nas interligações podem ser ponderados por probabilidades de ocorrências, extraídas de curvas de permanência (oriundas do planejamento da operação). Por simplicidade, propõe-se, em princípio, o tratamento de até cinco cenários de intercâmbio (probabilidades equiprováveis ou com probabilidades específicas).
Topologia ramal (linhas e trafos)	Status bem estabelecido: São conhecidas as estatísticas de disponibilidades de ramos. É usual a modelagem de contingências simples e de ordem superior.	Sugere-se a análise das topologias oriundas de contingências simples, associadas às probabilidades de ocorrência dos distúrbios de interesse (e.g. curtos 1F, 3F). Estatística necessária: idêntica àquela da adequação.
Carga	Status estabelecido: Curva de carga pode ser agregada em patamares representativos de permanências, às quais são atribuídas probabilidades.	O número de patamares e suas respectivas probabilidades devem manter estrita coerência com a representação do parque gerador. Estatística necessária: idêntica àquela da adequação.
Sistemas de Proteção e Controle	Status bem estabelecido: É usual a modelagem de cortes de carga e outros tipos de vinculações usualmente de forma determinística (i.e., a probabilidade de sucesso é unitária).	A modelagem do insucesso do esquema de proteção ou controle é muito relevante. Os dados necessários são disponíveis.

III.2.2.3 Modelagem de Distúrbios (Grandes Perturbações)

O tratamento das incertezas relacionadas aos distúrbios admite dois tipos de abordagens: *com e sem condicionamento*. No enfoque sem condicionamento, objetiva-se estimar todas as intensidades de transição do espaço probabilístico (vide Figura III.2) [10,91,93], incluindo as intensidades de distúrbios, λ_d e μ_d , relacionadas ao estado de defeito representativo de distúrbio, utilizando-se a definição formal da equação (III-1):

$$\lambda_d = \left(\frac{f_{ocorrência}}{t_{exposição}} \right) \times t_{observação} \quad (III-1)$$

Onde:

λ_d é a intensidade de um distúrbio específico (e.g. curto monofásico etc.);

$f_{ocorrência}$ é a frequência de ocorrência do distúrbio em questão;

$t_{exposição}$ é o tempo de exposição durante o qual podem ocorrer os distúrbios;

$t_{observação}$ é o tempo de observação, que inclui o tempo de exposição mais o somatório das durações de todos os distúrbios verificados.

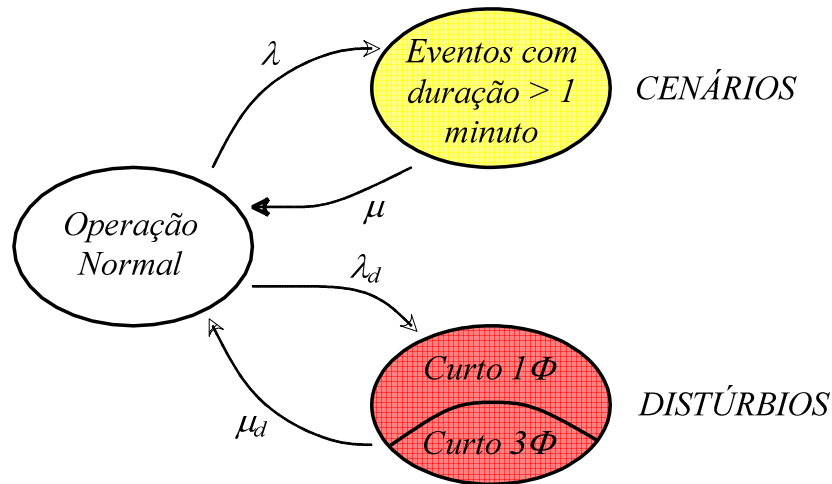


Figura III.2 – Intensidades de transição para cenários e distúrbios

Esse enfoque é conceitualmente dito *sem condicionamento* por sua natureza geral, levando à obtenção de todas as intensidades de transição de um espaço probabilístico qualquer e, por conseguinte, ao cálculo direto das probabilidades de todos os estados, incluindo aqueles representativos de cenários e distúrbios conjuntamente. A Figura III.2 exemplifica uma situação onde as falhas de elementos de transmissão genéricos, com *duração superior a um minuto*, são consideradas como definidoras de cenários topológicos e as falhas representativas de curtos trifásicos e monofásicos são especificamente associadas aos distúrbios.

A *grande dificuldade prática* desse enfoque reside na freqüente inexistência de registros rigorosos da evolução cronológica do desempenho de cada um dos componentes. Sabe-se, por exemplo, que é prática comum a discriminação rigorosa de eventos com duração igual ou superior a um minuto, o que facilita a modelagem de cenários. Por outro lado, para os eventos com duração inferior a um minuto, é usual o desprezo da informação e o registro relativo à duração. Caso essa informação fosse disponível por elemento, estaria viabilizado o cálculo rigoroso da probabilidade de ocorrência de um dado tipo de distúrbio, num dado local.

Perante essa dificuldade, a avaliação das incertezas de distúrbios pode ser tratada via um *enfoque condicionado*. Os condicionamentos podem ser efetivados em relação a várias opções, tais como, cenários particulares, tipos de distúrbios, locais de distúrbios, nível de tensão, etc. Interpreta-se aqui que o condicionamento significa que o cenário será analisado condicionadamente à ocorrência de um dado distúrbio (ou seja, *um dado distúrbio específico ocorre com probabilidade unitária*).

Por exemplo, para um dado cenário topológico específico (cuja probabilidade de ocorrência é conhecida), a probabilidade de ocorrência de um distúrbio do tipo curto-circuito, por descarga atmosférica *em certa linha de transmissão*, pode ser estimada pela razão entre o comprimento da linha e a extensão acumulada das linhas de mesmo nível de tensão do sistema. Com essa estratégia fica garantida (i.e. condicionada) a ocorrência do distúrbio no sistema, já que a soma das probabilidades de ocorrência de distúrbio em cada linha de transmissão necessariamente atinge a unidade. Evidentemente o cálculo pode ser mais refinado, caso sejam conhecidas as estatísticas sobre tipos, causas e locais de distúrbios verificados no sistema. [10,91,93].

III.2.2.4 Ruídos (Pequenas Perturbações)

A última categoria da hierarquia de incertezas proposta em [91,93] é denominada como ruído⁸. Como a própria denominação sugere, os ruídos são as incertezas de pequena magnitude, geralmente de alta freqüência, naturalmente presentes em qualquer sistema

⁸ Cita-se aqui este tipo de incerteza tão-somente para fins de organização conceitual.

físico. Este tipo de incerteza é exaustivamente abordado em [9,10], e não será considerada nesta Tese.

III.2.3 Combinação de Incertezas para Estudos de Adequação e Segurança

A combinação dos diferentes tipos de incertezas discutidas nas seções precedentes enseja a variedade de estudos de confiabilidade mostrados na Tabela III.3. Pode-se aí constatar que os estudos de adequação envolvendo incertezas de cenários (principalmente topologias de transmissão e parques geradores) são os de mais larga difusão. Todos os demais tipos de estudos ainda apresentam grandes desafios de natureza teórica e computacional [91,93].

Tabela III.3 – Comparando combinações de incertezas para adequação e segurança

Incerteza em	Adequação	Segurança
1) Cenários	É a aplicação tradicional mais consolidada da análise probabilística da confiabilidade em regime estático.	Aplicação conceitualmente abonada, porém ainda praticamente inexplorada.
2) Distúrbios (Grandes Perturbações)	Aplicação conceitualmente não recomendável, pois a análise de adequação só reflete a situação de estados em regimes estacionários. A trajetória dinâmica entre estados não é tratada, não sendo bem representada a atuação de medidas corretivas.	É a aplicação em estágio mais desenvolvido da análise probabilística de segurança dinâmica. Incertezas tipicamente tratadas: tipos, locais e durações de defeitos.
3) Ruídos (Pequenas Perturbações)	Tecnicamente viável, porém quase não utilizada porque resultados semelhantes podem ser obtidos a partir de análises clássicas de sensibilidade a perturbações. Registra-se na literatura a composição de um dado patamar de carga com ruídos, vide linha (5).	Aplicação não cogitada porque todo sistema real apresenta certo grau de robustez a ruídos. Essa análise, se desejada, pode ser realizada de forma menos onerosa, no âmbito da segurança estática. [10]
4) Cenários + Distúrbios	Vide linha (2). Admite-se uma análise simplificada pelo desprezo de μ_d	Aplicação conceitualmente abonada, porém ainda inexplorada. Apresenta grande potencial de interesse. É foco de atenção prioritária nesta Tese.
5) Cenário + Ruídos	Aplicação já explorada, mormente aquela combinando patamares de cargas com ruídos Gaussianos. Entretanto, inúmeras possibilidades desta combinação permanecem virtualmente inexploradas.	Vide mesmo argumento utilizado na linha (3).
6) Cenário + Distúrbios + Ruídos	No âmbito da adequação esta combinação tem as mesmas restrições apontadas nas linhas (2) e (5).	Sofre da mesma restrição apontada na linha (3).

III.2.4 O Problema da Geração de Estados Inviáveis

A análise probabilística clássica de confiabilidade idealmente requer que o espaço probabilístico de estados definido para o problema em questão seja *convexo*, ou seja, que a soma de todos os estados do espaço (sucesso, insucesso) atinja sempre a unidade. Na prática isso quase nunca ocorre porque em geral a formação do espaço probabilístico é feita de forma computacionalmente automática (combinatorialmente), gerando freqüentemente estados fisicamente inviáveis, porém com probabilidades definidas. O descarte desses estados provoca a perda de convexidade e a conseqüente distorção dos indicadores probabilísticos obtidos. Nos estudos tradicionais de adequação esse problema geralmente acontece quando o cálculo de fluxos de potência para certo cenário não converge.

Situação semelhante também se verifica na análise probabilística de segurança. Uma solução aproximada para esta situação passa por um ajuste heurístico das probabilidades dos estados fisicamente viáveis, numa tentativa de garantir a manutenção da convexidade do espaço probabilístico de estados. Uma alternativa de tratamento para a análise de segurança probabilística sob pequenas perturbações foi proposta por *Takahata* [10], admitindo uma adaptação para a análise de segurança transitória. Não obstante esse tópico não será tratado nesta Tese.

III.3 Avaliação da Segurança de Estados Probabilísticos

Cada estado selecionado do espaço probabilístico considerado deverá ser avaliado quanto a seu desempenho dinâmico. Nessa avaliação serão detectados modos de falha de interesse e geradas grandezas para posterior contabilização e geração dos índices probabilísticos.

Idealmente o método utilizado nessa avaliação deverá ser capaz de avaliar o sistema sob um amplo conjunto de enfoques, incluindo, entre outros, o sincronismo, grau de amortecimento, comportamento da freqüência, margens de estabilidade e outras grandezas relevantes para a caracterização de modos de falha associados à segurança do sistema, tendo, paralelamente, a capacidade de representação detalhada da dinâmica do

sistema de potência e uma resposta rápida o suficiente para tornar seu uso viável na prática. Também idealmente esse método deverá, ainda, ser capaz de, uma vez detectado um modo de falha de interesse, aplicar e avaliar o resultado de uma ou várias medidas corretivas convenientes.

Para a análise de segurança, as medidas corretivas passíveis de consideração contemplam ajustes pré-operacionais (e.g. ajustes de reguladores, ajustes de proteção), ajustes em tempo real (e.g. redespacho, variação de tapes, chaveamentos, atuação de controles flexíveis - FACTS) e, eventualmente, em última instância, medidas corretivas drásticas, tais como esquemas de alívio mínimo de carga e corte seletivo mínimo de geração. Estas duas últimas ações podem representar funções-objetivo de um problema de otimização relacionado à determinação da "estabilidade ótima" (ESO), traduzida pela obtenção de um ponto de operação de segurança máxima (ou seja, risco mínimo). A título organizacional, a Tabela III-4 ilustra diversas possibilidades de medidas corretivas e propostas de funções-objetivo de grande interesse para a análise probabilística de segurança [91,93].

Nesta Tese o desempenho dinâmico do estado selecionado, via enumeração, será realizado pela determinação de um equivalente generalizado de uma máquina contra barra infinita, que constitui o denominado método SIME ("single machine equivalent"), descrito no Capítulo IV.

Por motivo de simplicidade, a única medida corretiva modelada é o religamento tripolar com e sem sucesso. Embora o protótipo desenvolvido não contemple diretamente uma formulação ótima da segurança, o mesmo pode ser adaptado para um uso iterativo visando ao estabelecimento do ponto de operação de máxima segurança, *Silva Neto* [114].

Tabela III.4 – Medidas corretivas e funções objetivo para segurança sistêmica

		Adequação	Segurança
Medidas Corretivas	Redespacho ativo & reativo	Uso tradicional amplo	Possível influência sobre limites dinâmicos de intercâmbios, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência.
	Variação de tapes	Uso menos freqüente	Possível influência na segurança de longo termo. Tempo real.
	Chaveamentos (seccionamentos, conexões, desligamentos, vinculações)	Pouco difundido pela dificuldade de modelagem, mas essencial para carga leve e sistemas de subtransmissão	O religamento de linhas após a ocorrência de defeitos é uma medida tradicional. Tempo real.
	Controles flexíveis (FACTS)	Raros registros na literatura dada a dificuldade de modelagem.	Medida corretiva por excelência na análise de segurança. Tempo real.
	Ajustes de reguladores	Não se aplica.	Uso tradicional amplo (pré-operacional).
	Ajustes de proteção sistêmica	Uso indireto por vinculações, porém de implementação custosa.	Uso tradicional amplo (pré-operacional)
Estado da Arte			
Funções Objetivo	Mínimo corte de carga	Formulação clássica na análise de adequação pela solução do problema de fluxo de potência ótimo (FPO)	Definição de esquema de alívio de carga ou ilhamento via solução de FPO com restrição de segurança ou formulação do problema de "estabilidade ótima" (ESO).
	Mínimo corte seletivo de geração	Rara utilização indireta por simulação de vinculações. Passível de consideração no problema de FPO.	É uma função objetivo recomendável na formulação do problema de ESO.
	Máxima margem ou intercâmbio para perda de sincronismo	Não se aplica.	Aplicação altamente desejada. É uma função objetivo recomendável na formulação do problema de ESO.
	Máxima distância de autovalores ao semiplano positivo	Possível adaptação da função objetivo ao problema de FPO.	Não se aplica.
	Máximo amortecimento	Possível adaptação da função objetivo ao problema de FPO.	Aplicação desejada. É uma função objetivo recomendável na formulação do problema de ESO.

III.4 Índices de Segurança Probabilística

A título comparativo, a Tabela III.5 registra alguns dos possíveis índices que podem ser relacionados aos estudos de adequação ou segurança probabilística. Cumpre notar que a variedade de indicadores possíveis é muito abrangente [8, 85, 90], e a tabela em questão tenta apenas enfatizar o enquadramento conceitual de uma parcela dos indicadores possíveis [91,93]. Os indicadores utilizados nesta Tese encontram-se destacados em negrito e suas equações são definidas na seqüência.

Tabela III.5 – Natureza de índices probabilísticos para análise da adequação e segurança

Adequação	Segurança
Probabilidades de Situações - Interrupção de Carga (PPC) - Ilhamento - Desbalanço Carga/Geração - Violações de Limites ou Critérios	Probabilidades de Situações - Instabilidade - Margem de estabilidade menor que um dado critério - Violações de Limites ou Critérios
Expectâncias - Potência não Suprida (PNS) - Energia não Suprida (ENS) - Frequências de Interrupções (FPC) - Durações de Interrupções (DPC)	Expectâncias - Margem de estabilidade negativa - Corte de carga por subfrequência - Corte de geração por sobrefrequência
Outros Indicadores - Severidade (SEV) - Momentos de Ordem Superior - Estatísticas Diversas - Distribuições Estatísticas	Outros Indicadores - Momentos de Ordem Superior - Estatísticas Diversas - Distribuições Estatísticas

III.4.1 Probabilidade de Ocorrência de Instabilidade – POI

O cálculo da probabilidade de ocorrência de instabilidade é feito pelo somatório das probabilidades de todos os estados instáveis do espaço probabilístico através da equação (III–2):

$$POI = \sum_{i \in I} p_i \quad (\text{III–2})$$

Onde :

- POI - probabilidade de ocorrência da instabilidade;
- p_i - probabilidade do i -ésimo estado instável;
- i - i -ésimo estado instável;
- I - conjunto de estados instáveis contabilizados do espaço probabilístico (estados avaliados com margens negativas).

Interpretação: número entre zero e um, que indica o grau de debilidade dinâmica do sistema. Quanto maior o seu valor, menor é o grau de segurança dinâmica do sistema.

III.4.2 Probabilidade de Ocorrência de Estabilidade – POE

O cálculo da probabilidade de ocorrência de estabilidade é feito pelo somatório das probabilidades de todos os estados estáveis do espaço probabilístico através da equação (III-3):

$$POE = \sum_{e \in E} p_e \quad (III-3)$$

Onde :

- POE - probabilidade de ocorrência da estabilidade;
- p_e - probabilidade do e -ésimo estado estável;
- e - e -ésimo estado estável;
- E - conjunto de estados estáveis contabilizados do espaço probabilístico (estados avaliados com margens positivas).

Interpretação: é o indicador complementar àquele expresso pela equação (III-2).

Nota: Em condições ideais tem-se que

$$POI = 1 - POE \quad (III-4)$$

Como a manutenção da convexidade (vide seção III.2.4) nem sempre é trivial, a análise completa do espaço de estados nem sempre é viável. Assim justifica-se a necessidade do cálculo dos índices das Eqs. (III.2) e (III.3). O resultado da soma de ambos os indicadores revela a abrangência e a precisão da análise realizada: quanto mais próximo da unidade, mais plena terá sido a convexidade alcançada.

III.4.3 Probabilidade de Margem Insuficiente – *PMI*

Este índice é determinado através da contabilização de todos os estados do espaço probabilístico cuja margem de estabilidade seja menor do que um dado $\eta_{min} > 0$, da forma apresentada pela equação (III-5)

$$P M I = \sum_{n \in N} p_n \quad (III-5)$$

Onde :

- PMI - probabilidade de margem insuficiente;
- p_n - probabilidade do n -ésimo estado com margem menor que η_{min} ;
- n - n -ésimo estado estável;
- N - conjunto de estados estáveis contabilizados do espaço probabilístico (estados avaliados com margens positivas).

Interpretação: número entre zero e um indicando a proporção de estados com margem positiva menor que uma margem mínima especificada pelo analista.

III.4.4 Expectância de Margem Negativa – *EMN*

Um índice global de interesse configura-se na expectância de margem negativa, dada por:

$$\bar{E}(M^-) = \sum_{i \in I} m_i p_i \quad (III-6)$$

Onde :

- $\bar{E}(M^-)$ - expectância de margem negativa;
 m_i - margem negativa de estabilidade do i -ésimo estado instável;
 p_i - probabilidade do i -ésimo estado instável;
 I - conjunto de estados instáveis contabilizados do espaço probabilístico (estados avaliados com margens negativas).

Interpretação: representa o grau de insegurança dinâmica do sistema.

Observação: este índice deve ser contabilizado separadamente para as margens⁹ de Tipo 1 e de Tipo 2, resultando em expectâncias de margens negativas de Tipo 1 e de Tipo 2 ($\bar{E}(M_1^-)$ e $\bar{E}(M_2^-)$). A EMN do Tipo 1 é expressa em MW.rd e a EMN do Tipo 2 é expressa em MW.

III.4.5 Expectância de Probabilidade Ocorrência de Instabilidade – *EPI*

Este índice é calculado através da contabilização das probabilidades de ocorrência de defeitos ponderadas pelas probabilidades de que as durações desses defeitos sejam maiores do que os tempos críticos de eliminação (t_c). O índice probabilístico, *EPI*, é dado por:

$$EPI = \sum_{i=1}^n p_i p(t_i > t_c) \quad (\text{III-7})$$

Onde:

- EPI* - expectância de probabilidade de ocorrência de instabilidade
 p_i - probabilidade de ocorrência de defeito no local i
 $p(t_i > t_c)$ - probabilidade da duração do defeito no local i ser maior que t_c
 t_c - tempo crítico para eliminação do defeito
 n - nº de estados de distúrbio

⁹ Uma explicação sobre o significado e a natureza das margens de Tipo 1 e de Tipo 2 é dada no Capítulo IV (vide seção IV.4).

Interpretação: indica a probabilidade de insegurança dinâmica do sistema, sendo útil quando existem incertezas associadas às durações dos distúrbios.

III.4.6 Índice de Estabilidade Aparente – *IEA*

As expectâncias de margem de estabilidade (Tipo 1 e Tipo 2) isoladamente podem ser de difícil interpretação para produção de um diagnóstico do grau de insegurança dinâmica do sistema por serem grandezas obtidas em unidades distintas e também por carregarem informações diferentes sobre a natureza do comportamento dinâmico do sistema.

Representando-se a expectância de margem negativa do Tipo 1 segundo um eixo horizontal e a de Tipo 2 segundo um eixo vertical, essas expectâncias podem ser compostas conforme sugere a Figura III.2.1.

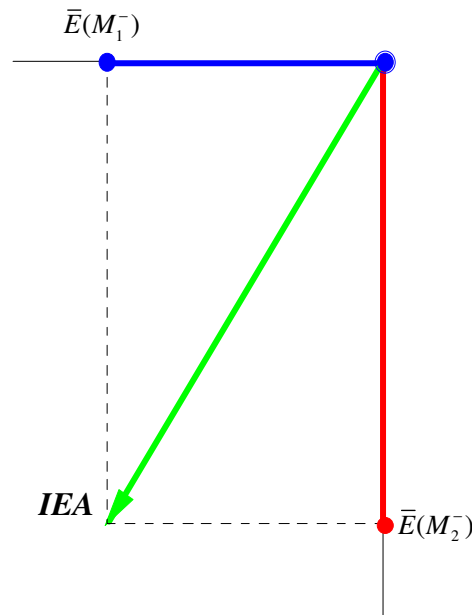


Figura III.2.1 – Composição das expectâncias de margens negativas

Com base na Figura III.2.1, define-se o indicador *IEA*, dado por:

$$IEA = -\sqrt{\bar{E}(M_1^-)^2 + \bar{E}(M_2^-)^2} \quad (\text{III-8})$$

Onde:

- IEA - índice de instabilidade aparente (adimensional);
- $\bar{E}(M_1^-)$ - módulo da expectância de margem negativa do Tipo 1 (adimensional);
- $\bar{E}(M_2^-)$ - módulo da expectância de margem negativa do Tipo 2 (adimensional);

Interpretação: Número menor ou igual a 0 (zero) que indica o grau de segurança do sistema. Quanto mais próximo de 0 (zero) seja IEA , maior o grau de segurança do sistema. IEA será numericamente igual a $\bar{E}(M_1^-)$ quando o sistema só apresentar margens negativas do Tipo 1 ou, por outro lado, igual a $\bar{E}(M_2^-)$ quando o sistema só apresentar margens negativas do Tipo 2.

Justificativa: O índice IEA combina as expectâncias de margens negativas do sistema em um único indicador cujo módulo é proporcional ao grau de segurança do sistema (risco). O índice IEA é capaz de reproduzir o efeito das variações isoladas ou conjuntas das margens de Tipo 1 e de Tipo 2 sobre o risco, no sentido da diminuição ou do aumento da segurança do sistema.

III.5 Fluxograma Conceitual da Metodologia Proposta

A Figura III.3 apresenta o diagrama conceitual adotado como base para a construção do protótipo computacional desenvolvido nesta Tese.

Os blocos funcionais assinalados na Figura III.3 são descritos a seguir:

Bloco 1: A construção do espaço de estados de cenários requer uma abordagem cuidadosa no que se refere à garantia da manutenção de sua convexidade. Em uma primeira abordagem poder-se-ia, por exemplo, permitir-se a seleção de um estado

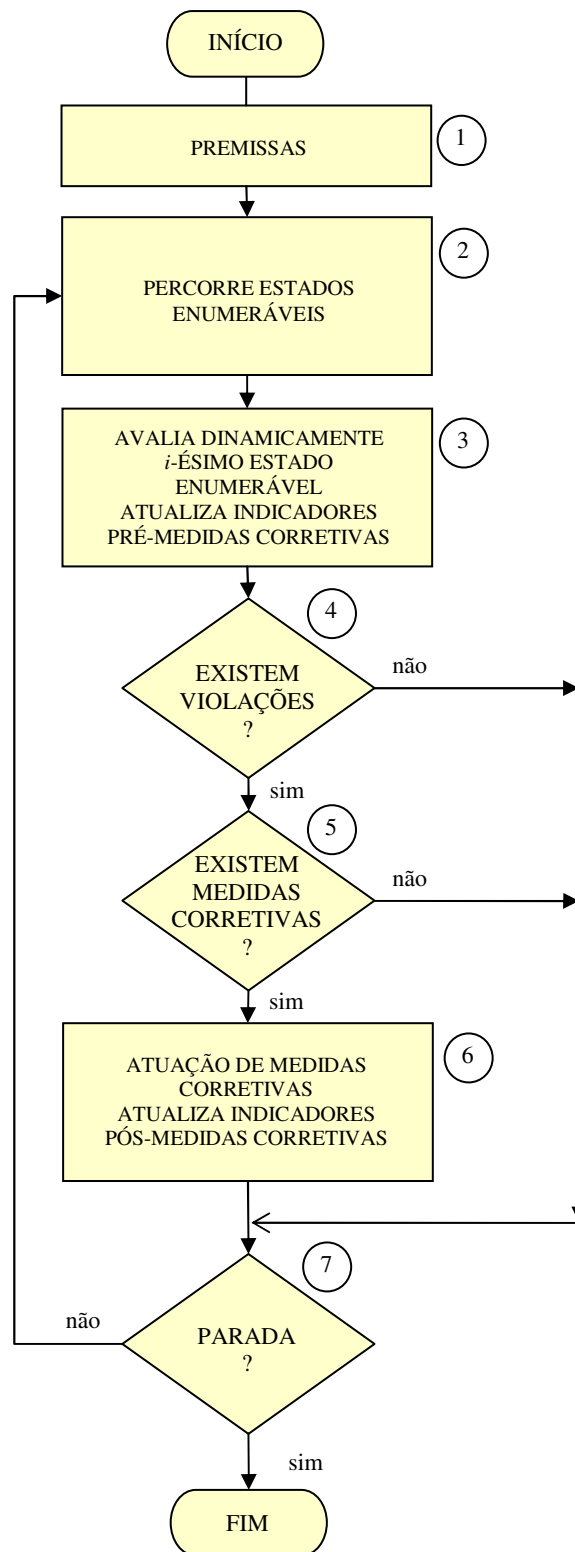


Figura III.3 – Fluxograma conceitual da metodologia proposta

inviável fisicamente, fazendo-se um descarte subsequente do estado selecionado e ajustando-se as probabilidades dos estados restantes de forma a se garantir a

convexidade dos índices probabilísticos calculados. Uma segunda abordagem basear-se-ia em premissas robustas de viabilidade dos estados selecionados. Nesse caso, a convexidade do espaço de estados seria garantida, *a priori*, por construção. Nesta tese apenas a abordagem de descarte será adotada.

Bloco 2: Neste bloco ocorre a composição das incertezas de cenários com as incertezas em distúrbios. As primeiras são, por hipótese, enumeráveis, enquanto as demais são, também por hipótese, enumeráveis, porém tratadas de forma condicionada (nesta Tese a seleção de estados por simulação Monte Carlo não está contemplada. Vide III.2.2.3). Aqui, a maior dificuldade para abordagem do espaço probabilístico de estados reside no tratamento a ser dado às durações e seqüências de distúrbios. Pode-se, por exemplo, admitir tempos fixos de eliminação para os diferentes níveis de tensão e seqüências de defeito pré-determinadas para cada defeito, não se introduzindo, assim, nenhuma incerteza quanto a esse fator. Outra possibilidade seria a de se adotar distribuições típicas para tempos de atuação de relés e de disjuntores, calculando-se o tempo crítico de eliminação dos defeitos e determinando-se a distribuição estatística desses tempos críticos. Uma terceira variante poderia levar em conta uma análise detalhada da confiabilidade das proteções e, mais detalhadamente ainda, das subestações de modo a tratar probabilisticamente as durações e as seqüências dos distúrbios. Nesta Tese o espaço de estados é formado segundo um modelo de tratamento desacoplado de incertezas que contempla *cenários* e *distúrbios* de acordo com uma estrutura de formação como a mostrada na Figura III.4.

As incertezas de *cenário* estão presentes em *topologias*, *patamares de carga* e *modos de intercâmbio*. Topologias são tratadas até o nível de contingência $n-2$, em um total de $1 + \frac{n^2 - n}{2}$ topologias. Para as variáveis de cenários associadas aos patamares de carga e aos modos de intercâmbio são admitidos até 5 níveis probabilísticos por variável, com qualquer combinação. As incertezas de *distúrbio* estão presentes no *elemento sob defeito* (*ocorrência de defeito*), na *localização do defeito no elemento* e no *tipo de defeito*. O número de elementos nos quais pode ocorrer algum defeito é igual ao número de circuitos de transmissão presentes na rede em estudo (não são contemplados defeitos

em transformadores). Cada elemento de transmissão é subdividido em 3 (três) segmentos que definem a localização probabilística do defeito. Quanto ao defeito são

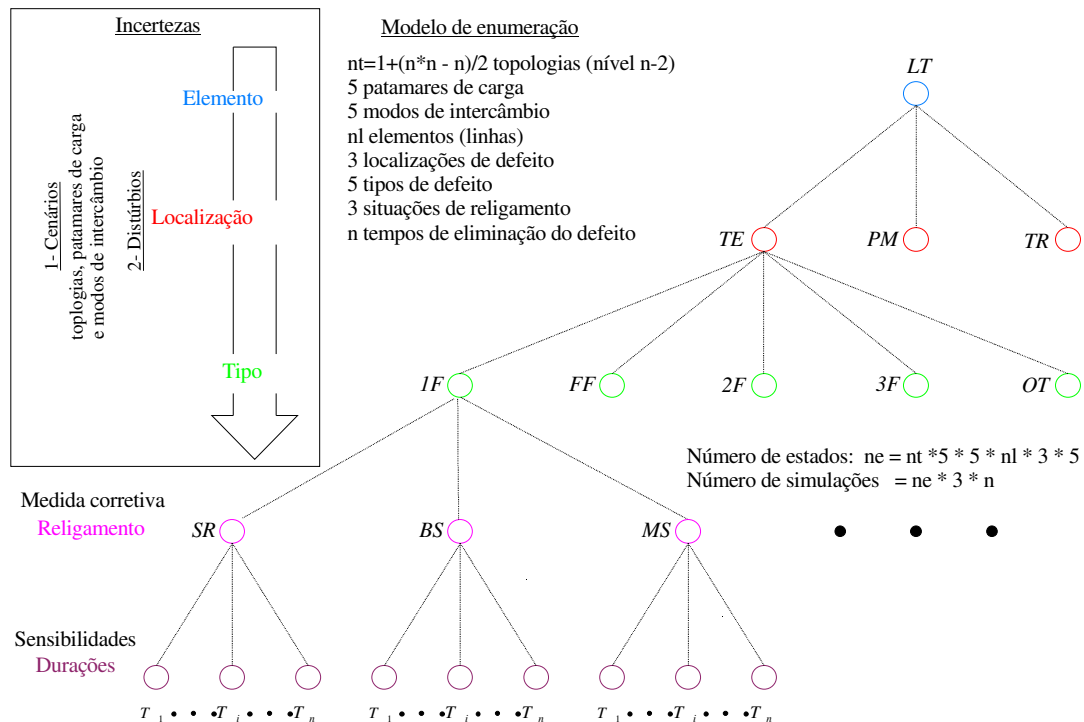


Figura III.4 – Modelo para tratamento desacoplado de incertezas

admitidos até 5 (cinco) diferentes tipos probabilísticos. Uma *medida corretiva probabilística* pode ser aplicada a cada elemento sob defeito e corresponde ao *religamento rápido tripolar* do elemento depois de transcorrido um tempo fixo (determinístico) a partir da eliminação inicial do defeito. A aplicação da medida corretiva não implica na geração de novos estados probabilísticos, mas modifica os estados originalmente considerados sem a aplicação da medida corretiva. As *durações* de defeito são representadas de forma simplificada através de uma distribuição normal $N(\mu, \sigma)$, admitindo a geração de durações probabilísticas de defeito iguais a μ , $\mu \pm \sigma$ ou $\mu \pm 2\sigma$, em um total de até 5 (cinco) valores. Esse modelo é compatível com simulações baseadas em enumeração exaustiva ou em Monte Carlo (não implementado no protótipo computacional desenvolvido).

Bloco 3: Essa etapa de avaliação do estado selecionado é feita tendo como base simulações de estabilidade transitória (vide Capítulo IV). Deve-se entender, no escopo deste trabalho, como limite temporal dessa avaliação, aquele para o qual somente

fenômenos de curta duração no espectro eletromecânico são considerados. Assim, indicadores que sejam representativos para a avaliação do estado dinâmico do sistema no espectro de frequência eletromecânico devem ser identificados. Por exemplo, indicadores passíveis de serem utilizados seriam: perda de sincronismo de um gerador isoladamente, perda de sincronismo de um grupo de geradores, ilhamento de sistemas, amortecimento insuficiente, subfrequência, sobrefrequência, subtensão, sobretensão e outros que possam caracterizar modos de falha relevantes para as avaliações de segurança. Nesta Tese utiliza-se a perda de sincronismo como único indicador do estado de segurança do sistema. Essa não é uma limitação do modelo de tratamento probabilístico proposto, mas corresponde a uma opção de modelagem computacional do comportamento eletromecânico do sistema para os fins desta Tese, opção esta que trata a rede elétrica através de sua redução às barras internas dos geradores, perdendo-se a identidade de outras grandezas (tensões, correntes, etc.) que eventualmente poderiam compor indicadores de segurança. Essa opção foi adotada por razões de simplicidade de implementação e de eficiência computacional.

Bloco 4: A caracterização de violações deve contemplar a trajetória do sistema durante o transitório eletromecânico. Assim, perda de sincronismo, excursões de tensão acima ou abaixo de limites aceitáveis, sub ou sobrefrequência, atuação de limitadores, sensibilização de sistemas especiais de proteção, entre outras, poderiam caracterizar violações transitórias a serem contabilizadas. As grandezas que caracterizam essas violações devem ser monitoradas durante as simulações. Nesta Tese, como já apontado, a perda de sincronismo é o indicador escolhido para a caracterização do estado dinâmico do sistema, sendo esse estado caracterizado por uma margem de estabilidade obtida ao longo da simulação eletromecânica (vide Capítulo IV).

Bloco 5: As medidas corretivas para casos de instabilidade podem variar de acordo com o modo de instabilidade apresentado pelo sistema. A Tabela III.4 apresentou algumas das possibilidades de interesse. Entretanto, nesta Tese apenas o religamento tripolar será contemplado.

Bloco 6: Caracterizada uma violação, uma medida corretiva poderá ser acionada para superá-la. O efeito da medida corretiva deve ser contabilizado separadamente para

efeito de cálculo de índices pós-medidas corretivas, que viabilizam caracterizar a eficácia das mesmas.

Bloco 7: Ao verificar que todos os eventos do espaço de estado foram enumerados, o processamento é finalizado e são gerados relatórios com diagnósticos das simulações realizadas.

III.6 Sumário

Este capítulo apresentou um arcabouço conceitual que subsidia o desenvolvimento de uma abordagem computacional simples, porém eficiente para a análise do desempenho dinâmico de sistemas de potência, sofrendo o efeito de incertezas de natureza probabilística.

A metodologia aqui apresentada traz à luz uma vasta coleção de desenvolvimentos de grande interesse para as avaliações de segurança probabilística, bem como insere problemas de caráter inédito. Os resultados obtidos com os conceitos aqui abordados serão mostrados no Capítulo VI.

* * *

Capítulo IV Avaliação da Segurança – O Método da Máquina Equivalente (SIME)

IV.1 Introdução

Entende-se que os requisitos fundamentais para viabilização da avaliação da segurança transitória de sistemas de potência com a consideração de incertezas estão no método de avaliação de estabilidade utilizado e nas técnicas para implementação da simulação no tempo. Tais fatores têm peso significativo em dois aspectos fundamentais para o sucesso da realização deste tipo de análise: *(i) modelagem abrangente da dinâmica eletromecânica do sistema de potência, e; (ii) eficiência computacional.*

O método de avaliação de estabilidade escolhido para os efeitos de demonstração da metodologia proposta nesta Tese foi o método de máquina equivalente singular. Este método apresenta características que o tornam atrativo na aplicação proposta, pois, similarmente aos métodos convencionais, *permite a modelagem detalhada da dinâmica dos sistemas de potência*, apresentando, contudo, *eficiência computacional* compatível com as avaliações probabilísticas, *de per si* computacionalmente intensivas. Ademais, o método viabiliza a obtenção de índices de estabilidade capazes de dar uma medida direta do grau de segurança em que se encontra o sistema o que, por sua vez, permite a obtenção de índices probabilísticos úteis na produção de diagnósticos e na monitoração do desempenho do sistema de potência à luz da consideração de incertezas que afetam seu comportamento dinâmico.

No que se segue o método SIME [107,108] é apresentado de forma condensada, de modo a facilitar o entendimento de seus aspectos relevantes úteis na construção da metodologia proposta nesta Tese.

IV.2 O Método SIME

Neste item discorre-se sobre o método de avaliação de estabilidade escolhido para compor - em conjunto com o arcabouço para tratamento de incertezas estabelecido nos itens precedentes - a metodologia para avaliação de segurança dinâmica com a consideração de incertezas.

Como já foi observado, a escolha do método deve-se, principalmente, a duas características importantes para as avaliações probabilísticas da segurança:

- (i) *possibilidade de representação detalhada da dinâmica do sistema;*
- (ii) *eficiência numérica de modo a viabilizar sua utilização em simulações de cunho probabilístico.*

Para o desenvolvimento que se segue tomar-se-á como referência as notações abaixo em conjunto com a Figura IV.1.

A_{ace}	- área acelerante
A_{des}	- área desacelerante
M	- coeficiente de inércia
P_a	- potência acelerante
P_{ar}	- potência acelerante em $\delta = \delta_r$
P_e	- potência elétrica
P, P_m	- potência mecânica
P_{max}	- potência elétrica máxima
$P_{a\ min}$	- potência acelerante mínima durante o transitório
t_e	- instante de eliminação do defeito
t_r	- instante de retorno
t_u	- instante de instabilidade
T	- aproximação triangular
W	- aproximação por mínimos quadrados
δ	- ângulo do rotor
δ_0	- ângulo inicial (pré-defeito) do rotor
δ_e	- ângulo de eliminação do defeito
δ_r	- ângulo de retorno
δ_u	- ângulo de instabilidade
η	- margem de estabilidade
η_e	- margem estável ou margem positiva (de estabilidade)
η_u	- margem instável ou margem negativa (de estabilidade)
ω	- velocidade angular do rotor

ν - deslocamento de fase

Subscritos:

D – durante o defeito;

P – pós-defeito

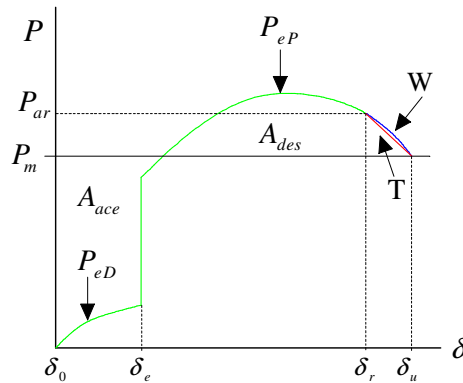


Figura IV.1 – Trajetória típica de um OMIB e grandezas associadas

IV.2.1 Análise de Segurança Dinâmica Determinística via SIME

O método doravante denominado equivalente via máquina singular, pertence a classe geral de métodos baseados em equivalentes de uma máquina contra barra infinita, também chamados genericamente como "máquina contra barra infinita" ("one-machine infinite bus - OMIB"). Esses métodos baseiam-se no princípio de que a perda de sincronismo de um sistema multimáquina fica caracterizada pela separação inexorável de suas máquinas em dois grupos. Esses grupos são, então, substituídos por um sistema de duas máquinas e, em seguida, por um equivalente do tipo máquina contra barra infinita ou, simplesmente, OMIB. Um OMIB pode ser visto como uma transformação do espaço multidimensional das equações dinâmicas do sistema multimáquina em uma única equação dinâmica. Existem três tipos de OMIBs: *invariantes no tempo*, *variantes no tempo* e *generalizados*.

Um **OMIB invariante no tempo** é obtido a partir das seguintes premissas:

- (i) *modelagem simplificada do sistema de potência;*
- (ii) *coerência das máquinas dentro de cada grupo.* Essa premissa permite que as máquinas mantenham seus movimentos relativos fixos ao longo do tempo.

Assim, as equações dinâmicas do sistema multimáquina são transformadas em uma equação equivalente de um OMIB, da forma:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e = P - P_{\max} \sin(\delta - v) \quad (\text{IV-1})$$

M , P , $P_{\max}$ e v assumem valores constantes (diferentes nas configurações durante o período de defeito e após o defeito). Aplicações desse tipo de OMIB podem ser encontradas em [98-102].

OMIBs variantes no tempo são obtidos quando se relaxa a premissa de coerência mantendo-se, porém, um modelo simplificado de sistema. Nesse caso P , $P_{\max}$ e v não são mais constantes e (IV-1) torna-se senoidal por partes [103-106].

OMIBs generalizados são obtidos quando, em adição ao relaxamento da premissa de coerência, adota-se uma modelagem detalhada do sistema de potência. O modelo dinâmico é ainda descrito por

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (\text{IV-2})$$

Todavia, a curva $P_a \times \delta$ não é mais senoidal. Porém, o conceito de energia do critério das áreas iguais permanece válido [107]. As abordagens do problema de estabilidade através de OMIBs generalizados são variadas, diferindo em muitos aspectos, mas baseiam-se sempre nos mesmos princípios da transformação generalizada.

O método SIME, utilizado na metodologia apresentada nesta Tese, baseia-se em um OMIB generalizado. De forma mais precisa, ele é um método híbrido, temporal-direto. O sistema multimáquina é avaliado em sua evolução durante o transitório, com todo o detalhe inerente a simulação no tempo, enquanto infere-se sobre sua condição de estabilidade através do método das áreas iguais. O ponto crucial dessa abordagem reside na correta identificação do padrão de decomposição das máquinas do sistema em dois

grupos, de forma a se definir o OMIB crítico. Os princípios sobre os quais o método SIME se baseia são amplamente comentados em [107,108].

IV.2.2 Formulação Geral do Método SIME

O método SIME [108] concentra-se na configuração pós-defeito de um sistema sujeito a um distúrbio, que pode conduzi-lo a instabilidade, a fim de:

- (i) *identificar o modo de separação das máquinas em dois grupos;*
- (ii) *substituir esses grupos, sucessivamente, por duas máquinas e, em seguida, por um OMIB;*
- (iii) *avaliar as propriedades de estabilidade desse OMIB através do critério das áreas iguais e, por conseguinte, aplicar os resultados ao sistema multimáquina.*

IV.2.2.1 Identificação das máquinas críticas

A noção de máquinas críticas está intimamente relacionada a cenários instáveis. As máquinas críticas são aquelas que se afastam excessivamente causando a perda de sincronismo do sistema. A cada passo da simulação, as máquinas são ordenadas de acordo com os ângulos de seus rotores, identificando-se o maior desvio angular entre duas máquinas consecutivas, considerando como críticas aquelas que se situarem acima dessa maior distância angular.

IV.2.2.2 Parâmetros do OMIB crítico

As expressões dos parâmetros do OMIB δ , ω , M , P_m , P_e , P_a são obtidas como se segue.

(i) Seja $\delta_C(t)$ o centro de inércia do grupo máquinas críticas. Pode-se escrever:

$$\delta_C(t) = M_C^{-1} \sum_{k \in C} M_k \delta_k(t) \quad (\text{IV-3})$$

De forma similar, para o grupo não-crítico:

$$\delta_N(t) = M_N^{-1} \sum_{k \in N} M_k \delta_k(t) \quad (\text{IV-4})$$

Em (IV-3) e (IV-4), tem-se:

$$\begin{cases} M_C = \sum_{k \in C} M_k \\ M_N = \sum_{j \in N} M_j \end{cases} \quad (\text{IV-5})$$

(ii) Defina o ângulo do rotor do OMIB correspondente pela transformação:

$$\delta(t) = \delta_C(t) - \delta_N(t) \quad (\text{IV-6})$$

A velocidade angular do rotor do OMIB correspondente é dada por:

$$\omega(t) = \omega_C(t) - \omega_N(t) \quad (\text{IV-7})$$

Onde

$$\begin{cases} \omega_C(t) = M_C^{-1} \sum_{k \in C} M_k \omega_k(t) \\ \omega_N(t) = M_N^{-1} \sum_{j \in N} M_j \omega_j(t) \end{cases} \quad (\text{IV-8})$$

(iii) Defina a potência mecânica equivalente do OMIB, como:

$$P_m(t) = M \left(M_C^{-1} \sum_{k \in C} P_{mk}(t) - M_N^{-1} \sum_{j \in N} P_{mj}(t) \right) \quad (\text{IV-9})$$

e a potência elétrica equivalente do OMIB, como:

$$P_e(t) = M \left(M_C^{-1} \sum_{k \in C} P_{ek}(t) - M_N^{-1} \sum_{j \in N} P_{ej}(t) \right) \quad (\text{IV-10})$$

Assim a potência acelerante resultante do OMIB é dada por:

$$P_a(t) = P_m(t) - P_e(t) \quad (\text{IV-11})$$

Nas expressões acima, M denota o coeficiente de inércia equivalente do OMIB:

$$M = \frac{M_C M_N}{M_C + M_N} \quad (\text{IV-12})$$

IV.2.2.3 Condições de estabilidade

O critério das áreas iguais fundamenta-se no conceito de energia. Basicamente, esse critério estabelece que as propriedades de estabilidade de um cenário de contingência podem ser obtidas em termos de uma margem de estabilidade, definida como o valor excedente de área desacelerante (A_{des}) em relação à área acelerante (A_{ace}), no plano $P \times \delta$ da trajetória do OMIB (vide Figura IV.1). Assim,

$$\eta = A_{des} - A_{ace} \quad (\text{IV-13})$$

A área acelerante (A_{ace}) representa a energia cinética armazenada durante o período de defeito, enquanto que a área desacelerante (A_{des}) representa a energia potencial máxima que o sistema pode dissipar durante o período pós-defeito. A diferença principal, e essencial, em relação ao critério das áreas iguais aplicado em sua forma clássica é que, para o método SIME, as curvas $P_m \times \delta$ e $P_e \times \delta$ do OMIB generalizado são computadas dos dados resultantes de uma simulação no tempo. Essa simulação é, em geral, realizada somente durante o curto espaço de tempo necessário para os cálculos de aplicação do critério das áreas iguais e caracterização da condição de estabilidade do sistema. Um OMIB de trajetória instável atinge um ângulo instável δ_u , no tempo t_u , assim que:

$$\begin{cases} P_a(t_u) = 0 \\ \dot{P}_a(t_u) = \frac{dP_a}{dt} \Big|_{t=t_u} > 0 \end{cases} \quad (\text{IV-14})$$

com $\omega > 0$ para $t > t_0$.

A expressão (IV-14) determina uma condição de término antecipado da simulação no tempo. A trajetória de um OMIB estável atinge um ângulo de retorno δ_r ($\delta_r < \delta_u$), em $t = t_r$, assim que:

$$\omega(t_r) = 0, \text{ com } P_a(t_r) < 0 \quad (\text{IV-15})$$

A expressão (IV-15) determina a condição de término antecipado da simulação no tempo por detecção de sistema estável. Finalmente, por definição, um OMIB com trajetória criticamente estável atinge o ângulo de retorno δ_r com $P_a(t_r) = 0$.

IV.2.2.4 Margens de estabilidade

A manipulação conveniente da Equação (IV-1) conduz à margem instável:

$$\eta_u = -\frac{1}{2} M \omega_u^2 \quad (\text{IV-16})$$

A Equação (IV-16) é muito simples e fácil de ser computada, requerendo apenas o conhecimento do coeficiente de inércia do OMIB e da velocidade do rotor. Condições extremamente severas podem conduzir a trajetórias pós-defeito que apresentem somente potência acelerante positiva. Nesses casos, outro tipo de margem deve ser utilizado para contornar essa dificuldade (ver item IV.3 para exemplo de aplicação). De acordo com o comportamento do sistema as margens instáveis acima descritas são notadas, respectivamente, como margens de *Tipo 1* ou *Tipo 2*. Ainda pela manipulação de (IV-1), observando que o OMIB permanece estável se P_{eP} retorna antes de cruzar com P_m e que $\omega = 0$ para $\delta = \delta_0$ e $\delta = \delta_r$, a margem estável fica dada por:

$$\eta_e = - \int_{\delta_r}^{\delta_u} P_a d\delta = \int_{\delta_r}^{\delta_u} |P_a| d\delta \quad (IV-17)$$

A margem estável dada por (IV-17) não pode ser calculada de forma exata dado que nem δ_u nem $P_{eP}(\delta)$ ($\delta_u > \delta > \delta_r$) podem ser computados diretamente, já que a curva $P_{eP} \times \delta$ do OMIB retorna em $\delta = \delta_r$. Duas formas possíveis de cálculo aproximado de η_e envolvem, ou uma aproximação triangular da área desacelerante, ou a extrapolação de $P_a(\delta)$ via aproximação por mínimos quadrados entre δ_r e δ_u , notadas, respectivamente, por T e W (vide Figura VI-1).

IV.3 Exemplo

Para ilustrar uma aplicação do método SIME, considere o sistema de 9 barras, apresentado no Anexo A. Os resultados mostrados correspondem à simulação de um curto-circuito trifásico na barra 9, eliminado pela abertura do circuito [4], da barra 6 para a barra 9. Os tempos de duração do defeito serão variados (3 valores) de forma a caracterizar o comportamento do OMIB para diferentes condições de impacto e

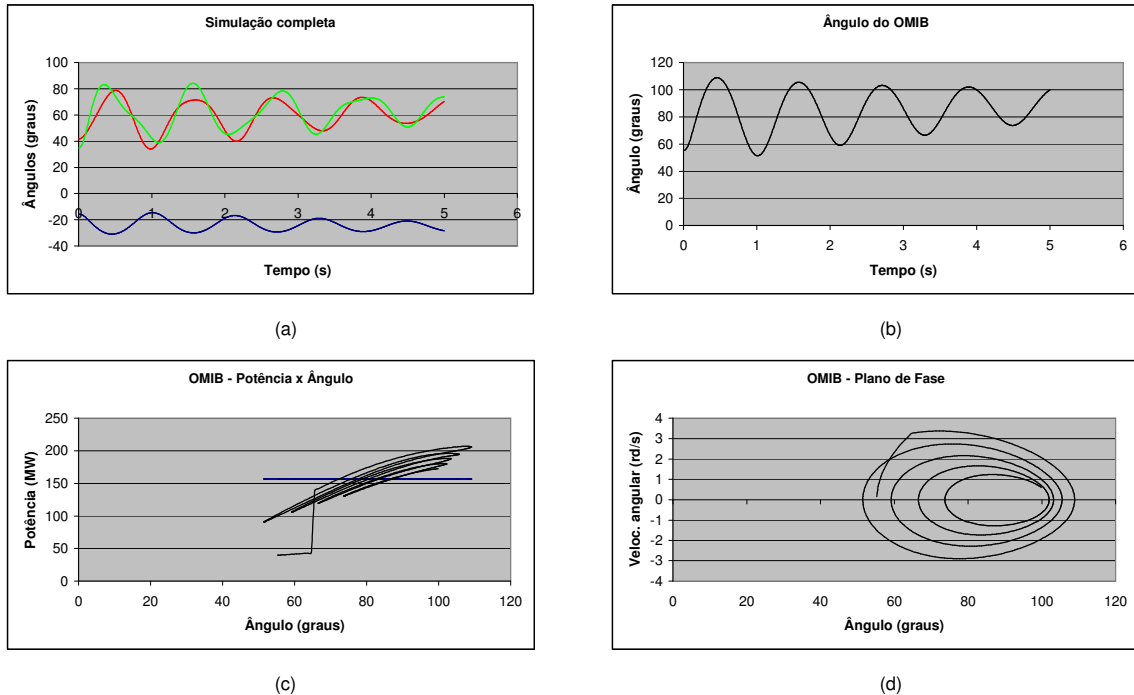


Figura IV.2 – SIME - Curto-circuito 3F na barra 9 eliminado em 100 ms pela abertura do circuito [4]

consequente efeito sobre o desempenho dinâmico do sistema. A Figura IV.2 mostra os resultados da simulação para uma duração de defeito de 100 ms.

Para as condições do distúrbio o sistema apresenta comportamento estável conforme mostram as curvas de ângulos da simulação completa e do OMIB correspondente. Na Figura IV.2 são apresentadas, além do gráfico da simulação completa no tempo – Figura IV.2(a) – as três representações típicas do SIME – Figuras IV-2(b), (c) e (d).

A Figura IV.2(b) apresenta a trajetória OMIB para o sistema exemplo. A Figura IV.2(c) apresenta a curva $P \times \delta$, a partir da qual são obtidas a condição de estabilidade do sistema e as margens. Finalmente, completando as representações típicas do SIME, a Figura IV.2(d) apresenta o plano de fase do OMIB, mostrando a evolução do ângulo do OMIB e de sua derivada (velocidade angular) ao longo do transitório eletromecânico.

O mesmo distúrbio foi simulado para uma duração de defeito de 150 ms, os resultados são apresentados na Figura IV.3.

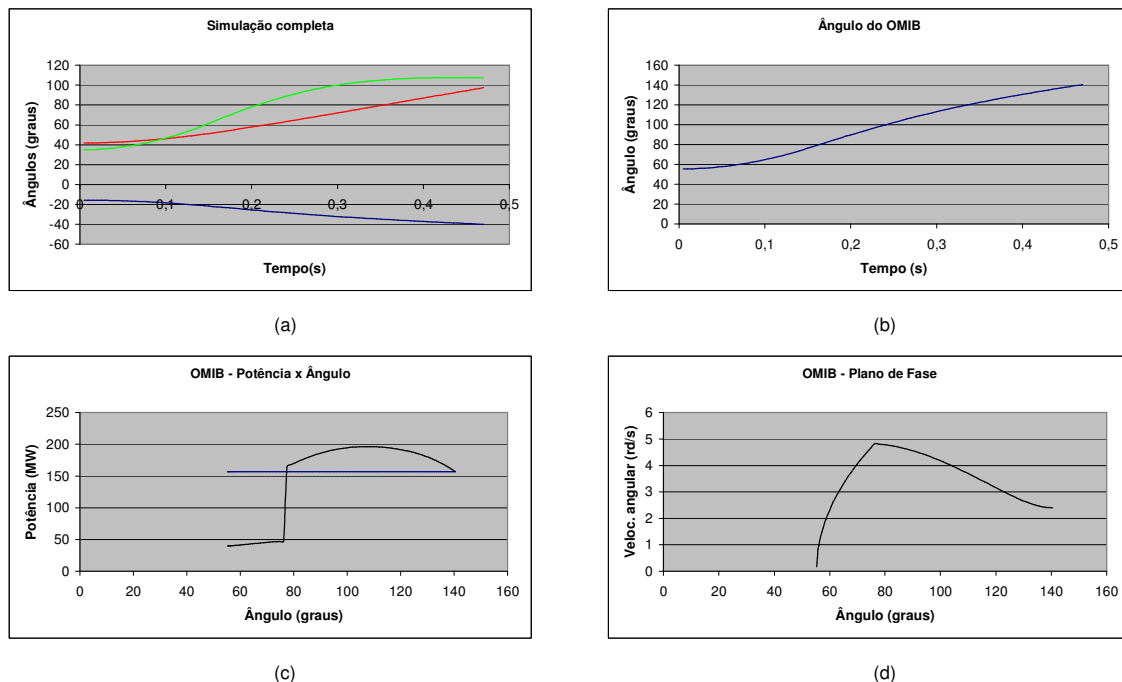


Figura IV.3 – SIME: Curto-circuito 3F na barra 9 eliminado em 150 ms pela abertura do circuito [4]

Observe agora – na curva Potência $\times$ Ângulo, Figura IV.3(c) – que quando o OMIB atinge a condição de instabilidade (neste caso, do Tipo 1) dada por (IV-15) a simulação é automaticamente interrompida.

Para a condição apresentada, o método SIME diagnosticou a instabilidade em $t = 0,45$ s, antecipando o fim da simulação e permitindo grande economia de tempo na análise. *Essa eficiência é fundamental no caso de avaliações probabilísticas, altamente intensivas em tempo de computação, como é o caso nesta Tese.*

Finalmente, a Figura IV.4 mostra uma condição na qual a duração de defeito foi elevada para 300 ms. Fica caracterizada, uma vez mais, a instabilidade do sistema. Nesse caso, porém, nota-se que a potência acelerante permanece positiva ao longo de toda a simulação, ou seja, a curva de potência elétrica jamais corta a curva de potência mecânica, caracterizando uma margem instável do Tipo 2.

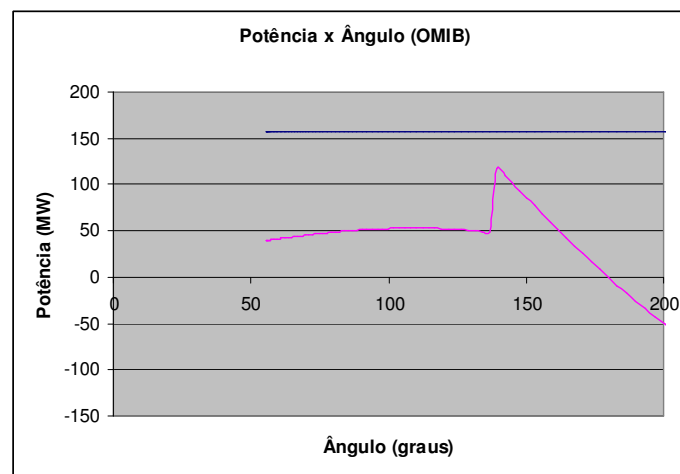


Figura IV.4 – Curto-circuito 3F na barra 9 eliminado em 300 ms pela abertura do circuito [4] – instabilidade do Tipo 2

Os resultados apresentados no exemplo revelam a potencialidade do método SIME, para diagnóstico da condição de estabilidade do sistema e para a geração de indicadores que podem ser utilizados em uma avaliação probabilística da segurança dinâmica do sistema estudado.

IV.4 Considerações Sobre a Existência e Valor das Margens de Estabilidade

Antes de finalizar este capítulo, faz-se necessário tecerem-se algumas considerações sobre a existência e a faixa de valores das margens de estabilidade. Essas considerações serão importantes para o entendimento e interpretação dos resultados que serão apresentados no Capítulo VI. Maiores detalhes sobre os aspectos aqui apresentados podem ser obtidos em [108].

Em geral, as margens de estabilidade expressam a que distância o sistema de potência encontra-se da estabilidade/instabilidade. Seria possível a obtenção de margens pelo método da máquina equivalente para toda a faixa de casos estáveis e instáveis? Se não, por que e qual seria a faixa de existência dessas margens?

Para essa avaliação, é importante lembrar que na acepção do método SIME uma margem de estabilidade resulta da caracterização de um OMIB e da aplicação do critério das áreas iguais. De acordo com esse método, uma margem de estabilidade é definida no plano $P \times \delta$ em função das áreas acelerante (A_{ace}) e desacelerante (A_{des}) (vide expressão VI-13) ou, de forma equivalente, pelo negativo da integral da potência acelerante do OMIB entre δ_0 e δ_u . Ou seja, a existência de uma margem de estabilidade no contexto do critério das áreas iguais implica na existência de A_{ace} e A_{des} , ou, equivalentemente, de δ_u .

Cabe notar, adicionalmente, que um OMIB só estará rigorosamente caracterizado em uma simulação instável, dado que sua existência está intrinsecamente ligada à separação dos grupos de máquinas e à perda de sincronismo. É aceitável se adotar esse OMIB para uma simulação estável desde que a mesma seja suficientemente próxima do caso limite de estabilidade.

Essas considerações levam a concluir que:

- **Margens negativas** só podem ser definidas quando existir A_{des} (ou δ_u). Isso só acontece quando a potência elétrica (P_e) ultrapassa a potência mecânica (P_m) em

algum instante $t \geq t_e$. A margem negativa Tipo 1 é expressa em MW.rd e a margem negativa Tipo 2 é dada em MW.;

- **Margens positivas** só podem ser definidas em casos próximos ao limite de estabilidade.

Tendo como referência as condições que definem o limite de estabilidade para as quais $\eta = 0$, nota-se que na acepção do método SIME, as margens de estabilidade variam entre pequenos valores positivos de η e valores negativos limitados a $|\eta_{m\acute{a}x}|$ que corresponde a $P_{a\ min} = 0$.

Em situações muito estáveis não se pode caracterizar um OMIB (ou, equivalentemente, δ_u). *Nessas condições, nesta Tese, a estabilidade do caso (margem positiva) será indicada simplesmente por um sinal “+”.*

Por outro lado, em situações extremamente severas, a margem dada pelo critério das áreas iguais não mais existe em função de uma das seguintes condições:

- As curvas de potência mecânica (P_m) e de potência elétrica (P_e) não se intersectam;
- O ângulo δ_e fica além do ângulo de instabilidade δ_u .

Para efeito dos cálculos computacionais, quando uma dessas condições se estabelece, um valor substituto para a margem é adotado, correspondendo ao valor mínimo de P_a durante o transitório. Esse é um valor dado em unidades de potência (MW) e define a chamada margem do Tipo 2.

IV.5 Sumário

Este capítulo apresentou uma breve revisão do método SIME e algumas de suas características importantes para a construção da metodologia de avaliação da segurança transitória de sistemas de potência com a consideração de incertezas, proposta nesta Tese.

Foi mostrado, através de um exemplo, como o método é aplicado em uma avaliação de estabilidade através da análise dos resultados de simulações interpretados com o emprego das três representações típicas do método SIME.

Os resultados apresentados no exemplo revelam a potencialidade do método SIME, para diagnóstico da condição de estabilidade do sistema e para a geração de indicadores que podem ser utilizados em uma avaliação probabilística da segurança dinâmica do sistema estudado.

Foram feitas algumas considerações importantes para o entendimento e interpretação dos resultados que serão apresentados no Capítulo VI, especialmente no que concerne ao cálculo de margens de estabilidade.

* * *

Capítulo V Protótipo Computacional

V.1 Introdução

Como visto anteriormente, especialmente nos Capítulos III e IV, a metodologia proposta nesta Tese baseia-se em um arcabouço conceitual sobre o qual se apóiam as considerações para derivação de uma aplicação que considere incertezas nas avaliações de segurança transitória e em um método de avaliação de estabilidade capaz de atender aos requisitos de cálculo exigidos pelas avaliações probabilísticas.

Neste capítulo discute-se a *estrutura lógica do protótipo desenvolvido para implementação dessa metodologia*, apresentando-se os fluxos lógicos de execução fundamentais que implementam o arcabouço de representação de incertezas, a avaliação dos estados probabilísticos selecionados e o cálculo dos indicadores de segurança dinâmica probabilística propostos.

V.2 Estrutura Lógica do Protótipo Computacional

De acordo com a metodologia proposta, via conjugação do arcabouço para consideração de incertezas (vide capítulo III, seção III.2) com a aplicação do método SIME (vide Capítulo IV) para a avaliação transitória do estado selecionado, o procedimento computacional adotado permite a avaliação do sistema de potência considerando duas categorias distintas de incertezas, incluindo as incertezas de cenários e distúrbios (vide Figura III.1). As incertezas relacionadas a ruídos e pontos de operação fogem do escopo deste trabalho. O procedimento computacional apresentado permite três modos de execução distintos para o tratamento das incertezas, os quais contemplam: *(i) incertezas somente em cenários; (ii) incertezas somente em distúrbios, e; (iii) composição de incertezas em cenários e em distúrbios (caso híbrido)*. O procedimento utilizado na aplicação a que se propõe este trabalho é mostrado na Figura V.1.

A Figura V.1 apresenta inicialmente um fluxograma simplificado enfocando as principais etapas levando-se em conta as incertezas em *cenários*, *distúrbios* e *combinação de cenários e distúrbios*. O manual de utilização do programa desenvolvido - *ASTP (Análise de Segurança Transitória Probabilística)* - pode ser consultado no Anexo B. O aplicativo proposto tem uma estrutura compatível com o aplicativo proposto em *Takahata* [10], viabilizando uma eventual integração.

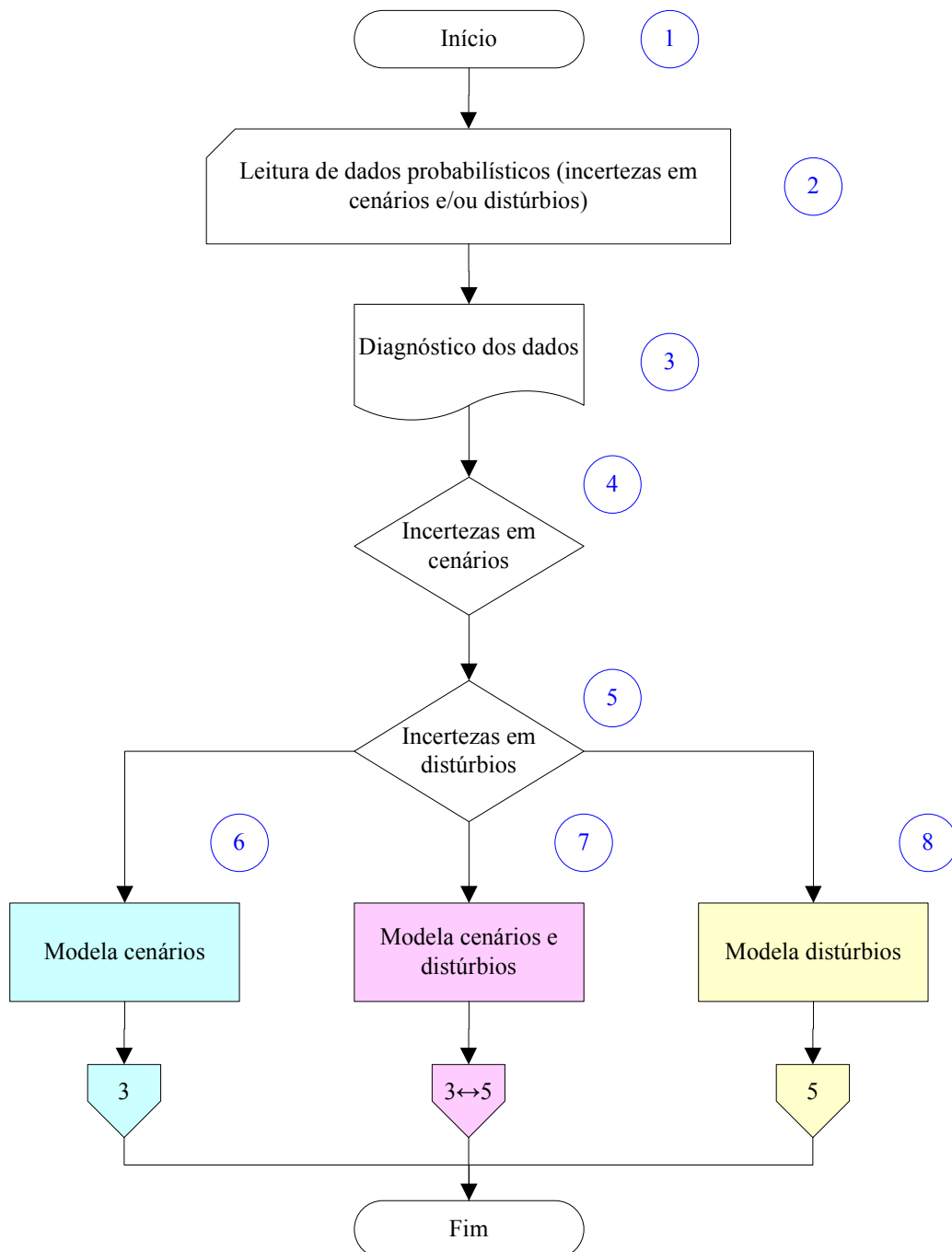


Figura V.1 – Fluxograma para opções de composição das incertezas

O **bloco 1** indica o início do processamento.

O **bloco 2** contempla a leitura dos dados probabilísticos dos elementos da rede elétrica (rede de referência: topologia, patamar de carga e modo de intercâmbio; dados estocásticos de circuitos: número de circuitos, taxas de falha e tempos médios de reparo; dados estocásticos de carga: número de patamares, carga por patamar e probabilidade de cada patamar; dados estocásticos de intercâmbio: número de modos de intercâmbio, modos de intercâmbio e probabilidade de cada modo). Esses dados devem ser complementados pela leitura de dados para representação da dinâmica do sistema em estudo: geradores, reguladores de tensão, curvas de saturação, estabilizadores de sistema de potência e reguladores de velocidade e critérios para representação de incertezas e avaliação da segurança.

O **bloco 3** representa a realização de diagnósticos sobre os dados.

Os **blocos 4 e 5** são indicativos da verificação se o sistema analisado apresenta incertezas em cenários, distúrbios ou em ambos.

Os **blocos 6, 7 e 8** efetuam o processamento das incertezas em três categorias propostas na metodologia: modelagem apenas em cenários ou modelagem apenas em distúrbios ou modelagem em cenários e distúrbios.

Os detalhes para as três categorias de incertezas (**Processos 3, 3↔5 e 5**) serão abordados à parte nas seções seguintes. Como já foi anteriormente mencionado, a modelagem de incertezas associadas a ruídos não é contemplada nesta Tese. Uma proposição para tratamento detalhado de ruídos em avaliações de *segurança estática* pode ser encontrada em [10].

Para a enumeração de cenários, distúrbios ou de cenários e distúrbios (evento híbrido) será adotado o modelo apresentado na Figura III.4 (vide Capítulo III, seção III.5).

V.2.1 Tratamento Computacional Apenas para Incertezas em Cenários

Os diferentes cenários podem ser preparados antecipadamente pelo analista, quando são tomados como base casos típicos de estudos de planejamento – expansão ou operação – para os quais as topologias da rede têm probabilidades conhecidas. Sugere-se a adoção de até *cinco* patamares de carga, com probabilidades atribuídas a partir das curvas (anuais, mensais ou diárias) de permanência de carga. Em princípio, não há limitação metodológica quanto ao número de casos que podem ser preparados por patamar. O protótipo construído permite a consideração de até cinco patamares de carga. Também, é possível a consideração de diferentes modos de intercâmbio, representando a forma como as trocas de energia entre subsistemas ocorrem ao longo do tempo. Neste aspecto, o protótipo permite a representação de até *cinco* diferentes modos de intercâmbio. Os estudos poderão ser conduzidos, simplesmente, a partir de um cenário geração/carga/topologia único (probabilidade unitária) ou considerando os múltiplos cenários enumerados com suas respectivas topologias.

O fator determinante para a escolha entre um cenário único ou um conjunto de cenários será o horizonte de estudo [5], definindo-se, assim, dois tipos de estudos: *(i)* para horizontes mais dilatados, para os quais diferentes estados de operação do sistema deverão ser cobertos; *(ii)* para horizontes próximos da operação, quando um cenário de geração, carga e topologia da rede é dado deterministicamente.

O propósito do primeiro tipo de estudo seria o de se avaliar o risco médio ao longo do período considerado, com os estados pré-falha sendo estocasticamente selecionados com base em suas probabilidades de ocorrência. A seleção dos estados pode ser realizada por técnicas de Monte Carlo ou por enumeração (neste trabalho apenas a enumeração será explorada). Cada estado de cenário selecionado deve ser armazenado para posterior avaliação dinâmica¹⁰.

¹⁰ Essa abordagem leva em conta as considerações apresentadas nos itens III.4 e III.5.

Os cenários obtidos a partir dos procedimentos acima indicados poderiam, eventualmente, ser submetidos a uma avaliação de adequação, previamente à avaliação de segurança.

No segundo tipo de estudo, o interesse concentra-se na avaliação do risco de uma determinada condição operativa – por exemplo, um limite de transferência, uma análise de intervenção ou uma condição de tempo real – sendo a avaliação dinâmica probabilística (distúrbios) conduzida a partir de condições deterministicamente definidas (cenários).

V.2.2 Tratamento Computacional Apenas para Incertezas do Tipo Distúrbio

Para cada um dos cenários gerados será procedida uma enumeração sobre o espaço probabilístico de distúrbios (por hipótese, as probabilidades de ocorrências, localizações e tipos de defeito são conhecidas). Em princípio, sugere-se uma seqüência básica de distúrbio composta, sempre, dos passos mostrados na Figura V.2. Essa estratégia tem a vantagem de viabilizar a inclusão, na estrutura de representação de incertezas, de seqüências vinculadas a determinadas localizações e a determinadas condições operativas permitindo-se, assim, a representação de seqüências de eventos complexas como aquelas associadas à atuação de sistemas especiais de proteção.

Tempo (ciclo)	Evento
0	<i>Defeito ocorre (várias localizações e tipos de defeitos)</i>
t_e	<i>Defeito eliminado por ação da proteção</i>
t_r	<i>O circuito é religado</i>
$t_r + t'_e$	<i>O circuito é desligado definitivamente no caso de insucesso no religamento</i>

Figura V.2 – Seqüência básica de distúrbio sugerida

Com respeito à Figura V.2 cabem os seguintes comentários:

- (i) t_e poderá ser sorteado por Monte Carlo, fixado ou obtido de uma distribuição discreta de 3 ou 5 valores. Neste último caso, os tempos de eliminação da falha serão enumerados. (Nesta Tese a opção por Monte Carlo não é implementada);
- (ii) t_r poderá ter um tratamento similar a t_e . Sugere-se fixá-lo;
- (iii) t'_e poderá ter um tratamento similar a t_e . Sugere-se fixá-lo.

Ao final da enumeração serão obtidas todas as seqüências de distúrbio que deverão ser avaliadas dinamicamente para os diferentes cenários obtidos anteriormente. As seqüências resultantes desse pré-processamento serão codificadas na forma de comandos específicos da ferramenta computacional de simulação dinâmica para posterior processamento.

V.2.3 Tratamento Computacional para a Combinação de Incertezas em Cenários e Distúrbios (Evento Híbrido)

A estratégia tratamento combinado de cenários e distúrbios pode ser implementada de duas formas. A primeira consiste na geração (enumeração) de todos os casos possíveis de cenários, e respectivas probabilidades, e de seu armazenamento em memória. Em seguida, para cada caso de cenário, aplica-se o modelo estocástico de distúrbio, gerando-se a enumeração correspondente aos distúrbios. Uma segunda forma de implementação consistiria na aplicação do modelo de enumeração de distúrbio na medida em que cada cenário probabilístico fosse gerado.

Independentemente da estratégia adotada, o número de estados resultantes da enumeração combinada de cenários e distúrbios varia com o grau de detalhamento escolhido tanto para a modelagem de cenários quanto para a modelagem de distúrbios. Assim, explorando-se o máximo grau de detalhamento contemplado no protótipo o número máximo de estados probabilísticos gerados pela combinação de cenários e distúrbios seria:

$$n_e = N_{cen} \cdot N_{dis} \quad (V-1)$$

com

$$\begin{aligned} N_{cen} &= N_t \cdot N_p \cdot N_m \\ N_{dis} &= N_{circ} \cdot N_l \cdot N_d \end{aligned} \quad (V-2)$$

e

$$N_t = \left[1 + (N_{circ} - 1) + \left(\frac{N_{circ}^2 - N_{circ}}{2} \right) \right] \quad (V-3)$$

Nas equações V-1, V-2 e V-3 tem-se:

n_e - Número total de estados resultantes da combinação de cenários e distúrbios

N_{cen} - Número total de estados de cenários

N_{dis} - Número total de estados de distúrbios

N_t - Número total de estados de topologias⁽¹⁾

N_p - Número total de estados de patamares de carga⁽²⁾

N_m - Número total de estados de modos de intercâmbio⁽³⁾

N_{circ} - Número total de circuitos na rede elétrica

N_l - Número total de estados de localizações⁽⁴⁾

N_d - Número total de estados de tipos de defeito⁽⁵⁾

Observações:

(1) – N_t , número de topologias, é função do nível de contingência estipulado. No caso da equação V-3, o nível de contingência correspondente é $n - 2$.

(2) – O modelo de cenários admite até 5 (cinco) patamares de carga probabilísticos.

- (3) –O modelo de cenários admite até 5 (cinco) diferentes modos de intercâmbio.
- (4) –O modelo de distúrbios admite até 3 (três) diferentes localizações de defeito em cada circuito da rede elétrica.
- (5) –O modelo de distúrbios admite até 5 (cinco) diferentes tipos de defeito em cada localização.

V.3 Fluxograma Detalhado

Com base no que foi descrito nos itens anteriores deste capítulo, apresenta-se, a seguir, o fluxograma detalhado do protótipo computacional para avaliação de segurança transitória probabilística ASTP V1.0.

V.3.1 Início do Processamento

O fluxograma inicial de processamento, apresentado na Figura V.3, é responsável pelo direcionamento do processamento, cuidando da alocação de arquivos, escolha do tipo de processamento (enumeração de estados ou simulação simples de estabilidade) e distribuição do fluxo de processamento segundo os parâmetros escolhidos.

O **bloco 1** representa um diálogo inicial via tela no qual se escolhe o tipo de processamento que será realizado. Pode-se escolher entre uma *simulação convencional de estabilidade* e uma *avaliação dinâmica probabilística por enumeração de estados*.

O **bloco 2** desvia o processamento segundo a escolha realizada no **bloco 1**. Assim, escolhendo-se a enumeração de estados, prossegue-se para o **bloco 3**. Do contrário, prossegue-se para o **bloco 5**.

O **bloco 3** representa a chamada da subrotina de leitura de dados para o processamento estocástico. O fluxo detalhado dessa subrotina é apresentado no item V.5.2.

O **bloco 4**, no retorno da leitura de dados para processamento estocástico, testa a condição de término da leitura. Em caso de erro, sinaliza e termina o processamento. Caso contrário, direciona o processamento para o **bloco 5**.

O **bloco 5** recebe o processamento tanto do **bloco 2** quanto do **bloco 4**. Vindo o processamento do **bloco 2**, a indicação é para uma simulação convencional de estabilidade, sendo o processamento conduzido para o **bloco 6** que prepara para a

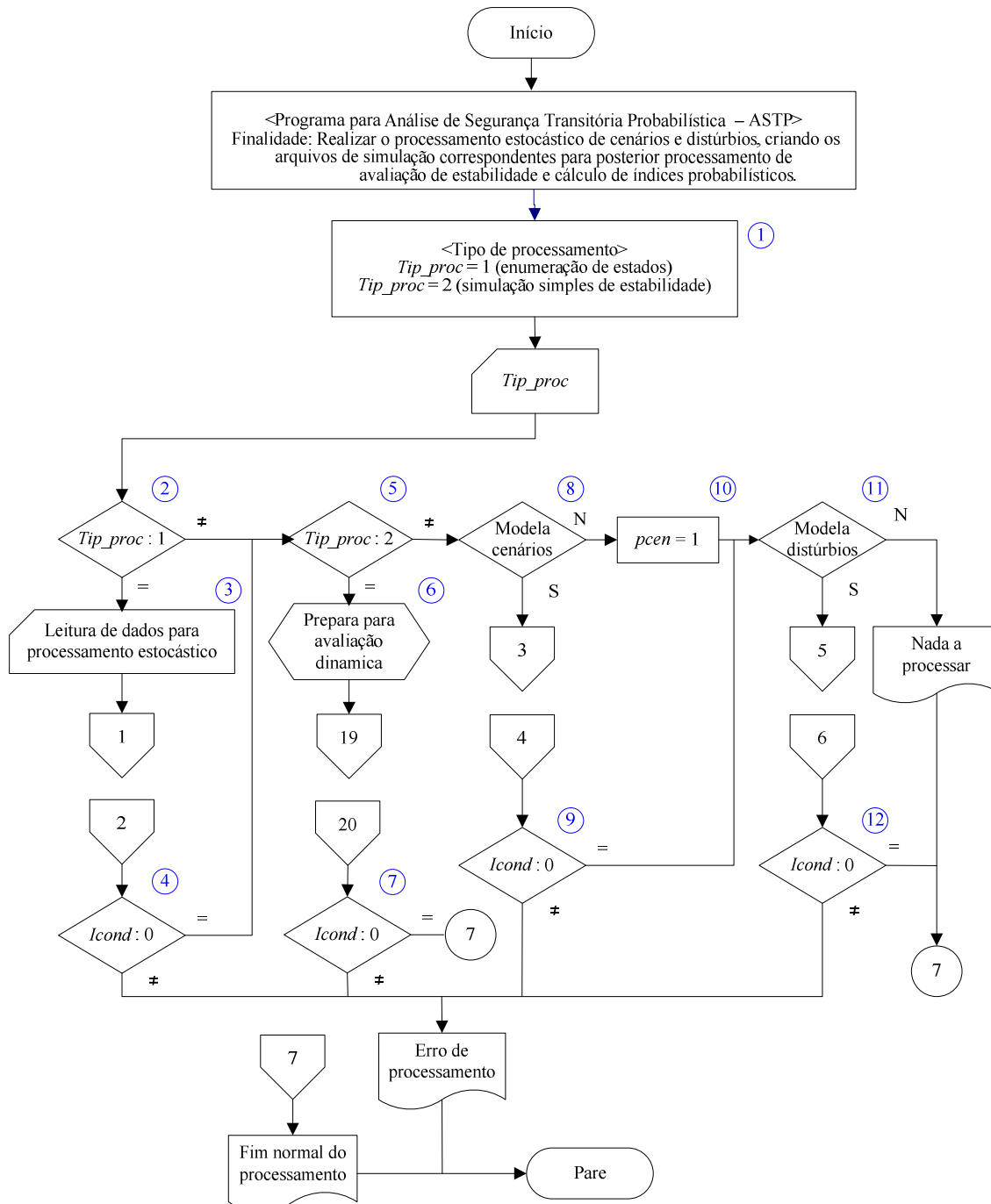


Figura V.3 – Fluxograma para direcionamento inicial do processamento

simulação dinâmica. No caso do processamento vir do **bloco 4**, a indicação é de que o estudo compreende uma avaliação de segurança probabilística.

O **bloco 6** é responsável pela preparação da simulação de estabilidade.

O **bloco 7** processa a condição de retorno da avaliação dinâmica e sinaliza em caso de erro.

O **bloco 8** verifica a opção de modelagem de cenários. Caso positivo, direciona o processamento para a subrotina de configuração de cenários. O fluxo detalhado dessa subrotina é apresentado no item V.5.3. Caso a modelagem de cenários não seja desejada, o fluxo de processamento segue para o **bloco 10**.

O **bloco 9** processa a condição de retorno da modelagem de cenários. Em caso de erro, sinaliza e finaliza o processamento. Caso contrário direciona o processamento para o **bloco 11**.

O **bloco 10** é executado quando não se deseja modelagem probabilística de cenários. Neste bloco atribui-se um valor unitário à probabilidade do cenário, indicando-a como de natureza determinística.

O **bloco 11** verifica a opção de modelagem de distúrbios. Caso positivo, direciona o processamento para a subrotina de configuração de distúrbios. O fluxo detalhado dessa subrotina é apresentado na seção V.3.4. Caso a modelagem de distúrbios não seja desejada, o fluxo de processamento termina.

O **bloco 12** processa a condição de retorno da enumeração de distúrbios e sinaliza em caso de erro.

V.3.2 Leitura de Dados Para Processamento Estocástico

A Figura V.4 apresenta o fluxograma detalhado do **Processo 1**, responsável pela leitura de dados estocásticos. Essa subrotina lê um arquivo de dados contendo os dados estocásticos de circuitos: número de circuitos, taxas de falha e tempos médios de reparo, probabilidades de ocorrência de defeitos em cada circuito, probabilidades de ocorrência de defeitos em cada seção de circuito, probabilidades de tipos de defeito, impedâncias

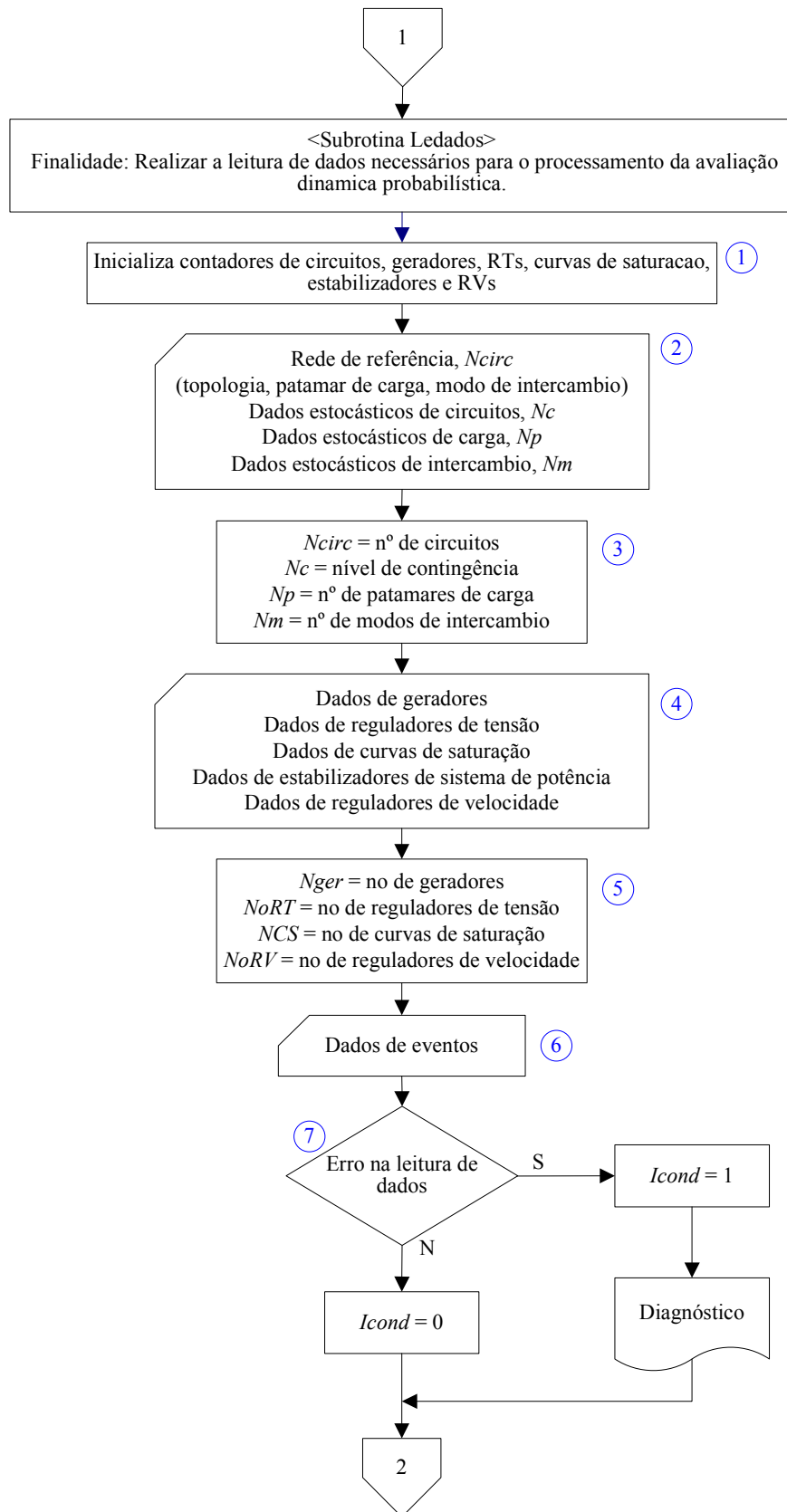


Figura V.4 – Fluxograma para leitura de dados para processamento estocástico

de defeito, taxas de sucesso e insucesso da medida corretiva (religamento rápido); dados estocásticos de carga: número de patamares e probabilidade de cada patamar; dados

estocásticos de intercâmbio: número de modos de intercâmbio e probabilidade de cada modo. Esses dados são complementados por dados relativos à dinâmica do sistema: máquinas síncronas, sistemas de controle de tensão e velocidade, sinais adicionais estabilizadores e curvas de saturação. O conjunto de dados lidos compreende, também, uma informação sobre um evento de distúrbio o qual é processado no caso de uma simulação convencional de estabilidade. Esse evento é composto pela descrição de um defeito (circuito defeituoso, local, tipo, impedância do defeito), sua duração e pela sequência de religamento do circuito defeituoso.

O **bloco 1** inicializa a contagem dos diferentes componentes da rede elétrica, incluindo os associados às máquinas e seus controles.

O **bloco 2** lê um arquivo de fluxo de potência convergido e associa seus dados à rede de referência.

O **bloco 3** estabelece os parâmetros necessários para o processamento de cenários.

O **bloco 4** processa a leitura dos dados necessários para as avaliações de estabilidade.

O **bloco 5** estabelece os parâmetros que caracterizam a modelagem dinâmica a ser empregada na simulação.

O **bloco 6** processa a informação sobre um evento de distúrbio a ser processado no caso de uma simulação convencional de estabilidade.

O **bloco 7** verifica a condição final de leitura de dados, sinalizando e emitindo diagnóstico em caso de erro durante o processamento de leitura de dados para o processamento estocástico.

V.3.3 Estudo de Cenários

A Figura V.5 apresenta o fluxograma detalhado do **Processo 3**, responsável pela configuração do estudo de cenários. Esse processo recebe os parâmetros relativos a cenários (nível de contingência, número de patamares de carga e número de modos de intercâmbio) e configura o modelo de cenários. As possibilidades envolvem a consideração combinada de contingências até o nível $n - 2$, até 5 (cinco) patamares de carga e até 5 (cinco) modos de intercâmbio. O fluxo de processamento a ser seguido após a configuração é determinado pelo valor assumido variável *opc* em função dos parâmetros de cenários.

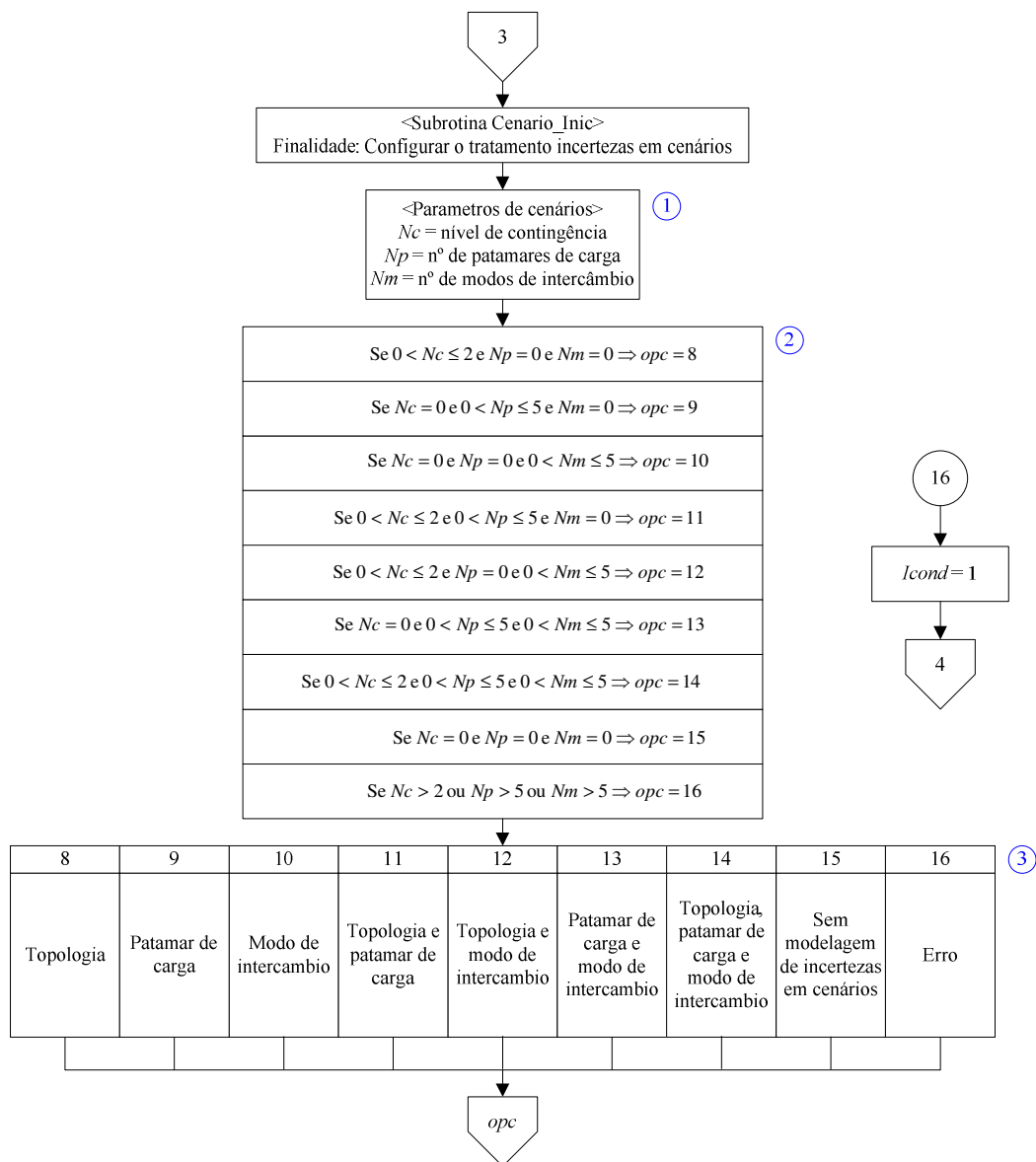


Figura V.5 – Fluxograma para configuração do estudo de cenários

O **bloco 1** é responsável pela passagem dos parâmetros de cenários.

O **bloco 2** processa os parâmetros de cenários e estabelece o valor da variável *opc* a partir do qual será determinado o fluxo de processamento de cenários seguinte. Cada diferente valor da variável *opc* desvia a execução para um determinado processo para tratamento de cenários com incertezas, conforme mostrado na Tabela V.2. A variável *opc* ainda pode assumir outros valores de controle conforme mostra a Figura V.5.

Tabela V.2 – Processos componentes dos fluxos de processamento de cenários

<i>opc</i>	Processamento de Cenários
8	Topologia
9	Patamar de carga
10	Modo de intercâmbio
11	Topologia e patamar de carga
12	Topologia e modo de intercâmbio
13	Patamar de carga e modo de intercâmbio
14	Topologia, patamar de carga e modo de intercâmbio

O **bloco 3** realiza o desvio para o processo determinado pelo valor da variável *opc*.

Cada um dos possíveis fluxos de processamento de cenários será detalhado nos itens que se seguem, nos quais serão descritos cada um dos fluxos de processamento responsáveis pelas diferentes abordagens de modelagens de cenários.

V.3.3.1 Processamento de Incertezas em Topologias

O **Processo 8**, que compreende o fluxo de processamento responsável pela modelagem de incertezas em topologias, está detalhado na Figura V.6.

O **bloco 1** é responsável pela passagem de parâmetros de topologias.

O **bloco 2** processa os parâmetros de topologias e fixa as grandezas determinísticas de cenários (patamar de carga e modo de intercâmbio) para o caso de tratamento de

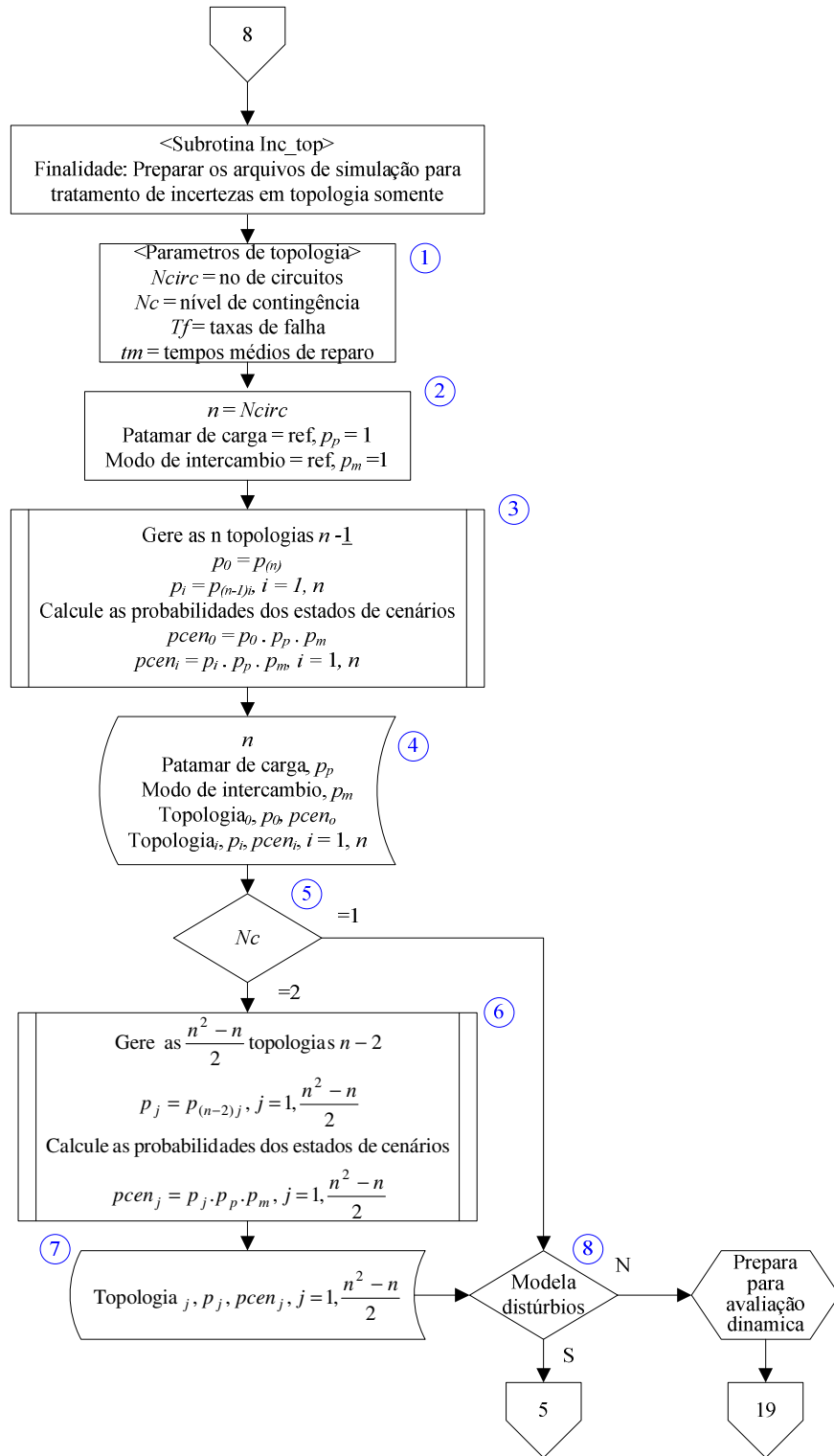


Figura V.6 – Fluxograma para tratamento de incertezas em topologias

incertezas em topologias. Às grandezas determinísticas atribui-se uma probabilidade unitária.

O **bloco 3** representa o ciclo de formação de topologias do primeiro nível de contingência ($n - 1$), incluindo a rede completa. À medida que cada topologia é gerada neste ciclo, sua probabilidade de ocorrência é calculada em função das taxas de falha e tempos médios de reparo dos circuitos que a compõem. Cada topologia estabelece um cenário de topologia cuja probabilidade é a mesma da rede definidora da topologia (patamar de carga e modo de intercâmbio tratados deterministicamente).

O **bloco 4** armazena para posterior processamento (um a um) dos cenários (topologias) gerados no **bloco 3**, conjuntamente com as respectivas probabilidades, incluindo o cenário (topologia) correspondente à rede completa.

O **bloco 5** verifica o nível de contingência escolhido para os cenários de topologias. Se igual a 1 (tratamento de incertezas somente em topologias n e $n - 1$) o processamento prossegue para o **bloco 8**. Se igual a 2 (tratamento de incertezas em topologias n , $n - 1$ e $n - 2$), o processamento segue para o **bloco 6**.

O **bloco 6** representa o ciclo de formação de topologias do segundo nível de contingência ($n - 2$). À medida que cada topologia é gerada neste ciclo, sua probabilidade de ocorrência é calculada em função das taxas de falha e tempos médios de reparo dos circuitos que a compõem. Cada topologia estabelece um cenário de topologia cuja probabilidade é a mesma da rede definidora da topologia (patamar de carga e modo de intercâmbio tratados deterministicamente).

O **bloco 7** armazena para posterior processamento um a um dos cenários (topologias) gerados no **bloco 6**, conjuntamente com as respectivas probabilidades.

O **bloco 8** decide sobre a extensão do tratamento de incertezas aos distúrbios. Caso essa extensão não seja desejada, o processamento prossegue para a preparação para avaliação dinâmica dos cenários de topologia. Caso se deseje combinar o tratamento de incertezas em topologias com o tratamento de incertezas em distúrbios, o fluxo de processamento é direcionado para o tratamento de distúrbios, cujo detalhamento é feito no item V.3.4.

V.3.3.2 Processamento de Incertezas em Patamares de Carga

O **Processo 9**, que compreende o fluxo de processamento responsável pela modelagem de incertezas em patamar de carga, está detalhado na Figura V.7.

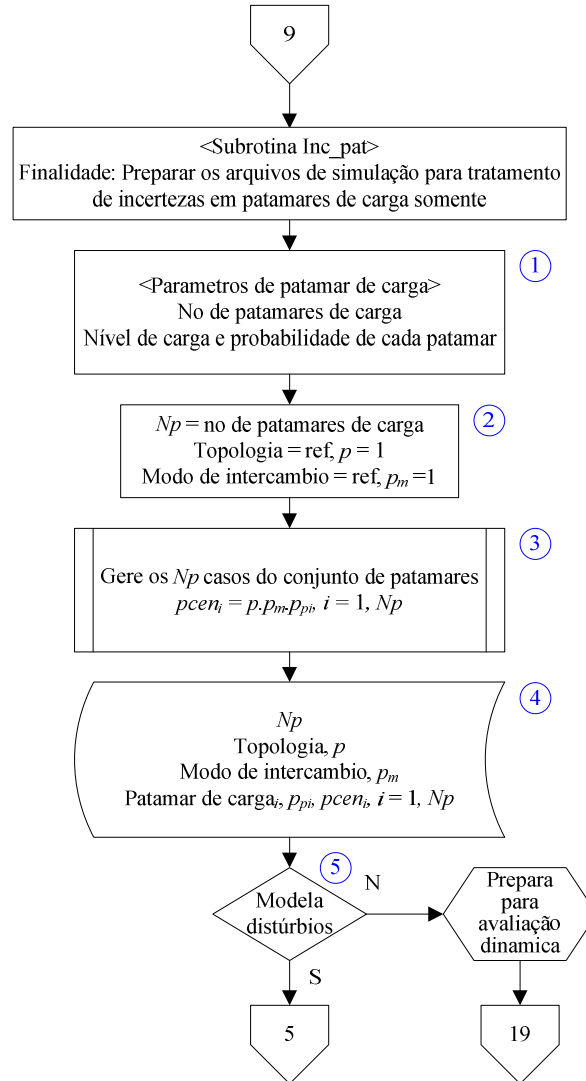


Figura V.7 – Fluxograma para tratamento de incertezas em patamares de carga

O **bloco 1** é responsável pela passagem de parâmetros de patamares de carga.

O **bloco 2** processa os parâmetros de patamares de carga e fixa as grandezas determinísticas de cenários (topologia e modo de intercâmbio) para o caso de tratamento de incertezas em patamares de carga. Às grandezas determinísticas atribui-se uma probabilidade unitária.

O **bloco 3** representa o ciclo de formação de cenários de patamares de carga. À medida que cada cenário de patamar de carga é gerado neste ciclo, sua probabilidade de ocorrência é obtida (dado lido).

O **bloco 4** armazena para posterior processamento um a um dos cenários de patamar de carga gerados no **bloco 3**, conjuntamente com suas respectivas probabilidades.

O **bloco 5** decide sobre a extensão do tratamento de incertezas aos distúrbios. Caso essa extensão não seja desejada, o processamento prossegue para a preparação para avaliação dinâmica dos cenários de patamares de carga. Caso se deseje combinar o tratamento de incertezas em patamares de carga com o tratamento de incertezas em distúrbios, o fluxo de processamento é direcionado para o tratamento de distúrbios, cujo detalhamento é feito no item V.3.4.

V.3.3.3 Processamento de Incertezas em Modos de Intercâmbio

O **Processo 10**, que compreende o fluxo de processamento responsável pela modelagem de incertezas em modos de intercâmbio, está detalhado na Figura V.8.

O **bloco 1** é responsável pela passagem de parâmetros de modos de intercâmbio.

O **bloco 2** processa os parâmetros de modos de intercâmbio e fixa as grandezas determinísticas de cenários (topologia e patamar de carga) para o caso de tratamento de incertezas em modos de intercâmbio. Às grandezas determinísticas atribui-se uma probabilidade unitária.

O **bloco 3** representa o ciclo de formação de cenários de modos de intercâmbio. À medida que cada cenário de modo de intercâmbio é gerado neste ciclo, sua probabilidade de ocorrência é obtida (dado lido).

O **bloco 4** armazena para posterior processamento um a um dos cenários de modo de intercâmbio gerados no **bloco 3**, conjuntamente com suas respectivas probabilidades.

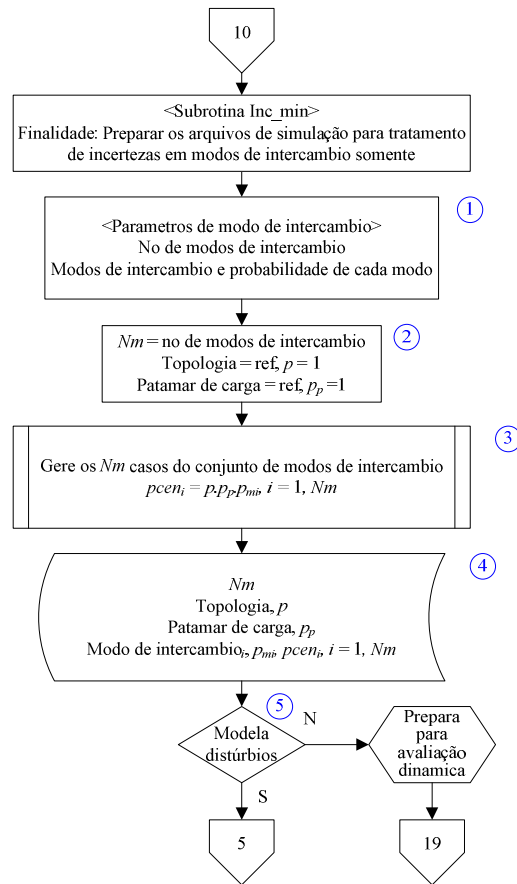


Figura V.8 – Fluxograma para tratamento de incertezas em modos de intercâmbio

O **bloco 5** decide sobre a extensão do tratamento de incertezas aos distúrbios. Caso essa extensão não seja desejada, o processamento prossegue para a preparação para avaliação dinâmica dos cenários de modos de intercâmbio. Caso se deseje combinar o tratamento de incertezas em modos de intercâmbio com o tratamento de incertezas em distúrbios, o fluxo de processamento é direcionado para o tratamento de distúrbios, cujo detalhamento é feito no item V.3.4.

V.3.3.4 Processamento de Incertezas em Topologias e Patamares de Carga

O **Processo 11**, que compreende o fluxo de processamento responsável pela modelagem de incertezas em topologias e patamares de carga, está detalhado na Figura V.9.

O **bloco 1** é responsável pela passagem de parâmetros de topologias e de patamares de carga.

O **bloco 2** processa os parâmetros de topologias e patamares de carga e fixa a grandeza determinística de cenários (modo de intercâmbio) para o caso de tratamento de incertezas em topologias e patamares de carga. À grandeza determinística atribui-se probabilidade unitária.

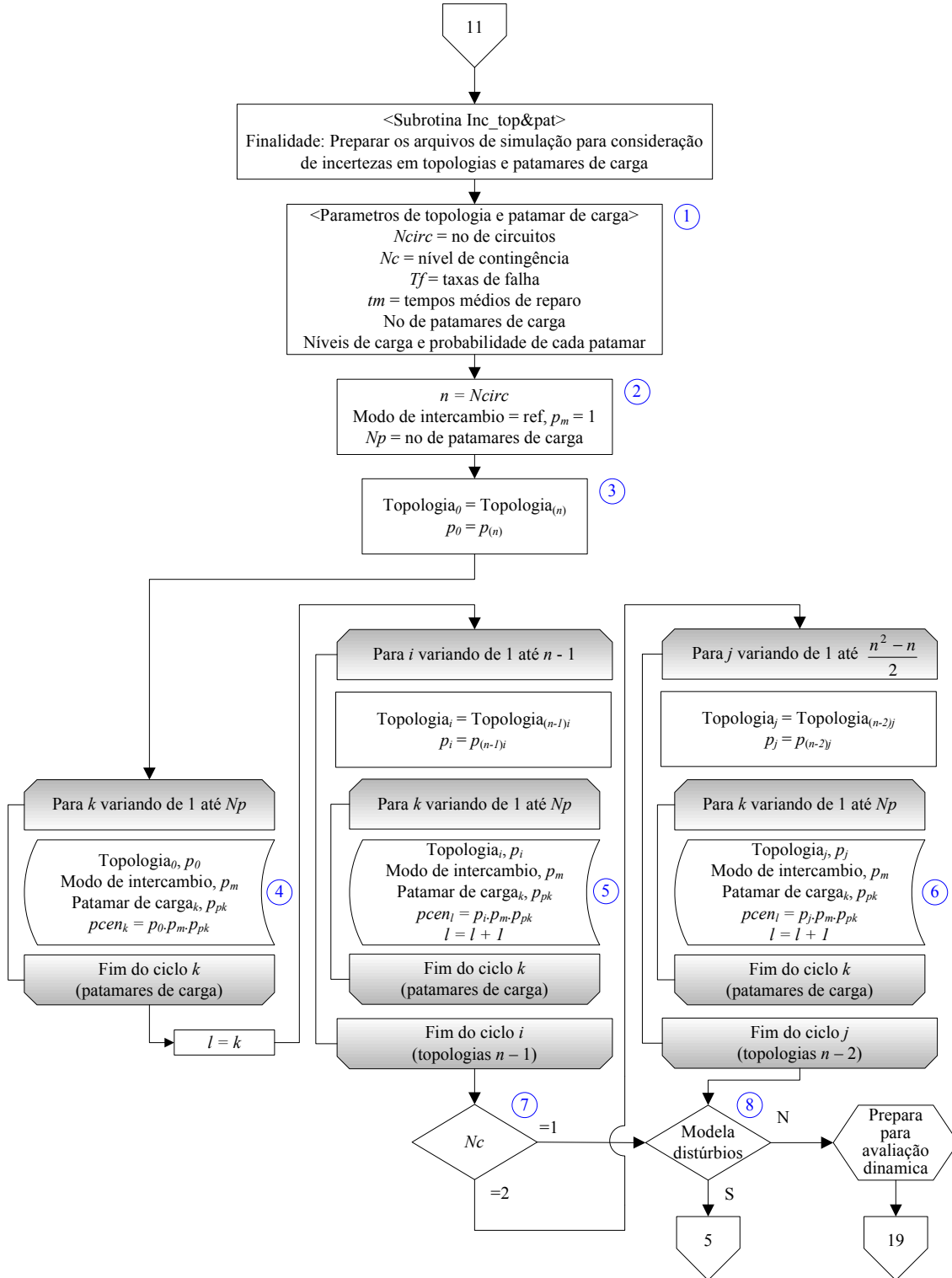


Figura V.9 – Fluxograma para tratamento de incertezas em topologias e patamares de carga

O **bloco 3** seleciona a topologia n e calcula sua probabilidade de ocorrência em função das taxas de falha e tempos médios de reparo dos circuitos que a compõem.

O **bloco 4** é um conjunto formado por um ciclo no qual os diferentes patamares de carga probabilísticos são compostos com a topologia n , selecionada no **bloco 1**. As probabilidades de cada combinação da topologia n com os diferentes patamares de carga são calculadas e atribuídas a cada cenário composto (topologia n – patamar de carga k). A cada passo deste ciclo, é gerado e armazenado, para posterior processamento, um conjunto de informações que contém a topologia n , o modo de intercâmbio (determinístico), o patamar de carga k e a probabilidade do cenário composto (topologia n – patamar de carga k).

O **bloco 5** é um conjunto formado por dois ciclos. A cada passo do ciclo externo é selecionada uma topologia $n - 1$ que, a cada passo do ciclo interno, é combinada com os diferentes patamares de carga probabilísticos. Neste ciclo interno, as probabilidades de cada combinação da topologia $n - 1$ selecionada com os diferentes patamares de carga são calculadas e atribuídas a cada cenário composto (topologia $(n - 1)$ – patamar de carga k), sendo gerado e armazenado, para posterior processamento, um conjunto de informações que contém a topologia $n - 1$ selecionada, o modo de intercâmbio (determinístico), o patamar de carga k e a probabilidade do cenário composto (topologia $(n - 1)$ – patamar de carga k).

O **bloco 6** executa um processamento similar ao do bloco 5, com a diferença de que agora, as topologias selecionadas são as do segundo nível de contingência ($n - 2$), se este tiver sido selecionado no bloco 7.

O **bloco 8** decide sobre a extensão do tratamento de incertezas aos distúrbios. Caso essa extensão não seja desejada, o processamento prossegue para a preparação para avaliação dinâmica dos cenários compostos de topologias e patamares de carga. Caso se deseje combinar o tratamento de incertezas compostas de topologias e patamares de carga com o tratamento de incertezas em distúrbios, o fluxo de processamento é direcionado para o tratamento de distúrbios, cujo detalhamento é feito no item V.3.4.

V.3.3.5 Processamento de Incertezas em Topologias e Modos de Intercâmbio

O **Processo 12**, que compreende o fluxo de processamento responsável pela modelagem de incertezas em topologias e modos de intercâmbio está detalhado na Figura V.10.

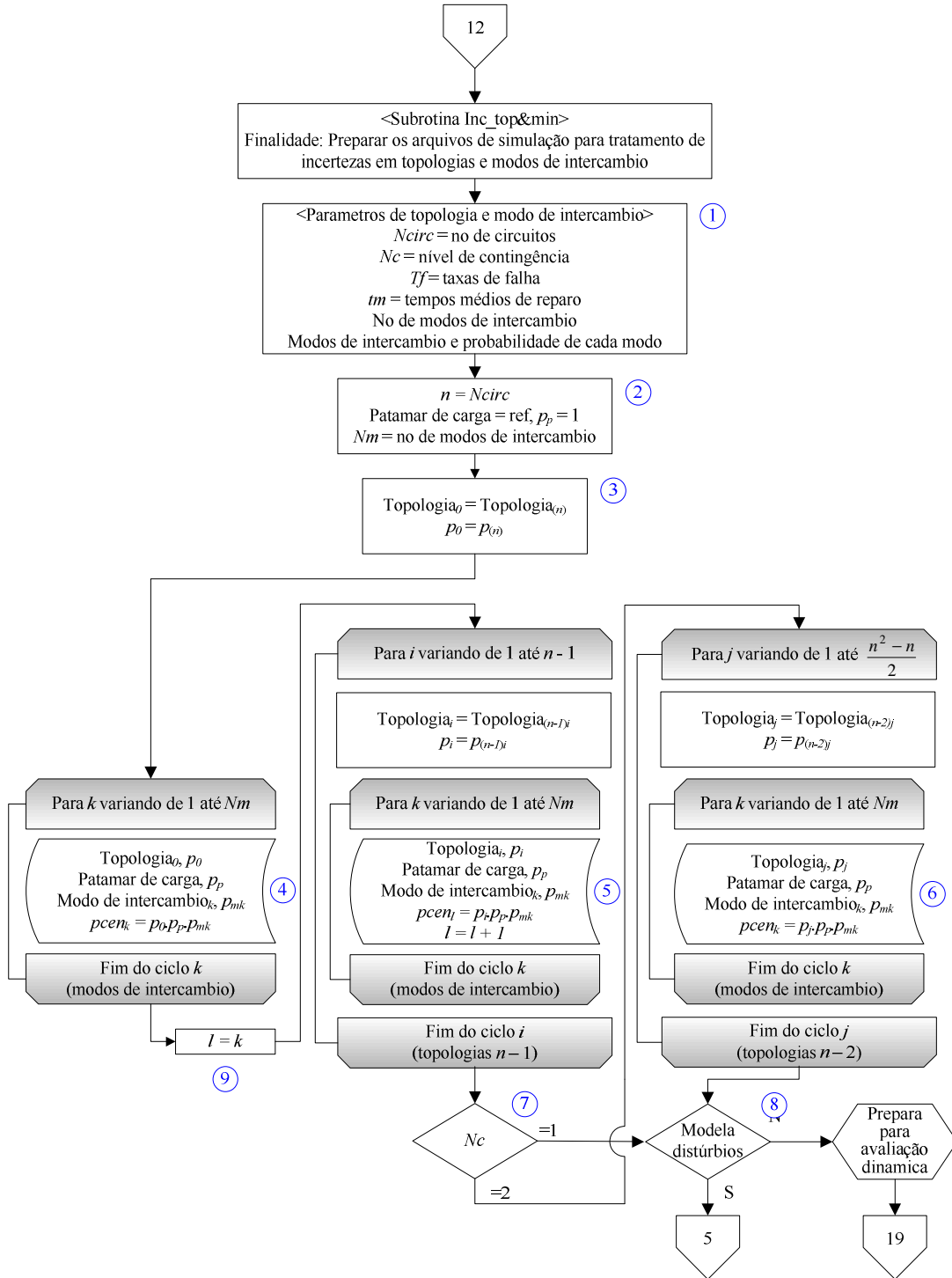


Figura V.10 – Fluxograma para tratamento de incertezas em topologias e modos de intercâmbio

O **bloco 1** é responsável pela passagem de parâmetros de topologias e de modos de intercâmbio.

O **bloco 2** processa os parâmetros de topologias e modos de intercâmbio e fixa a grandeza determinística de cenários (patamar de carga) para o caso de tratamento de incertezas em topologias e modos de intercâmbio. À grandeza determinística atribui-se probabilidade unitária.

O **bloco 3** seleciona a topologia n e calcula sua probabilidade de ocorrência em função das taxas de falha e tempos médios de reparo dos circuitos que a compõem.

O **bloco 4** é um conjunto formado por um ciclo no qual os diferentes modos de intercâmbio probabilísticos são compostos com a topologia n , selecionada no **bloco 1**. As probabilidades de cada combinação da topologia n com os diferentes modos de intercâmbio são calculadas e atribuídas a cada cenário composto (topologia n – modo de intercâmbio k). A cada passo deste ciclo, é gerado e armazenado, para posterior processamento, um conjunto de informações que contém a topologia n , o patamar de carga (determinístico), o modo de intercâmbio k e a probabilidade do cenário composto (topologia n – modo de intercâmbio k).

O **bloco 5** é um conjunto formado por dois ciclos. A cada passo do ciclo externo é selecionada uma topologia $n - 1$ que, a cada passo do ciclo interno, é combinada com os diferentes modos de intercâmbio probabilísticos. Neste ciclo interno, as probabilidades de cada combinação da topologia $n - 1$ selecionada com os diferentes modos de intercâmbio são calculadas e atribuídas a cada cenário composto (topologia $(n - 1)$ – modo de intercâmbio k), sendo gerado e armazenado, para posterior processamento, um conjunto de informações que contém a topologia $n - 1$ selecionada, o patamar de carga (determinístico), o modo de intercâmbio k e a probabilidade do cenário composto (topologia $(n - 1)$ – modo de intercâmbio k).

O **bloco 6** executa um processamento similar ao do **bloco 5**, com a diferença de que, agora, as topologias selecionadas são as do segundo nível de contingência $(n - 2)$, se este tiver sido selecionado no **bloco 7**.

O **bloco 8** decide sobre a extensão do tratamento de incertezas aos distúrbios. Caso essa extensão não seja desejada, o processamento prossegue para a preparação da avaliação dinâmica dos cenários compostos de topologias e modos de intercâmbio. Caso se deseje combinar o tratamento de incertezas compostas de topologias e modos de intercâmbio com o tratamento de incertezas em distúrbios, o fluxo de processamento é direcionado para o tratamento de distúrbios, cujo detalhamento é feito no item V.3.4.

V.3.3.6 Processamento de Incertezas em Patamares de Carga e Modos de Intercâmbio

O **Processo 13**, que compreende o fluxo de processamento responsável pela modelagem de incertezas em patamares de carga e modos de intercâmbio, está detalhado na Figura V.11.

O **bloco 1** é responsável pela passagem de parâmetros de patamares de carga e de modos de intercâmbio.

O **bloco 2** processa os parâmetros de patamares de carga e modos de intercâmbio e fixa a grandeza determinística de cenários (topologia) para o caso de tratamento de incertezas em patamares de carga e modos de intercâmbio. À grandeza determinística atribui-se probabilidade unitária.

O **bloco 3** é um conjunto formado por dois ciclos. A cada passo do ciclo externo é selecionado um patamar de carga que, a cada passo do ciclo interno, é combinado com os diferentes modos de intercâmbio probabilísticos. Neste ciclo interno, as probabilidades de cada combinação de patamar de carga selecionado no ciclo externo com os diferentes modos de intercâmbio são calculadas e atribuídas a cada cenário composto (patamar de carga l – modo de intercâmbio m). Concomitantemente, é gerado e armazenado, para posterior processamento, um conjunto de informações que contém a topologia selecionada (determinística), o patamar de carga l , o modo de intercâmbio k e a probabilidade do cenário composto (patamar de carga l – modo de intercâmbio k). Note que o **bloco 3** compõe um método geral que é utilizado por outro processo durante o fluxo de processamento. Essa utilização é indicada pelos blocos de entrada **17** e de

saída **18**, responsáveis pela transferência de processamento, conforme mostrado na Figura V.11.

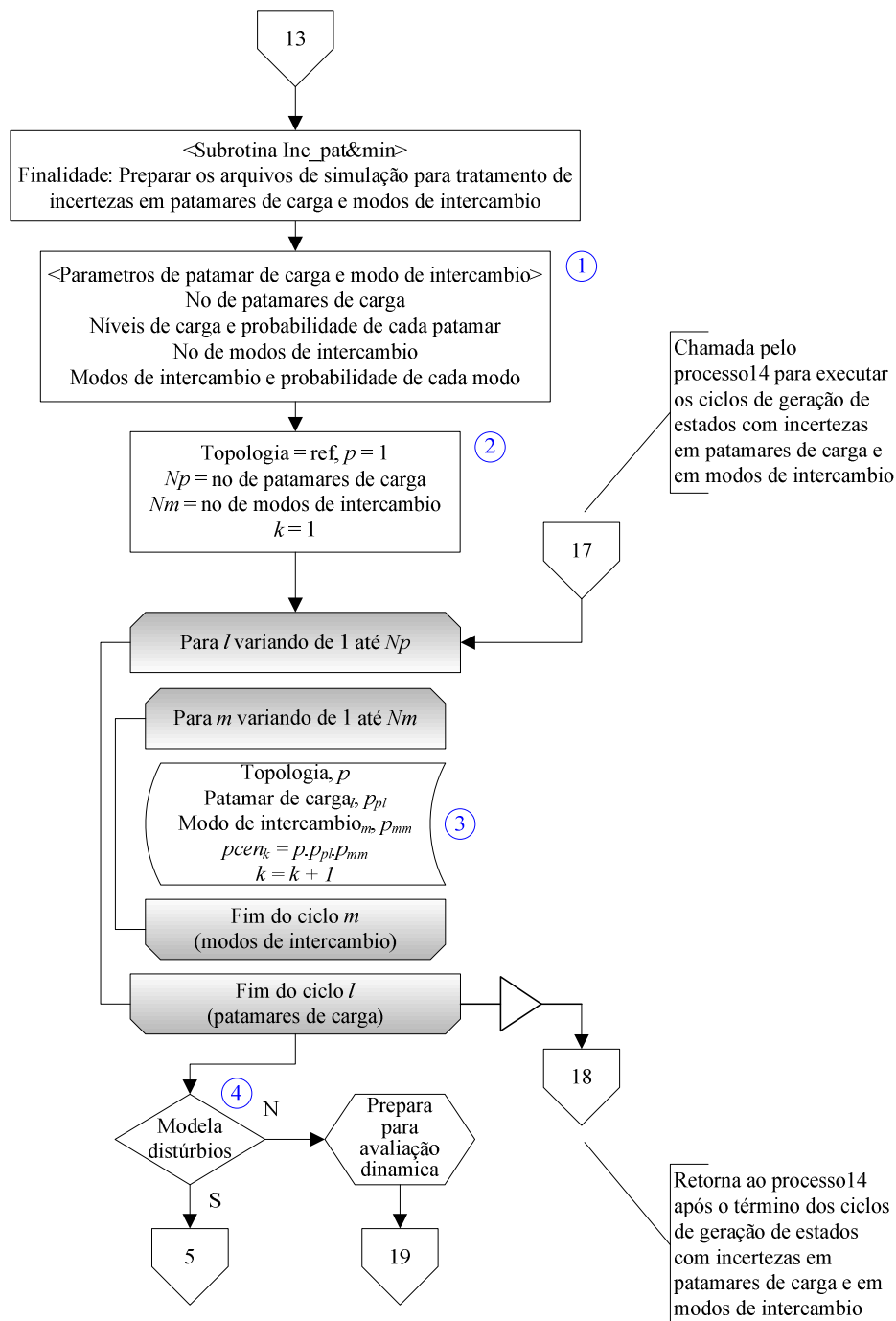


Figura V.11 – Fluxograma para tratamento de incertezas em patamares de carga e modos de intercâmbio

V.3.3.7 Processamento de Incertezas em Topologias, Patamares de Carga e Modos de Intercâmbio

O **Processo 14** compreende o fluxo de processamento mais abrangente permitido pelo protótipo computacional no que tange à consideração de incertezas em cenários. Este processo é o responsável pelo tratamento conjunto de incertezas em topologias, patamares de carga e modos de intercâmbio. O fluxo de processamento correspondente está detalhado na Figura V.12.

O **bloco 1** é o responsável pela passagem de parâmetros de topologias, patamares de carga e de modos de intercâmbio.

O **bloco 2** processa os parâmetros de topologias, patamares de carga e modos de intercâmbio.

O **bloco 3** inicializa o contador de cenários de topologias, patamares de carga e modos de intercâmbio.

O **bloco 4** seleciona a topologia n e transfere o processamento para o **bloco 5**.

O **bloco 5** representa a chamada ao método de tratamento conjunto de incertezas em patamares de carga e modos de intercâmbio. Esse método, contido no **Processo 13**, é um conjunto formado por dois ciclos. A cada passo do ciclo externo é selecionado um patamar de carga que, a cada passo do ciclo interno, é combinado com os diferentes modos de intercâmbio probabilísticos. Neste ciclo interno, quando chamado a partir do **Processo 14**, as probabilidades de cada combinação de topologia, patamar de carga selecionado no ciclo externo com os diferentes modos de intercâmbio são calculadas e atribuídas a cada cenário composto (topologia i – patamar de carga l – modo de intercâmbio m). Concomitantemente, é gerado e armazenado, para posterior processamento, um conjunto de informações que contém a topologia i , o patamar de carga l , o modo de intercâmbio k e a probabilidade do cenário composto (topologia i – patamar de carga l – modo de intercâmbio m). A chamada ao método de tratamento conjunto de incertezas em patamares de carga e modos de intercâmbio é indicada

pelos blocos de saída **17** e de retorno **18**, responsáveis pela transferência de processamento, conforme mostrado na Figura V.12.

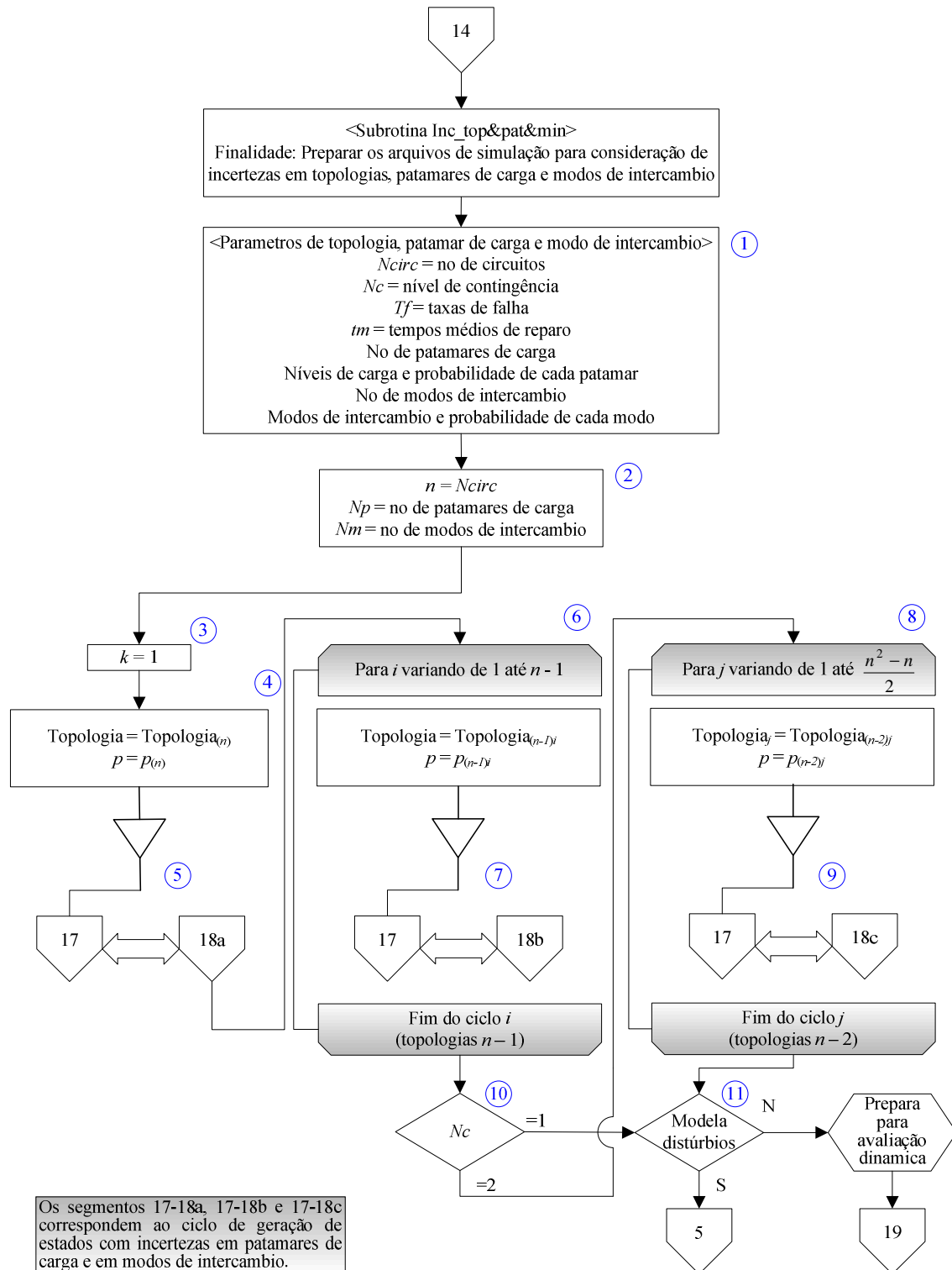


Figura V.12 – Fluxograma para tratamento de incertezas em topologias, patamares de carga e modos de intercâmbio

V.3.4 Estudo de Distúrbios

A Figura V.13 apresenta o fluxograma detalhado do **Processo 5**, responsável pela configuração do estudo de distúrbios. Esse processo recebe os parâmetros relativos a distúrbios (arquivos representativos de cada cenário, probabilidade de cada cenário e dados estocásticos de distúrbios), configurando o modo de tratamento de incertezas em distúrbios de acordo com o descrito a seguir.

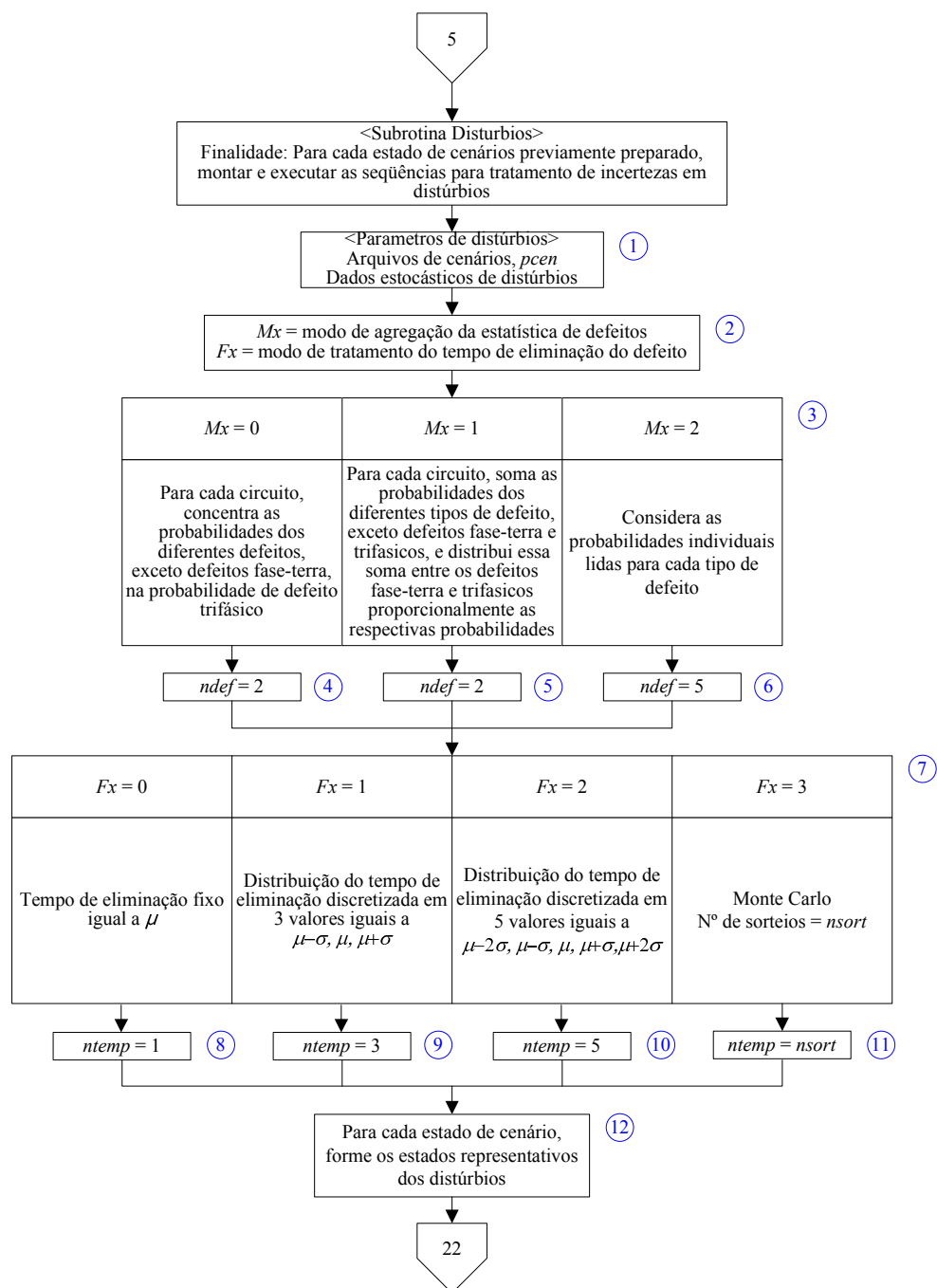


Figura V.13 – Fluxograma para configuração do estudo de distúrbios

As possibilidades de tratamento de distúrbios compreendem a consideração de incertezas em:

- elemento sob defeito
- localização do defeito no elemento
- tipo de defeito

Os tempos de eliminação de defeitos são tratados deterministicamente através de uma análise de sensibilidade, conforme sugerido no item V.4.2 e detalhado a seguir.

O **bloco 1** é responsável pela passagem dos parâmetros de distúrbios.

O **bloco 2** processa os parâmetros de distúrbios e estabelece os modos de tratamento da estatística de defeitos e dos tempos de eliminação de defeitos. A Tabela V.3 apresenta as diferentes possibilidades permitidas de representação de defeitos e de tempos de eliminação. A variável Mx controla o tratamento da estatística de defeitos enquanto que a variável Fx determina o número de diferentes tempos de eliminação a serem considerados na avaliação de sensibilidade.

Tabela V.3 – Tratamento da estatística de defeitos e das tempos de eliminação

Mx			
0	1	2	
Para cada circuito, concentra as probabilidades dos diferentes defeitos, exceto defeitos fase-terra, na probabilidade de defeito trifásico	Para cada circuito, soma as probabilidades dos diferentes tipos de defeito, exceto defeitos fase-terra e trifasicos, e distribui essa soma entre os defeitos fase-terra e trifasicos proporcionalmente as respectivas probabilidades	Considera as probabilidades individuais lidas para cada tipo de defeito	
Fx			
0	1	2	3
Tempo de eliminação fixo igual a μ	Distribuição do tempo de eliminação discretizada em 3 valores iguais a $\mu-\sigma, \mu, \mu+\sigma$	Distribuição do tempo de eliminação discretizada em 5 valores iguais a $\mu-2\sigma, \mu-\sigma, \mu, \mu+\sigma, \mu+2\sigma$	Monte Carlo ^(*)

(*) Opção não está implementada

O **bloco 3** processa o valor da variável Mx e estabelece o modo de tratamento da estatística de defeitos.

Os **blocos 4, 5 e 6** fixam o número de defeitos que serão considerados no modelo de distúrbios em função do modo escolhido para tratamento da estatística de defeitos.

O **bloco 7** processa o valor da variável Fx e estabelece o modo de tratamento do tempo de eliminação do defeito para análise de sensibilidade.

Os **blocos 8, 9, 10 e 11** fixam o número de diferentes tempos de eliminação do defeito que serão considerados no modelo de distúrbios em função do modo escolhido para tratamento do tempo de eliminação. A opção Monte Carlo não está implementada.

O **bloco 12**, após a configuração do modo de estudo de distúrbios, seleciona cada um dos cenários de entrada aplicando a ele o modelo de distúrbio configurado.

V.3.4.1 Processamento de Distúrbios

O **Processo 22**, que compreende o fluxo de processamento responsável pela modelagem de distúrbios, está detalhado na Figura V.14.

Esse processo é iniciado a partir da configuração do modo de estudo de distúrbios e da escolha de um cenário.

O **bloco 1** compreende o ciclo que executa a sensibilidade relativa à variação do tempo de eliminação do defeito.

O **bloco 2** incrementa a variável N_{caso} , que conta o número de casos totais processados.

O **bloco 3** compreende o ciclo de aplicação da medida corretiva. O único tipo de medida corretiva considerado é o religamento rápido de circuitos. O processamento dessa medida para fins de estudos probabilísticos de segurança dinâmica exige a simulação das situações: *(i)* sem medida corretiva; *(ii)* com medida corretiva bem sucedida, e; *(iii)*

com medida corretiva mal sucedida. Dá-se, assim, conta da representação da estatística de atuação com sucesso e insucesso do religamento quando aplicado a um determinado circuito ou sistema elétrico.

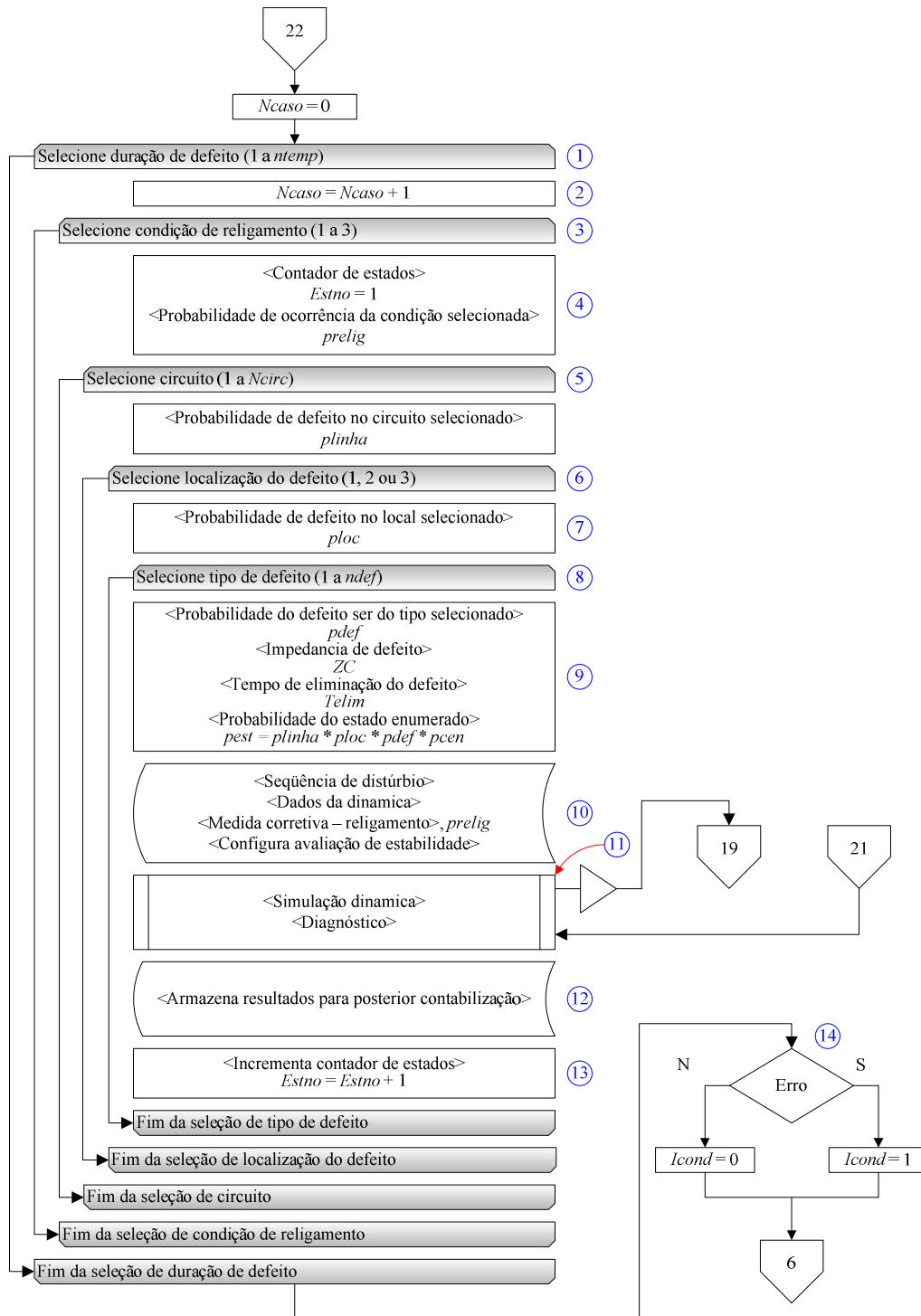


Figura V.14 – Fluxograma para tratamento de incertezas em distúrbios

O **bloco 4** inicializa a contagem de estados probabilísticos de distúrbios e seleciona a probabilidade correspondente à condição de atuação da medida corretiva em tratamento no dado estado do ciclo de aplicação da medida corretiva.

O **bloco 5** compreende o ciclo de seleção dos circuitos para aplicação do modelo de distúrbio configurado.

O **bloco 6** corresponde à atribuição de uma probabilidade de ocorrência de defeito ao circuito selecionado.

O **bloco 7** corresponde ao ciclo de seleção da localização do defeito no circuito corrente.

O **bloco 8** corresponde à atribuição de uma probabilidade de ocorrência de defeito na localização selecionada.

O **bloco 9** corresponde ao ciclo de seleção do tipo de defeito.

O **bloco 10** corresponde à configuração final do distúrbio com a atribuição de uma probabilidade ao tipo de defeito selecionado, determinação da impedância de defeito, atribuição da duração do defeito e cálculo da probabilidade do estado selecionado, resultado da combinação de incertezas de distúrbios (elemento sob defeito, localização do defeito e tipo de defeito).

O **bloco 11** cuida do armazenamento da seqüência de distúrbio (e correspondentes atributos), da agregação dos dados dinâmicos correspondentes à rede em estudo, da determinação do contexto de atuação da medida corretiva (e respectiva probabilidade de sucesso ou insucesso) e configura a avaliação dinâmica do estado selecionado.

O **bloco 12** corresponde à chamada do **Processo 19**, responsável pela realização da avaliação dinâmica do estado selecionado e correspondente diagnóstico de simulação com a obtenção de índices dinâmicos de interesse.

V.3.5 Estudo de Cenários e Distúrbios (Casos Híbridos)

Os casos híbridos são tratados no fluxo do processamento conforme indicam os processos descritos para os estudos de cenários (vide item V.3.3). Observe que durante os fluxos de processamento de cenários há um bloco de decisão que desvia o processamento para o tratamento de distúrbios. Esse desvio é feito por opção de controle do programa, indicada pelo analista nos dados de entrada (vide Anexo B).

Como o tratamento de distúrbios é realizado sempre sobre um cenário, seja este determinístico ou probabilístico, o fluxo lógico passa sempre primeiramente pelo tratamento de cenários.

V.3.6 Avaliação Dinâmica do Estado Selecionado

Seja nos estudos separados ou em estudos combinados de cenários e distúrbios, a avaliação dinâmica de cada estado probabilístico gerado é requerida para que se possa inferir sobre a condição de estabilidade (segurança) do sistema. Essa avaliação, além de produzir o diagnóstico correto quanto ao comportamento dinâmico deve, também, produzir índices capazes de caracterizar graus de risco para o devido apoio a decisões de expansão ou de operação no que tange ao aspecto da segurança do sistema. Esse, portanto, é um componente fundamental do protótipo computacional construído. Este item está aqui colocado de modo a contribuir para o entendimento da inserção da avaliação dinâmica no contexto do cálculo probabilístico realizado pelo protótipo e, também, para destacar algumas características relevantes do método de diagnóstico adotado.

A Figura V.15 mostra o **Processo 19**, responsável pelo fluxo de execução da avaliação dinâmica. Nessa figura não se apresenta os detalhes característicos da simulação dinâmica que, em grande parte, são os mesmos de qualquer simulação convencional de estabilidade [97]. São, entretanto, apontados blocos ou segmentos funcionais específicos do protótipo construído, os quais fazem parte integrante da metodologia proposta nesta Tese. Esses blocos ou segmentos são aqueles responsáveis pela implementação do método SIME e pelo cálculo de índices da simulação dinâmica (vide seção III.4) que

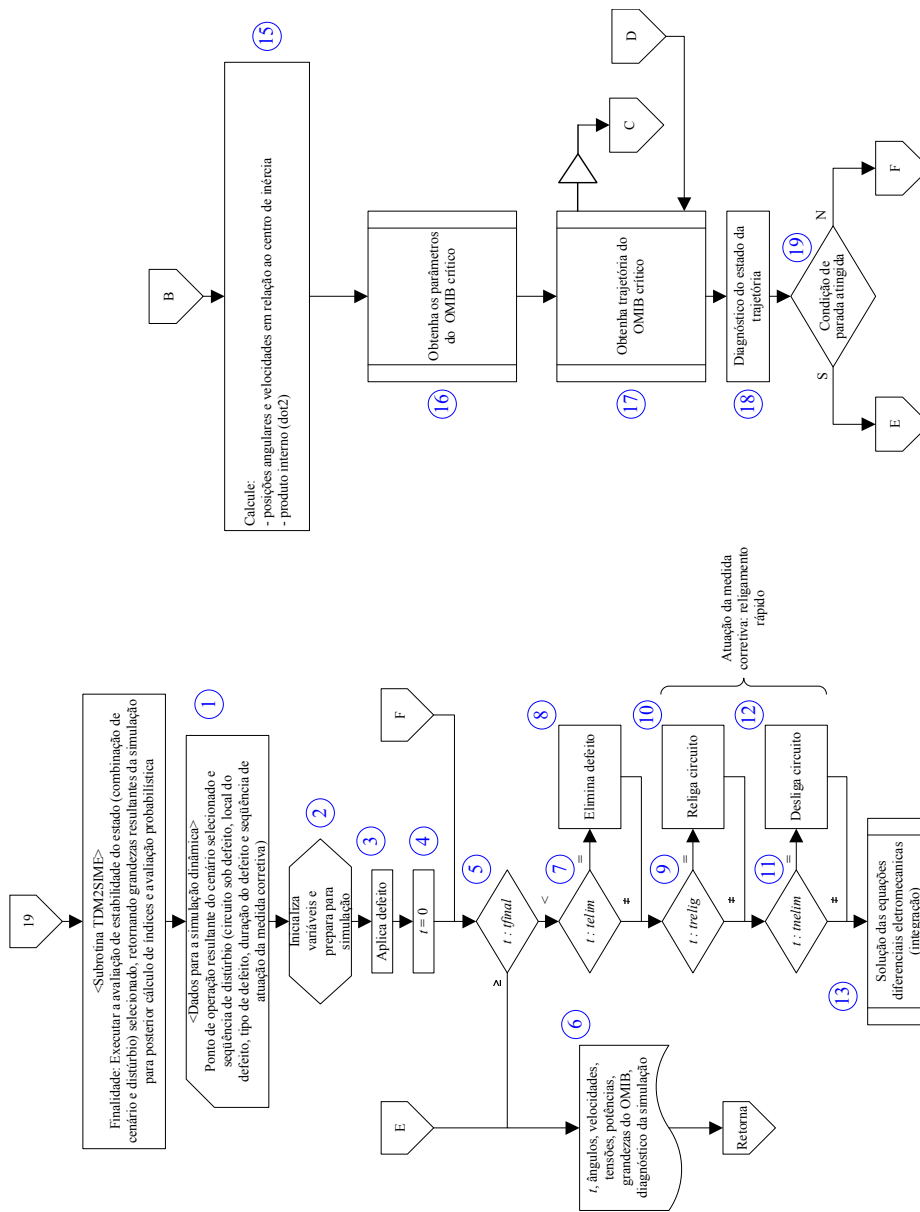


Figura V.15 – Fluxograma geral da avaliação dinâmica

serão utilizados para diagnóstico da condição de estabilidade do sistema e para a composição dos índices probabilísticos resultantes da avaliação de segurança dinâmica com consideração de incertezas. O fluxo de processamento adotado no **Processo 19** é descrito a seguir.

O **bloco 1** é responsável pela leitura dos dados que caracterizam o estado sob análise, contendo a descrição do cenário (ponto de operação), do distúrbio (circuito sob defeito, localização do defeito, tipo de defeito, impedância de defeito, duração do defeito) e de atuação da medida corretiva (religamento rápido) resultantes dos processos de formação da estrutura de tratamento de incertezas anteriormente descritos, adicionados dos dados necessários para realização da simulação de estabilidade, quais sejam: dados dos geradores elétricos, dados de sistemas de controle e dados de eventos (seqüência e medida corretiva).

O **bloco 2** faz a inicialização de variáveis e prepara a simulação de estabilidade.

O **bloco 3** interpreta os dados de eventos e aplica o defeito (modificações na matriz de admitância de barras).

O **bloco 4** inicializa a contagem de tempo.

O **bloco 5** verifica se a simulação chegou a seu final.

O **bloco 6** executa o processamento para finalização da simulação de estabilidade, imprimindo as variáveis que caracterizam o estado do sistema ao final da simulação, as grandezas relativas ao equivalente de máquina contra barra infinita (inércia, potências elétrica e mecânica, margens e ângulos) e o diagnóstico da simulação.

O **bloco 7** verifica se foi transcorrido o tempo de duração do defeito.

O **bloco 8** processa a eliminação do defeito (modificações na matriz de admitância de barras).

O **bloco 9** verifica se transcorreu o tempo de espera para o religamento do circuito defeituoso (medida corretiva).

O **bloco 10** processa o religamento do circuito (modificações na matriz de admitância de barras).

O **bloco 11** verifica se transcorreu o tempo de espera para nova abertura do circuito, no caso de religamento malsucedido (medida corretiva aplicada sem sucesso).

O **bloco 12** processa o desligamento definitivo do circuito no caso de religamento malsucedido.

O **bloco 13** constitui-se do método de integração (solução) das equações diferenciais, calculando os novos valores das grandezas representativas da dinâmica do sistema para o instante $t_n = t_{n-1} + \Delta t$.

O **bloco 14** processa a saída do processo de integração das equações dinâmicas, imprimindo os novos ângulos e velocidades dos rotores, as tensões internas e potências, bem como demais grandezas características da dinâmica do sistema para o instante t_n .

O **bloco 15** transforma ângulos e velocidades para a referência do centro de inércia do sistema. Calcula também o produto escalar *dot2* [49,89], utilizado para verificação da condição de estabilidade do sistema (cruzamento da superfície limite de energia potencial) em casos para os quais o distúrbio tem como consequência a inexistência de um ponto de equilíbrio para o sistema pós-defeito.

O **bloco 16** compreende o cálculo dos parâmetros do equivalente crítico máquina-barra infinita (OMIB crítico), conforme mostrado na seção IV.2.2.2.

O **bloco 17** compreende o cálculo o ponto da trajetória do OMIB crítico no instante t_n .

O **bloco 18** diagnostica a trajetória do OMIB crítico, inferindo sobre a o estado dinâmico do sistema através da verificação das condições de estabilidade ditadas pelas Equações (IV-14) e (IV-15) e do cálculo das margens de estabilidade, conforme Equações (IV-16) e (IV-17).

O **bloco 19** verifica se foi ou não atingida alguma condição de parada da simulação (trajetória ainda indefinida, sistema estável ou sistema instável) e desvia o fluxo de processamento de acordo com a condição existente.

Os fluxos de processamento responsáveis pelo cálculo dos parâmetros do OMIB crítico, obtenção do ponto da trajetória, cálculo de margens, diagnóstico da trajetória e registro da condição existente são detalhados e comentados a seguir.

V.3.6.1 Processamento do Equivalente Crítico e Diagnóstico da Simulação

A Figura V.16 apresenta o **Subprocesso C** e o **Subprocesso G** responsáveis, respectivamente, pela obtenção dos parâmetros de OMIB crítico (vide seção IV.2.2.2) e pelo cálculo da trajetória deste OMIB crítico com o fim de diagnosticar a condição de estabilidade do sistema. Os **blocos de 1 a 3** compõem o **Subprocesso C** enquanto que o **Subprocesso G** é composto dos **blocos de 4 a 8**.

O **bloco 1**, início do **Subprocesso C**, procede a uma ordenação crescente dos ângulos dos rotores, mantendo um apontador da ordem original para posterior indexação.

O **bloco 2** percorre a lista de ângulos determinando a maior diferença angular existente entre dois rotores adjacentes na lista ordenada. O par de rotores associado a essa maior diferença define a separação entre o grupo de máquinas não-críticas e o grupo de máquinas críticas, sendo o limite final do grupo não-crítico dado pelo rotor de menor ângulo do par e o limite inferior do grupo crítico dado pelo rotor de maior ângulo do par.

O **bloco 3** processa, a partir da identificação dos grupos não-crítico e crítico, o cálculo dos parâmetros do OMIB crítico.

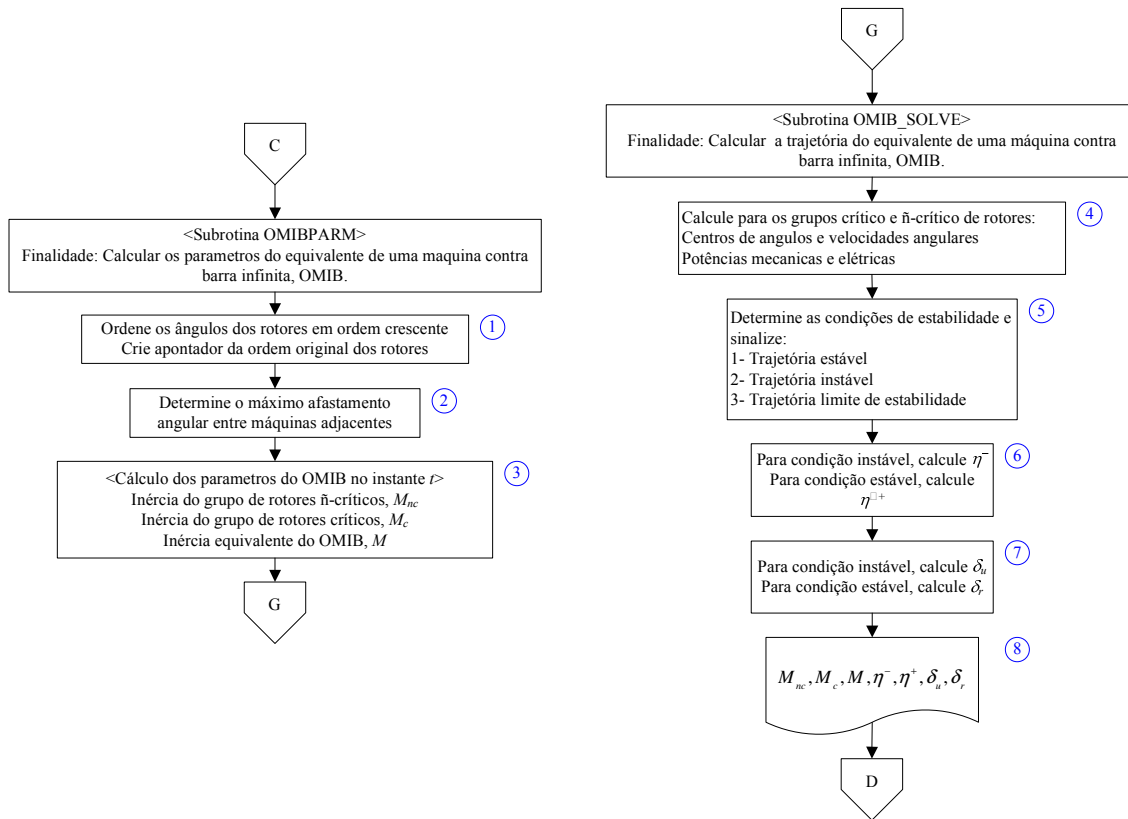


Figura V.16 – Processamento do equivalente crítico e diagnóstico da simulação

O **bloco 4**, já no **Subprocesso G**, recebe os parâmetros do OMIB crítico e da simulação no tempo (grandezas convencionais) e calcula para os grupos crítico e não-crítico de rotores os respectivos centros de ângulos, velocidades angulares, potências mecânicas e elétricas.

O **bloco 5**, a partir das grandezas que caracterizam a trajetória do OMIB crítico anteriormente calculadas, procede ao diagnóstico da condição de estabilidade do sistema (vide seção IV.2.2.3) distinguindo entre trajetória estável, instável e limite de estabilidade.

O **bloco 6** calcula as margens de estabilidade, negativa para sistema instável e positiva para sistema estável (vide item IV.2.2.4).

O **bloco 7** calcula o ângulo do OMIB crítico no qual o sistema se instabiliza ou retorna em seu comportamento oscilatório, conforme o sistema seja instável ou estável.

O **bloco 8** registra em arquivo os parâmetros do OMIB crítico, a margem e o ângulo característicos da condição de estabilidade do sistema. Esses valores serão posteriormente processados de acordo com as probabilidades dos estados selecionados e serão utilizados para cálculo dos índices probabilísticos de segurança.

V.3.7 Cálculo dos Índices Probabilísticos e Tabulação de Resultados

Ao final do processamento de cenários e distúrbios, incluindo as opções de representação de incertezas em cenários e distúrbios e as avaliações de estabilidade de cada um dos estados probabilísticos gerados, o fluxo de processamento do protótipo é direcionado ao cálculo de índices e tabulação final da análise de segurança probabilística realizada pelo protótipo. A Figura V.17 mostra o **Processo H**, responsável pelo tratamento final dos resultados das simulações de avaliação de segurança dinâmica probabilística.

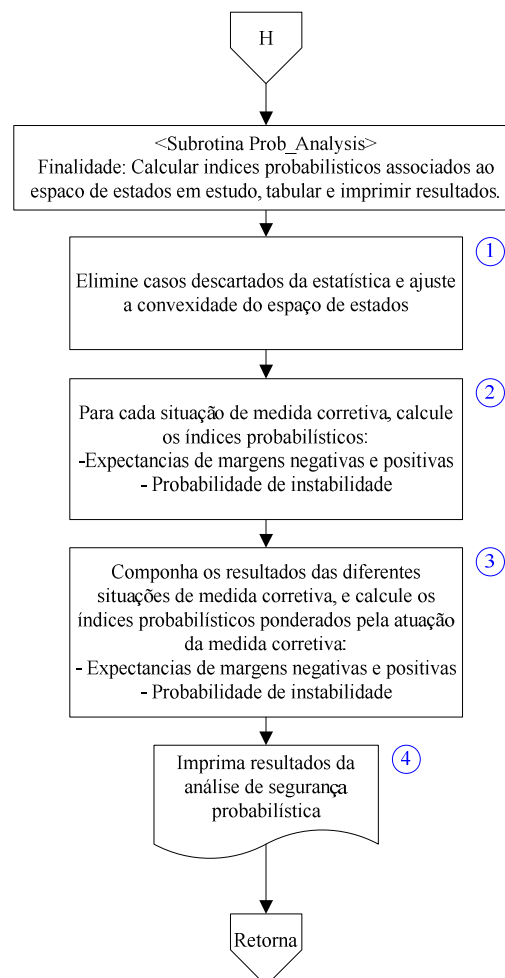


Figura V.17 – Fluxograma para cálculo dos índices probabilísticos, tabulação e impressão de resultados

O **bloco 1** trata o espaço probabilístico de estados contabilizando os estados viáveis e inviáveis e procedendo ao ajuste do espaço viável de acordo com opção do usuário, podendo proceder ao descarte simples dos estados inviáveis ou a redistribuição das probabilidades a eles associadas pelos demais estados considerados viáveis.

O **bloco 2** procede ao cálculo do efeito da atuação da medida corretiva sobre o espaço de estados probabilísticos, obtendo os índices relativos aos casos antes da aplicação de medidas corretivas e após sua aplicação.

O **bloco 3** compõe os resultados processados pelo **bloco 2** calculando probabilidades e expectâncias ponderadas pelas diferentes situações de atuação da medida corretiva.

O **bloco 4** tabula e imprime os resultados da avaliação de segurança do sistema de potência em regime transitório considerando incertezas.

V.4 Sumário

Este capítulo *registra a forma adotada para a implementação da metodologia proposta nesta Tese*. Apresentou-se aqui, em detalhes, o âmago do procedimento computacional que viabiliza a avaliação da estabilidade transitória de um sistema de potência submetido a um ambiente de incertezas. O capítulo apresenta e discute a estrutura do protótipo desenvolvido para o cálculo computacional dos indicadores de segurança dinâmica probabilística propostos no Capítulo III. Aborda-se tanto o macro-arcação lógico adotado quanto as minudências de implementação e artifícios de cálculo utilizados.

Depois de realizada a seleção de estado, fica esclarecida como é efetuada a simulação no domínio do tempo empregando o método SIME para a verificação da condição de segurança da configuração do sistema. Nesse contexto, mostra-se, também, como o protótipo trata a aplicação de medidas corretivas, no caso o *reliamento automático de circuitos*.

Nos estudos tradicionais de adequação, quando a topologia da rede de transmissão é analisada por enumeração, a avaliação restringe-se às contingências simples, pois a enumeração de contingências duplas de sistemas reais de grande porte já pode

extrapolar a capacidade computacional usualmente disponível. A extensão da análise da topologia para o foco da segurança dinâmica incluindo estabilidade transitória, sugere que a monitoração usual também se restrinja às contingências simples e, no caso particular de sistemas de porte reduzido, às contingências duplas. O protótipo construído permite, por opção do usuário, a modelagem de contingências simples e duplas.

De acordo com a metodologia proposta no Capítulo III (vide seção III.4) o procedimento computacional adotado permite a avaliação do sistema de potência considerando duas categorias distintas de incertezas, quais sejam: incertezas de cenários e distúrbios (vide Figura III.1). Como anteriormente comentado, as incertezas relacionadas a ruídos e pontos de operação fogem do escopo deste trabalho. Adicionalmente, admite-se também a combinação das duas categorias citadas, ou seja, incertezas em cenários combinadas com distúrbios.

Os diferentes cenários podem ser preparados de forma particularizada – quando são tomados como base casos típicos de estudos de planejamento (expansão ou operação) para os quais as topologias da rede têm probabilidades conhecidas – ou de forma automática, através da combinação das incertezas escolhidas conforme detalhado nos fluxos de processamento apresentados ao longo do capítulo. Os estudos poderão ser conduzidos, simplesmente, a partir de um cenário geração/carga/topologia único (probabilidade unitária) ou considerando os múltiplos cenários enumerados com suas respectivas probabilidades.

Para cada um dos cenários gerados procede-se uma enumeração sobre o espaço probabilístico de distúrbios. Observe-se ainda que a situação na qual o usuário define apenas um único tipo e local de distúrbio (com duração fixa) também é contemplada pelo aplicativo. As combinações de cenários e distúrbios são, por sua vez, submetidas a uma avaliação de estabilidade, através da qual se infere objetivamente sobre a condição de estabilidade do estado probabilístico em análise. Os resultados dessas avaliações são armazenados e, a partir deles, o protótipo executa o processo final de cálculo de índices probabilísticos e tabulação dos resultados obtidos.

* * *

Capítulo VI Aplicação e Resultados

VI.1 Introdução

A aplicação do arcabouço probabilístico (descrito no Capítulo III) em conjunto com o método SIME (vide Capítulo IV) para avaliação da estabilidade de um estado selecionado (enumerado), ilustra no presente capítulo o uso da metodologia de avaliação de segurança dinâmica probabilística desenvolvida [92].

Três sistemas distintos serão apresentados, de modo a facilitar o entendimento progressivo do procedimento proposto. Nos testes realizados foram utilizados os sistemas de 4, 9 e 39 barras detalhados no Anexo A.

A estrutura lógica descrita no Capítulo V foi implementada em linguagem FORTRAN 95, através do aplicativo Análise de Segurança Transitória Probabilística – ASTP. Uma descrição pormenorizada deste programa pode ser vista no Anexo B (capacidades do programa, instruções de instalação, manual do usuário). No Anexo C, podem ser encontrados exemplos de arquivos de entrada, relatório de saída e outras informações relativas ao módulo executável do programa ASTP.

VI.2 Convenções e Premissas Gerais

As seguintes convenções e premissas gerais serão utilizadas e servirão para todos os sistemas apresentados:

- Uma barra será referenciada por um número inteiro entre parênteses. Ex: barra (7);
- Um circuito será referenciado por um número inteiro entre chaves. Ex: [4];

- Os terminais de cada circuito - indicados no desenho por um ponto nos circuitos - serão referenciados pelos números inteiros 1 ou 2, respectivamente para os terminais de origem e de chegada do circuito. Um ponto intermediário no circuito será referenciado pela letra M;
- A referência a um dado terminal de um dado circuito será composta pelo número do circuito entre chaves seguido do número do terminal. Ex: [4]1, [2]M;
- A notação adotada para os defeitos considerados é:
 - **1F**, *monofásico*;
 - **FF**, *entre 2 fases sem envolvimento da terra*;
 - **2F**, *entre 2 fases com envolvimento da terra*;
 - **3F**, *trifásicos*;
 - **OT**, *outros*.
- As probabilidades de ocorrência de cada tipo de defeito podem ser obtidas a partir de dados típicos ou das estatísticas de desempenho para sistemas reais;
- As impedâncias de defeitos para os diferentes tipos considerados podem ser obtidas de estudos de curto-circuito ou, na indisponibilidade destes, pela aplicação da metodologia apresentada em *Aquino et alii* [110].

VI.3 Aspectos de Modelagem

Para os exemplos a serem apresentados cabem as seguintes considerações:

- A modelagem dinâmica restringiu-se aos transitórios do rotor e da tensão de campo da máquina síncrona (3 estados dinâmicos por gerador, associados aos fenômenos eletromecânicos), com e sem representação de controles (reguladores de tensão);
- Para os cenários (vide Capítulo III), podem ser consideradas incertezas em:

- topologias (níveis de contingência $n-1$ e $n-2$);
 - patamares de carga (até 5 patamares probabilísticos);
 - modos de intercâmbio (até 5 modos probabilísticos);
 - combinações de patamares e modos de intercâmbio (até 25 combinações probabilísticas).
- Para os distúrbios (vide Capítulo III), são consideradas incertezas em:
 - elemento sob defeito;
 - localização do defeito no elemento (terminal de origem, terminal de chegada ou ponto intermediário do circuito);
 - tipo de defeito (cinco tipos: 1F, FF, 2F, 3F, OT)¹¹;
 - durações de defeito, modeladas através de distribuições normais cujas médias (μ) e desvios padrões (σ) representam o comportamento probabilístico da atuação da proteção.

A Figura VI.1 apresenta o modelo de distúrbio mostrando o modo de composição das incertezas modeladas para cada elemento da rede de transmissão: local, tipo e duração. A cada local e tipo está associado um valor de probabilidade (obtido, por exemplo, das estatísticas de desempenho do sistema em estudo), enquanto que a duração do defeito é modelada por uma distribuição normal $N(\mu, \sigma)$. Os tempos críticos de eliminação dos defeitos para os diferentes locais e tipos são obtidos através de estudos convencionais de estabilidade. As áreas hachuradas representam as probabilidades de instabilidade para as diferentes durações de defeito.

- Como medida corretiva, o religamento rápido tripolar do circuito defeituoso pode ser modelado probabilisticamente através dos percentuais de sucesso e insucesso de sua atuação;

¹¹ Identificados internamente pelo programa ASTP como tipos 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

- As possíveis combinações de modelagem de incertezas só em cenários, só em distúrbios e entre cenários e distúrbios (*modelagem híbrida*), com ou sem a consideração de medida corretiva, gera um espaço probabilístico de estados cuja dimensão é função do grau de detalhamento escolhido para representação das incertezas;

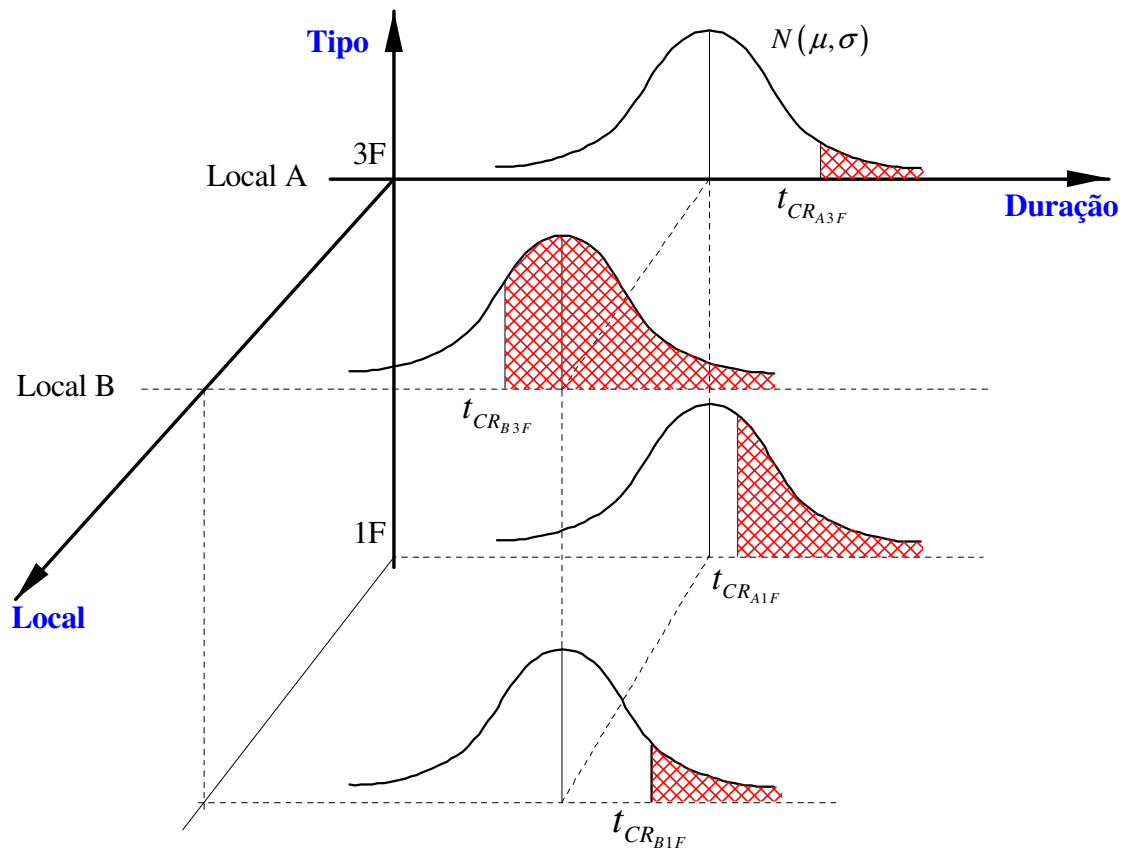


Figura VI.1 – Modelo de distúrbios

- O espaço probabilístico de estados gerado é tratado por enumeração exaustiva.
- Os valores de probabilidade associados à atuação do religamento e à ocorrência de defeitos, sua localização, tipo e duração são coerentes com valores encontrados na literatura e nas estatísticas de desempenho de sistemas reais [5,19,86,88].

Do ponto de vista da modelagem dinâmica, o núcleo de cálculo implementado representa as máquinas síncronas através de um modelo capaz de simular efeitos transitórios de eixo d, requerendo uma equação diferencial (pE_q'), além da equação de

balanço (*swing*) para representação dos transitórios dos rotores. Essa representação permite a inclusão da modelagem de reguladores automáticos de tensão (RAT). As cargas são representadas por impedâncias constantes e, para a simulação no tempo, a rede elétrica é reduzida às barras internas dos geradores. Essa técnica permite uma maior velocidade de cálculo, tendo, entretanto, como consequência a perda de identidade de tensões e fluxos da rede elétrica, razão pela qual o programa ASTP não trabalha com índices ou manipulações derivadas dessas grandezas. Sobre esta base de modelagem dinâmica implementa-se o método da máquina equivalente (SIME), apresentado no Capítulo IV.

Os exemplos que serão apresentados a seguir visam dar, através de modelagens gradualmente detalhadas, um entendimento dos conceitos e da aplicação da metodologia desenvolvida em estudos de avaliação da segurança transitória probabilística de sistemas elétricos de potência.

VI.4 Aplicações Didáticas a um Sistema-teste de 4 Barras

O sistema de 4 barras estudado (dados e topologia) é apresentado no Anexo A.

VI.4.1 Estudos com Cenário Determinístico e Variação Singular Probabilística nos Distúrbios

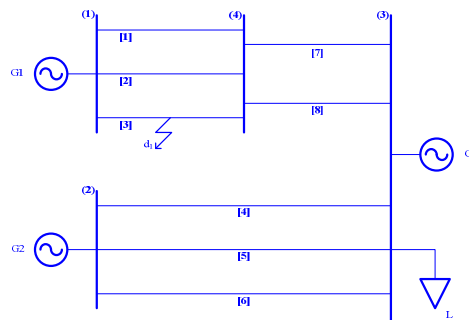
Os estudos com cenário fixo são aqueles para os quais os cenários (topologia, patamar de carga e modo de intercâmbio) foram tratados de forma determinística, permitindo-se a representação de incertezas em distúrbios, com diferentes graus de modelagem (e.g., incerteza em local com tipo de defeito fixo ou incertezas em local e tipo).

Caso 1:

Incertezas:	Sem (probabilidades unitárias e nulas)	
Tipos de defeito:	1F	3F
Ocorrência de defeitos		
Elementos:	[3]	

Locais:	[3]M (d_1)
Duração dos defeitos:	70 ms
Impedância dos defeitos:	j 7,0 %, para defeito 1F j 1,0 %, para defeito 3F
Atuação do religamento:	sem religamento
Topologias:	n
Carga total:	(2100 + j 150) MVA
Despachos de geração:	G1 = 940 MW G2 = 710 MW G3 = 451,5 MW (ref.)

Situação de estudo:



O Caso 1 apresenta uma avaliação estritamente determinística de defeitos em pontos determinados do sistema visando familiarizar o leitor com as características do programa. Essa avaliação é feita via simulação no tempo, de forma convencional, utilizando o método SIME para a produção dos índices de estabilidade da simulação. O programa ASTP é capaz de realizar este tipo de tarefa, produzindo curvas do comportamento dinâmico de grandezas do sistema ao longo do tempo (tipicamente, ângulos de rotores, potências elétricas, tensões de geradores, e outras). Adicionalmente, como diferencial das simulações realizadas com o ASTP, são obtidas margens de estabilidade via máquina equivalente e as curvas típicas de representação do comportamento do OMIB. Os resultados das simulações são apresentados a seguir.

O Quadro VI.1 apresenta um resumo do relatório da simulação convencional. Neste primeiro exemplo (Caso 1), o relatório de saída do programa ASTP será didaticamente comentado, destacando-se alguns detalhes importantes para o posterior entendimento e interpretação dos resultados das avaliações de segurança transitória com a consideração de incertezas.

Para a simulação convencional determinística, o relatório produzido pelo programa ASTP apresenta os dados de entrada da simulação realizada: frequência do sistema,

dados de máquinas, máquina de referência, condições iniciais e dados do distúrbio simulado (elemento defeituoso, local do defeito no elemento, impedância de defeito). Em seguida apresenta dados gerais da simulação (passo de integração, duração do defeito, tempos de atuação do religamento e tempo limite do estudo). Nota-se que a simulação do religamento é controlada através de parâmetros de tempo que indicam o instante de religamento e de nova abertura, no caso de religamento mal sucedido. *Quando esses tempos são maiores que o tempo limite de estudo, o programa ASTP entende que não será simulado o religamento do circuito defeituoso.*

O relatório apresenta, ainda em seu início, as condições das máquinas síncronas no instante imediatamente antes do distúrbio. As colunas (WIS / WS), (ELQ) e (PE) representam, respectivamente, as variações de velocidade dos rotores em relação à velocidade síncrona (em %), os valores instantâneos das tensões internas E'_q (em p.u.) e os valores instantâneos das potências elétricas geradas (em MW). Iniciada a simulação no tempo, o relatório segue apresentando um resumo das condições do sistema para cada passo de integração, até o final da simulação. Havendo alguma alteração de condição dinâmica ao longo da simulação, a mesma é reportada. O tempo t_r corresponde ao instante em que o ângulo do OMIB atinge seu valor máximo e passa a decrescer; η indica a margem de estabilidade obtida para o OMIB (no caso, positiva, indicando a condição de estabilidade do sistema); δ_r é o ângulo de retorno do OMIB e ocorre em $t = t_r$; e, por fim, aparece o valor de δ_u , ângulo a partir do qual ficaria caracterizada instabilidade do sistema (no caso, a margem de estabilidade – positiva – e δ_u são extrapolados, pois o sistema é estável – vide item IV.2.2.4). Neste exemplo (Caso 1, defeito 1F), o OMIB oscila e inicia seu retorno (atinge δ_r) em $t = 0,90$ s, ficando tal evento registrado no relatório. O registro realizado compõe-se de um quadro com as condições das máquinas em $t = t_r$ e de um quadro com as grandezas do OMIB nesse mesmo instante de tempo. Cabe comentar aqui que se a análise compreendesse apenas o comportamento do sistema durante a primeira oscilação, a simulação poderia ser automaticamente interrompida, pois o sistema seria considerado estável (transitoriamente).

Todavia, o programa ASTP continua a simulação até o tempo limite de estudo em busca de uma eventual condição de instabilidade após a primeira oscilação (instabilidade dinâmica). Assim, a simulação segue, eventualmente registrando alguma nova alteração de condição dinâmica e, ao final, o relatório apresenta um diagnóstico como o mostrado no Quadro VI.1, indicando a condição de estabilidade do sistema para o distúrbio simulado e os parâmetros do OMIB que a caracterizam.

Paralelamente ao relatório da simulação, o programa ASTP gera arquivos com registros de variáveis de interesse durante o transitório (vide Anexo B). Esses arquivos podem ser utilizados para a produção de gráficos para a complementação da análise e documentação, bem como para comprovação dos diagnósticos automáticos realizados.

O comportamento dinâmico do sistema é mostrado a seguir através das curvas obtidas durante a simulação no tempo.

A Figura VI.2 mostra o comportamento dos ângulos dos rotores dos geradores para o defeito simulado. Observa-se que o curto-circuito 1F no ponto médio do circuito [3] não provoca instabilidade e que os geradores G1 e G2 oscilam em oposição de fase, enquanto G3 apresenta batimento de frequência¹².

Nas Figuras VI.3(a), (b) e (c) é mostrado, para o Caso 1 (defeito 1F), o comportamento do OMIB através de suas representações típicas.

O OMIB confirma o comportamento estável do sistema de forma clara através de suas representações típicas.

Explorando-se, ainda para o defeito monofásico, algumas das características do método da máquina equivalente, as Figuras VI.4(a) e (b) mostram detalhes adicionais das grandezas do OMIB, obtidos de suas representações típicas, confirmando os resultados obtidos na simulação convencional (vide Figuras VI.2 e VI.3(a)).

¹² O batimento é o resultado da interferência de ondas ou sinais de frequências próximas. A superposição dos sinais com frequências próximas resulta num sinal com frequência ω igual à média das duas frequências, modulado em amplitude por uma frequência igual à metade da diferença $\Delta\omega$ entre elas.

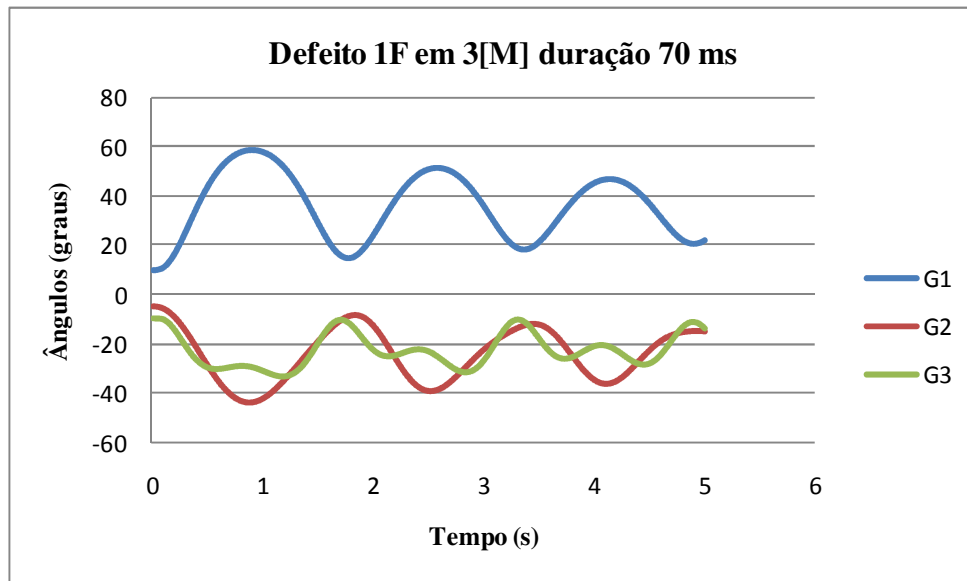


Figura VI.2 – Caso 1: Ângulos dos rotores - defeito 1F com duração de 70 ms

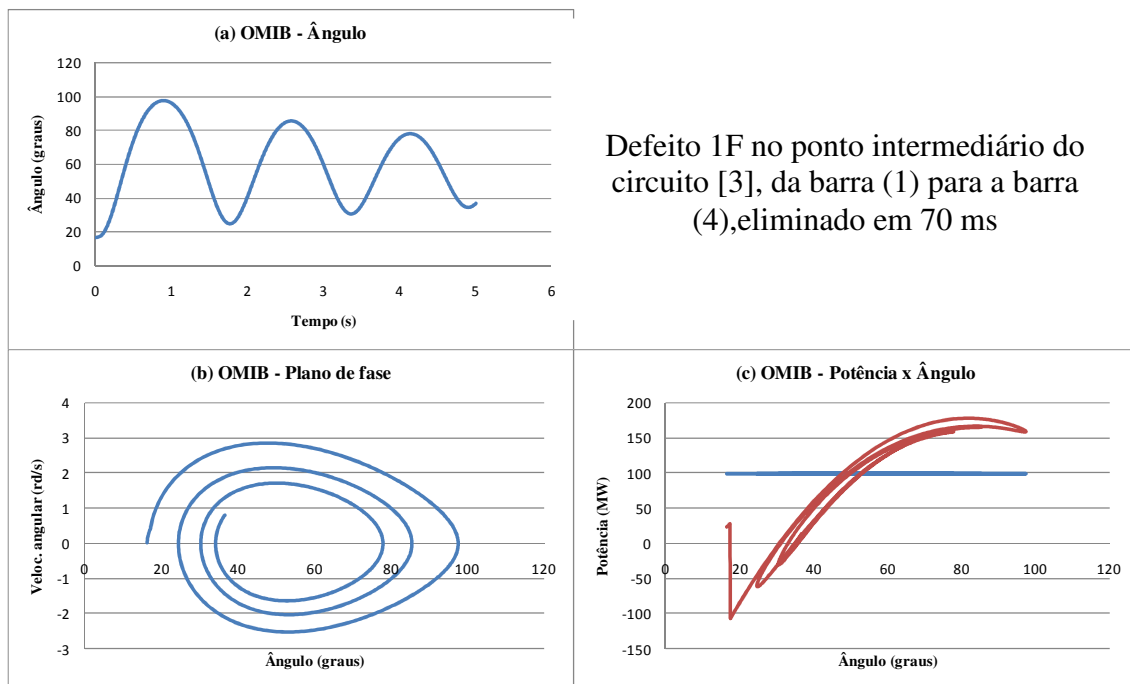
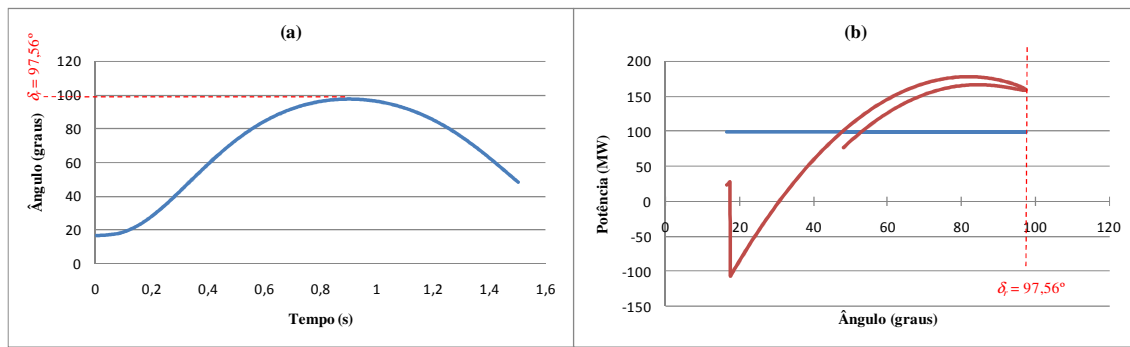


Figura VI.3 – Caso 1: OMIB – representações típicas - defeito 1F com duração de 70 ms -



**Figura VI.4 – (a) δ – Ângulo de retorno, curva $\delta \times t$
(b) δ – Ângulo de retorno, curva $P \times \delta$**

As Figuras VI.4(a) e VI.4(b) correspondem às Figuras VI.3(a) e VI.3(c), respectivamente, com o resultado da simulação mostrado somente até o tempo $t = 1,5$ s. Essas figuras destacam o ângulo de retorno δ_r (em concordância com o obtido na simulação convencional).

Continuando-se nas avaliações determinísticas para o Caso 1, procedeu-se a simulação do defeito trifásico. Os resultados são mostrados nas Figuras VI.5, VI.6(a), (b) e (c) e no Quadro VI.2.

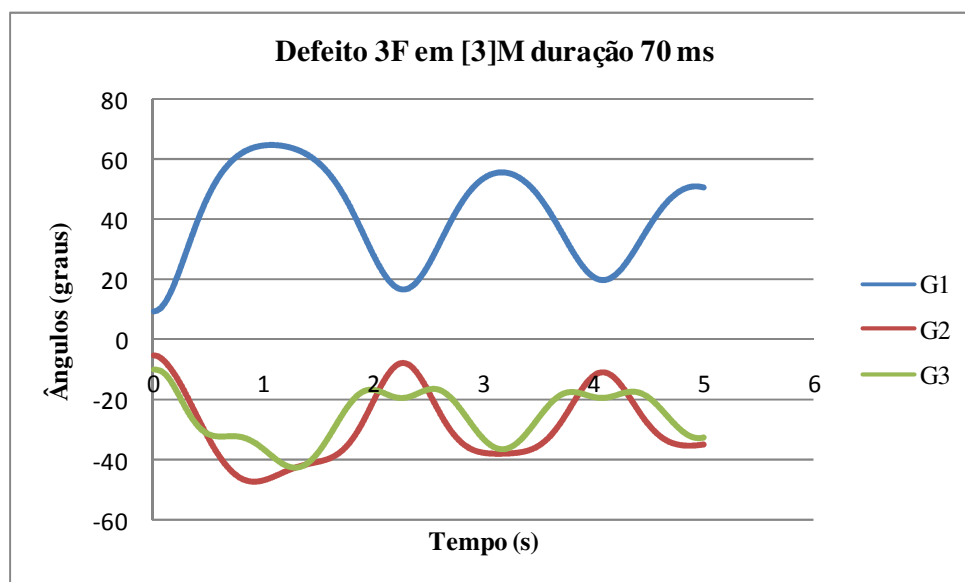


Figura VI.5 – Caso 1: Ângulos dos rotores - defeito 3F com duração de 70 ms

Quadro VI.2 – Resumo do relatório da simulação convencional

Caso 1: defeito 3F com duração de 70 ms

FREQUENCIA NOMINAL DO SISTEMA = 60.00 HZ									
==> DADOS DE MAQUINAS <==									

* MAQUINA *	P BASE	RA	XLD	XD	XQ	TLD0	H		
	(MVA)	(PU)	(PU)	(PU)	(PU)	(S)	(S)		

* 1 *	100.000000	0.000003	0.027000	0.163100	0.158600	8.000000	38.850000		
* 2 *	100.000000	0.000003	0.027000	0.163100	0.158600	8.000000	38.850000		
* 3 *	100.000000	0.000006	0.054000	0.326200	0.317200	8.000000	19.430000		

A MAQUINA DE REFERENCIA E A 1									
==> CONDIC0ES INICIAIS (ANTES DO CURTO) <==									

* MAQUINA *	DELTA	WIS / WS	ELQ	PE					
	(GRAUS)	(%)	(PU)	(MW)					

* 1 *	70.109104	0.000000	1.015581	940.032716					
* 2 *	55.487518	0.000000	1.001001	710.018884					
* 3 *	50.249231	0.000000	0.830061	451.553831					

==> DADOS DE CURTO <==									
DEFEITO OCORRE NA LINHA DA BARRA 1									
PARA A BARRA 4, CIRCUITO No. 3									
A UMA DISTANCIA DE 50.00% DO COMPRIMENTO DA LINHA A PARTIR DA BARRA 1									
COM IMPEDANCIA DE DEFEITO ZC= (0.000000 + J 0.010000) PU									
PASSO DE INTEGRACAO = 0.005000 SEG.									
ELIMINACAO DO CURTO EM 0.070000 SEG.									
RELIGAMENTO EM 5.010000 SEG.									
NOVA ABERTURA EM 5.020000 SEG.									
TEMPO LIMITE DE ESTUDO = 5.000000 SEG.									
T = 0.000000									

* MAQUINA *	DELTA	WIS / WS	ELQ	PE					
	(GRAUS)	(%)	(PU)	(MW)					

* 1 *	0.000000	0.000000	1.015581	256.611216					
* 2 *	-14.621586	0.000000	1.001001	359.482220					
* 3 *	-19.859873	0.000000	0.830061	248.051121					

T = 1.075000									

* MAQUINA *	DELTA	WIS / WS	ELQ	PE					
	(GRAUS)	(%)	(PU)	(MW)					

* 1 *	0.000000	5.034054	0.986311	463.466635					
* 2 *	-109.903889	5.103452	1.008849	196.767898					
* 3 *	-102.883813	4.898606	0.810033	196.626617					

>>> SISTEMA ATINGIU ANG. RETORNO EM T= 1.075000 SEG.									
+-----+-----+-----+									
MAQUINA	POT. MEC.	INERCIA							
	(MW)	(s)							
+-----+-----+-----+									
1	940.032716	20.610565							
2	710.018884	20.610565							
3	451.553831	10.307935							
+-----+-----+-----+									
H CRIT.	H N.CRIT.	H OMIB							
	(s)	(s)							
+-----+-----+-----+									
20.610565	30.918500	12.366763							
+-----+-----+-----+									
PM CRIT	PM N.CRIT	PM OMIB							
	(MW)	(MW)							
+-----+-----+-----+									
564.038986	464.605168	99.433818							
+-----+-----+-----+									
ETA	DELTA _r	DELTA _u (e)							
	(MW.rd)	(graus)							
+-----+-----+-----+									
0.053915	107.563462	107.802339							
+-----+-----+-----+									
>>> T= 1.075000 SEGS. TRAJETORIA ESTAVEL. TRACANDO TRAJETORIA DO OMIB.									

T = 5.000000									
* MAQUINA *	DELTA	WIS / WS	ELQ	PE					
	(GRAUS)	(%)	(PU)	(MW)					

* 1 *	0.000000	20.962782	0.970918	603.442816					
* 2 *	-84.950385	21.038417	1.028340	305.890390					
* 3 *	-82.879711	21.054318	0.805581	218.421543					

+-----+-----+-----+									
S I S T E M A	E S T A V E L								
+-----+-----+-----+									
RETORNO EM Tr = 1.0750 (S)									
+-----+-----+-----+									
ETA	DELTA _r	DELTA _u (e)							
	(MW.rd)	(graus)							
+-----+-----+-----+									
0.053915	107.563462	107.802339							
+-----+-----+-----+									
>>> T= 5.000000 SEGS. TRAJETORIA ESTAVEL.									

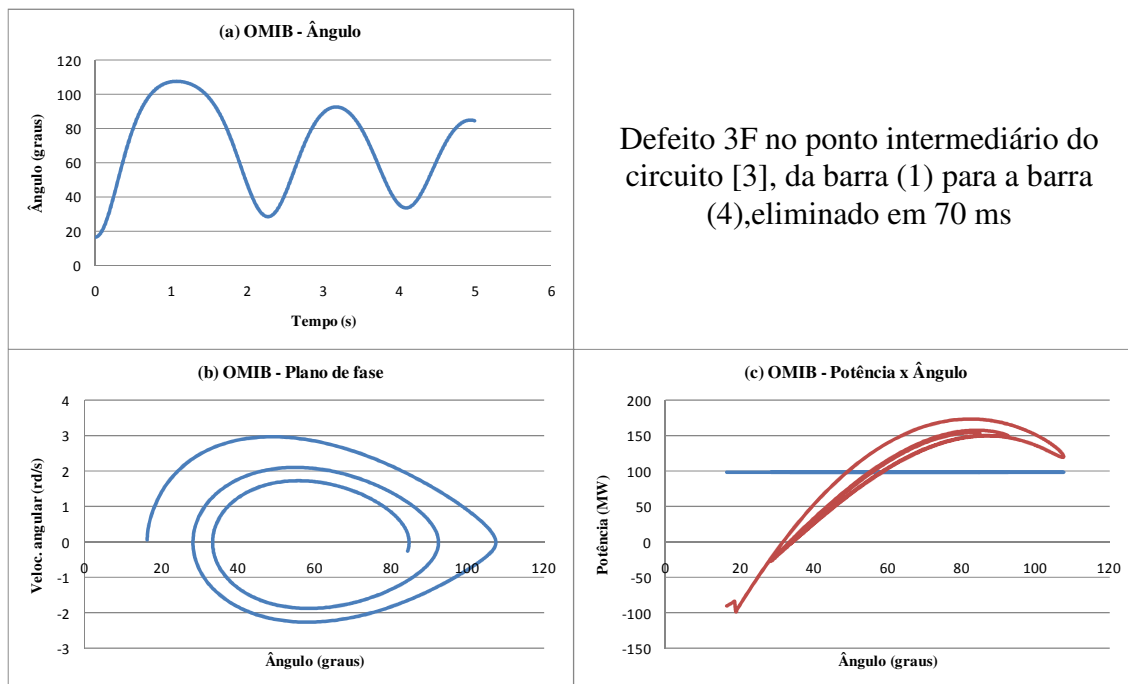


Figura VI.6 – Caso 1: OMIB - defeito 3F com duração de 70 ms

O Caso 1 mostra que o sistema é estável, apresentando comportamentos similares para defeitos monofásicos e trifásicos no circuito [3]M. As diferenças entre as duas situações de defeito são resumidas na Tabela VI.1, que apresenta a comparação entre os valores de tempo de retorno (t_r), margem de estabilidade η , ângulo de retorno δ_r e ângulo de instabilidade δ_u , permitindo um confronto direto e quantitativo entre as duas situações de defeito. *A comparação entre os valores de margens evidencia, como esperado, a maior severidade do defeito 3F.* Ressalta-se que, no caso de sistemas estáveis como o do Caso 1, tanto η quanto δ_u são obtidos por extrapolação (vide Figura IV.3 e item IV.2.2.4).

**Tabela VI.1 – OMIB – comparação entre defeitos 1F e 3F
- duração 70 ms -**

OMIB (variável)	Defeito 1F	Defeito 3F
η (MW.rd)	1,05066	0,05392
t_r (s)	0,90	1,075
δ_r (graus)	97,56	107,56
δ_u (graus)	99,19	107,80
diagnóstico	estável	estável

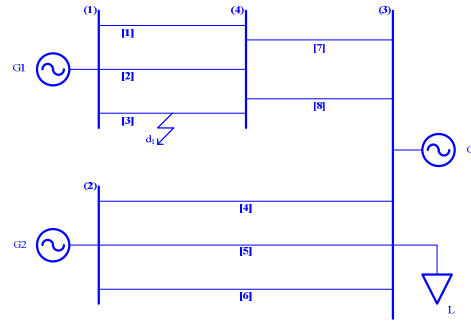
A representação via máquina equivalente permite uma comparação direta e quantitativa entre as duas situações simuladas. As variáveis do OMIB caracterizam numericamente as condições de estabilidade para cada um dos defeitos simulados, *sendo capazes de diferenciá-las e quantificá-las de forma objetiva, sem a necessidade de inspeção visual das curvas de ângulo (ou outras variáveis) obtidas da simulação convencional*. Essa é uma das características importantes do método da máquina equivalente, a qual é utilizada pelo programa ASTP para cálculo de índices probabilísticos relacionados à segurança transitória do sistema de potência.

O Caso 1 mostrou, via uma aplicação de simulação determinística, as principais características do programa ASTP em seu modo de utilização convencional, destacando seu diferencial com relação aos programas de estabilidade tradicionais. Nesse aspecto, a implementação do método da máquina equivalente (SIME) torna o programa capaz de realizar diagnósticos precisos e objetivos sobre a condição de estabilidade do sistema, dotando-o da capacidade de calcular índices que podem ser utilizados em avaliações de cunho probabilístico, como será mostrado a partir do Caso 2.

Caso 2:

Incertezas:	tipos de defeitos		
Tipos de defeito:	1F		3F
	$p=70\%$		$p=30\%$
Ocorrência de defeitos			
Elementos:	[3]		
Locais:	[3]M (d ₁)		
Duração dos defeitos:	100 ms		
Impedância dos defeitos:	j 7,0 %, para defeito 1F		j 1,0 %, para defeito 3F
Atuação do religamento:	sem religamento		
Topologias:	n		
Carga total:	(2100 + j 150) MVA		
Despachos de geração:	G1 = 940 MW	G2 = 710 MW	G3 = 451,5 MW (ref.)

Situação de estudo:



No Caso 2 *somente incertezas quanto ao tipo de defeito são consideradas visando ilustrar de forma simples o impacto causado por esta consideração*. Neste tipo de simulação com o programa ASTP outros relatórios são gerados com informações sobre a avaliação probabilística realizada e com a contabilização dos índices resultantes.

Similarmente às simulações de cunho determinístico, é gerado o relatório resumo da simulação no tempo. Dele foram extraídos os resultados condensados na Tabela VI.2. *Nota-se, agora, que o defeito trifásico eliminado em 100 ms sem religamento causa a instabilidade do sistema*. Da verificação direta dos resultados da Tabela VI.2, as seguintes conclusões quanto à natureza da instabilidade são obtidas:

1. A instabilidade ocorre pelo estabelecimento da condição dada por (IV-14), ou

$$\text{seja: } \begin{cases} P_a(t_u) = 0 \\ \dot{P}_a(t_u) = \frac{dP_a}{dt} \Big|_{t=t_u} > 0, \text{ com } \omega > 0 \text{ para } t > t_0, \text{ ficando caracterizada pelo} \end{cases}$$

valor negativo de η .

2. A instabilidade é não oscilatória, dado que o sistema não encontra um ângulo de retorno δ_r , o que caracteriza uma instabilidade transitória (instabilidade de primeira oscilação, característica de falta de torque de sincronismo).
3. Os valores de η , t_u e δ_r , que definem a condição de estabilidade, são obtidos diretamente dos cálculos com o OMIB, de forma precisa, e são índices que podem ser utilizados para mensurar probabilidades e expectativas de grandezas dinâmicas associadas à segurança transitória do sistema.

4. Comparando-se os valores de margens de estabilidade associados aos defeitos com durações de 70 ms (vide Tabela VI.1) e 100 ms (vide Tabela VI.2) *observa-se a nítida degradação da segurança do sistema, advinda da maior duração do defeito. Esse resultado mostra a capacidade da modelagem adotada no sentido da obtenção de diagnósticos automáticos corretos.*

**Tabela VI.2 – OMIB – comparação entre defeitos 1F e 3F
- duração 100 ms -**

OMIB (variável)	Defeito 1F	Defeito 3F
η (MW.rd)	0,89701	-3,15265
t_r (s)	0,925	–
δ_r (graus)	97,62	–
t_u (s)	-	0,955
δ_u (graus)	99,04	113,16
diagnóstico	estável	instável

As Figuras VI.7(a), (b), (c) e (d) apresentam as condições de verificação da estabilidade do sistema através das representações típicas do OMIB para o defeito 3F com duração de 100 ms, destacando aspectos que confirmam o diagnóstico de instabilidade realizado.

Na Figura VI.7(a), ângulo do OMIB, é assinalado o ângulo instável δ_u . Na Figura VI.7(b), plano de fase do OMIB, assinala-se o valor de ω . A observação somente dessas duas curvas não seria suficiente para um diagnóstico preciso da condição de estabilidade, embora uma das condições necessárias esteja configurada ($\omega > 0$, para $t > t_0$). A Figura VI.7(c) mostra que a segunda condição necessária,

$$\begin{cases} P_a(t_u) = 0 \\ \dot{P}_a(t_u) = \frac{dP_a}{dt} \Big|_{t=t_u} > 0, \end{cases} \text{ também é atingida, configurando a instabilidade do sistema.}$$

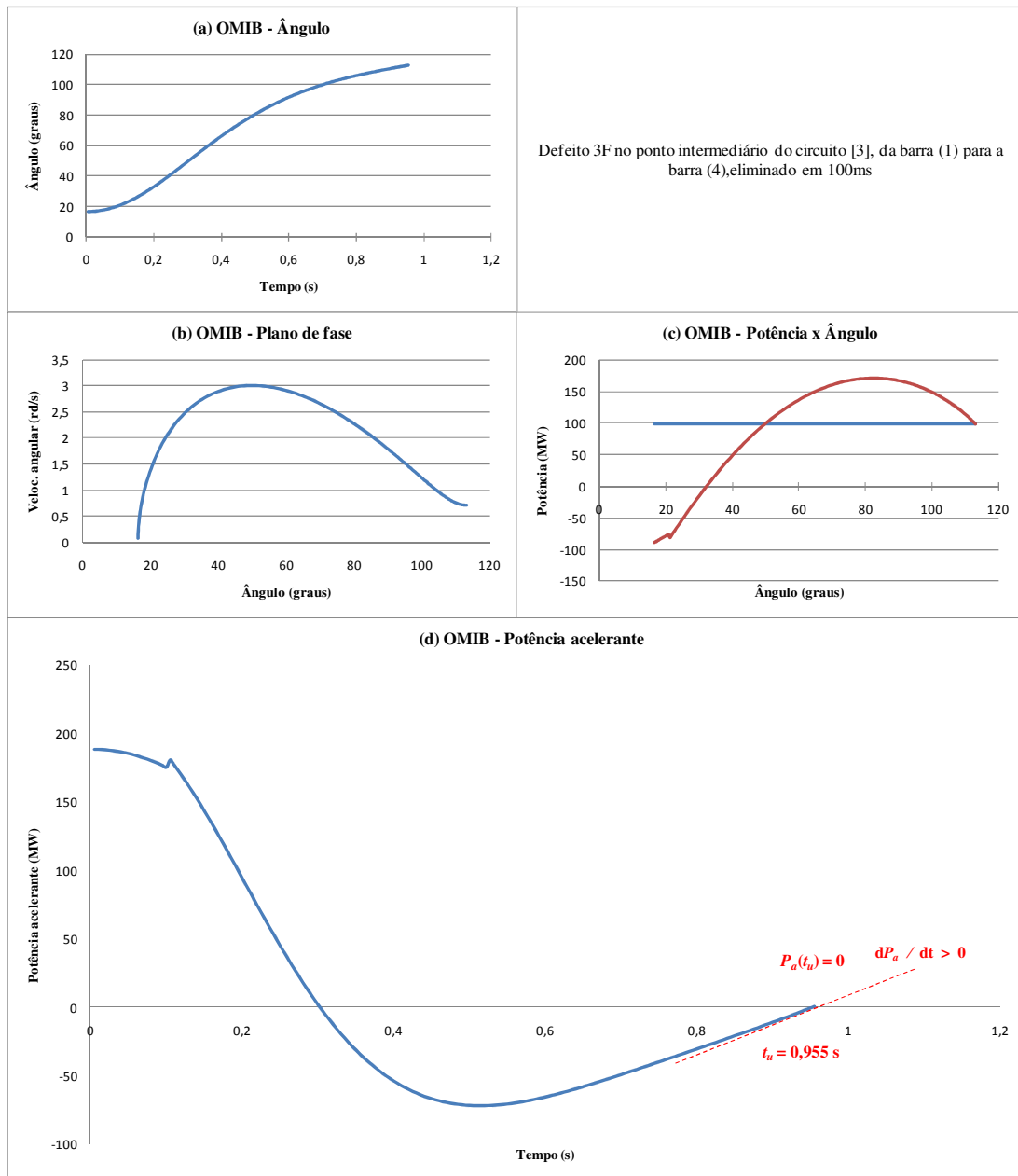


Figura VI.7 – Caso 2: OMIB – condições de estabilidade para defeito 3F com duração de 100 ms

Finalmente, a Figura VI.7(d) confirma o valor positivo da derivada da potência acelerante do OMIB em relação ao tempo.

Deve ser observada outra característica importante da aplicação do método da máquina equivalente que diz respeito ao término antecipado da simulação no instante em que se define a condição de estabilidade. Tal característica resulta em grande economia de tempo nas simulações, sem perda de precisão no diagnóstico, permitindo viabilizar as análises probabilísticas que são intensivas em cálculos que demandam tempos de

computação elevados. As avaliações probabilísticas para o Caso 2 são apresentadas a seguir.

Para as avaliações probabilísticas o programa ASTP produz *dois arquivos* de resultados. O **primeiro arquivo** armazena os índices obtidos para cada estado avaliado. Esse arquivo contém em seu cabeçalho informações sobre o arquivo que contém a rede de referência para o estudo, o número de casos simulados, a dimensão do espaço de estados, nível detalhamento do modelo de distúrbios (nº de seções de cada circuito de transmissão, nº de tipos de defeito considerados, nº de sensibilidades quanto a duração do defeito) e nível de detalhamento do modelo de cenários (nº de topologias, nº de patamares de carga, nº de modos de intercâmbio e nº de cenários mistos de patamar e intercâmbio). Tipicamente, esse cabeçalho se apresenta na forma mostrada na Figura VI.8.

Rede de referencia							
004busn0c00000000p0m0.dat							
No. de casos	No. estados	No. secoes	No. defeitos	No. sensibs			
6	2	1	2	1			
		No. topologs	No. patamares	No. mod. int.	No. cen. mist		
		1	0	0	0		

Figura VI.8 – Caso 2: Cabeçalho do arquivo de resultados da avaliação dos estados probabilísticos

Para o estudo do Caso 2, o corpo do arquivo se apresenta na forma mostrada na Figura VI.9.

Nota-se que os 6 casos do Caso 2 correspondem às simulações sem religamento (as de interesse para o Caso 2 e assinaladas em destaque na Figura VI.9), com religamento com sucesso e com religamento sem sucesso (essas últimas sem interesse para o que se quer mostrar no Caso 2).

Caso---	Estado-	Probab----	ETA-----	Circ De--	Para	Loc-	Tipo	
1	1	0.70000000	0.89701	3	1	4	2	1
2	2	0.30000000	-3.15265	3	1	4	2	2
3	1	0.70000000	53.21032	3	1	4	2	1
4	2	0.30000000	56.76782	3	1	4	2	2
5	1	0.70000000	1.93341	3	1	4	2	1
6	2	0.30000000	-47.13435	3	1	4	2	2
		Imp-def	reli	Telim--	TT2----	TT3----	DOT2-----	DOT2M-----
		0.07000	0	0.10000	5.01000	5.02000	1.07138	-0.67064 FSWS
		0.01000	0	0.10000	5.01000	5.02000	0.03358	-0.68665
		0.07000	1	0.10000	0.35000	5.02000	3.23548	0.01791 FSWS
		0.01000	1	0.10000	0.35000	5.02000	4.12734	3.37243 FSWS
		0.07000	2	0.10000	0.35000	0.45000	0.98302	0.46599 FSWS
		0.01000	2	0.10000	0.35000	0.45000	0.02001	-1.07141 IDAA

Figura VI.9 – Caso 2: Corpo do arquivo de resultados da avaliação dos estados probabilísticos

No corpo desse primeiro arquivo aparecem os valores obtidos para os índices e outras informações abaixo descritas.

Caso	– nº do caso simulado
Estado	– nº do estado avaliado
Probab	– probabilidade do estado (p.u.)
ETA	– margem de estabilidade obtida na avaliação do estado (MW.rd ou MW, conforme a margem seja do Tipo 1 ou do Tipo 2. Sendo do Tipo 2 o valor vem seguido de um caractere #)
Circ	– nº do circuito para modelagem probabilística de distúrbio
De	– nº da barra de origem do circuito
Para	– nº da barra de chegada do circuito
Loc	– seção do circuito na qual se localiza o defeito (1: terminal emissor; 2: ponto médio do circuito, e; 3: terminal receptor)
Tipo	– tipo do defeito (identificação interna varia com o modo de agregação adotado para a estatística de defeitos (Vide Anexo B))
Imp-def	– impedância de defeito (%)
reli	– condição de atuação da medida corretiva (0: sem religamento; 1: com religamento com sucesso; 2: com religamento sem sucesso)
Telim	– duração do defeito (s)
TT2	– instante da tentativa de religamento do circuito (s)
TT3	– instante de nova abertura do circuito qdo de religamento sem sucesso (s)
DOT2	– produto escalar do vetor de potências acelerantes pelo vetor de variações angulares (vide Capítulo IV) (p.u.)
DOTM	– valor mínimo atingido por DOT2 durante a simulação (p.u.)

Na última coluna pode aparecer um identificador composto por quatro letras que informa sobre o diagnóstico da condição dinâmica do estado avaliado, para uso interno do programa (na situação mostrada FSWS é um acrônimo correspondente a ‘**F**irst **S**Wing **S**table’, enquanto que IDAA corresponde a ‘**I**nstabilidade **D**etectada **A**pós nova **A**bertura’). A ausência de identificador significa instabilidade de primeira oscilação.

O **segundo arquivo** gerado pelo programa ASTP contém um relatório resumo do estudo com informações relativas aos índices contabilizados. Uma saída correspondente a esse arquivo é mostrada no Quadro VI.3.

Quadro VI.3 – Resumo do estudo e tabela de contabilização de índices
Caso 2: defeito 3F com Duração de 100 ms

```

- Resumo do Estudo -

<Identificação do caso base>
  Sistema 04 Barras - 100 % da carga
  Sistema com    4 barras    8 circuitos e    3 geradores (s/ reguladores de tensão)
  Carga total: 2100.00 MW + j 150.00 MVar
  Arquivo de dados da rede: 004busn0c00000000p0m0.dat

<Total de casos simulados>
  -6

<Composição do espaço probabilístico de estados>
  -    2 estados

<Incertezas consideradas>
  1- elemento sob defeito
  2- localização do defeito
    1 (ponto médio do circuito)
  3- tipos de defeito
    0- 1F e 3F (distribuição concentrada da estatística)
  4- atuação da medida corretiva (religamento tripolar)
    0.0 % de sucesso    0.0 % de insucesso

<Sensibilidade quanto às durações dos defeitos>
  0- mu

+-----+-----+-----+-----+-----+
| Contingência:  ckt(1):    0 de (  0) para (  0) |
|               ckt(2):    0 de (  0) para (  0) |
| Probabilidade:  0.00000 |
+-----+-----+-----+-----+-----+
|               Indices de segurança globais - sem religamento |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| Duração do | Probabilidade | Expectância de | |
| Defeito   | de Instabilidade | Margem Negativa |
|           |                 | Tipo 1         | Tipo 2         |
| (ms)      | (p.u.)         | (MW.rd)        | (MW)           |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| 100.0     | 0.30000       | -0.94580      | 0.00000      |
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

Esse arquivo contém uma descrição do estudo realizado com informações sobre o caso base e nome do arquivo de dados da rede, o número de casos simulados, a composição do espaço de estados (relativo aos distúrbios), incertezas consideradas na modelagem de

distúrbios e sensibilidades quanto à duração dos defeitos. Em seguida, aparece uma tabela que condensa informações sobre o tratamento de cenários (com a respectiva probabilidade do cenário) e apresenta os índices probabilísticos contabilizados (probabilidade de instabilidade e expectativa de margem negativa).

O Caso 2 exemplifica um estudo no qual são consideradas incertezas apenas quanto ao tipo de defeito (no caso, dois tipos de defeito). Portanto, dois estados probabilísticos correspondentes, respectivamente, ao defeito monofásico e ao defeito trifásico, são gerados e numerados como 1 e 2 (vide Figura VI.9). Os demais casos que aparecem no arquivo são derivados da simulação da atuação do religamento (sucesso e insucesso) e serão usados posteriormente.

Os resultados da avaliação probabilística, para a duração de defeito de 100 ms, são apresentados nas Tabelas VI.3 e VI.4.

**Tabela VI.3 – Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F –
- Caso 2 - (duração 100 ms)**

Localização do defeito	Probabilidades		Margens (MW.rd)	
			Duração do defeito (ms)	
	Defeito tipo		100	
[LT]Local	1F	3F	1F	3F
[3]M	0,70	0,30	0,89701	-3,15265

**Tabela VI.4 – Índices de segurança do sistema
- Caso 2 - (duração 100 ms)**

Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 100
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,30
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,70
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 1,00
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) -0,94580
<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente $-[(-0,94580)^2 + 0^2]^{1/2} = -0,94580$

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

O Caso 2 demonstra a característica agregada pelo programa ASTP às avaliações de segurança. Além do diagnóstico do comportamento dinâmico determinístico do sistema, obtêm-se, também, métricas através de índices de risco associados à segurança do sistema. Tais índices são a probabilidade de instabilidade (*POI*), a probabilidade de estabilidade (*POE*), a probabilidade de margem insuficiente (*PMI*) e a expectância de margem negativa (*EMN*) para o sistema nas condições estudadas. As expressões para cálculo de cada um desses índices encontram-se no Capítulo III, Seção III.4.

Enquanto o sistema apresenta comportamento estável, as margens de estabilidade são positivas e só podem ser obtidas por extrapolação dentro da faixa de sua existência¹³. Entretanto, o cálculo da margem negativa e, por conseguinte, o diagnóstico quanto à instabilidade, é rigoroso e o índice obtido permite uma quantificação do risco de segurança do sistema.

Na situação particular estudada neste caso, o espaço probabilístico avaliado contém apenas dois estados, associados às probabilidades 0,3 e 0,7. Como um dos estudos apresenta comportamento estável e o outro é instável, esses valores de probabilidade são diretamente refletidos nos indicadores *POI* e *POE*, como era de se esperar. Embora óbvio, esse exemplo ilustra de forma simples como os índices *POI* e *POE* são contabilizados. Neste exemplo a soma *POI* + *POE* atinge a unidade, indicando o esgotamento da análise de todo o espaço probabilístico e a conseqüente garantia de convexidade.

A expectância de margem negativa *EMN* é dada por (vide Tabela VI.2):

$$EMN = 0,3 \times (-3,15265) = -0,94580$$

O valor de *EMN* indica o grau de exposição do sistema estudado a riscos dinâmicos para o espectro de incertezas estudado. Nessa situação, o indicador *PMI* é unitário, alertando

¹³ Margens positivas só podem ser calculadas quando δ_r é suficientemente próximo de δ_u . Para sistemas muito estáveis a excursão angular é pequena e δ_r fica longe de δ_u . No decorrer deste capítulo, as margens para os casos muito estáveis serão assinaladas por um sinal +.

o analista sobre a insegurança do ponto de operação analisado caso o critério de segurança adotado solicite um valor de margem igual ou superior a 1 MW.rd para qualquer condição simulada.

Caso 3:

Incertezas: locais (na linha de transmissão) dos defeitos

Tipos de defeito: 3F
(determinístico)

Ocorrência de defeitos

Elementos:	[3]	[4]
Locais:	[3]M (d_1)	[4]1 (d_3)
	$p = 10\%$	$p = 90\%$

Duração dos defeitos: 70 ms 150 ms

Impedância dos defeitos: j 1,0 %

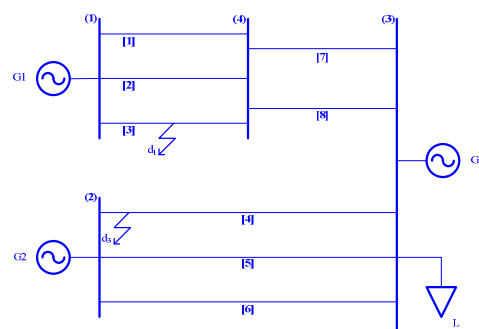
Atuação do religamento: sem religamento

Topologias: n

Carga total: (2100 + j 150) MVA

Despachos de geração: G1 = 940 MW G2 = 710 MW G3 = 451,5 MW (ref.)

Situação de estudo:



O Caso 3 *exemplifica uma situação de incerteza quanto ao local do defeito*. As demais variáveis (circuito sob defeito, tipo e duração do defeito) são tratadas de forma determinística. No Caso 3, os tempos de duração do defeito nos locais d_1 e d_3 são diferentes para exemplificar uma possível diversidade nos sistemas de proteção dos circuitos (compare com o Caso 1).

Deste ponto em diante, os resultados das simulações no tempo só serão mostrados para apoiar a compreensão das análises probabilísticas ou para mostrar algum resultado de interesse que mereça ser destacado.

As Tabelas IV.5 e IV.6 mostram os resultados para as condições simuladas no Caso 3.

**Tabela VI.5 – Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 3F –
- Caso 3- locais d_1 (70 ms) e d_3 (150 ms)**

Defeito Tipo	Probabilidades	Margens (MW.rd)	
		Duração do defeito (ms)	
		[LT]	
3F	Local	70	150
	d_1	d_3	[3]M [4]1
	0,10	0,90	0,05392 -6,76465

**Tabela VI.6 – Índices de segurança do sistema
- Caso 3 –**

Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 70 ms (d_1) e 150 ms (d_2)
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,90
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,10
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 1,00
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) $0,9 \times (-6,76465) = -6,08819$
<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente -6,08819

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

Verifica-se que o comportamento do sistema é estável para o defeito no local d_1 e instável para defeito no local d_3 (margem negativa). Além desse diagnóstico, as margens calculadas indicam a maior severidade do defeito no local d_3 comparativamente ao local d_1 . Observa-se que, apesar do defeito no local d_1 não conduzir o sistema a instabilidade, a margem positiva existente é insuficiente face ao critério estipulado de margem mínima de 1 MW.rd. O índice *PMI* indica essa condição, provendo uma informação adicional que pode ser utilizada, por exemplo, para tomada de decisão quanto à necessidade de

adoção de medidas operativas para melhorar o grau de segurança do sistema (redução do risco de segurança). O índice de estabilidade aparente confirma os diagnósticos anteriores.

A Tabela VI.6.1 evidencia o possível impacto da variação da incerteza geográfica do distúrbio refletido pelo índice *IEA*. Observando-se neste exemplo que a ausência de defeitos em d_3 garante absoluta segurança para sistema.

Tabela VI.6.1 – Impacto da variação da incerteza do distúrbio

	Probabilidade (p.u.)		Expectância de margem negativa (MW.rd)	Índice de estabilidade aparente
	d_1	d_2		
(a)	0	1	-6,76465	-6,76465 menos seguro
(b)	0,1	0,9	-6,08819	-6,08819
(c)	0,5	0,5	-3,38233	-3,38233
(d)	0,999	0,001	-0,00676	-0,00676
(e)	1	0	0	0 mais seguro

Caso 3 (a): idêntico ao Caso 3, com redespacho de geração

Uma variante do Caso 3 foi estudada de forma a *mostrar o efeito de uma possível medida operativa como, por exemplo, redespacho de geração*. Os resultados da aplicação dessa medida são apresentados a seguir.

Nesse exemplo foi feito um redespacho de geração, com o despacho de G1 passando de 940 para 930 MW e o de G2 passando de 710 para 720 MW. O despacho de G3 não foi alterado.

As Tabelas IV.7 e IV.8 mostram os resultados para as condições simuladas no Caso 3 (a).

Como era de se esperar, o redespacho aplicado não afetou o comportamento do índice *POI* (*probabilidade de ocorrência de instabilidade*). Todavia, a probabilidade de margem insuficiente, *PMI*, antes de 100 %, reduz-se para 90 %, sinalizando uma maior aderência ao critério de segurança proposto. Por outro lado, o índice *EMN* (*expectância de margem negativa*) sofreu variação significativa, indicando um agravamento das condições de defeito no local d_3 decorrente do redespacho realizado.

**Tabela VI.7 – Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 3F –
- Caso 3 (a) - locais d_1 (70 ms) e d_3 (150 ms)**

Defeito Tipo	Probabilidades		Margens (MW.rd)	
			Duração do defeito (ms)	
			[LT]	
3F	Local		70	150
	d_1	d_3	[3]M	[4]1
	0,10	0,90	1,9233	-21,72210

**Tabela VI.8 – Índices de segurança do sistema
- Caso 3 (a) -**

Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 70 ms (d_1) e 150 ms (d_2)
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,90
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,10
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,90
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) -19,54989
<i>IEA</i> - Índice de estabilidade aparente -19,54989

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

As conseqüências da medida operativa adotada são claramente verificadas através das simulações com o programa ASTP, indicando seu potencial uso para dimensionamento e avaliação do efeito de ações dessa natureza. A otimização dessas medidas poderá ser obtida conjugando-se a metodologia do programa ASTP com outras técnicas para otimizar o resultado desejado com a aplicação.

A partir da comparação dos resultados mostrados nas Tabelas VI.6 e VI.8, conclui-se:

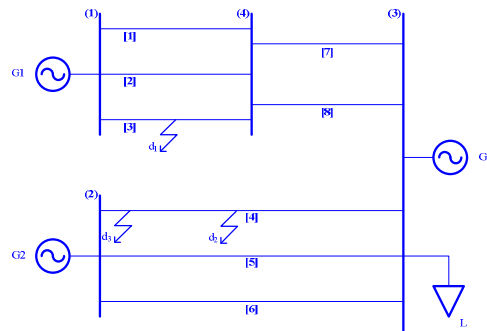
- O redespacho foi capaz de reduzir a probabilidade de ocorrência de eventos de margem insuficiente, perante o critério pré-definido;
- A contrapartida, neste caso, foi operar o sistema sob risco aumentado dado que, na ocorrência de um defeito no local d_3 , a expectância de margem negativa que era $EMN = -6,08819 \text{ MW.rd}$, passou para $EMN = -19,54989 \text{ MW.rd}$.

Os resultados aqui obtidos demonstram de maneira simples que os índices probabilísticos propostos podem ser utilizados na formulação de um problema de otimização estocástica de segurança, apontando a região de despacho mais segura, Silva Neto [114].

Caso 4:

Incertezas:	locais (na linha de transmissão) e durações dos defeitos		
Tipos de defeito:	3F (determinístico)		
Ocorrência de defeitos			
Elementos:	[3]	[4]	
Locais:	[3]M (d_1) $p = 50\%$	[4]M (d_2) $p = 30\%$	[4]1 (d_3) $p = 20\%$
Duração dos defeitos:	local d_1 N(70,10) ms	local d_2 N(200,50) ms	local d_3 N(200,50) ms
Impedância dos defeitos:	j 1,0 %		
Atuação do religamento:	sem religamento		
Topologias:	n		
Carga total:	(2100 + j 150) MVA		
Despachos de geração:	G1 = 940 MW	G2 = 710 MW	G3 = 451,5 MW (ref.)

Situação de estudo:



Enquanto os casos 2 e 3 visaram ilustrar o impacto de incertezas somente em tipos e locais de defeitos, o Caso 4 aborda a incerteza em durações de defeitos. Ocorre que a natureza da incerteza nas durações dos defeitos é modelada por distribuições probabilísticas, enquanto as incertezas nos tipos e locais de defeitos são modeladas por probabilidades extraídas do histórico de desempenho do sistema. Por este motivo este caso abrange também a combinação de incertezas em locais e durações, com o intuito de melhor ilustrar o efeito resultante.

Caso 4 foi precedido de um estudo convencional de estabilidade para determinação dos tempos críticos de eliminação de defeito, por tentativa e erro, para os locais d_1 , d_2 e d_3 . As simulações finais que confirmam os tempos críticos para eliminação dos defeitos são mostradas na Figura VI.10 (para defeito em d_1), na Figura VI.11 (para defeito em d_2) e na Figura VI.12 (para defeito em d_3).

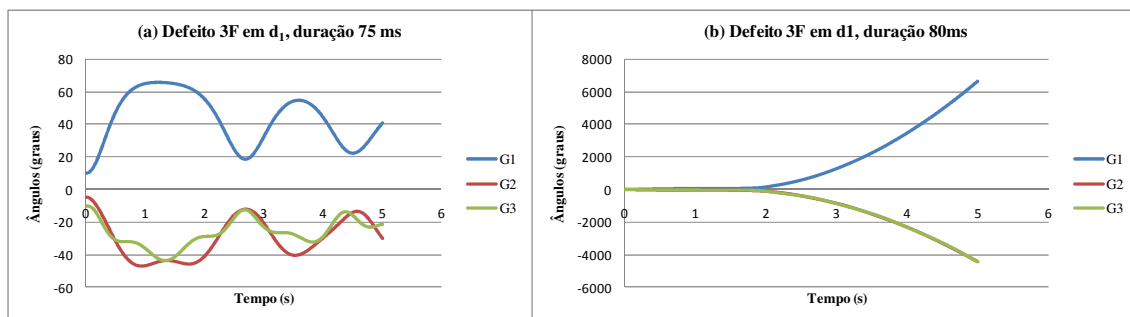


Figura VI.10 – Caso 4: Tempo crítico para defeito 3F em d_1

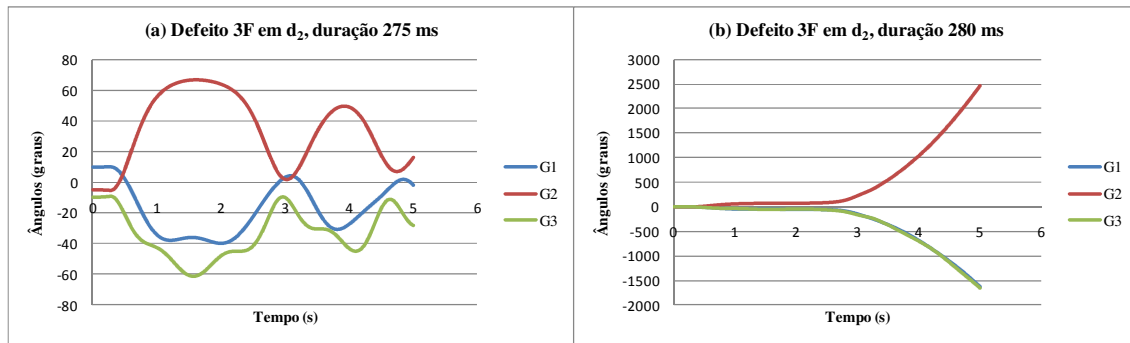


Figura VI.11 – Caso 4: Tempo crítico para defeito 3F em d_2

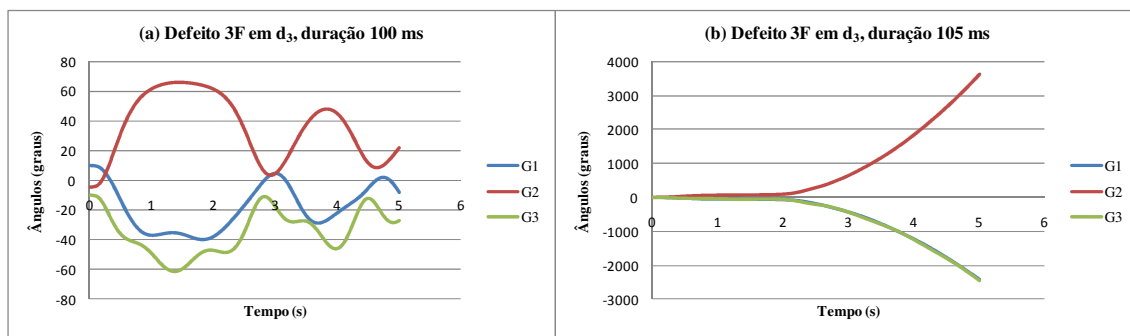


Figura VI.12 – Caso 4: Tempo crítico para defeito 3F em d_3

Os tempos críticos obtidos e as respectivas probabilidades de ocorrência de defeito em d_1 , d_2 e d_3 são mostrados na Tabela VI.9.

Tabela VI.9 – Caso 4: Tempos críticos para eliminação dos defeitos e probabilidades de ocorrência

t_{c1}	p_1	t_{c2}	p_2	t_{c3}	p_3
75	0,5	275	0,3	100	0,2

O tempo de duração do defeito (atuação da proteção) foi modelado como uma normal $N(70,10)$, para o circuito [3], e $N(200,50)$ para o circuito [4]. As probabilidades acumuladas para essas duas distribuições são mostradas nas Figuras VI.13 e VI.14.

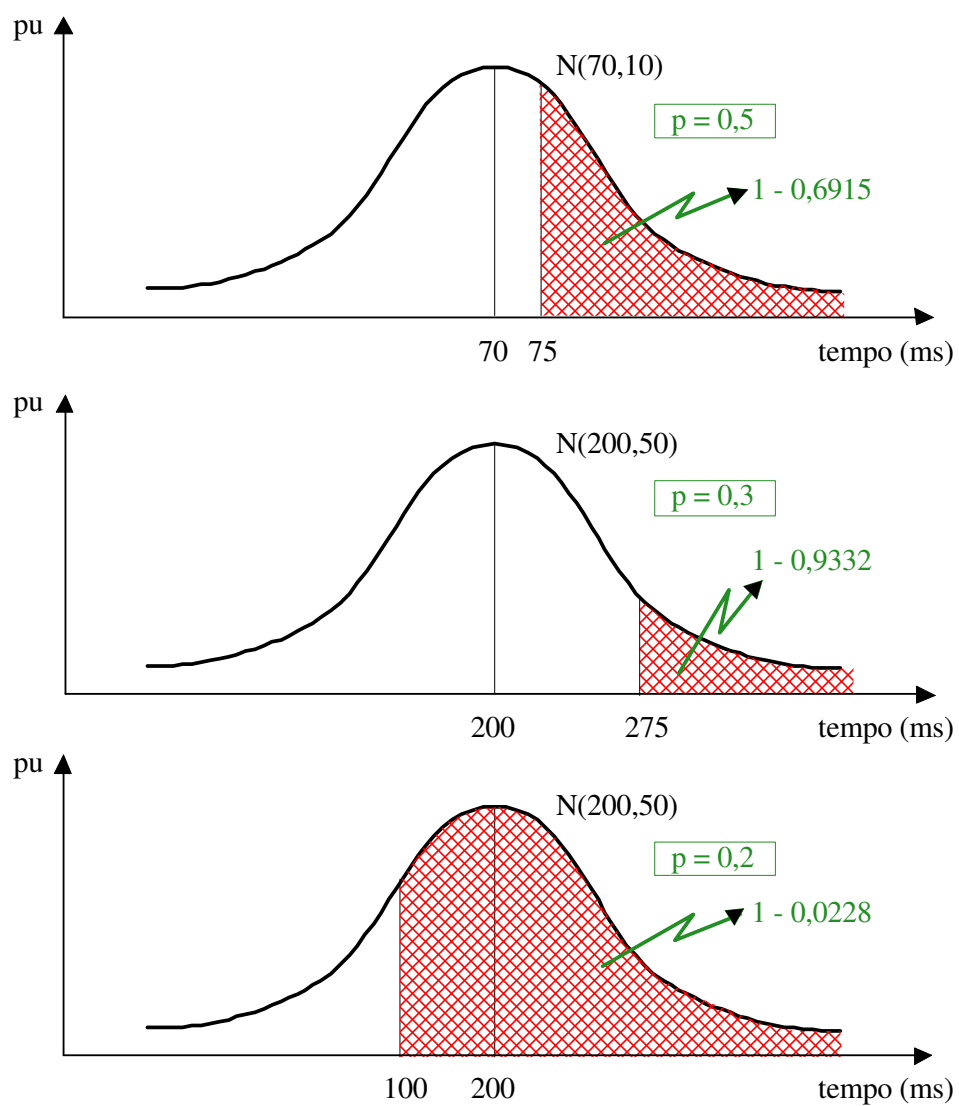


Figura VI.13 – Probabilidades acumuladas

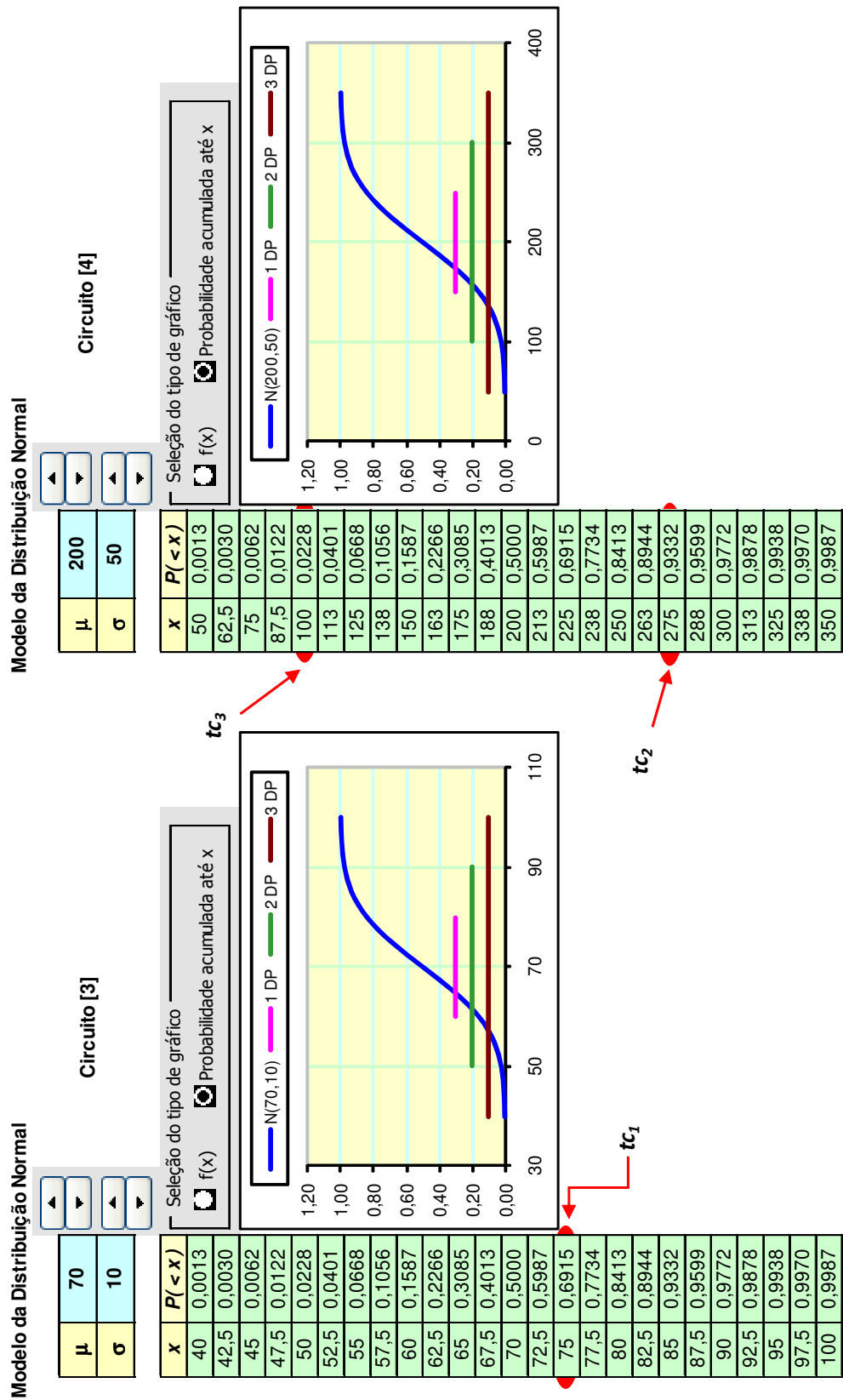


Figura VI.14 – Modelo probabilístico das proteções

Na Figura VI.14, μ representa o tempo médio de atuação da proteção e σ a dispersão dos tempos de atuação. As tabelas de probabilidade e curvas de probabilidade acumulada foram obtidas de [111].

A chance do sistema de proteção eliminar o defeito em $t \leq t_c$ é dada pela probabilidade acumulada sob a curva normal $N(\mu, \sigma)$ até o valor t_c . Esses valores estão assinalados, aproximadamente, na Figura VI.14 pelas setas vermelhas. Assim, para o circuito [3], essa probabilidade seria igual a 69,15%, enquanto que para o circuito [4] a probabilidade de eliminação do defeito em $t \leq t_c$ é de 93,32%, para o local d_2 , e de 2,28%, para o local d_3 .

Considerando-se os defeitos 3F nos locais d_1 , d_2 e d_3 com suas respectivas probabilidades, pode-se calcular a expectância de probabilidade de ocorrência de instabilidade por desajuste de proteção (*EPI*, vide Equação III-7), para o exemplo do Caso 4.

$$EPI = 0,5 \cdot (1 - 0,6915) + 0,3 \cdot (1 - 0,9332) + 0,2 \cdot (1 - 0,0228) = 0,3697$$

VI.4.2 Estudos com Distúrbios Determinísticos e Variação Singular Probabilística nos Cenários

Os estudos com cenário variável são aqueles para os quais são modeladas incertezas em topologia, patamar de carga e modo de intercâmbio. Na continuidade desta seção, será mostrado, de forma gradual, como o programa ASTP trata incertezas somente em cenários.

Caso 5:

Incertezas:

Topologia

circuito [1]

$\lambda_1 = 10$ (falhas/ano)

$TM_{reparo_1} = 584$ horas

(prob. de operação = 0,60)

circuito [5]

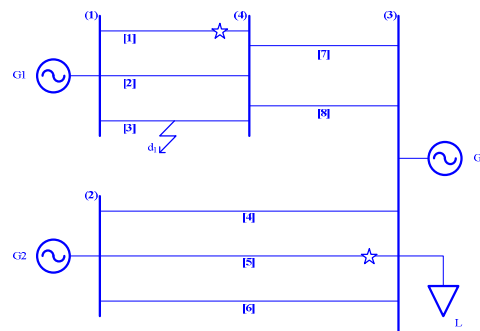
$\lambda_5 = 10$ (falhas/ano)

$TM_{reparo_5} = 292$ horas

(prob. de operação = 0,75)

Tipos de defeito:	1F (determinístico)
Ocorrência de defeitos	
Elementos:	[3]
Locais:	[3]M (d_1)
Duração dos defeitos:	70 ms
Impedância dos defeitos:	j 7,0 %
Atuação do religamento:	sem religamento
Topologias:	n n-1 n-2
Carga total:	(2100 + j 150) MVA
Despachos de geração:	G1 = 710 MW G2 = 940 MW G3 = 451,5 MW (ref.)

Situação de estudo:



A Tabela VI.10 apresenta as margens de estabilidade para o defeito monofásico no ponto médio do circuito [3] para as diferentes topologias probabilísticas estudadas.

Tabela VI.10 – Caso 5: Margens de estabilidade

Defeito 1F em [3]M com duração de 70 ms			
Topologia	Circuitos desligados	Probabilidade da rede	Margem
n	–	0,45	6,89841
n-1	[1]	0,30	-59,61690
n-1	[5]	0,15	+
n-2	[1] e [5]	0,10	-63,30790

A partir das probabilidades e margens resultantes para a situação considerada no Caso 5, os índices de segurança mostrados na Tabela VI.11 são obtidos.

Consoante a análise clássica determinística, a Tabela VI.10 indicaria apenas dois casos estáveis e dois casos instáveis. Por outro lado, a análise probabilística dá informações adicionais indicando que o sistema permanece em condição de operação sustentada durante 60% do tempo (vide *POE*). Além disso, a análise probabilística atribui uma graduação de risco para o ponto de operação analisado, quantificando o nível de segurança do sistema através do indicador *EMN*.

No exemplo tratado é interessante notar que a fragilidade topológica oriunda da indisponibilidade do circuito [1] é mais crítica do ponto de vista de risco que a indisponibilidade dupla. Isto ocorre porque o módulo da parcela de risco devida a indisponibilidade simples é igual a $\left| \left[0,30 \times (-59,6169) \right] \right| = +17,89$ enquanto que o módulo da parcela devida a indisponibilidade dupla atinge apenas $\left| \left[0,10 \times (-63,3079) \right] \right| = +6,33$. Observando-se também que, neste exemplo, o cálculo de *IEA* é trivial já que não ocorrem situações de instabilidade que provoquem o aparecimento de margens do Tipo 2.

**Tabela VI.11 – Índices de segurança do sistema
– Caso 5: incertezas em topologia –**

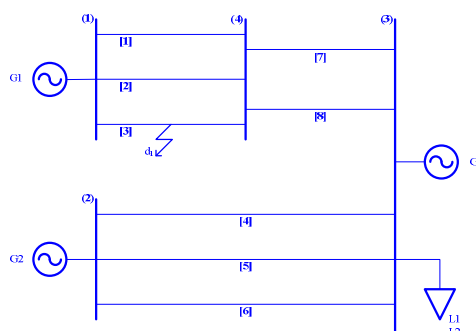
Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 70 ms (d_1)
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) $0,3 + 0,10 = 0,40$
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) $0,45 + 0,15 = 0,60$
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* $0,30 + 0,10 = 0,40$
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) $0,3 \times (-59,61690) + 0,1 \times (-63,3079) = -24,21586$
<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente $((-24,21586)^2 + 0^2)^{1/2} = -24,21586$

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

Caso 6:

Incertezas:	patamares de carga $L1 = (2100 + j 150) \text{ MVA}$ $L2 = (1680 + j 120) \text{ MVA}$ $p = 20\%$ $p = 80\%$
Tipos de defeito:	3F (determinístico)
Ocorrência de defeitos	
Elementos:	[3]
Locais:	[3]M (d ₁)
Duração dos defeitos:	100 ms
Impedância dos defeitos:	j 1,0 %
Atuação do religamento:	sem religamento
Topologias:	n
Carga total:	L1 ou L2
Despachos de geração: L1	G1 = 940 MW G2 = 710 MW G3 = 451,5 MW (ref.)
 L2	G1 = 750 MW G2 = 570 MW G3 = 360,3 MW (ref.)

Situação de estudo:



A Tabela VI.12 resume o resultado do processamento realizado considerando incertezas somente em patamar de carga.

Tabela VI.12 – Caso 6: Margens de estabilidade

Incertezas em patamar de carga			
Patamar	Carga (MVA)	Probabilidade (p.u.)	Margem (MW.rd)
L1	2100 + j 150	0,20	-3,15265
L2	1680 + j 120	0,80	4,22069

Os índices de segurança para o Caso 6 são apresentados na Tabela VI.13.

**Tabela VI.13 – Índices de segurança do sistema
– Caso 6: incertezas em patamar de carga –**

Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 100 ms (d_1)
POI – Prob. de instabilidade (pu) 0,20
POE – Prob. de estabilidade (pu) 0,80
PMI – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,20
EMN – Expectância de margem negativa (MW.rd) $0,2 \times (-3,15265) = -0,63053$
IEA – Índice de estabilidade aparente -0,63053

* Estipulando-se margem mínima de 1 MW.rd

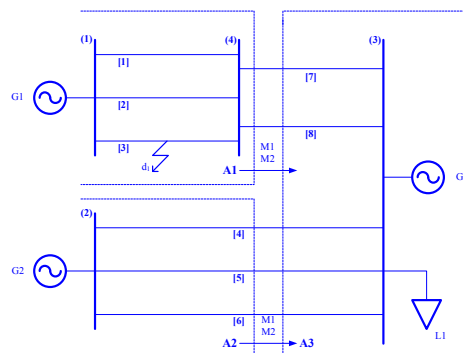
Este caso indica novamente a dependência entre a segurança do sistema e o ponto de operação do mesmo. A quantificação do nível de segurança baseia-se na ponderação probabilística dos patamares de carga. Uma vez mais, neste exemplo, também não ocorreu a margem do Tipo 2.

Caso 7:

Incertezas:	modos de intercâmbio
	$M1 = 940 \text{ MW}, A1 \rightarrow A3$ $M2 = 930 \text{ MW}, A1 \rightarrow A3$ $710 \text{ MW}, A2 \rightarrow A3$ $720 \text{ MW}, A2 \rightarrow A3$ $p = 20\%$ $p = 80\%$
Tipos de defeito:	3F (determinístico)
Ocorrência de defeitos	
Elementos:	[3]
Locais:	[3]M (d_1)
Duração dos defeitos:	100 ms
Impedância dos defeitos:	j 1,0 %
Atuação do religamento:	sem religamento
Topologias:	n
Carga total:	(2100 + j 150) MVA
Despachos de geração: M1	G1 = 940 MW G2 = 710 MW G3 = 451,5 MW (ref.)

M2 $G1 = 930 \text{ MW}$ $G2 = 720 \text{ MW}$ $G3 = 451,5 \text{ MW (ref.)}$

Situação de estudo:



A Tabela VI.14 resume o resultado do processamento realizado considerando incertezas somente em modo de intercâmbio.

Tabela VI.14 – Caso 7: Margens de estabilidade

Incertezas em modo de intercâmbio			
Modo	Intercâmbio	Probabilidade (p.u.)	Margem (MW.rd)
M1	940 MW, da Área 1 para a Área 3, 710 MW, da Área 2 para a Área 3	0,20	-3,15265
M2	930 MW, da Área 1 para a Área 3, 720 MW, da Área 2 para a Área 3	0,80	1,10394

Os índices de segurança para o Caso 7 são apresentados na Tabela VI.15.

À semelhança do caso anterior (Caso 6), a situação aqui retratada também evidencia a dependência entre segurança e os limites de intercâmbio do sistema. Essa avaliação é um procedimento clássico, porém usualmente desprezando os perfis estatísticos dos diferentes modos de intercâmbio possíveis para o sistema.

A comparação dos Casos 6 e 7 retrata uma outra faceta interessante da metodologia proposta. Observa-se que as Tabelas VI.13 e VI.15 indicam exatamente os mesmos índices de segurança, sejam eles contabilizados como probabilidades ou como

**Tabela VI.15 – Índices de segurança do sistema
– Caso 7: incertezas em modo de intercâmbio –**

Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 100 ms (d_1)
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,20
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,80
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,20
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) -0,63053
<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente 1,58597

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

expectâncias. Essa constatação poderia sugerir que os dois pontos de operação analisados se equivalem sob o ponto de vista da segurança probabilística. Não obstante, as Tabelas VI.12 e VI.14 sugerem que o modo de operação do Caso 6 pode ser mais favorável, sob o enfoque da “expectância da robustez”, que no Caso 6 apresenta um valor de $(0,8 \times 4,22069) = +3,4$ enquanto que no Caso 7 atinge apenas $(0,8 \times 1,10394) = +0,9$.

VI.4.3 Estudos com Cenário Determinístico e Variações Múltiplas Probabilísticas dos Distúrbios

Nos casos a seguir será escolhido um cenário fixo (sem incertezas em topologia, patamar de carga e modo de intercâmbio) sobre o qual será avaliado o efeito do detalhamento do modelo probabilístico de distúrbios sobre os valores dos índices de segurança do sistema de 4 barras. O cenário escolhido é aquele da seção VI.4.1 (vide Caso 2).

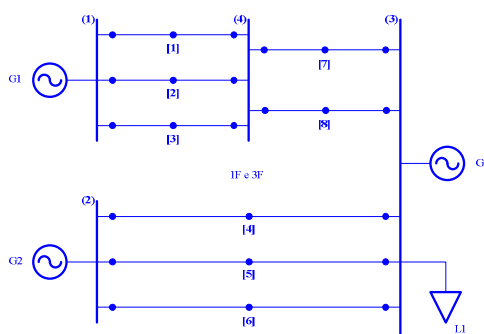
Caso 8:

Incertezas: tipos e locais (posição da e local na linha de transmissão)
de defeito

Tipos de defeito: 1F 3F

	$p = 80\%$	$p = 20\%$
Ocorrência de defeitos	equiprovável	
Elementos:	todos os 8 circuitos	
	$p = 1/8 = 0,125$	
Locais:	M	1 e 2
	$p = 1$	$p = 1/2$
		1, M e 2
		$p = 1/3$
Duração dos defeitos:	100 ms	
Impedância dos defeitos:	j 7,0 %, para defeito 1F	j 1,0 %, para defeito 3F
Atuação do religamento:	sem religamento	
Topologias:	n	
Carga total:	(2100 + j 150) MVA	
Despachos de geração:	G1 = 940 MW	G2 = 710 MW
		G3 = 451,5 MW (ref.)

Situação de estudo:



Em decorrência das considerações acima, o número de estados do espaço composto pelas variáveis probabilísticas de distúrbio (tipo e localização do defeito) variará conforme a Tabela VI.16. Deve ser observado que o sistema teste de 4 barras é composto por 8 (oito) circuitos.

Tabela VI.16 – Variação do número de estados segundo o grau de detalhamento da representação probabilística dos distúrbios

Grau de detalhamento do modelo	Tipos de defeito	Localização	Nº de estados probabilísticos
1	1F, 3F	M	$8 \times 2 \times 1 = 16$
2	1F, 3F	1 e 2	$8 \times 2 \times 2 = 32$
3	1F, 3F	1, M e 2	$8 \times 2 \times 3 = 48$

As Tabelas VI.17, VI.18 e VI.19 apresentam os índices probabilísticos obtidos para os diferentes graus de detalhamento considerados para o modelo probabilístico.

Note que o espaço de estados resultante para o Caso 8(c) (2 tipos de distúrbios, 3 localizações de defeito para cada circuito) é a união dos espaços de estados retratados nos Casos 8(a) e 8(b).

**Tabela VI.17 – Índices de segurança do sistema
Caso 8(a): incertezas em tipo e local do defeito
- 16 estados -**

Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 100 ms
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,025
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,975
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,125
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) $0,025 \times (-3,15265) = -0,07882$
<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente -0,07882

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

**Tabela VI.18 – Índices de Segurança do Sistema
Caso 8(b): incertezas em tipo e local do defeito
- 32 estados -**

Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 100 ms
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,0125
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,9875
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,0750
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) $0,0125 \times (-18,72217) = -0,23403$
<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente -0,23403

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

**Tabela VI.19 – Índices de segurança do sistema
Caso 8(c): incertezas em tipo e local do defeito
- 48 estados -**

Índices de Segurança (globais)
Duração do defeito (ms) 100 ms
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,016675
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,983325
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,0917
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) $0,00833 \times (-18,72217) + 0,00835 \times (-3,15265) = -0,18228$
<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente -0,18228

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

Os resultados apresentados nas Tabelas VI.17, VI.18 e VI.19 são respaldados pelo Quadro VI.4 que condensa a saída do programa ASTP para os três graus de detalhamento do modelo de distúrbio escolhidos na exemplificação do Caso 8.

O Caso 8 mostra a sensibilidade dos índices de segurança com relação ao detalhamento do modelo de distúrbios (premissas adotadas para o tratamento das incertezas). Nota-se que os Casos 8(a) e 8(b) não capturam todos os estados instáveis, resultando em valores de probabilidade de instabilidade ponderados, apenas e diferentemente, pelas probabilidades dos estados individuais instáveis de cada caso. Já o Caso 8(c) captura ambos os estados instáveis e pondera de forma mais consistente a probabilidade de instabilidade para o sistema de 4 barras para o cenário determinístico considerado. As mesmas considerações são feitas para a probabilidade de margem insuficiente e expectâncias de margem negativa.

Nesse ponto é importante notar que a compreensão dos indicadores baseados apenas em probabilidades (e.g. *POI*, *POE*, *PMI*) perde a relatividade quando a estrutura do espaço probabilístico de estados varia. Em outras palavras, a comparação entre espaços com 16, 32 e 48 elementos (tal como se verifica neste exemplo) deve ser feita com cautela.

Quadro VI.4 – Resultados das avaliações dos modelos de 16, 32 e 48 estados
Caso 8: incertezas em tipo e local do defeito

Dados do Modelo de Distribuição - 16 estados							Resultados da Avaliação						
Circuito	Prob	Local	Localização		Defeito	Tipo	Estado	Probab	Margem	Resultados da Avaliação			
			Local	Prob						Estado	Probab	Margem	
1	0,12500	M	1,00000		IF	0,80000	1	0,00000	1,20719				
					3F	0,20000	2	0,02500	2,03549				
2	0,12500	M	1,00000		IF	0,80000	3	0,00000	1,20719				
					3F	0,20000	4	0,02500	2,03549				
3	0,12500	M	1,00000		IF	0,80000	5	0,00000	0,89701				
					3F	0,20000	6	0,02500	-3,15265				
4	0,12500	M	1,00000		IF	0,80000	7	0,00000	3,14503				
					3F	0,20000	8	0,02500	3,16720				
5	0,12500	M	1,00000		IF	0,80000	9	0,00000	+				
					3F	0,20000	10	0,02500	+				
6	0,12500	M	1,00000		IF	0,80000	11	0,00000	+				
					3F	0,20000	12	0,02500	+				
7	0,12500	M	1,00000		IF	0,80000	13	0,00000	+				
					3F	0,20000	14	0,02500	+				
8	0,12500	M	1,00000		IF	0,80000	15	0,00000	+				
					3F	0,20000	16	0,02500	+				

Dados do Modelo de Distribuição - 32 estados							Resultados da Avaliação						
Circuito	Prob	Local	Localização		Defeito	Tipo	Estado	Probab	Margem	Resultados da Avaliação			
			Local	Prob						Estado	Probab	Margem	
1	0,12500		1	0,50000	IF	0,80000	1	0,05000	1,10454				
					3F	0,20000	2	0,01250	5,87486				
2			2	0,50000	IF	0,80000	3	0,05000	1,78769				
					3F	0,20000	4	0,01250	4,81892				
3			1	0,50000	IF	0,80000	5	0,05000	1,10454				
					3F	0,20000	6	0,01250	5,87486				
4			2	0,50000	IF	0,80000	7	0,05000	1,78769				
					3F	0,20000	8	0,01250	4,81892				
5			1	0,50000	IF	0,80000	9	0,05000	0,50884				
					3F	0,20000	10	0,01250	-18,72217				
6			2	0,50000	IF	0,80000	11	0,05000	1,28129				
					3F	0,20000	12	0,01250	0,18962				
7			1	0,50000	IF	0,80000	13	0,05000	2,40405				
					3F	0,20000	14	0,01250	+				
8			2	0,50000	IF	0,80000	15	0,05000	+				
					3F	0,20000	16	0,01250	+				
9			1	0,50000	IF	0,80000	17	0,05000	+				
					3F	0,20000	18	0,01250	+				
10			2	0,50000	IF	0,80000	19	0,05000	+				
					3F	0,20000	20	0,01250	+				
11			1	0,50000	IF	0,80000	21	0,05000	+				
					3F	0,20000	22	0,01250	+				
12			2	0,50000	IF	0,80000	23	0,05000	+				
					3F	0,20000	24	0,01250	+				
13			1	0,50000	IF	0,80000	25	0,05000	+				
					3F	0,20000	26	0,01250	+				
14			2	0,50000	IF	0,80000	27	0,05000	+				
					3F	0,20000	28	0,01250	+				
15			1	0,50000	IF	0,80000	29	0,05000	+				
					3F	0,20000	30	0,01250	+				
16			2	0,50000	IF	0,80000	31	0,05000	+				
					3F	0,20000	32	0,01250	+				

Dados do Modelo de Distribuição - 48 estados							Resultados da Avaliação						
Circuito	Prob	Local	Localização		Defeito	Tipo	Estado	Probab	Margem	Resultados da Avaliação			
			Local	Prob						Estado	Probab	Margem	
1	0,12500		1	0,33333	IF	0,80000	1	0,03330	1,10454				
					3F	0,20000	2	0,00833	5,87486				
2	0,12500	M	0,33333		IF	0,80000	3	0,03340	1,20719				
					3F	0,20000	4	0,00835	2,03549				
3			2	0,33333	IF	0,80000	5	0,03330	1,78769				
					3F	0,20000	6	0,00833	4,81892				
4			1	0,33333	IF	0,80000	7	0,03340	1,10454				
					3F	0,20000	8	0,00833	5,87486				
5			M	0,33333	IF	0,80000	9	0,03340	1,20719				
					3F	0,20000	10	0,00835	2,03549				
6			2	0,33333	IF	0,80000	11	0,03330	1,78769				
					3F	0,20000	12	0,00833	4,81892				
7			1	0,33333	IF	0,80000	13	0,03330	0,50884				
					3F	0,20000	14	0,00833	-18,72217				
8			M	0,33333	IF	0,80000	15	0,03340	0,89701				
					3F	0,20000	16	0,00835	-3,15265				
9			2	0,33333	IF	0,80000	17	0,03333	1,28129				
					3F	0,20000	18	0,008325	0,18962				
10			1	0,33333	IF	0,80000	19	0,03333	2,40405				
					3F	0,20000	20	0,008325	+				
11			M	0,33333	IF	0,80000	21	0,0334	+				
					3F	0,20000	22	0,00835	+				
12			2	0,33333	IF	0,80000	23	0,03333	+				
					3F	0,20000	24	0,008325	+				
13			1	0,33333	IF	0,80000	25	0,03333	+				
					3F	0,20000	26	0,008325	+				
14			M	0,33333	IF	0,80000	27	0,0334	+				
					3F	0,20000	28	0,00835	+				
15			2	0,33333	IF	0,80000	29	0,03333	+				
					3F	0,20000	30	0,008325	+				
16			1	0,33333	IF	0,80000	31	0,03333	+				
					3F	0,20000	32	0,008325	+				
17			M	0,33333	IF	0,80000	33	0,0334	+				
					3F	0,20000	34	0,00835	+				
18			2	0,33333	IF	0,80000	35	0,03333	+				
					3F	0,20000	36	0,008325	+				
19			1	0,33333	IF	0,80000	37	0,03333	+				
					3F	0,20000	38	0,008325	+				
20			M	0,33333	IF	0,80000	39	0,0334	+				
					3F	0,20000	40	0,00835	+				
21			2	0,33333	IF	0,80000	41	0,03333	+				
					3F	0,20000	42	0,008325	+				
22			1	0,33333	IF	0,80000	43	0,03333	+				
					3F	0,20000	44	0,008325	+				
23			M	0,33333	IF	0,80000	45	0,0334	+				
					3F	0,20000	46	0,00835	+				
24			2	0,33333	IF	0,80000	47	0,03333	+				
					3F	0,20000	48	0,008325	+				

Por outro lado, bastante interessante é a indicação resultante dos indicadores de risco, gerados via expectativas (e.g. EMN , IEA). No exemplo em questão nota-se que o experimento com 32 estados ($EMN = -0,23$) é mais crítico do que aquele com 48 estados ($EMN = -0,08$). *Esse resultado ilustra de forma clara o conceito de risco como o produto de uma probabilidade por uma consequência.*

Tais constatações são indicações relevantes para a aplicação do arcabouço probabilístico aqui proposto, pois significam que o uso criterioso das abordagens probabilísticas exige o estabelecimento de premissas de estudo que devem permanecer inalteradas ao longo das avaliações de segurança transitória com a consideração de incertezas. Essas premissas fornecem um referencial de análise, sem o qual fica impossível o estabelecimento de comparações consistentes entre os índices de segurança obtidos para as diferentes condições de evolução e operação do sistema de potência.

VI.4.4 Estudos com Distúrbio Determinístico e Variações Múltiplas Probabilísticas de Cenários

Nos caso a seguir será escolhido um distúrbio fixo (sem incertezas em local, tipo ou duração do defeito) para o qual será avaliado efeito do detalhamento do modelo probabilístico de cenários (dois patamares de carga e topologias até o nível de contingência $n-2$) sobre os valores dos índices de segurança do sistema de 4 barras.

O distúrbio escolhido é um defeito 1F, com duração de 70 ms, no circuito [3] do sistema de 4 barras.

Caso 9:

Incertezas: topologia e patamares de carga

Tipos de defeito: 1F
(determinístico)

Ocorrência de defeitos

Elementos: [3]

Locais: [3]M (d_1)

Duração dos defeitos: 70 ms

Para a situação do Caso 9, $n_e = 8$.

A Tabela VI.20 apresenta os estados enumerados para o exemplo resultantes da combinação de incertezas em patamar de carga e topologia, com as respectivas probabilidades e margens de estabilidade.

**Tabela VI.20 – Probabilidades e margens de estabilidade
- Caso 9: incertezas em patamar de carga e topologia -**

Patamar	Prob	Topologia	Prob.	Estado	Prob	Margem	
						Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
1 (100%)	0,2	1 (n)	0,45*	1	0,09	1,05066	-
		2 (n-1)	0,30	2	0,06	-	-193,8944
		3 (n-1)	0,15	3	0,03	+	-
		4 (n-2)	0,10	4	0,02	-	-193,6155
2 (80%)	0,8	1 (n)	0,45	5	0,36	3,46417	-
		2 (n-1)	0,30	6	0,24	-	-54,5149
		3 (n-1)	0,15	7	0,12	3,43740	-
		4 (n-2)	0,10	8	0,08	-	-55,1789

* $0,6 \times 0,75 = 0,45$

Nota-se neste experimento o aparecimento de outro tipo de margem de estabilidade apontado no Capítulo IV. A *margem de Tipo 2* corresponde a uma condição de instabilidade para a qual a curva de potência elétrica do OMIB jamais corta a curva de potência mecânica, indicando uma condição muito severa de distúrbio. As margens de Tipo 1 e de Tipo 2 devem ser contabilizadas separadamente, pois são grandezas obtidas em unidades distintas, conforme também explicado no Capítulo IV. Observa-se que neste experimento não foi detectada margem negativa do Tipo 1.

A contabilização dos índices de segurança probabilística para o Caso 9 conduz aos resultados apresentados na Tabela VI.21.

Tabela VI.21 – Índices de Segurança do Sistema
Caso 9: incertezas em patamar de carga e topologia

Índices de Segurança (globais)	
Tipo do defeito	Duração (ms)
1F	70
POI – Prob. de instabilidade (pu) $(0,06 + 0,02 + 0,24 + 0,08) = 0,40$	
POE – Prob. de estabilidade (pu) 0,60	
PMI – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,40	
EMN – Expectância de margem negativa (MW) – Tipo 2 $0,06 \times (-193,8944) + 0,02 \times (-193,6155) + 0,24 \times (-54,5149) + 0,08 \times (-55,1784) =$ -33,0039	
IEA – Índice de estabilidade aparente -33,0039	

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

Os resultados apontados pelos indicadores EMN e IEA sugerem uma grande influência no sentido da degradação da robustez do sistema, causada pela debilidade topológica.

VI.4.5 Estudo com Modelo Probabilístico Híbrido

A combinação probabilística de distúrbios e cenários gera um modelo híbrido de incertezas que também pode ser tratado através do programa ASTP. Essa possibilidade será ilustrada a seguir através de um caso combinando incertezas no tipo e na localização do defeito (distúrbios) e na topologia (cenário).

Nota-se que o exemplo a seguir será construído através da conjugação parcial das representações probabilísticas adotadas para detalhamento de distúrbios no Caso 8 e para detalhamento de cenários no Caso 9.

Caso 10:

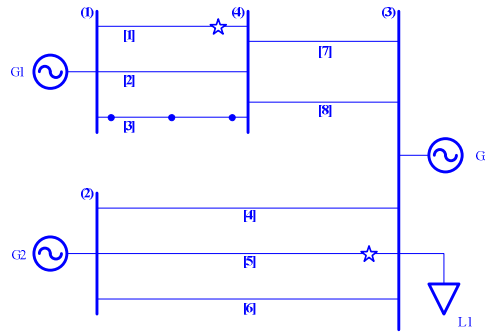
Incertezas: tipos, locais (local na linha de transmissão) de defeito e topologia

Tipos de defeito: 1F 3F
 $p = 80\%$ $p = 20\%$

Ocorrência de defeitos

Elementos:	[3]		
	$p = 1,0$		
Locais:	1	M	2
	$p = 1/3$	$p = 1/3$	$p = 1/3$
Duração dos defeitos:	70 ms		
Impedância dos defeitos:	j 7,0 %, para defeito 1F		j 1,0 %, para defeito 3F
Atuação do religamento:	sem religamento		
Topologias:	n	n-1	n-2
	circuito [1]		circuito [5]
	$\lambda_l = 10$ (falhas/ano)		$\lambda_5 = 10$ (falhas/ano)
	$TMreparo_l = 584$ horas		$TMreparo_5 = 292$ horas
	(prob. de operação = 0,60)		(prob. de operação = 0,75)
Carga total:	(1260 + j 90) MVA		
Despachos de geração:	G1 = 560 MW	G2 = 420 MW	G3 = 280,3 MW (ref.)

Situação de estudo:



O Caso 10 retrata o efeito da combinação probabilística de distúrbios e cenários sobre os índices de segurança do sistema. O número de estados do espaço composto pelas variáveis probabilísticas de distúrbio (tipo e localização do defeito) e de cenário (topologia) será dado pela expressão (VI-2).

$$n_e = n_d n_l \left(1 + n + \frac{n^2 - n}{2} \right) \quad (\text{VI-2})$$

Onde:

n_e – número de estados probabilísticos

n_d – número de tipos de defeito (= 2)

n_l – número de localizações de defeito (= 3)

n – número de circuitos com incertezas (= 2)

Para a situação do Caso 10, $n_e = 2 \times 3 \times 4 = 24$.

A Tabela VI.22 apresenta os estados enumerados para o Caso 10 resultantes da combinação de incertezas distúrbio e cenário (espaço híbrido), com as respectivas probabilidades e margens de estabilidade. As colunas relativas aos estados de topologia mostram os 4 (quatro) estados topológicos que resultam das hipóteses consideradas para representação de incertezas na topologia (1 estado correspondente à rede n , 2 estados correspondentes às redes $n-1$ e 1 estado correspondente à rede $n-2$).

Tabela VI.22 – Estados enumerados para o espaço híbrido

Estado de Topologia		Estado de Distúrbio		Estado Híbrido		Margens	
Nº	Probabilidade	Nº	Probabilidade	Nº	Probabilidade	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
1 (rede n)	0,45000	1	0,26640	1	0,11988	+	-
		2	0,06660	2	0,02997	+	-
		3	0,26720	3	0,12024	+	-
		4	0,06680	4	0,03006	+	-
		5	0,26640	5	0,11988	+	-
		6	0,06660	6	0,02997	+	-
2 (1ª rede n-1)	0,30000	1	0,26640	7	0,07992	-1,30776	-
		2	0,06660	8	0,01998	-10,80229	-
		3	0,26720	9	0,08016	+	-
		4	0,06680	10	0,02004	-3,89689	-
		5	0,26640	11	0,07992	+	-
		6	0,06660	12	0,01998	-0,15853	-
3 (2ª rede n-1)	0,15000	1	0,26640	13	0,03996	+	-
		2	0,06660	14	0,00999	+	-
		3	0,26720	15	0,04008	+	-
		4	0,06680	16	0,01002	+	-
		5	0,26640	17	0,03996	+	-
		6	0,06660	18	0,00999	+	-
4 (rede n-2)	0,10000	1	0,26640	19	0,02664	+	-
		2	0,06660	20	0,00666	-0,49206	-
		3	0,26720	21	0,02672	+	-
		4	0,06680	22	0,00668	-	-38,39100
		5	0,26640	23	0,02664	+	-
		6	0,06660	24	0,00666	+	-
Resultados para o Espaço Híbrido							
Probabilidade de Instabilidade		Expectâncias de Margem Negativa					
		Tipo 1 (MW.rd)			Tipo 2 (MW)		
0,15326		-0,40488			-0,25645		

As colunas relativas aos estados de distúrbio mostram os 6 (seis) estados de distúrbio resultantes das hipóteses consideradas para a representação de distúrbios (2 estados para tipo e 3 estados para a localização), lembrando que foram considerados defeitos 1F e 3F

(com probabilidades de 80% e 20%, respectivamente), localizados em [3]1, [3]M e [3]2 (com probabilidades iguais a 33,333% - estados de localização equiprováveis). Nota-se que os estados de distúrbio se repetem para cada uma das redes probabilísticas consideradas. As colunas relativas aos estados híbridos mostram os 24 (vinte e quatro) estados resultantes da combinação dos estados de topologia (quatro) com os estados de distúrbios (seis) e respectivas probabilidades. Essas probabilidades são o produto da probabilidade da topologia considerada pela probabilidade de cada estado de distúrbio.

A Tabela VI.23 apresenta de forma condensada os índices de segurança globais para o estudo do Caso 10.

**Tabela VI.23 – Índices de Segurança do Sistema
Caso 10: incertezas em distúrbios e cenários**

Índices de Segurança (globais)		
Composição do espaço híbrido		
Topologias n, n-1 e n-2		
Tipos do defeito	Locais	Duração fixa (ms)
1F e 3F	[3]1,M e 2	70
POI – Prob. de instabilidade (pu) 0,15326		
POE – Prob. de estabilidade (pu) 0,84674		
PMI – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,15326		
EMN – Expectância de margem negativa		
Tipo1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	
-0,40488	-0,25645	
IEA – Índice de estabilidade aparente -0.47926		

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

Neste experimento nota-se o aparecimento simultâneo das margens Tipo 1 e Tipo 2.

VI.4.6 Efeito da Incerteza em Medida Corretiva

Neste item apresenta-se uma segunda variante do Caso 3 estudado no item VI.4.1. Desta feita, serão apresentados resultados de uma medida corretiva aplicada sob as mesmas condições daquele caso. Tal medida constituiu-se da aplicação de religamento rápido

tripolar do circuito defeituoso. A atuação do religamento¹⁴ é modelada probabilisticamente, com probabilidades de sucesso, igual a 80%, e de insucesso, igual a 20% (para sistemas reais tais valores podem ser obtidos das estatísticas de desempenho). Os resultados são apresentados na Tabela VI.24.

Para a contabilização adequada dos índices de segurança com a aplicação da medida corretiva é necessária a ponderação dos resultados com relação à atuação do religamento, considerando-se a composição probabilística dos estados nas seguintes situações:

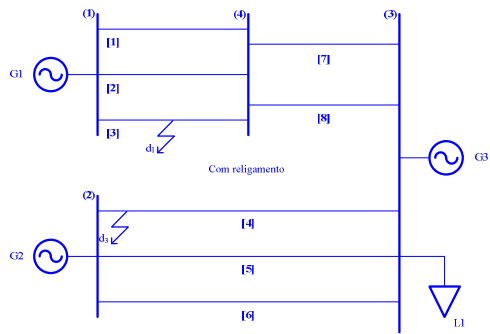
1. Com religamento – sucesso;
2. Com religamento – insucesso.

Caso 11:

Incertezas:	loais (local na linha de transmissão) dos defeitos, religamento		
Tipos de defeito:	3F (determinístico)		
Ocorrência de defeitos			
Elementos:	[3]	[4]	
Locais:	[3]M (d ₁)	[4]1 (d ₃)	
	$p = 10\%$	$p = 90\%$	
Duração dos defeitos:	70 ms	150 ms	
Impedância dos defeitos:	j 1,0 %		
Atuação do religamento:	com religamento	sucesso, $p = 80\%$	insucesso, $p = 20\%$
Topologias:	n		
Carga total:	(2100 + j 150) MVA		
Despachos de geração:	G1 = 940 MW	G2 = 710 MW	G3 = 451,5 MW (ref.)

¹⁴ O religamento pode ocorrer após a extinção do defeito - situação para a qual se diz que o religamento foi realizado com sucesso - ou, com o defeito ainda presente, quando, então, depois de transcorrido o tempo de atuação da proteção, uma nova abertura do circuito acontece. Nessa situação, diz-se que ocorreu insucesso no religamento. Probabilidades de sucesso e insucesso podem ser atribuídas ao religamento de tal sorte a que se dê tratamento probabilístico à sua atuação.

Situação de estudo:



Nesse ponto é conveniente mostrar como o programa ASTP implementa a seqüência básica de eventos para a simulação de estabilidade, mostrada na Figura VI.15:

Tempo (ciclo)	Evento
0	<i>Distúrbio ocorre</i>
t_e	<i>Distúrbio é eliminado por ação da proteção</i>
t_r	<i>O circuito é religado, permanecendo ligado até o final da simulação no caso de sucesso do religamento</i>
$t_r + t_e$	<i>O circuito é desligado definitivamente no caso de insucesso no religamento</i>
t_f	<i>Fim da simulação</i>

Figura VI.15 – Seqüência básica de eventos para simulação de estabilidade

Na Figura VI.15, tem-se:

- t_e - instante de eliminação do defeito (duração do defeito) (s)
- t_r - instante de religamento do circuito (s)
- t_f - instante de término da simulação (s)

Após a eliminação do defeito inicial, o tempo de espera até a tentativa de religamento é igual a $(t_r - t_e)$, sendo internamente fixado em 250 ms. No caso de insucesso do religamento o defeito permanece durante um intervalo de tempo igual à duração inicial do defeito antes da nova abertura do circuito.

A Tabela VI.24 apresenta o resultado da contabilização dos índices de segurança *PMI* (probabilidade de margem insuficiente) e *EMN* (expectância de margem negativa) para

o Caso 11, considerando a medida corretiva de religamento rápido tripolar do circuito [3].

**Tabela VI.24 – Índices de segurança
- Caso 11 – Idem Caso 3, com religamento**

Religamento	Local do defeito	Probabilidade	Margem	PMI^*	EMN
Sem	3[M]	0,10	0,05391	1,00	-6,08819
	4[1]	0,90	-6,76465		
sucesso (80%)	3[M]	0,10	52,58604	0,00	0,00000
	4[1]	0,90	+		
insucesso (20%)	3[M]	0,10	-27,27431	0,02	-0,54549
	4[1]	0,90	+		

* Margem mínima de +1 MW.rd para efeito de contabilização de margem insuficiente

A contabilização do índice EMN no caso da consideração do religamento é feita da seguinte forma:

$$EMN = p_{sr} \sum_{I_{sr}} p_i m_i^- + p_{ir} \sum_{I_{ir}} p_i m_i^- \quad (VI-3)$$

Onde:

I_{sr} – conjunto de estados instáveis quando de sucesso no religamento

I_{ir} – conjunto de estados instáveis quando de insucesso no religamento

p_{sr} – probabilidade de sucesso no religamento

p_{ir} – probabilidade de insucesso no religamento

p_i – probabilidade do estado associado a i -ésima margem negativa

m_i^- – i -ésima margem negativa

Nota-se o benefício representado pela atuação do religamento. Sem o recurso de religamento tinha-se $EMN = -6,08819$ MW.rd, passando-se a ter $EMN = -0,54549$ MW.rd, quando da consideração do religamento. Ainda, neste caso, o

religamento foi capaz de reduzir a probabilidade de margem insuficiente, logrando-se, assim, um efetivo ganho na segurança do sistema.

A Tabela VI.25 apresenta de forma condensada os índices de segurança globais para o estudo do Caso 11, comparando-os com a situação sem religamento apresentada no Caso 3 (vide Tabela VI.6). Pode-se aí notar que o índice de estabilidade aparente bem reflete o efeito positivo da medida corretiva.

Deve aqui ser observado que a análise puramente determinística do religamento não seria capaz de gerar um elemento de decisão adequado pela dificuldade de se produzir referências objetivas para aferição do benefício esperado com a utilização da medida corretiva. Se, por um lado, no caso do exemplo, a atuação bem sucedida do religamento leva o sistema a ser sempre estável para a condição estudada, por outro lado, o insucesso do religamento não só não evita a instabilidade em uma das situações (e.g. defeito em [4]1) como, também, agrava o impacto (vide na Tabela VI.24 a diferença entre as margens negativas dos casos sem religamento e com insucesso do religamento).

**Tabela VI.25 – Índices de Segurança do Sistema
– Comparação: Caso 11 e Caso 3 –**

Índices de Segurança (globais) Duração do defeito (ms) 70 ms (d_1) e 150 ms (d_2)	
Caso 11: com religamento	Caso 3: sem religamento
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu)	
0,02	0,90
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu)	
0,98	0,10
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)*	
0,02	1,00
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd)	
-0,54549	-6,08819
<i>IEA</i> – ~Índice de estabilidade aparente	
-0,54549	-6,08819

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

VI.5 Aplicações ao Sistema-teste de 9 Barras

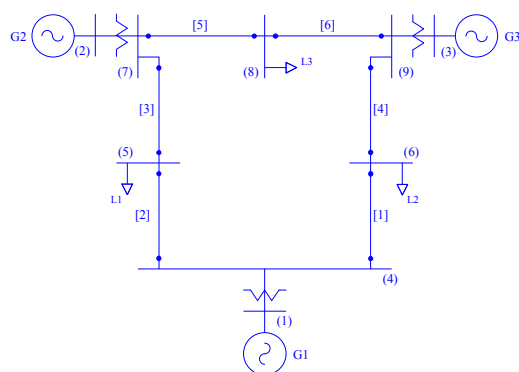
O sistema de 9 barras estudado (dados, topologia e ponto de operação) é apresentado no Anexo A.

Os exemplos a seguir com as aplicações ao sistema de 9 barras visam explorar outras possibilidades de modelagem com o programa ASTP que permitem estudar *o efeito da representação mais detalhada da dinâmica do sistema de potência*. Serão feitas análises comparando os índices probabilísticos obtidos, por exemplo, *com e sem a representação de reguladores de tensão*. Exploram-se, também, situações com e sem a atuação de medidas corretivas. Essa investigação é relevante porque pode auxiliar uma futura modelagem das *incertezas nos parâmetros do sistema*.

Caso 12:

Incertezas:	tipos e locais (posição da e local na linha de transmissão) de defeito		
Tipos de defeito:	1F	3F	
	$p = 80\%$	$p = 20\%$	
Ocorrência de defeitos			
Elementos:	todos os circuitos (probabilidades proporcionais aos comprimentos dos circuitos) ¹⁵		
Locais:	1 e 2 (equiprováveis) $p = \frac{1}{2}$		
Duração dos defeitos:	100 ms		
Impedância dos defeitos:	vide Anexo A		
Atuação do religamento:	sem religamento		
Topologias:	n		
Carga total:	(315,0 + j 115,0) MVA		
Despachos de geração:	G1 = 71.6 MW	G2 = 163 MW	G3 = 85 MW
	(ref.)		

¹⁵ Neste exemplo, para o cálculo das probabilidades de ocorrência de defeitos nos elementos, o comprimento de cada circuito foi considerado como proporcional à reatância do circuito. Os valores dessas probabilidades e das impedâncias de defeito são apresentados no Anexo A.

Situação de estudo:

O Caso 12 retrata o efeito da inclusão dos reguladores automáticos de tensão (RAT) sobre o resultado das avaliações de segurança probabilística. O diagrama de blocos e os dados utilizados na representação dos reguladores de tensão encontram-se no Anexo A.

Neste caso são consideradas incertezas quanto ao elemento sob defeito, a localização do defeito no elemento (terminal de origem ou terminal de chegada) e o tipo de defeito (curto-circuito monofásico ou curto-circuito trifásico), gerando, então, um espaço probabilístico com 24 estados ($6 \text{ elementos} \times 2 \text{ terminais} \times 2 \text{ tipos de defeito}$).

As Tabelas VI.26 e VI.27 apresentam probabilidades e margens dos estados individuais – curto-circuito 1F e 3F – para uma duração de defeito de 100 ms, respectivamente, *com e sem RAT*.

Tabela VI.26 – Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – para duração de defeito de 100 ms – sem RAT

[LT]Terminal	Probabilidades		Margens (MW.rd)	
			Duração do defeito (ms)	
	Tipo de defeito		100	
	1F	3F	1F	3F
[1]1	0,05400*	0,01350	0,28173*	1,49291
[1]2	0,05400*	0,01350	0,33808*	1,85162
[2]1	0,05000*	0,01250	0,84440*	5,76689
[2]2	0,05000*	0,01250	0,55090*	3,67709
[3]1	0,09464**	0,02366**	-0,91808**	-1,18601**
[3]2	0,09464**	0,02366**	-0,35627**	-22,06850**
[4]1	0,09992	0,02498	1,28660	2,26092
[4]2	0,09992	0,02498	1,27337	1,59374
[5]1	0,04232	0,01058	+	+
[5]2	0,04232	0,01058	+	+
[6]1	0,05912	0,01478	+	+
[6]2	0,05912	0,01478	+	+

Tabela VI.27 – Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – para duração de defeito de 100 ms – com RAT

	Probabilidades		Margens (MW.rd)	
			Duração do defeito (ms)	
	Tipo de defeito		100	
[LT]Terminal	1F	3F	1F	3F
[1]1	0,05400*	0,01350	0,44972*	2,00162
[1]2	0,05400*	0,01350	0,56905*	1,85858
[2]1	0,05000	0,01250	1,36892	9,90462
[2]2	0,05000	0,01250	1,18921	4,58987
[3]1	0,09464	0,02366	3,36880	+
[3]2	0,09464	0,02366**	+	-20,61299**
[4]1	0,09992	0,02498	+	+
[4]2	0,09992	0,02498	+	+
[5]1	0,04232	0,01058	+	+
[5]2	0,04232	0,01058	+	+
[6]1	0,05912	0,01478	+	+
[6]2	0,05912	0,01478	+	+

Nessas tabelas, os pares de probabilidades e margens negativas correspondentes aos estados instáveis estão assinalados com dois asteriscos e os pares de probabilidades e margens correspondentes aos estados com margem insuficiente (margens menores do que +1 MW.rd) estão assinalados com um asterisco. Tais resultados permitem o cálculo dos índices de segurança probabilística apresentados na Tabela VI.28.

Tabela VI.28 – Índices de segurança do sistema – Caso 12 – defeitos 1F e 3F em ambos os terminais de cada circuito, com durações iguais a 100 ms, sem religamento

Índices de Segurança (globais)	
Sem RAT	Com RAT
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,23660	<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,02366
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,76340	<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,97634
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,44460	<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,13166
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) -0,67081	<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa (MW.rd) -0,48770
<i>IEA</i> - Índice de estabilidade aparente -0,67081	<i>IEA</i> - Índice de estabilidade aparente -0,48770

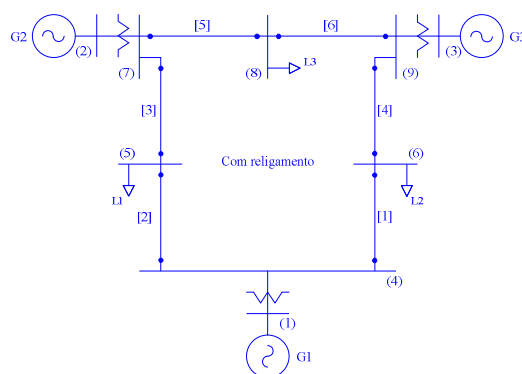
* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

A Tabela VI.28 destaca o efeito benéfico dos reguladores de tensão sobre o desempenho dinâmico do sistema, claramente espelhados pelos índices de segurança probabilística obtidos.

Caso 12(a):

Incertezas:	tipos e locais (posição da e local na linha de transmissão) de defeito, religamento		
Tipos de defeito:	1F	3F	
	$p = 80\%$	$p = 20\%$	
Ocorrência de defeitos			
Elementos:	todos os circuitos (probabilidades proporcionais aos comprimentos dos circuitos) ¹⁶		
Locais:	1 e 2 (equiprováveis) $p = 1/2$		
Duração dos defeitos:	100 ms		
Impedância dos defeitos:	vide Anexo A		
Atuação do religamento:	com religamento em todos os circuitos probabilidade de sucesso = 0,90 probabilidade de insucesso = 0,10		
Topologias:	n		
Carga total:	(315,0 + j 115,0) MVA		
Despachos de geração:	G1 = 71.6 MW	G2 = 163 MW	G3 = 85 MW (ref.)

Situação de estudo:



¹⁶ Idem, nota 15.

O Caso 12(a) inclui, para as condições e premissas do Caso 12, a representação probabilística da atuação de religamento rápido tripolar.

As Tabelas VI.29 e VI.30 apresentam probabilidades e margens para os $2 \times 24 = 48$ estados individuais – curto-circuito 1F e 3F – para uma duração de defeito de 100 ms, respectivamente, com e sem RAT considerando ainda a incerteza do religamento. Nessas tabelas, as margens instáveis de Tipo 2 (dadas em MW) são assinaladas com asterisco.

Tabela VI.29 – Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – para duração de defeito de 100 ms – sem RAT – atuação do religamento

Estado	Probabilidade	Margens (MW.rd ou MW*)		
		Sem religamento	Religamento (sucesso-90%)	Religamento (insucesso-10%)
1	0,05400	0,2817	+	+
2	0,01350	1,4929	+	+
3	0,05400	0,3381	+	+
4	0,01350	1,8516	+	+
5	0,05000	0,8444	+	+
6	0,01250	5,7669	+	+
7	0,05000	0,5509	+	+
8	0,01250	3,6771	+	+
9	0,09460	-0,9181	+	-0,1098
10	0,02370	-1,1860	+	-37,4260
11	0,09460	-0,3563	+	-4,9141
12	0,02370	-22,0685	+	-50,8977*
13	0,09990	1,2866	+	+
14	0,02500	2,2609	+	+
15	0,09990	1,2734	+	+
16	0,02500	1,5937	+	-28,1824
17	0,04230	+	+	+
18	0,01060	+	+	-32,8119
18	0,04230	+	+	+
20	0,01060	+	+	+
21	0,05910	+	+	+
22	0,01480	+	+	+
23	0,05910	+	+	+
24	0,01480	+	+	+

Deve-se ressaltar que para o cômputo da atuação do religamento é necessário o cálculo das margens de estabilidade para as condições de sucesso e de insucesso da atuação do religamento, para posterior ponderação pelas probabilidades de sucesso e insucesso e

obtenção do efeito do religamento sobre os índices de segurança globais do sistema. Nesse exemplo, o tratamento probabilístico da medida corretiva duplica a dimensão do espaço de estados original.

Tabela VI.30 – Probabilidades e margens dos estados individuais – cc 1F e 3F – para duração de defeito de 100 ms – com RAT – atuação do religamento

Estado	Probabilidade	Margens (MW.rd ou MW*)		
		Sem religamento	Religamento (sucesso-90%)	Religamento (insucesso-10%)
1	0,0540	0,4497	+	+
2	0,0135	2,0016	+	+
3	0,0540	0,5691	+	+
4	0,0135	1,8586	+	+
5	0,0500	1,3689	+	+
6	0,0125	9,9046	+	+
7	0,0500	1,1892	+	+
8	0,0125	4,5899	+	+
9	0,0946	3,3688	+	+
10	0,0237	+	+	-34,9558
11	0,0946	+	+	-2,3862
12	0,0237	-20,6130	+	-46,7314*
13	0,0999	+	+	+
14	0,0250	+	+	+
15	0,0999	+	+	+
16	0,0250	+	+	-25,6854
17	0,0423	+	+	+
18	0,0106	+	+	-31,9291
18	0,0423	+	+	+
20	0,0106	+	+	+
21	0,0591	+	+	+
22	0,0148	+	+	+
23	0,0591	+	+	+
24	0,0148	+	+	+

Os valores de margem sem a atuação do religamento são apresentados nas tabelas apenas para efeito de comparação. Os resultados apresentados nas Tabelas VI.29 e VI.30 permitem o cálculo dos índices de segurança probabilística apresentados na Tabela VI.31.

**Tabela VI.31 – Índices de segurança do sistema
– Caso 12(a) – defeitos 1F e 3F em ambos os terminais de
cada circuito, com durações iguais a 100 ms – com religamento**

Índices de Segurança (globais)			
Sem RAT		Com RAT	
<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,02722		<i>POI</i> – Prob. de instabilidade (pu) 0,01775	
<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,97278		<i>POE</i> – Prob. de estabilidade (pu) 0,98225	
<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,27216		<i>PMI</i> – Prob. de margem insuficiente (pu)* 0,17752	
<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa		<i>EMN</i> – Expectância de margem negativa	
(MW.rd)	(MW)	(MW.rd)	(MW)
-0,24121	-0,12042	-0,20323	-0,11047
<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente		<i>IEA</i> – Índice de estabilidade aparente	
-0,26960		-0,23131	

* Estipulando-se margem mínima de +1 MW.rd

Os resultados obtidos nas Tabelas VI.28 e VI.31 confirmam a viabilidade de análise de incertezas associadas à representação dinâmica do sistema através do procedimento proposto, particularmente no que se refere aos parâmetros dos reguladores. É interessante comparar os resultados de ambas as tabelas, onde fica evidenciado o benefício da modelagem do RAT e a degradação causada pela possibilidade de insucesso no religamento.

Caso 12(b):

Incertezas:	tipos e locais (posição da e local na linha de transmissão) de defeito, religamento	
Tipos de defeito:	1F	3F
	$p = 80\%$	$p = 20\%$
Ocorrência de defeitos		
Elementos:	todos os circuitos	

**Quadro VI.5 – Sensibilidade quanto à variação das probabilidades de sucesso e insucesso na atuação da medida corretiva
Caso 12(b): Defeitos 1F e 3F em ambos os terminais de cada circuito, com durações iguais a 100 ms
- Sem regulador automático de tensão -**

(a) Atuação do religamento: 10% de sucesso 90% de insucesso									
Índices de segurança globais – sem religamento					Índices de segurança globais – com religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.23660	-0.67081	0.00000		100.0	0.23660	-0.67081	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.00000	0.00000	0.00000		100.0	0.00000	0.00000	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.27216	-2.41210	-1.20424		100.0	0.27216	-2.41210	-1.20424	
Índices de segurança globais – efeito do religamento					Índices de segurança globais – efeito do religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.24494	-2.17089	-1.08382		100.0	0.13608	-1.20605	-0.60212	
(b) Atuação do religamento: 50% de sucesso 50% de insucesso									
Índices de segurança globais – sem religamento					Índices de segurança globais – sem religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.23660	-0.67081	0.00000		100.0	0.23660	-0.67081	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.00000	0.00000	0.00000		100.0	0.00000	0.00000	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.27216	-2.41210	-1.20424		100.0	0.27216	-2.41210	-1.20424	
Índices de segurança globais – efeito do religamento					Índices de segurança globais – efeito do religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.24494	-2.17089	-1.08382		100.0	0.13608	-1.20605	-0.60212	
(c) Atuação do religamento: 90% de sucesso 10% de insucesso									
Índices de segurança globais – sem religamento					Índices de segurança globais – sem religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.23660	-0.67081	0.00000		100.0	0.23660	-0.67081	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.00000	0.00000	0.00000		100.0	0.00000	0.00000	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.27216	-2.41210	-1.20424		100.0	0.27216	-2.41210	-1.20424	
Índices de segurança globais – efeito do religamento					Índices de segurança globais – efeito do religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1	Tipo 2
(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)	(ms)	(p.u.)	(MW.rd)	(MW.rd)	(MW)
100.0	0.24494	-2.17089	-1.08382		100.0	0.02722	-0.24121	-0.12042	

índices diferem em função das diferentes ponderações de sucesso e insucesso na atuação da medida corretiva.

Comparando-se, agora, os resultados obtidos em cada uma das colunas no Quadro VI.5 para *POI* e *EMN* sem religamento e com o efeito do religamento, conclui-se que:

- (i) Com uma alta taxa de insucesso (90%) o religamento tem efeito negativo sobre os índices de segurança. Tanto a probabilidade de instabilidade, quanto as expectâncias de margem negativa crescem em relação ao caso sem medida corretiva, indicando que o custo de investimento em sistemas de proteção para realização de religamentos rápidos não se justificaria. Tal situação poderia se configurar, por exemplo, quando da impossibilidade de se garantir uma boa taxa de extinção do arco secundário antes da tentativa de religamento;
- (ii) Uma taxa intermediária de insucesso (50%) já indica um resultado benéfico do religamento sobre os eventos de instabilidade do sistema, com uma significativa redução da probabilidade de instabilidade (de 23,66%, sem religamento, para 13,61%, com o efeito do religamento). Nesse caso, o elemento de decisão se concentraria no impacto global sobre o desempenho do sistema retratado pelas expectâncias de margem negativa. Nota-se que, apesar da significativa redução dos eventos de instabilidade, aqueles persistentes ou induzidos pelos insucessos, conduzem a valores de expectância de margem negativa aumentados em relação à condição na qual não se considera a aplicação de medida corretiva. Se a valoração desses impactos (por exemplo, custo da interrupção de carga) indicar um balanço desfavorável em comparação à condição sem religamento, a medida corretiva não seria recomendada;
- (iii) Taxas mais baixas de insucesso da medida corretiva (10%) conduzem a resultados favoráveis tanto na redução da probabilidade de ocorrência de instabilidade, *POI*, quanto da expectância de margem negativa, *EMN*. No caso do exemplo, a probabilidade de instabilidade passa de 23,66% (sem religamento) para 2,72% (com o efeito do religamento) enquanto que a expectância de margem negativa do Tipo 1 passa de -0,67081 para -0,24121. Quanto à expectância de margem negativa de Tipo 2, a mesma passa de 0

(zero) para -0,1204. Mais uma vez a valoração desse impacto pode auxiliar na decisão a ser tomada, muito embora a grande redução na probabilidade de ocorrência de instabilidade já seja uma indicação muito clara do benefício do religamento nesse caso.

O Quadro VI.6 conclui o exemplo do Caso 12(b) mostrando o efeito da representação dos reguladores automáticos de tensão sobre os índices de segurança do sistema. A partir desse quadro confirma-se novamente que:

- (iv) O efeito da regulação de tensão sobre o desempenho dinâmico do sistema é muito benéfico como pode ser verificado pelos efeitos sobre os índices de segurança probabilística. Para o caso sem regulação e sem religamento, a probabilidade de ocorrência de instabilidade (*POI*) é de 23,66%, enquanto que para o caso com regulação esse índice cai para 2,36%;
- (v) Também, para a expectância de margem negativa (*EMN*), o mesmo efeito é verificado. *EMN* passa de -0,67081 MW.rd – caso sem regulação e sem religamento – para -0,48770 MW.rd, no caso com regulação e sem religamento. Tal efeito denota a redução da gravidade do impacto global das situações de instabilidade sobre o desempenho do sistema;
- (vi) Quando se considera o efeito do religamento sobre o caso com regulação de tensão observa-se *uma crescente exigência de aumento na qualidade da atuação da medida corretiva*. Observe-se a Tabela VI.32 que extrai dos Quadros VI.5 e VI.6 os valores de *POI* e *EMN* (tipos 1 e 2) para as três taxas de sucesso do religamento, sem e com RAT, tabelados conjuntamente com o índice *IEA*.
- (vii) Para o caso sem regulação, a partir de uma taxa de sucesso de 50% já se poderia pensar em justificar a adoção da medida corretiva, dado que para essa taxa de sucesso o índice *POI*, que era de 23,66%, cai para 13,61%. Nota-se, todavia, um aumento no módulo da margem negativa de tipo 1 e o surgimento, agora, de uma margem negativa de tipo 2. Esses dois efeitos indicam que, embora a chance de instabilidade seja reduzida, ocorre um aumento do risco para os fenômenos de instabilidade do sistema. Nota-se, também, que o índice

Tabela VI.32 – Índices de segurança sem e com RAT

Índices de segurança sem e com RAT											
			com religamento								
			taxa de sucesso (%)								
				10			50			90	
Probabilidade de instabilidade (<i>POI</i>)											
(<i>%</i>)			(<i>%</i>)			(<i>%</i>)			(<i>%</i>)		
23,66			24,49			13,61			2,72		
2,37			15,98			8,88			1,78		
Expectância de margem negativa (<i>EMN</i>) e Índice de estabilidade aparente (<i>IEA</i>)											
Tipo 1	Tipo 2	<i>IEA</i>	Tipo 1	Tipo 2	<i>IEA</i>	Tipo 1	Tipo 2	<i>IEA</i>	Tipo 1	Tipo 2	<i>IEA</i>
-0,67081	0,00000	-0.67081	-2,17089	-1,08382	-2,42640	-1,20605	-0,60212	-1,34800	-0,24121	-0,12042	-0,26960
-0,48770	0,00000	-0.48770	-1.82908	-0,99510	-2,08225	-1,01616	-0,55283	-1,15681	-0,20323	-0,11057	-0,23136

Obs: valores em negrito correspondem aos casos com RAT

IEA bem reflete essa condição tornando-se mais negativo em comparação com a situação sem religamento.

Já para o *caso com regulação*, a exigência quanto à taxa de sucesso do religamento torna-se *maior*. Observa-se que para uma taxa de sucesso do religamento de 50%, a *POI*, que era de 2,37% sem religamento, agora *aumenta* para 8,88% com o religamento. Similarmente ao caso sem RAT, o comportamento das margens negativas também indica um agravamento do risco dinâmico do sistema. Aqui, também, o índice *IEA* indica essa condição de deterioração do desempenho dinâmico do sistema, passando de um valor de (-0,48770), para a condição sem religamento, para um valor de (-1,15681) quando da atuação do religamento.

Comparem-se, agora, os casos sem e com RAT para um índice de sucesso do religamento igual a 90%. Aqui fica evidente o benefício do religamento tanto quando se observa seus reflexos sobre a probabilidade de ocorrência de instabilidade, quanto sobre as margens negativas e sobre o índice *IEA*.

- (viii) *Observa-se que o índice IEA apresentou um comportamento sempre coerente com o desempenho (risco) dinâmico do sistema, podendo ser utilizado como um substituto adequado para as expectativas de margens negativas de tipos 1 e 2 quando das avaliações da segurança transitória probabilística de sistemas de potência. Na situação do Caso 12(b), o melhor IEA obtido foi de (-0,23136) para a condição com taxa de sucesso de 90% do religamento e com RAT,*

- Com regulador automático de tensão -

a) Atuação do relamento: 10% de sucesso 90% de insucesso										b) Atuação do relamento: 50% de sucesso 50% de insucesso										c) Atuação do relamento: 90% de sucesso 10% de insucesso									
Índices de segurança globais - sem relamento										Índices de segurança globais - sem relamento										Índices de segurança globais - sem relamento									
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)						Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)						Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)					
(ms)	(p.u.)									(ms)	(p.u.)									(ms)	(p.u.)								
100.0	0.02366	-0.48770	0.00000							100.0	0.02366	-0.48770	0.00000							100.0	0.02366	-0.48770	0.00000						
Índices de segurança globais - com relamento (sucesso)										Índices de segurança globais - com relamento (sucesso)										Índices de segurança globais - com relamento (sucesso)									
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)						Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)						Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)					
(ms)	(p.u.)									(ms)	(p.u.)									(ms)	(p.u.)								
100.0	0.00000	0.00000	0.00000							100.0	0.00000	0.00000	0.00000							100.0	0.00000	0.00000	0.00000						
Índices de segurança globais - com relamento (insucesso)										Índices de segurança globais - com relamento (insucesso)										Índices de segurança globais - com relamento (insucesso)									
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)						Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)						Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)					
(ms)	(p.u.)									(ms)	(p.u.)									(ms)	(p.u.)								
100.0	0.17752	-2.03231	-1.10566							100.0	0.17752	-2.03231	-1.10566							100.0	0.17752	-2.03231	-1.10566						
Índices de segurança globais - efeito do relamento										Índices de segurança globais - efeito do relamento										Índices de segurança globais - efeito do relamento									
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)						Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)						Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)					
(ms)	(p.u.)									(ms)	(p.u.)									(ms)	(p.u.)								
100.0	0.15977	-1.82908	-0.99510							100.0	0.08876	-1.01616	-0.55283							100.0	0.01775	-0.20323	-1.10566						

corroborando a expectativa de melhoria de desempenho dinâmico a partir da adoção da medida corretiva em conjunto com a utilização da regulação automática de tensão.

VI.6 Aplicações ao Sistema-teste de 39 Barras

O sistema de 39 barras estudado (dados e topologia) é apresentado no Anexo A.

Os exemplos anteriores tiveram cunho meramente didático, objetivando facilitar o entendimento conceitual dos indicadores gerados pelo novo procedimento aqui proposto.

Nos exemplos dessa seção serão mostrados, para o sistema de 39 barras, os efeitos sobre os índices probabilísticos considerando-se: **(a)** diferentes hipóteses de comportamento das probabilidades de ocorrência de defeitos; **(b)** diferentes hipóteses para o comportamento das taxas de falhas das linhas de transmissão; **(c)** representação híbrida de cenários e distúrbios; **(d)** variações da carga e das taxas de falhas das linhas, e; **(e)** uso do programa ASTP como ferramenta auxiliar para tomada de decisão.

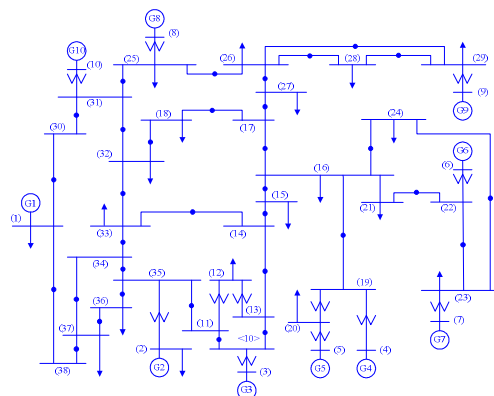
Caso 13:

Os Casos 13(a) e 13(b) apresentam uma comparação dos efeitos sobre os índices de segurança probabilística quando se levam em conta diferentes hipóteses para representação das probabilidades de ocorrência de defeitos para um cenário fixo. Os reguladores de tensão não foram representados.

Caso 13(a):

Incertezas:	loais (posições das linhas de transmissão) de defeito
Tipos de defeito:	3F (determinístico)
Ocorrência de defeitos	
Elementos:	todos os 34 circuitos (equiprovável) $p = 1/34 = 0,02941$
Locais:	M $p = 1$
Duração dos defeitos:	80 ms
Impedância dos defeitos:	vide Tabela VI.35
Atuação do religamento:	sem religamento
Topologias:	n
Carga total:	(6097,3+ j 1409,1) MVA
Despachos de geração:	G1 = 1000 MW G2 = 520.3 MW G3 = 650 MW (ref.) G4 = 632 MW G5 = 508 MW G6 = 650 MW G7 = 560 MW G8 = 540 MW G9 = 830 MW G10 = 250 MW (vide Figura A.6)

Situação de estudo:



Caso 13(b):

Incertezas: locais (posições das linhas de transmissão) de defeito
Tipos de defeito: 3F
 (determinístico)

Ocorrência de defeitos

Elementos: todos os 34 circuitos
 (probabilidades proporcionais aos comprimentos dos circuitos – vide coluna da direita da Tabela VI.34)

Locais: M
 $p = 1$

Duração dos defeitos: 80 ms

Impedância dos defeitos: vide Tabela VI.35

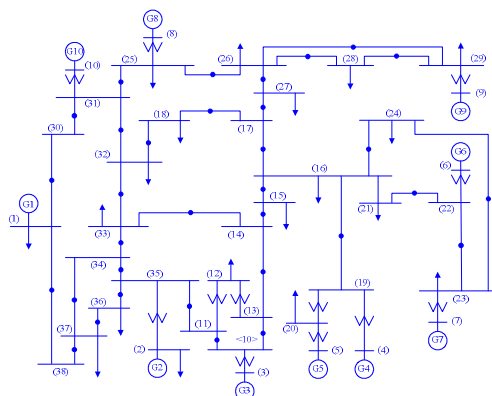
Atuação do religamento: sem religamento

Topologias: n

Carga total: (6097,3+ j 1409,1) MVA

Despachos de geração: G1 = 1000 MW G2 = 520.3 MW G3 = 650 MW
 (ref.)
 G4 = 632 MW G5 = 508 MW G6 = 650 MW
 G7 = 560 MW G8 = 540 MW G9 = 830 MW
 G10 = 250 MW

Situação de estudo:



Para o Caso 13(b), o comprimento das linhas de transmissão foi estimado como em *Schilling et alii* [77] (e não como proporcional à reatância do circuito):

$$\ell = 7,8(X.B)^{1/2} \quad (\text{VI-4})$$

Onde:

ℓ - comprimento em km

X - reatância em %

B - susceptância em Mvar

A Tabela VI.33 mostra os valores de taxas de falha e de tempos médios de reparo para o sistema brasileiro com base no levantamento estatístico do desempenho de linhas e transformadores [77,88,90]. Os valores assinalados com asterisco foram os escolhidos para o sistema de 39 barras, para o qual foi assumida a tensão de referência de 500 kV.

Tabela VI.33 – Desempenho estatístico no Brasil: linhas e transformadores

Tensão (kV)	Linhas		Transformadores	
	Taxa de falha λ (oc/km.ano)	Tempo médio de reparo (h)	Taxa de falha λ (oc/ano)	Tempo médio de reparo (h)
69	3,1949	1,0142	0,2494	0,7835
138	0,0399	1,0144	0,6142	8,4360
230	0,0232	1,0144	0,7207	12,5366
345	0,0228	0,9107	0,7368	16,1616
440	0,0144	3,3770	0,5000	12,7187
500*	0,0183*	2,3547*	0,5945	53,6546
525	0,0183	2,3547	0,5945	53,6546
765	0,0102	1,6525	0,3712	100,3958

A Tabela VI.34 mostra os dados estocásticos dos circuitos para o sistema de 39 barras. As taxas de falha e tempos médios de reparo das linhas estão de acordo com a

Tabela VI.33 e as probabilidades de ocorrência de defeito consideradas foram calculadas como sendo proporcionais ao comprimento de cada circuito¹⁸.

**Tabela VI.34 – Dados estocásticos dos circuitos
- Sistema de 39 barras -**

Dados Estocásticos dos Circuitos										
Circuito	de	para	X (%)	B (Mvar)	L (km)	λ (oc/ano)	Tempo médio de reparo (h)	Probabilidade de operação	Probabilidade de falha	Probabilidade de ocorrência de defeito
1	30	31	4,11	69,87	132,1785	2,4189	2,3547	0,99935	0,00065	0,06915
2	30	1	2,5	75	106,8059	1,9545	2,3547	0,99947	0,00053	0,05588
3	31	32	1,51	25,72	48,6092	0,8895	2,3547	0,99976	0,00024	0,02543
4	31	25	0,86	14,6	27,6389	0,5058	2,3547	0,99986	0,00014	0,01446
5	32	33	2,13	22,14	53,5640	0,9802	2,3547	0,99974	0,00026	0,02802
6	32	18	1,33	21,38	41,5934	0,7612	2,3547	0,99980	0,00020	0,02176
7	33	34	1,28	13,42	32,3278	0,5916	2,3547	0,99984	0,00016	0,01691
8	33	14	1,29	13,82	32,9339	0,6027	2,3547	0,99984	0,00016	0,01723
9	34	35	0,26	4,34	8,2856	0,1516	2,3547	0,99996	0,00004	0,00433
10	34	37	1,12	14,76	31,7137	0,5804	2,3547	0,99984	0,00016	0,01659
11	35	36	0,92	11,3	25,1494	0,4602	2,3547	0,99988	0,00012	0,01316
12	35	11	0,82	13,89	26,3240	0,4817	2,3547	0,99987	0,00013	0,01377
13	36	37	0,46	7,8	14,7748	0,2704	2,3547	0,99993	0,00007	0,00773
14	37	38	3,63	38,04	91,6575	1,6773	2,3547	0,99955	0,00045	0,04795
15	38	1	2,5	120	135,1000	2,4723	2,3547	0,99934	0,00066	0,07068
16	39	11	0,43	7,29	13,8100	0,2527	2,3547	0,99993	0,00007	0,00723
17	39	13	0,43	7,29	13,8100	0,2527	2,3547	0,99993	0,00007	0,00723
18	13	14	1,01	17,23	32,5385	0,5955	2,3547	0,99984	0,00016	0,01702
19	14	15	2,17	36,6	69,5128	1,2721	2,3547	0,99966	0,00034	0,03637
20	15	16	0,94	17,1	31,2721	0,5723	2,3547	0,99985	0,00015	0,01636
21	16	17	0,89	13,42	26,9566	0,4933	2,3547	0,99987	0,00013	0,01410
22	16	19	1,95	30,4	60,0549	1,0990	2,3547	0,99970	0,00030	0,03142
23	16	21	1,35	25,48	45,7469	0,8372	2,3547	0,99978	0,00022	0,02393
24	16	24	0,59	6,8	15,6234	0,2859	2,3547	0,99992	0,00008	0,00817
25	17	18	0,82	13,19	25,6522	0,4694	2,3547	0,99987	0,00013	0,01342
26	17	27	1,73	32,16	58,1803	1,0647	2,3547	0,99971	0,00029	0,03044
27	21	22	1,4	25,65	46,7415	0,8554	2,3547	0,99977	0,00023	0,02445
28	22	23	0,96	18,46	32,8357	0,6009	2,3547	0,99984	0,00016	0,01718
29	23	24	3,5	36,1	87,6763	1,6045	2,3547	0,99957	0,00043	0,04587
30	25	26	3,23	51,3	100,4048	1,8374	2,3547	0,99951	0,00049	0,05253
31	26	27	1,47	23,96	46,2910	0,8471	2,3547	0,99977	0,00023	0,02422
32	26	28	4,74	78,02	149,9984	2,7450	2,3547	0,99926	0,00074	0,07848
33	26	29	6,25	102,9	197,8073	3,6199	2,3547	0,99903	0,00097	0,10349
34	28	29	1,51	24,9	47,8281	0,8753	2,3547	0,99976	0,00024	0,02502
Base: 100 MVA				Total:	1911,3973				Soma:	1,00000

Deve-se aqui alertar que a penúltima coluna da direita da Tabela VI.34 reflete apenas a probabilidade de falha da linha de transmissão, porém sem contemplar desligamentos provocados por defeitos do tipo curto-circuito, com

¹⁸ Na Tabela VI.34, para o circuito #1, tem-se que:

$$\ell = 7,8 \times (4,11 \times 69,87)^{1/2} = 132,1785; \lambda = 132,1785 \times 0,0183 = 2,4189$$

Probabilidade de operação = $(8760/2,3547) / (\lambda + 8760/2,3547) = 0,99935$ (refere-se apenas aos cenários da linha de transmissão)

Probabilidade de falha = 1 – probabilidade de operação

Probabilidade de ocorrência de defeito (proporcional ao comprimento) = $132,1785 / 1911,3973 = 0,06915$ (refere-se aos distúrbios na linha de transmissão)

duração inferior a 1 (um) minuto (vide Figura III.2). Assim, as probabilidades desta coluna penúltima da direita estão associadas apenas a diferentes cenários topológicos e não aos distúrbios. Por exemplo, a probabilidade de ocorrência de rede completa é dada pelo produtório de todas as probabilidades desta coluna. A grosso modo, essa probabilidade pode usualmente ser tomada como quase igual a um. Caso todas as estatísticas apontadas na Figura III.2 fossem passíveis de coleta rigorosa, as probabilidades exatas de ocorrência dos curtos poderiam ser diretamente obtidas via hipótese Markoviana clássica, prescindindo do artifício de condicionamento aqui utilizado.

Os dados das impedâncias de defeito para o sistema de 39 barras foram obtidos de forma aproximada, considerando que a tensão de seqüência positiva no ponto de defeito situa-se, na grande maioria dos casos dos sistemas reais, entre 0,8 e 0,5 p.u. para defeitos sólidos [110]. Como forma de retratar a gravidade do impacto para os diferentes defeitos considerados, os valores de referência adotados foram de 0,7 p.u., para defeitos 1F, e 0,5 p.u., para defeitos 3F. Valores intermediários de 0,65 e 0,6 foram adotados para defeitos FF e 2F, respectivamente. O valor de 0,75 p.u. foi adotado para os demais defeitos.

Com base nesses valores de tensão no ponto de defeito foram obtidas as impedâncias de defeito (reatâncias em % e reatores equivalentes em Mvar) para o sistema de 39 barras, mostradas na Tabela VI.35. Esses valores foram utilizados pelo programa ASTP no processo automático de enumeração dos estados de distúrbio para o sistema de 39 barras. Para a situação de defeito 3F optou-se por um valor nulo de impedância como forma de agravar o impacto resultante para este tipo de defeito.

**Tabela VI.35 – Impedâncias de defeito
- Sistema de 39 barras -**

Barra	Impedâncias de defeito (%) / Reator equivalente (MVAR)									
	1F		FF		2F		3F		OT	
1	1,250	8000	0,750	13333	0,525	19048	0,350	28571	1,500	6667
2	8,000	1250	5,050	1980	3,250	3077	2,250	4444	10,250	976
3	7,500	1333	4,500	2222	2,750	3636	2,000	5000	9,250	1081
4	7,250	1379	4,500	2222	3,000	3333	2,000	5000	9,250	1081
5	10,000	1000	6,500	1538	4,500	2222	3,000	3333	13,500	741
6	6,000	1667	4,000	2500	2,750	3636	1,750	5714	7,500	1333
7	7,000	1429	4,750	2105	3,250	3077	2,250	4444	9,250	1081
8	7,250	1379	4,500	2222	3,000	3333	2,000	5000	9,250	1081
9	10,000	1000	6,500	1538	4,250	2353	2,750	3636	12,500	800
10	3,500	2857	2,250	4444	1,650	6061	1,100	9091	4,500	2222
11	4,750	2105	3,000	3333	2,150	4651	1,380	7246	6,150	1626
12	9,750	1026	6,000	1667	4,000	2500	2,750	3636	12,500	800
13	5,000	2000	3,250	3077	2,150	4651	1,450	6897	6,150	1626
14	4,500	2222	3,000	3333	2,000	5000	1,350	7407	5,750	1739
15	4,650	2151	3,000	3333	2,000	5000	1,350	7407	5,750	1739
16	3,700	2703	2,400	4167	1,600	6250	1,075	9302	4,650	2151
17	3,900	2564	2,550	3922	1,750	5714	1,175	8511	5,000	2000
18	4,300	2326	2,800	3571	1,900	5263	1,300	7692	5,400	1852
19	5,500	1818	3,600	2778	2,500	4000	1,650	6061	6,800	1471
20	8,250	1212	5,250	1905	3,500	2857	2,300	4348	10,800	926
21	5,250	1905	3,350	2985	2,250	4444	1,550	6452	6,500	1538
22	5,100	1961	3,350	2985	2,250	4444	1,500	6667	6,400	1563
23	5,400	1852	3,550	2817	2,400	4167	1,600	6250	6,800	1471
24	4,600	2174	3,000	3333	2,050	4878	1,350	7407	5,750	1739
25	3,950	2532	2,650	3774	1,800	5556	1,200	8333	4,900	2041
26	5,400	1852	3,600	2778	2,450	4082	1,650	6061	6,700	1493
27	5,350	1869	3,540	2825	2,400	4167	1,610	6211	6,700	1493
28	9,500	1053	6,250	1600	4,250	2353	2,900	3448	11,800	847
29	9,000	1111	5,850	1709	4,000	2500	2,700	3704	11,200	893
30	4,250	2353	2,900	3448	1,930	5181	1,310	7634	5,400	1852
31	3,200	3125	2,100	4762	1,450	6897	0,980	10204	4,000	2500
32	3,700	2703	2,450	4082	1,650	6061	1,110	9009	4,710	2123
33	4,300	2326	2,800	3571	1,900	5263	1,300	7692	5,500	1818
34	4,450	2247	2,850	3509	1,900	5263	1,275	7843	5,600	1786
35	4,400	2273	2,800	3571	1,875	5333	1,240	8065	5,600	1786
36	5,150	1942	3,300	3030	2,180	4587	1,250	8000	6,620	1511
37	4,900	2041	3,150	3175	2,100	4762	1,400	7143	6,350	1575
38	4,600	2174	3,050	3279	2,050	4878	1,400	7143	5,750	1739
39	4,750	2105	3,100	3226	2,050	4878	1,380	7246	6,100	1639

A Tabela VI.36 apresenta os resultados obtidos pelo programa ASTP para o Caso 13(a) – probabilidades de ocorrência de defeito equiprováveis – e para o Caso 13(b) – probabilidades de ocorrência de defeito proporcionais ao comprimento das linhas. Note que os valores proporcionais de probabilidades foram retirados da Tabela VI.34 (última coluna). Os valores equiprováveis de probabilidades são iguais a $1 / 34$. Nota-se, também, que a única diferença entre os casos reside nos valores das probabilidades dos estados enumerados.

**Tabela VI.36 – Probabilidades e margens para os estados enumerados
- Sistema de 39 barras -**

Defeito 3F no ponto médio dos circuitos						
Circuito			Estado	Probabilidade (equiprovável)	Probabilidade (proporcional) ¹	Margem
Nº	de	para				(MW _{rd} ou MW)
1	30	31	1	0,02947 ²	0,06915	0,50572
2	30	1	2	0,02941	0,05588	+
3	31	32	3	0,02941	0,02543	+
4	31	25	4	0,02941	0,01446	-72,97308
5	32	33	5	0,02941	0,02802	+
6	32	18	6	0,02941	0,02176	+
7	33	34	7	0,02941	0,01691	+
8	33	14	8	0,02941	0,01723	+
9	34	35	9	0,02941	0,00433	+
10	34	37	10	0,02941	0,01659	+
11	35	36	11	0,02941	0,01316	+
12	35	11	12	0,02941	0,01377	+
13	36	37	13	0,02941	0,00773	+
14	37	38	14	0,02941	0,04795	+
15	38	1	15	0,02941	0,07068	+
16	39	11	16	0,02941	0,00723	+
17	39	13	17	0,02941	0,00723	+
18	13	14	18	0,02941	0,01702	+
19	14	15	19	0,02941	0,03637	+
20	15	16	20	0,02941	0,01636	+
21	16	17	21	0,02941	0,0141	-21,10316
22	16	19	22	0,02941	0,03142	-1798,62490
23	16	21	23	0,02941	0,02393	+
24	16	24	24	0,02941	0,00817	+
25	17	18	25	0,02941	0,01342	+
26	17	27	26	0,02941	0,03044	+
27	21	22	27	0,02941	0,02445	-11,72280
28	22	23	28	0,02941	0,01718	+
29	23	24	29	0,02941	0,04587	+
30	25	26	30	0,02941	0,05253	+
31	26	27	31	0,02941	0,02422	+
32	26	28	32	0,02941	0,07848	-25,07161
33	26	29	33	0,02941	0,10349	-50,48122
34	28	29	34	0,02941	0,02502	-92,65712

Notas:

¹ Probabilidade proporcional ao comprimento da linha de transmissão

² Valor ajustado. Os demais valores desta coluna equivalem a 1/34

A Tabela VI.37 apresenta a comparação dos índices probabilísticos para as duas situações distintas de considerações quanto à modelagem da incerteza relativa à ocorrência do distúrbio.

Tabela VI.37 – Comparação dos índices de segurança - ocorrências equiprováveis e proporcionais -

Índices de Segurança (globais)	
Equiprovável	Proporcional
<i>POI</i> - Probabilidade de instabilidade	
0,20587	0,29142
<i>POE</i> - Probabilidade de estabilidade	
0,79413	0,70858
<i>PMI</i> - Probabilidade de margem insuficiente	
0,23534	0,36057
<i>EMN</i> - Expectância de margem negativa	
MW.rd	
-7,71384	-10,86295
MW	
-53,24233	-56,79942
<i>IEA</i> - Índice de estabilidade aparente	
-53,79823	-57,82887

A análise dos resultados apresentados na Tabela VI.37 conduz às seguintes conclusões:

- (i) A consideração de ocorrência equiprovável de defeitos em todos os circuitos levou a resultados otimistas quando comparados aos obtidos com a consideração de probabilidades proporcionais aos comprimentos das linhas. Tal efeito decorreu, para o caso simulado, do fato de que as probabilidades dos estados instáveis ficaram, em média, para o caso proporcional, maiores do que o valor constante de probabilidade do caso equiprovável (vide Tabela VI.36);
- (ii) A simulação considerando incertezas equiprováveis nada mais é do que uma extensão do tratamento determinístico clássico. Isso fica evidenciado observando-se que o valor de *POI* reflete o total de casos instáveis (7) dividido

pelo total de casos (34), ou seja, $POI = 7 / 34 = 0,20587$. Não obstante, a análise probabilística sugerida fornece uma informação adicional, dada pelos indicadores *EMN* e *IEA* que refletem o conceito de risco (produto de uma probabilidade por uma consequência).

- (iii) A simulação considerando a exposição a risco das linhas de transmissão, como sendo proporcionais ao comprimento das mesmas, apresenta um resultado mais realista que o caso equiprovável. Uma representação ainda mais rigorosa que ambas, seria a baseada na estatística individualizada de defeitos de curta duração para cada linha de transmissão, conforme ilustrado na Figura III.2.
- (iv) No exemplo particular apresentado, o pior defeito do sistema ocorre entre as barras 16 e 19 (vide linha 22 da Tabela VI.36) com uma margem negativa de tipo 2 de aproximadamente 1799 MW. Embora o percentual de risco de cada defeito seja quase idêntico para as simulações proporcional e equiprovável, isto não necessariamente ocorrerá em outros sistemas. *Nota-se então que uma definição conveniente para uma hierarquia de gravidades de defeitos poderá ser extraída pelo cálculo das parcelas de risco obtidas pelo tratamento proporcional.*
- (v) Os resultados mostrados na Tabela VI.37 foram obtidos considerando o cenário determinístico de rede completa *sem incertezas* (probabilidade unitária). Entretanto, um simples ajuste poderia ser realizado, multiplicando-se os resultados pela probabilidade de ocorrência da rede completa, extraível da Tabela VI.34. Esse cálculo reflete a existência dos defeitos de longa duração e dos defeitos de curta duração, consoante a Figura III.2.

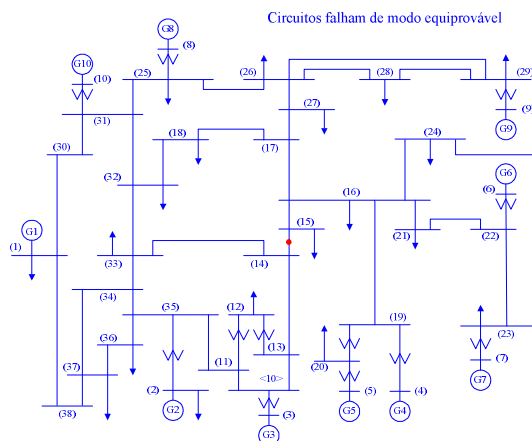
Caso 14:

O Caso 14 apresenta uma comparação dos efeitos da consideração de diferentes hipóteses para representação das probabilidades de cenários topológicos sobre os índices de segurança probabilística.

Caso 14(a):

Incertezas:	Topologias
Tipos de defeito:	3F (determinístico)
Ocorrência de defeitos	
Elementos:	[19]
Locais:	M $p = 1$
Duração dos defeitos:	80 ms
Impedância dos defeitos:	vide Tabela VI.35
Atuação do religamento:	sem religamento
Topologias:	n $p = 0,9^{33} = 0,0309032$ n-1 (equiprováveis) $p = 0,1 \times 0,9^{32} = 0,0034337$
Carga total:	(6097,3+ j 1409,1) MVA
Despachos de geração:	G1 = 1000 MW G2 = 520.3 MW G3 = 650 MW (ref.) G4 = 632 MW G5 = 508 MW G6 = 650 MW G7 = 560 MW G8 = 540 MW G9 = 830 MW G10 = 250 MW

Situação de estudo:



Caso 14(b):

Idem 14(a), com topologias n e n-1 com probabilidades oriundas de falhas nos circuitos, calculadas a partir das colunas “probabilidade de operação”, “probabilidade de falha” da Tabela VI.34.

Os dados utilizados para representação probabilística das falhas nos circuitos são usualmente obtidos das estatísticas de desempenho do sistema (vide Tabela VI.33). Porém, para a simulação das topologias equiprováveis do Caso 14(a), foi estabelecida para cada circuito, tão-somente para fins de ilustração, uma probabilidade arbitrária de operação igual a 0,9 e uma probabilidade de falha igual a 0,1, conforme mostrado na Tabela VI.38.

**Tabela VI.38 – Taxa de falha e tempo médio de reparo
- topologias equiprováveis –**

Dados para falhas equiprováveis dos circuitos			
λ (oc/ano)	Tempo médio de reparo (h)	Probabilidade de operação	Probabilidade de falha
2,00000	486,66667	0,90	0,10

Nas condições de simulação do Caso 14, *o circuito sob defeito está sempre presente em todas as topologias*, conseqüentemente não haverá uma topologia enumerada para representar a falha do circuito [19]. Nesta situação, a probabilidade da rede completa é dada por $0,9^{33} = 0,0309032$, enquanto as probabilidades das 33 topologias ($n-1$) igualam $(0,1 \times 0,9^{32}) = 0,0034337$. Observe-se que o desprezo das topologias degradadas de ordem ($n-2$), ($n-3$), etc, provocará a perda da convexidade dos indicadores probabilísticos calculados. Uma alternativa de modelagem simplificada que poderia ser empregada utilizaria um valor de probabilidade gerado pela simples contagem do total de topologias, tomando-as como equiprováveis. Neste caso, ter-se-ia $p = 1 / (1+33) = 0,0294118$. Desta forma a convexidade probabilística seria preservada, já que essa alternativa representa uma mera contagem de modos de falha, ignorando o histórico de desempenho do sistema. *Em possíveis situações de não convergência do fluxo de potência para uma determinada rede $n-1$, a mesma será expurgada da estatística. Nessa circunstância os índices gerados perdem a convexidade (i.e. $POE + POI < 1$).*

A Tabela VI.39 apresenta os estados topológicos associados às topologias n e ($n-1$) para o sistema de 39 barras considerando as redes ($n-1$) equiprováveis. A soma das probabilidades é menor que um, indicando a perda da convexidade. Dois estados topológicos foram identificados como instáveis para o defeito especificado (curto 3F em

[19]M, com duração de 80 ms). Um estado não logrou convergência e foi retirado da estatística. Este fato também contribui para a perda da convexidade.

**Tabela VI.39 – Estados topológicos e margens associadas
- defeito 3F em [19]M, duração 80 ms -
- topologias equiprováveis (n-1)-**

Estado	Circuito em falha	Prob	Margem (MW.rd/ MW)	Estado	Circuito em falha	Prob	Margem (MW.rd/ MW)
1	não há	0,0309032	1,55238	18	(39)-(13)	0,0034336	+
2	(30)-(31)	0,0034336	+	19	(13)-(14)	0,0034336	+
3	(30)-(1)	0,0034336	+	20	(15)-(16)	0,0034336	+
4	(31)-(32)	0,0034336	+	21	(16)-(17)	0,0034336	-104,57960
5	(31)-(25)	0,0034336	-4,73260	22	(16)-(19)	0,0034336	*
6	(32)-(33)	0,0034336	+	23	(16)-(21)	0,0034336	+
7	(32)-(18)	0,0034336	+	24	(16)-(24)	0,0034336	+
8	(33)-(34)	0,0034336	+	25	(17)-(18)	0,0034336	+
9	(33)-(14)	0,0034336	+	26	(17)-(27)	0,0034336	+
10	(34)-(35)	0,0034336	+	27	(21)-(22)	0,0034336	+
11	(34)-(37)	0,0034336	+	28	(22)-(23)	0,0034336	+
12	(35)-(36)	0,0034336	+	29	(23)-(24)	0,0034336	+
13	(35)-(11)	0,0034336	+	39	(25)-(26)	0,0034336	+
14	(36)-(37)	0,0034336	+	31	(26)-(27)	0,0034336	+
15	(37)-(38)	0,0034336	+	32	(26)-(28)	0,0034336	+
16	(38)-(1)	0,0034336	+	33	(26)-(29)	0,0034336	+
17	(39)-(11)	0,0034336	+	34	(28)-(29)	0,0034336	+

* Rede não convergente – expurgada da estatística

Na Tabela VI.40, são apresentados os resultados mais realistas para o caso de topologias com probabilidades oriundas das falhas dos circuitos (vide Tabela VI.34, colunas correspondentes às probabilidades de operação e de falha). Os valores de probabilidade obtidos indicam que a perda de convexidade é menos acentuada.

Nota-se que as diferenças entre as Tabelas VI.39 e VI.40 residem somente nos valores das probabilidades das redes e que os eventos de instabilidade foram tais que somente margens de Tipo 2 (MW) foram obtidas, tendo as mesmas ocorrido para as topologias (n-1) associadas aos estados topológicos 5 e 21 que correspondem, respectivamente, a falhas dos circuitos [4] – de (31) para (25) – e [21] – de (16) para (17). Uma inspeção da topologia do sistema de 39 barras (vide Figura A.5) indica que para o defeito simulado (curto 3F em [19]M, eliminado pela abertura de [19]), as seguintes condições são observadas:

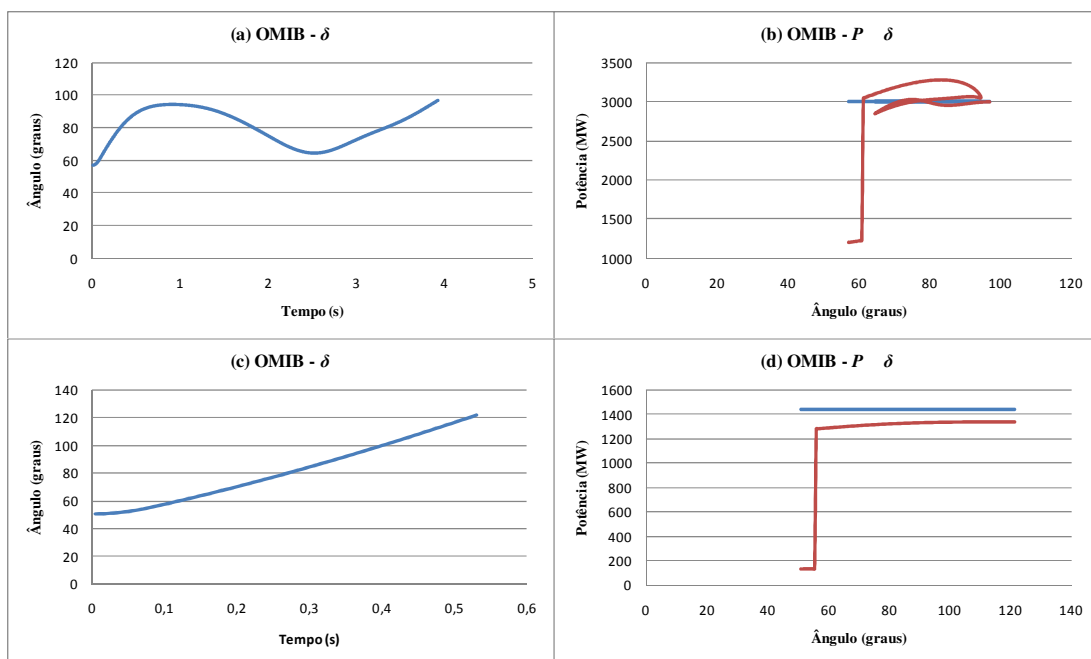
Tabela VI.40 – Estados topológicos e margens associadas
- topologias com probabilidades oriundas das taxas de falha –
- defeito 3F em [19]M, duração 80 ms -

Estado	Circuito em falha	Prob	Margem (MW.rd/MW)	Estado	Circuito em falha	Prob	Margem (MW.rd/MW)
1	-	0,9906419	1,55238	18	(39)-(13)	0,0000673	+
2	(30)-(31)	0,0006443	+	19	(13)-(14)	0,0001586	+
3	(30)-(1)	0,0005206	+	20	(15)-(16)	0,0001524	+
4	(31)-(32)	0,0002369	+	21	(16)-(17)	0,0001314	-104,57960
5	(31)-(25)	0,0001347	-4,73260	22	(16)-(19)	0,0002927	*
6	(32)-(33)	0,0002611	+	23	(16)-(21)	0,0002230	+
7	(32)-(18)	0,0002028	+	24	(16)-(24)	0,0000762	+
8	(33)-(34)	0,0001576	+	25	(17)-(18)	0,0001250	+
9	(33)-(14)	0,0001605	+	26	(17)-(27)	0,0002836	+
10	(34)-(35)	0,0000404	+	27	(21)-(22)	0,0002279	+
11	(34)-(37)	0,0001546	+	28	(22)-(23)	0,0001601	+
12	(35)-(36)	0,0001226	+	29	(23)-(24)	0,0004274	+
13	(35)-(11)	0,0001283	+	39	(25)-(26)	0,0004894	+
14	(36)-(37)	0,0000720	+	31	(26)-(27)	0,0002256	+
15	(37)-(38)	0,0004468	+	32	(26)-(28)	0,0007312	+
16	(38)-(1)	0,0006586	+	33	(26)-(29)	0,0009643	+
17	(39)-(11)	0,0000673	+	34	(28)-(29)	0,0002332	+

* Rede não convergente – expurgada da estatística

- Na falha do circuito [4] (vide estado 5 da Tabela VI.40), a eliminação de um defeito em [19]M pela abertura do circuito [19] resulta em uma configuração com dois grupos de geradores radializados através do caminho formado pelos circuitos [6] e [25]. Esses grupos são formados, de um lado, pelos geradores G1, G2, G3 e G10 e, do outro lado, pelos geradores G4, G5, G6, G7, G8 e G9. Embora não ocorra um ilhamento como decorrência direta da abertura do circuito [19], o caminho de oscilação resultante não é capaz de suportar as trocas de potência entre os grupos de geração formados, levando-os à perda de sincronismo após um período oscilatório.
- Na falha do circuito [21] (vide estado 21 da Tabela VI.40), a eliminação de um defeito em [19]M pela abertura do circuito [19] resulta em ilhamento imediato do sistema e conseqüente instabilidade. As duas ilhas formadas são compostas, de um lado, pelos geradores G1, G2, G3, G8, G9 e G10 e, do outro lado, pelos geradores G4, G5, G6 e G7. Neste caso, a perda de sincronismo ocorre sem que o sistema experimente oscilação.

A Figura VI.16 retrata a fidelidade com que o método SIME captura as condições instáveis associadas aos estados topológicos 5 e 21 e as diferentes naturezas das instabilidades detectadas. As Figuras VI.16(a) e (b) correspondem à topologia resultante da falha do circuito [4]. Nessas figuras observa-se a natureza oscilatória da instabilidade, com o evento se caracterizando por uma pequena margem negativa de Tipo 1. As Figuras VI.16(c) e (d) retratam o evento de instabilidade associado à topologia correspondente à falha do circuito [21]. Nota-se, nesse caso, que a instabilidade é não oscilatória e se caracteriza como uma margem de Tipo 2, denotando a maior insegurança do sistema quando da falha do circuito [21], para o defeito em [19]M. Compare-se o valor das margens negativas nas Tabelas VI.39 e VI.40.



**Figura VI.16 – Caso 14: Comportamento dinâmico dos casos instáveis.
- estados topológicos 5 e 21 -**

A Tabela VI.41 apresenta a comparação entre os índices de segurança para as duas diferentes situações de tratamento das incertezas topológicas, cabendo os seguintes comentários:

**Tabela VI.41 – Comparação dos índices de segurança
- topologias equiprováveis e oriundas das falhas nos circuitos -**

Índices de Segurança (globais)	
Equiprováveis	Taxas de falha
<i>POI</i> - Probabilidade de instabilidade	
0,00687	0,00027
<i>POE</i> - Probabilidade de estabilidade	
0,13391	0,99906
<i>PMI</i> - Probabilidade de margem insuficiente	
0,00687	0,00027
<i>EMN</i> - Expectância de margem negativa	
MW.rd	
-	-
MW	
-0,37534	-0,01438
<i>IEA</i> - Índice de estabilidade aparente	
-0,37534	-0,01438

- (i) A consideração de topologias equiprováveis conduziu a resultados mais pessimistas para os índices de segurança. Tal fato decorre dos valores escolhidos para as taxas de falha e tempos médios de reparo, com probabilidades de operação e de falha de 0,9 e 0,1, respectivamente. No exemplo do Caso 14(a), essa escolha levou a valores de probabilidades constantes para as diferentes redes, maiores do que aqueles oriundos das falhas dos circuitos levantadas em estatísticas de desempenho.
- (ii) A simulação considerando topologias $n-1$ equiprováveis comporta-se como uma simples contabilização indireta de estados instáveis incluindo uma ponderação de probabilidades. Nesse exemplo tem-se que $POI = 2 \text{ casos instáveis} \times (0,9^{32} \times 0,1) = 0,006867$. Para o conjunto de topologias incluindo a rede completa e as topologias $n-1$, o tratamento determinístico mais usual traduz-se na atribuição de probabilidades iguais a $1 / (n + 1)$. A vantagem obtida em relação ao procedimento determinístico clássico revela-se na quantificação do risco do sistema expresso pelas

expectâncias de margem negativa (*EMN*) e pelo índice de estabilidade aparente (*IEA*).

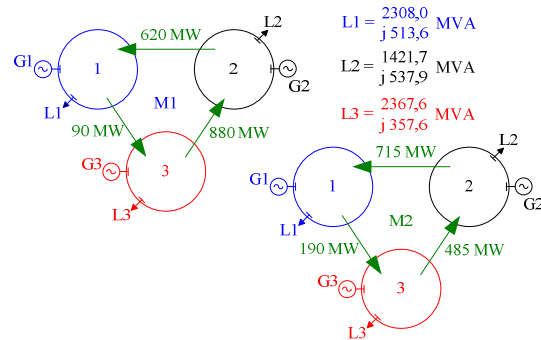
(iii) Deve ser aqui enfatizado que no caso 14(b) a diferenciação das incertezas de cada topologia $n-1$ advém da composição das duas penúltimas colunas da direita da Tabela VI.34. Isso ocorre porque a estatística aí representada não comporta os defeitos de curta duração, como explicado na Figura III.2.

(iv) A Tabela VI.41 também evidencia a perda de convexidade, já que em ambos os casos verifica-se que $POE + POI < 1$. Esse fato ocorreu pelo descarte de configurações sem convergência e pelo abandono de topologias degeneradas de ordem superior ($n-2$), ($n-3$), etc.

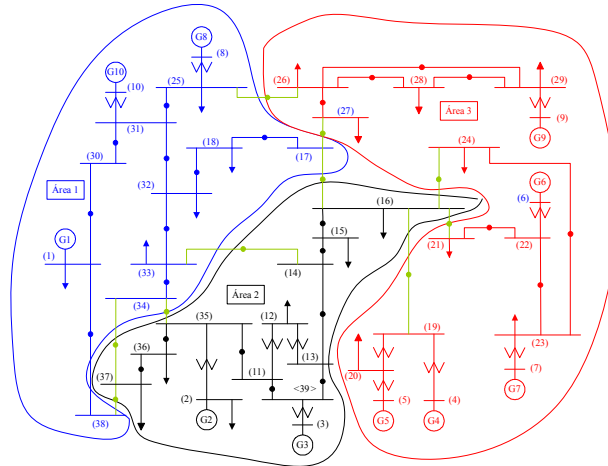
Caso 15:

Incertezas:	locais (posições das linhas de transmissão) de defeito e modos de intercâmbio		
Tipos de defeito:	3F (determinístico)		
Ocorrência de defeitos			
Elementos:	todos os 34 circuitos (probabilidades proporcionais aos comprimentos dos circuitos – vide coluna da direita da Tabela VI.34)		
Locais:	M $p = 1$		
Duração dos defeitos:	80 ms		
Impedância dos defeitos:	vide Tabela VI.35		
Atuação do religamento:	sem religamento		
Topologias:	n		
Carga total:	(6097,3+ j 1409,1) MVA		
Despachos de geração:	M1 ($p = 20\%$)	G1 = 1000 MW	G2 = 520,3 MW (ref.)
		G3 = 650 MW	G4 = 632 MW
		G6 = 650 MW	G7 = 560 MW
		G9 = 830 MW	G10 = 250 MW
			G5 = 508 MW
			G8 = 540 MW

M2 ($p = 80\%$)	G1 = 1000 MW	G2 = 1011,3 MW (ref.)
G3 = 650 MW	G4 = 532 MW	G5 = 408 MW
G6 = 550 MW	G7 = 460 MW	G8 = 540 MW
G9 = 730 MW	G10 = 250 MW	



Situação de estudo:



O Caso 15 apresenta um exemplo de aplicação do programa ASTP para o estudo de uma situação híbrida de combinação de incertezas. São consideradas incertezas de distúrbio e de cenário da forma como acima indicada. No Caso 15 *os reguladores de tensão foram representados*, provocando diferenças em relação ao Caso 13(b).

O Quadro VI.7 apresenta os modos de intercâmbio para modelagem de cenários, conforme o relatório de fluxo de potência do programa ASTP. Verifica-se que os intercâmbios líquidos das áreas correspondem à situação de estudo do Caso 15, mostrada acima. Observe que nas duas condições retratadas *a carga é a mesma para cada uma das áreas*, em um total de $(6097,3 + j 1409,1)$ MVA. Os padrões de exportação e importação das áreas são distintos nas duas situações, caracterizando os dois diferentes modos de intercâmbio que serão utilizados na modelagem de cenários.

Segu

Modo de Intercâmbio 2 - Probabilidade 80%											
TOTAIS DA AREA 1											
X	---	X	---	X	---	X	---	X	---	X	---
GERACAO		CARGA		SHUNT		INJ EQV		EXPORT.		IMPORT.	
MW/		MW/		MVAR/		MW/		MW/		MW/	
MVAR		MVAR		EQUIV		MVAR		MVAR		MVAR	
X	---	X	---	X	---	X	---	X	---	X	---
1790.0		2308.0		0.0		0.0		511.8		1037.2	
240.0		513.6		0.0		0.0		204.1		157.8	
											</

A Tabela VI.42 apresenta, para cada um dos estados de distúrbio, os valores de suas probabilidades e as margens obtidas para os dois modos de intercâmbio estudados.

**Tabela VI.42 – Probabilidades e margens para os estados enumerados
- Modelagem híbrida de incertezas (distúrbios e cenários)**

Estado	Probabilidade	Modo de intercâmbio 1 (20%)	Modo de intercâmbio 2 (80%)
		Margem	Margem
		(MW.rd ou MW)	(MW.rd ou MW)
1	0,06915	+	+
2	0,05588	+	+
3	0,02543	+	+
4	0,01446	-114,56811	+
5	0,02802	+	-14,09265
6	0,02176	+	+
7	0,01691	+	-47,81697
8	0,01723	+	+
9	0,00433	+	-89,24432
10	0,01659	+	-11,42405
11	0,01316	+	-28,10153
12	0,01377	+	-52,76066
13	0,00773	+	-5,48643
14	0,04795	+	+
15	0,07068	+	+
16	0,00723	+	-17,13453
17	0,00723	+	-16,30109
18	0,01702	+	-29,72203
19	0,03637	+	+
20	0,01636	+	+
21	0,0141	+	+
22	0,03142	-1797,90290	-169,69010
23	0,02393	+	+
24	0,00817	+	+
25	0,01342	+	+
26	0,03044	+	+
27	0,02445	-185,93489	+
28	0,01718	+	+
29	0,04587	+	+
30	0,05253	-4,72097	+
31	0,02422	+	+
32	0,07848	-36,31366	+
33	0,10349	-35,01817	+
34	0,02502	-85,47566	+

Nota-se que os 34 estados de distúrbio combinam-se com os dois estados de cenários formando um espaço de estados com 68 elementos (34 estados de distúrbio $\times$ 2 estados de cenário).

A Tabela VI.43 apresenta a contabilização dos índices de segurança probabilística para cada um dos estados de cenário estudados. A comparação dos índices obtidos para os dois modos de intercâmbio retratados indica que *o desempenho dinâmico do sistema apresenta maior segurança quando operando no modo 2*, tanto quanto à probabilidade de instabilidade quanto às expectativas de margens negativas. Esse resultado sugere o emprego da metodologia proposta como ferramenta auxiliar para o estabelecimento de modos operacionais seguros.

**Tabela VI.43 – Comparação dos índices de segurança
- Modelagem de distúrbios para cada cenário -**

Índices de Segurança (globais)	
Modo de intercâmbio 1	Modo de intercâmbio 2
<i>POI</i> - Probabilidade de instabilidade	
0,32985	0,16341
<i>POE</i> - Probabilidade de estabilidade	
0,67015	0,83659
<i>PMI</i> - Probabilidade de margem insuficiente	
0,32985	0,16341
<i>EMN</i> - Expectância de margem negativa	
MW.rd	
-15,06328	-3,66576
MW	
-56,49011	-5,33166
<i>IEA</i> - Índice de estabilidade aparente	
-58,46396	-6,47027

A Tabela VI.44 apresenta os índices globais de segurança quando se considera a combinação probabilística de distúrbios e cenários (modelagem híbrida).

**Tabela VI.44 – Comparação dos índices de segurança
- Modelagem híbrida de distúrbios e cenários –**

Índices de Segurança (globais)
Modelagem híbrida distúrbios e cenários
<i>POI</i> - Probabilidade de instabilidade
0,19670
<i>POE</i> - Probabilidade de estabilidade
0,80330
<i>PMI</i> - Probabilidade de margem insuficiente
0,19670
<i>EMN</i> - Expectância de margem negativa
MW.rd
-5,94526
MW
-15,56335
<i>IEA</i> - Índice de estabilidade aparente
-16,66025

Como era de se esperar, nota-se que o índice de estabilidade aparente (*IEA*) global, que reflete os dois modos de operação do sistema, situa-se num valor intermediário entre aqueles obtidos individualmente para os modos 1 e 2 de operação.

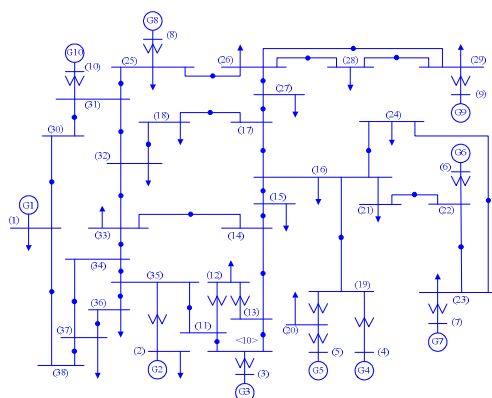
Caso 16:

Incertezas:	loais (posições das linhas de transmissão) de defeito
Tipos de defeito:	3F (determinístico)
Ocorrência de defeitos	
Elementos:	todos os 34 circuitos (equiprovável, $p = 1/34 = 0,02941$)
Locais:	M
Duração dos defeitos:	80 ms
Impedância dos defeitos:	vide Tabela VI.35
Atuação do religamento:	com religamento
Topologias:	n

Carga total: vide Tabela VI.45

Despachos de geração: vide Tabela VI.45

Situação de estudo:



O Caso 16 apresenta um exemplo de aplicação do programa ASTP para o estudo da sensibilidade dos índices de segurança probabilística com relação a grandezas escolhidas. Serão apresentados resultados relativos às seguintes sensibilidades: (i) variação da carga; e (ii) variação das taxas de falha.

Caso 16(a): *Sensibilidade dos índices de segurança probabilística com relação à variação da carga (vide caso 13(a)).*

Neste exemplo são mostrados resultados da variação dos índices globais de segurança com relação a três níveis de carga para o sistema de 39 barras. Os despachos de geração e valores de carga considerados para cada um dos níveis são indicados na Tabela VI.45.

Tabela VI.45 – Despachos de geração e níveis de carga

Geração (MW)	Pesada	Média	Leve
G1	1000,0	850,0	800,0
G2	520,3	468,5	336,0
G3	650,0	550,0	500,0
G4	632,0	520,0	500,0
G5	508,0	420,0	400,0
G6	650,0	555,0	500,0
G7	560,0	475,0	400,0
G8	540,0	460,0	400,0
G9	830,0	705,0	550,0
G10	250,0	210,0	210,0
Carga total (MVA)	6097.30 + j 1409.10	5182.80 + j 1198.00	4573.20 + j 1057.10

Observando-se os resultados apresentados no Quadro VI.8, nota-se, claramente, que o efeito da variação de carga, no sentido do maior para o menor carregamento do sistema, é o de produzir um aumento no nível de segurança dinâmica., como é usual.

A Figura VI.17 apresenta os resultados do Quadro VI.8 de forma gráfica, facilitando a visualização do comportamento dos índices de segurança com relação à variação da carga. Nesta figura o nível 1 representa a carga pesada.

Neste experimento, ressalta-se que não se buscou um maior refinamento quanto ao ajuste do ponto de operação. Na obtenção dos resultados desse exemplo, a redução de carga foi acompanhada de um reajuste dos níveis de tensão do sistema no intuito de que as faixas normais de operação fossem observadas. Todavia, esse ajuste não foi explorado ao máximo, não só no que diz respeito às tensões, mas, também, com relação aos despachos de geração. Possivelmente, um maior cuidado na otimização da condição operativa ao longo da evolução da carga terá, também, efeito sobre a variação dos índices em relação à variável escolhida. Em uma avaliação de segurança (dinâmica) esses parâmetros têm efeito importante sobre o comportamento dinâmico do sistema, podendo afetar de forma significativa as margens e de forma importante a condição de estabilidade. A variação de carga se reflete sobre os índices de segurança probabilística, podendo ser observado tanto nas probabilidades de instabilidade quanto nas expectativas de margem negativa para os três níveis de carga estudados (vide Quadro VI.8(a), (b) e (c), nas janelas correspondentes às situações sem religamento).

Observando-se, agora, os resultados apresentados no Quadro VI.8(a), (b) e (c) nas janelas correspondentes ao cômputo do efeito do religamento, nota-se que a tendência do efeito da variação de carga se mantém. *Todavia, observa-se uma tendência de saturação do efeito do religamento sobre os índices de segurança indicando a necessidade de maior atenção quanto ao real benefício da medida corretiva nessa situação. Em outras palavras, o custo da medida operativa frente ao benefício adicional agregado aumenta de importância em uma tomada de decisão envolvendo sua adoção na proporção em que o nível de segurança do sistema cresce. Isso indicaria, por exemplo, a necessidade de se garantir níveis de sucesso da medida corretiva em um número crescente de situações, o que pode encontrar um limite econômico ditado pelas características elétricas e dinâmicas do sistema em análise.*

Quadro VI.8 – Caso 16(a): Sensibilidade dos índices de segurança com relação a variação da carga.

(a) Sistema 39 Barras-New England – Carga Pesada Carga total: 6097.30 MW + j 1409.10 MVar									
Índices de segurança globais – sem religamento					Índices de segurança globais – com religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.20587	-7.71384	-53.24233		80.0	0.11764	-1.03681	-44.55625	
Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.05882	-13.06016	0.00000		80.0	0.02941	-0.38690	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.47062	-57.21390	-31.03755		80.0	0.08823	-1.04817	-19.29923	
Índices de segurança globais – efeito do religamento					Índices de segurança globais – efeito do religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.14118	-21.89091	-6.20751		80.0	0.04117	-0.57546	-3.85985	

(b) Sistema 39 Barras-New England – Carga Média Carga total: 5182.80 MW + j 1198.00 MVar									
Índices de segurança globais – sem religamento					Índices de segurança globais – com religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.11764	-1.03681	-44.55625		80.0	0.02941	-0.45729	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.02941	-0.38690	0.00000		80.0	0.02941	-0.45729	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.23528	-22.24859	-19.41007		80.0	0.08823	-1.04817	-19.29923	
Índices de segurança globais – efeito do religamento					Índices de segurança globais – efeito do religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.07058	-4.75924	-3.88201		80.0	0.04117	-0.57546	-3.85985	

(c) Sistema 39 Barras-New England – Carga Leve Carga total: 4573.20 MW + j 1057.10 MVar									
Índices de segurança globais – sem religamento					Índices de segurança globais – com religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.02941	0.00000	-11.55791		80.0	0.02941	0.00000	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (sucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.02941	-0.45729	0.00000		80.0	0.02941	-0.45729	0.00000	
Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)					Índices de segurança globais – com religamento (insucesso)				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.08823	-1.04817	-19.29923		80.0	0.08823	-1.04817	-19.29923	
Índices de segurança globais – efeito do religamento					Índices de segurança globais – efeito do religamento				
Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)	Duração do Defeito	Probabilidade de Instabilidade	Expectância de Margem Negativa	Tipo 1 (MW.rd)	Tipo 2 (MW)
(ms)	(p.u.)				(ms)	(p.u.)			
80.0	0.04117	-0.57546	-3.85985		80.0	0.04117	-0.57546	-3.85985	

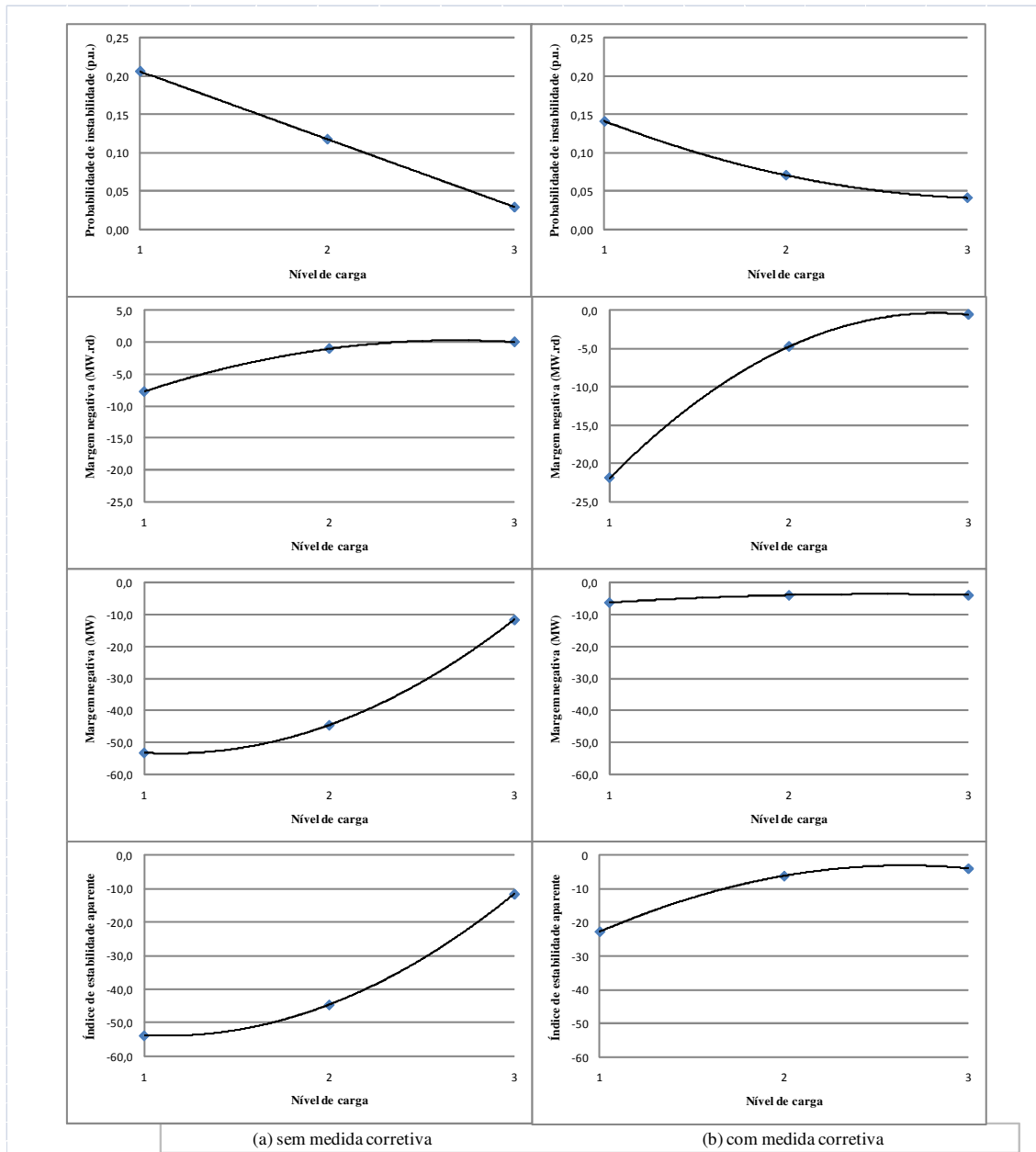


Figura VI.17 – Caso 16(a): Sensibilidade dos índices de segurança com relação a variação da carga.

Caso 16(b): *Sensibilidade dos índices de segurança probabilística com relação à variação das taxas de falha (vide casos 14(a) e 14(b)).*

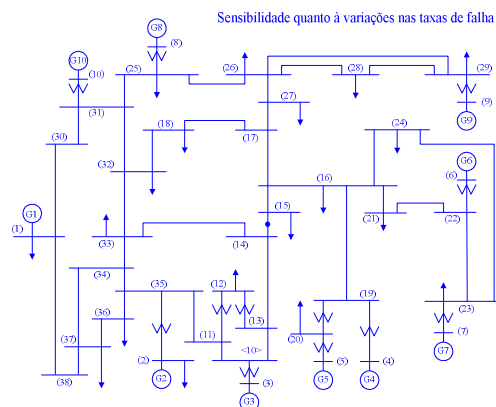
Incertezas: Topologias

Tipos de defeito: 3F

Ocorrência de defeitos

Elementos:	[19], da barra (14) para a barra (15) $p = 1,0$		
Locais:	M $p = 1,0$		
Duração dos defeitos:	80 ms		
Impedância dos defeitos:	vide Tabela VI.35		
Atuação do religamento:	sem religamento		
Topologias:	n n-1 vide dados estocásticos na Tabela VI.40		
Carga total:	(6097,3 + j 1409,1) MVA		
Despachos de geração:	G1 = 1000 MW G2 = 520,3 MW G3 = 650 MW (ref.) G4 = 632 MW G5 = 508 MW G6 = 650 MW G7 = 560 MW G8 = 540 MW G9 = 830 MW G10 = 250 MW		

Situação de estudo:



Neste exemplo são mostrados resultados da variação dos índices globais de segurança com relação a três níveis de taxa de falha para o sistema de 39 barras. Os valores de taxa de falha considerados são oriundos da estatística de desempenho do sistema. Os valores de referência são aqueles assinalados na Tabela VI.40. No estudo de sensibilidade dos índices de segurança a variação das taxas de falha foi de $\pm 20\%$ no valor de λ . O tempo médio de reparo foi mantido constante ao longo do estudo.

Na Tabela VI.46 são apresentadas as sensibilidades com relação às taxas de falha dos circuitos para o sistema de 39 barras.

Tabela VI.46 – Sensibilidade com relação às taxas de falha

0,8 λ							
Estado	Circuito em falha	Probabilidade	Margem (MW.rd ou MW)	Estado	Circuito em falha	Probabilidade	Margem (MW.rd ou MW)
1	-	0,9927792	1,55238	18	(39)-(13)	0,0000540	+
2	(30)-(31)	0,0005164	+	19	(13)-(14)	0,0001271	+
3	(30)-(1)	0,0004173	+	20	(15)-(16)	0,0001222	+
4	(31)-(32)	0,0001899	+	21	(16)-(17)	0,0001053	-104,57960
5	(31)-(25)	0,0001080	-4,73260	22	(16)-(19)	0,0002346	*
6	(32)-(33)	0,0002093	+	23	(16)-(21)	0,0001787	+
7	(32)-(18)	0,0001625	+	24	(16)-(24)	0,0000610	+
8	(33)-(34)	0,0001263	+	25	(17)-(18)	0,0001002	+
9	(33)-(14)	0,0001287	+	26	(17)-(27)	0,0002273	+
10	(34)-(35)	0,0000324	+	27	(21)-(22)	0,0001826	+
11	(34)-(37)	0,0001239	+	28	(22)-(23)	0,0001283	+
12	(35)-(36)	0,0000983	+	29	(23)-(24)	0,0003425	+
13	(35)-(11)	0,0001028	+	30	(25)-(26)	0,0003923	+
14	(36)-(37)	0,0000577	+	31	(26)-(27)	0,0001809	+
15	(37)-(38)	0,0003581	+	32	(26)-(28)	0,0005860	+
16	(38)-(1)	0,0005278	+	33	(26)-(29)	0,0007728	+
17	(39)-(11)	0,0000540	+	34	(28)-(29)	0,0001869	+
Referência = λ							
Estado	Circuito em falha	Probabilidade	Margem (MW.rd ou MW)	Estado	Circuito em falha	Probabilidade	Margem (MW.rd ou MW)
1	-	0,9909826	1,55238	18	(39)-(13)	0,0000673	+
2	(30)-(31)	0,0006443	+	19	(13)-(14)	0,0001586	+
3	(30)-(1)	0,0005206	+	20	(15)-(16)	0,0001524	+
4	(31)-(32)	0,0002369	+	21	(16)-(17)	0,0001314	-104,57960
5	(31)-(25)	0,0001347	-4,73260	22	(16)-(19)	0,0002927	*
6	(32)-(33)	0,0002611	+	23	(16)-(21)	0,0002230	+
7	(32)-(18)	0,0002028	+	24	(16)-(24)	0,0000762	+
8	(33)-(34)	0,0001576	+	25	(17)-(18)	0,0001250	+
9	(33)-(14)	0,0001605	+	26	(17)-(27)	0,0002836	+
10	(34)-(35)	0,0000404	+	27	(21)-(22)	0,0002279	+
11	(34)-(37)	0,0001546	+	28	(22)-(23)	0,0001601	+
12	(35)-(36)	0,0001226	+	29	(23)-(24)	0,0004274	+
13	(35)-(11)	0,0001283	+	30	(25)-(26)	0,0004894	+
14	(36)-(37)	0,0000720	+	31	(26)-(27)	0,0002256	+
15	(37)-(38)	0,0004468	+	32	(26)-(28)	0,0007312	+
16	(38)-(1)	0,0006586	+	33	(26)-(29)	0,0009643	+
17	(39)-(11)	0,0000673	+	34	(28)-(29)	0,0002332	+
1,2 λ							
Estado	Circuito em falha	Probabilidade	Margem (MW.rd ou MW)	Estado	Circuito em falha	Probabilidade	Margem (MW.rd ou MW)
1	-	0,9900855	1,55238	18	(39)-(13)	0,0000740	+
2	(30)-(31)	0,0007081	+	19	(13)-(14)	0,0001743	+
3	(30)-(1)	0,0005722	+	20	(15)-(16)	0,0001675	+
4	(31)-(32)	0,0002604	+	21	(16)-(17)	0,0001444	-104,57960
5	(31)-(25)	0,0001481	-4,73260	22	(16)-(19)	0,0003217	*
6	(32)-(33)	0,0002869	+	23	(16)-(21)	0,0002451	+
7	(32)-(18)	0,0002228	+	24	(16)-(24)	0,0000837	+
8	(33)-(34)	0,0001732	+	25	(17)-(18)	0,0001374	+
9	(33)-(14)	0,0001764	+	26	(17)-(27)	0,0003117	+
10	(34)-(35)	0,0000444	+	27	(21)-(22)	0,0002504	+
11	(34)-(37)	0,0001699	+	28	(22)-(23)	0,0001759	+
12	(35)-(36)	0,0001347	+	29	(23)-(24)	0,0004697	+
13	(35)-(11)	0,0001410	+	30	(25)-(26)	0,0005379	+
14	(36)-(37)	0,0000791	+	31	(26)-(27)	0,0002480	+
15	(37)-(38)	0,0004910	+	32	(26)-(28)	0,0008036	+
16	(38)-(1)	0,0007238	+	33	(26)-(29)	0,0010597	+
17	(39)-(11)	0,0000740	+	34	(28)-(29)	0,0002562	+

Em relação aos valores de referência (λ), são calculados os valores a $(0,8 \lambda)$ e $(1,2 \lambda)$ (vide Tabela VI.41). Nessa tabela se pode observar que, à medida que a taxa de falha varia do menor para o maior valor, diminui a probabilidade de operação em rede completa (n) ao mesmo tempo em que aumentam as probabilidades de ocorrências das redes em falha ($n-1$).

A Tabela VI.47 apresenta a comparação dos índices de segurança para as variações de taxa de falha consideradas. A tabela mostra o comportamento coerente dos índices com relação às variações nas taxas de falhas dos circuitos. Verifica-se que a probabilidade de ocorrência instabilidade (POI) aumenta com o aumento das taxas de falhas, o mesmo ocorrendo com relação à probabilidade de margem insuficiente (PMI) e com as expectâncias de margem negativa (EMN) e índices de estabilidade aparente (IEA).

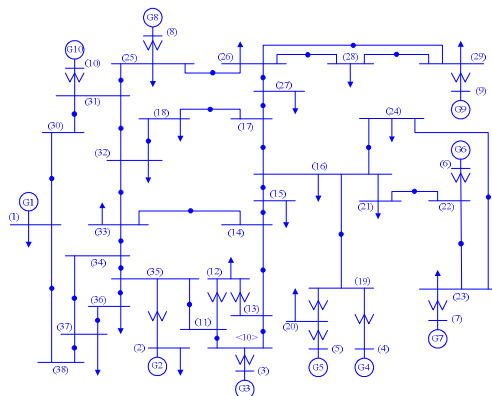
**Tabela VI.47 – Comparação dos índices de segurança
- sensibilidade com relação às taxas de falha -**

Índices de Segurança (globais)		
$0,8\lambda$	λ	$1,2\lambda$
<i>POI</i> - Probabilidade de instabilidade		
0,00021	0,00027	0,00029
<i>POE</i> - Probabilidade de estabilidade		
0,99953	0,99940	0,99934
<i>PMI</i> - Probabilidade de margem insuficiente		
0,00021	0,00027	0,00029
<i>EMN</i> - Expectância de margem negativa MW.rd		
0,00000	0,00000	0,00000
MW		
-0,01152	-0,01438	-0,01580
<i>IEA</i> - Índice de estabilidade aparente		
-0,01152	-0,01438	-0,01580

Caso 17:

Incertezas:	loais (posições nas linhas de transmissão) de defeito
Tipos de defeito:	3F (determinístico)
Ocorrência de defeitos	
Elementos:	todos os circuitos (equiprovável)
Locais:	M $p = 1,0$
Duração dos defeitos:	80 ms
Impedância dos defeitos:	vide Tabela VI.35
Atuação do religamento:	com religamento
Topologias:	n
Carga total:	vide Tabela VI.45
Despachos de geração:	vide Tabela VI.45

Situação de estudo:



O Caso 17 (hipóteses idênticas ao Caso 16) apresenta um exemplo de aplicação do programa ASTP como auxiliar à tomada de decisão. Para este exemplo serão estudadas duas situações, uma envolvendo a escolha de um reforço topológico e outra uma decisão quanto à realização de um desligamento programado no sistema.

Caso 17(a): *Reforço topológico (vide Tabela VI.45, carga pesada)*

Estuda-se, neste caso, a melhor escolha de reforço topológico para o sistema tendo como figura de mérito o aumento do nível de segurança do sistema com base no

comportamento dos índices de segurança probabilística, *POI* e *IEA*, obtidos para cada uma das opções de reforço. A escolha de reforço deverá recair sobre um dos seguintes circuitos:

- 1: [4] - de (25) para (31)
- 2: [22] - de (16) para (19)
- 3: [27] - de (21) para (22)
- 4: [33] - de (26) para (29)

No cálculo das probabilidades são considerados agora 35 circuitos.

A Figura VI.18 apresenta graficamente o resultado dos cálculos dos índices de segurança *POI* e *IEA* para os reforços concorrentes. O reforço 1 – duplicação do circuito [4] – e o reforço 2 – duplicação do circuito [22] – apresentam *POI* idênticos e menores do que aquelas correspondentes aos reforços 3 e 4. O reforço 2 apresenta um *IEA* menos negativo do que a do reforço 1 e também do que os dos demais reforços. Levando em conta essas comparações, a decisão sobre a melhor alternativa de reforço recairá sobre a duplicação do circuito [22].

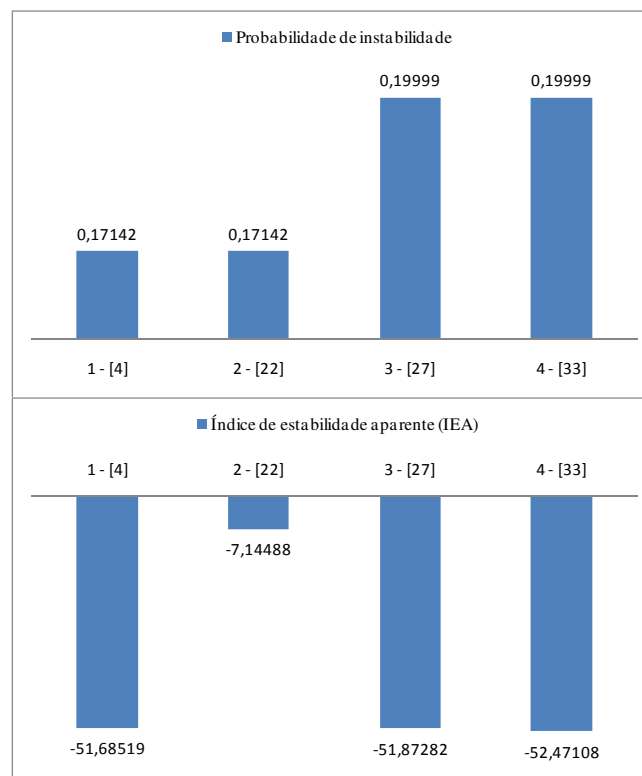


Figura VI.18 – Caso 17(a): Índices de segurança para os reforços concorrentes.

Caso 17(b): Desligamento programado (vide Tabela VI.45 carga leve).

Estuda-se, neste caso, a melhor escolha para a realização de um desligamento programado entre dois concorrentes, tendo como figura de mérito o menor impacto sobre o nível de segurança do sistema, com base no comportamento dos índices de segurança probabilística, *POI* e *IEA*, obtidos para cada uma das opções de desligamento. A escolha de realização do desligamento deverá recair sobre um dos seguintes circuitos:

1: [5] - de (32) para (33)

2: [7] - de (33) para (34)

O cálculo das probabilidades considera agora 33 circuitos.

A Figura VI.19 apresenta graficamente o resultado dos cálculos dos índices de segurança *POI*, e *IEA* para os desligamentos concorrentes.

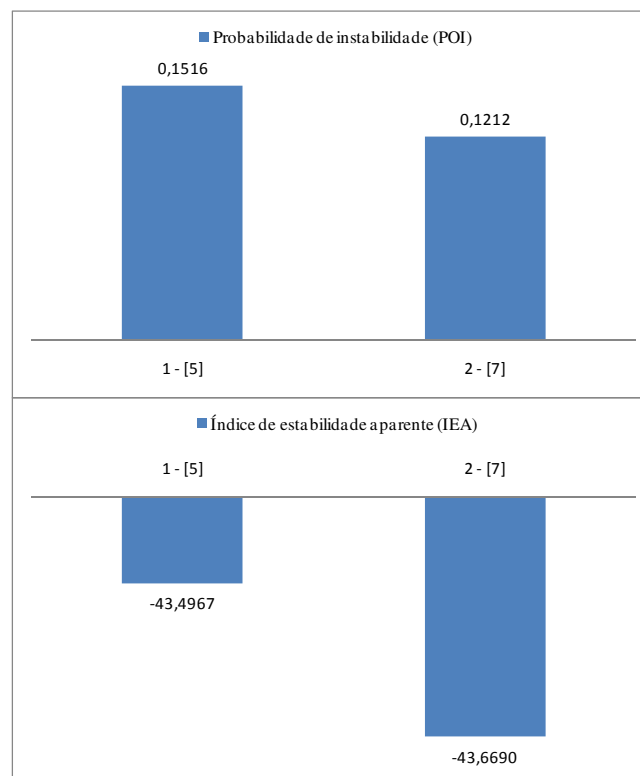


Figura VI.19 – Caso 17(b): Índices de segurança para os desligamentos concorrentes.

O desligamento 1 (circuito [5]) apresenta *POI* maior do que a do desligamento 2 (circuito [7]). Todavia, o desligamento do circuito [5] apresenta *IEA* menos negativo. Neste caso, embora a menor probabilidade de instabilidade para o sistema esteja associada ao desligamento do circuito [7], o risco de segurança do sistema é menor quando do desligamento do circuito [5] nas condições estudadas. Assim, a decisão sobre a escolha de que desligamento realizar recairia sobre o circuito [5].

VI.7 Desempenho Computacional

Nesta seção é apresentada uma breve análise sobre o desempenho computacional do programa ASTP, utilizado na geração dos resultados apresentados ao longo desta Tese, especialmente neste capítulo.

Para a avaliação do desempenho computacional do protótipo foram utilizadas simulações referentes ao sistema-teste de 39 barras correspondentes aos Casos 14(b) e 15. A Tabela VI.48 apresenta os tempos e percentuais de uso da CPU¹⁹ para as diferentes etapas de processamento contidas no programa ASTP, tendo como base as simulações realizadas para os casos citados.

Tabela VI.48 – Ocupação da CPU (base Casos 14(b) e 15)

Etapa de processamento	Ocupação da CPU			
	Caso 14(a)		Caso 15	
	segundos	%	segundos	%
Leitura de dados	0,125000	0,08	0,171875	0,12
Topologias	111,062500	71,05	-	0,00
Distúrbios	-	0,00	108,156250	72,92
Contabilização	1,450000	0,94	1,562500	1,05
Administrativo	43,675500	27,93	38,43738	25,91
Total	156,313000	100	148,328000	100

¹⁹ A configuração computacional utilizada nessas simulações compunha-se de uma CPU Intel Centrino de 1995 MHz com 2048 MBytes de memória RAM.

VI.8 Sumário

Este capítulo apresentou diversos resultados de estudos realizados com o programa ASTP, que implementa uma nova metodologia para tratamento desacoplado de incertezas com base em avaliações do desempenho dinâmico do sistema. A estrutura de tratamento de incertezas foi combinada com o método SIME para construção de um modelo apropriado para a avaliação da segurança de sistemas de potência em regime transitório considerando incertezas.

Os exemplos apresentados visaram demonstrar, passo a passo, como o arcabouço de tratamento de incertezas proposto nesta Tese pode ser aplicado às avaliações de segurança transitória. Foram também destacadas características do método da máquina equivalente (SIME) que permitem que as avaliações de estabilidade sejam realizadas através de índices numéricos (margens, tempos de retorno, tempos para a instabilidade) de forma objetiva e mensurável, tornando possível, em conjunção com a representação de incertezas propiciada pelo programa ASTP, o cálculo de índices de risco associados ao desempenho dinâmico do sistema de potência.

A utilização da metodologia proposta tornou possível ponderar as diferentes conseqüências dos distúrbios por suas probabilidades, produzindo índices de segurança capazes de dar ao analista uma base consistente de comparação e de decisão entre as diferentes situações de *cenários* e *distúrbios* que se apresentam em um sistema elétrico de potência.

Os estudos foram compostos de diversas aplicações do modelo a sistemas de 4, 9 e 39 barras, demonstrando diversas possibilidades de análise.

Foi demonstrada a flexibilidade da metodologia, bem como o potencial de sua aplicação a sistemas reais, com a possibilidade de representação detalhada da rede elétrica, envolvendo dispositivos de controle, tais como, os reguladores automáticos de tensão e medidas corretivas.

* * *

Capítulo VII Conclusões

VII.1 Introdução

Sabe-se que os denominados estudos dinâmicos tradicionais, sob enfoque estritamente determinístico, encontram-se suficientemente maduros. Neles verifica-se que é prática corriqueira a simulação de situações visando a reprodução de eventos a priori selecionados, tais como a ocorrência de determinados tipos de defeitos, em locais especificados, com durações conhecidas, bem como as condições iniciais de topologia, carga e despachos.

Não obstante, sabe-se também que tanto a ocorrência dos distúrbios quanto a caracterização das condições iniciais dos cenários envolvendo topologias, carga e intercâmbios admitem uma melhor caracterização como variáveis aleatórias, sujeitas a um tratamento probabilístico clássico.

Evidencia-se então que o enfoque tradicional ignora as incertezas inerentes às condições operativas dos sistemas de potência e gera a proposição de critérios e procedimentos sem levar em conta o conceito de risco, privilegiando a adoção de soluções de natureza conservativa.

Ao menos duas críticas podem ser lançadas à prática vigente, quais sejam: *(i)* embora o procedimento usado seja embasado no conceito de prevenção do “*pior caso*”, não se pode garantidamente afirmar que tal ocorra, dado o caráter eminentemente combinatorial de possibilidades que deveriam ser analisadas, pois o processo adotado permite que situações potencialmente perigosas sejam ignoradas; *(ii)* os custos resultantes associados à operação e planejamento do sistema não são otimizados. Em resumo, a técnica corrente não necessariamente gera a melhor avaliação a cerca do nível

de segurança dinâmica para o sistema, como também pode exigir a implantação de esquemas e ajustes de custo elevado.

A composição da análise dinâmica clássica do sistema de potência com o tratamento probabilístico de fatores relevantes, tais como as incertezas associadas às ocorrências de tipos, locais e durações dos distúrbios, bem como as incertezas relacionadas às ocorrências de topologias, níveis de carga, perfis de despachos, desempenho da proteção e outros aspectos de interesse, *propicia então uma evolução em relação aos procedimentos hoje usados*. Esse tipo de tratamento constitui a denominada *análise probabilística de segurança*.

Isto posto, seguem as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento da presente pesquisa.

VII.2 Principais Contribuições

A seguir, apresentam-se as principais medidas adotadas para a consecução dos objetivos propostos nesta Tese, constituindo-se em reais contribuições para os estudos de segurança de sistemas de potência em regime transitório considerando incertezas.

Novos Indicadores e Aplicações Práticas

Um novo indicador de risco denominado *índice de estabilidade aparente (IEA)* foi proposto e testado com sucesso em um conjunto de variados experimentos. Esse indicador se revelou conveniente como *métrica do modo de falha de segurança* sob a influência de incertezas. Exemplos da aplicação prática do índice foram dados no Capítulo VI em casos de *avaliação do ponto de operação* (Caso 16(a)), de decisão sobre a *escolha de um reforço topológico* (Caso 17(a)) e de realização de um *desligamento programado* (Caso 17(b)).

Tratamento de Incertezas de Curta Duração

A inexistência de estatísticas representativas da cronologia típica de distúrbios do tipo curto-circuito de diferentes naturezas (*e.g.* trifásico, monofásico, etc), necessária para viabilizar o cálculo de intensidades de transição entre estados, foi *contornada adotando-se o artifício do condicionamento à ocorrência de um distúrbio*, ou seja, operou-se uma espécie de desacoplamento entre incertezas associadas a cenários (topologias, cargas, intercâmbios) e os defeitos. Embora esse artifício tenha impacto direto nos valores numéricos obtidos, seu emprego não altera o caráter essencialmente relativo dos indicadores gerados. O Capítulo III apresentou o arcabouço conceitual que fundamenta o tratamento proposto para as incertezas associadas aos cenários aos distúrbios, respaldando e viabilizando as avaliações de segurança transitória probabilística apresentadas nesta Tese.

Seleção e Combinação de Incertezas de Longa Duração

Os procedimentos tradicionais de análise transitória de sistemas de potência usualmente especificam as condições iniciais do sistema, para a rede completa, submetida a um regime de carga (*e.g.* carga pesada) determinado. Nessas condições é usual a aplicação de distúrbios do tipo curto-circuito (*e.g.* trifásico franco) com duração determinada, em alguns locais previamente escolhidos pelo analista e com o respectivo ajuste da proteção. Esse tipo de especificação traz intrinsecamente a tipologia de incertezas que devem ser tratadas. Sendo assim, o conjunto mínimo indispensável de incertezas de longa duração que devem ser consideradas no âmbito da análise de segurança transitória contempla: a topologia da rede, o patamar de carga, e o despacho indiretamente traduzido pelo intercâmbio entre áreas. Esse conjunto deve ser combinado com o tipo, local e duração dos distúrbios e o desempenho da proteção. Assim sendo, a metodologia aqui desenvolvida tratou todos os tipos de incertezas relevantes de forma inédita, por modelagem estocástica simplificada, porém concatenada. No Capítulo III foi abordada e proposta uma *delimitação dos tipos de incertezas que devem ser representadas* nas avaliações de segurança transitória. A estrutura de representação estocástica daí

resultante viabilizou o tratamento computacional da segurança transitória com a consideração de incertezas proposto nesta Tese.

Modelagem Dinâmica Expedita sem Perda de Efeitos de Controle

Na simulação dinâmica propriamente dita explorou-se a metodologia SIME, sucintamente descrita no Capítulo IV. Essa solução mostrou-se factível, pois a mesma além de permitir a modelagem de controles e o impacto de medidas corretivas, *gera resultados em tempos computacionais compatíveis para aplicações em planejamento da expansão e planejamento da operação*. Aspectos importantes para o tratamento e diagnóstico da condição dinâmica do sistema, como representação da máquina síncrona por modelo detalhado, representação de controles, detecção de instabilidade em *backswing*, identificação e separação de geradores em grupos crítico e não-crítico, detecção do cruzamento da superfície limite de energia potencial, cálculo de margens de estabilidade, religamento rápido de elementos defeituosos e aplicação de defeitos quilométricos foram considerados e implementados com sucesso.

Protótipo Computacional

Construiu-se um protótipo computacional, testado e validado sob uma bateria de experimentos concebidos no Capítulo VI. Esse protótipo permite manipulação de grande volume de dados de forma concatenada, tratando adequadamente as situações associadas a problemas de não convergência, de armazenamento de resultados intermediários e automatização da avaliação dos estados probabilísticos. *O protótipo, embora não otimizado, demonstrou razoável capacidade operacional, gerando resultados coerentes e evidências de utilidade prática (vide Anexos B, C).*

VII.3 Sugestões para Aperfeiçoamentos

No Capítulo I mencionou-se que a análise de confiabilidade compreende três etapas fundamentais, quais sejam: *monitoração, diagnose e gestão*. A proposta apresentada

nesta Tese abrange tão-somente o aspecto de *monitoração*, marcada por traços do binômio diagnose/gestão. Sendo assim, os aperfeiçoamentos relacionados à diagnose e gestão não serão aqui comentados em profundidade, já que dependem de ampla experiência advinda da etapa de monitoração. Mesmo assim, algumas possibilidades de uso do protótipo desenvolvido para fins de diagnose e gestão foram esboçados no *Caso 16* do Capítulo VI.

No que tange especificamente aos possíveis aperfeiçoamentos relacionados ao tratamento do modo de falha de segurança sob a influência de incertezas, os desenvolvimentos vislumbrados enquadram-se nas seguintes categorias:

Novos Desenvolvimentos Conceituais

- Integração da proposta aqui desenvolvida com a análise probabilística de adequação [31,40];
- Integração da proposta aqui desenvolvida com o modo de falha de segurança tratado sob o enfoque do colapso de tensão, consoante *Rodrigues* [112];
- Desenvolvimento de novas métricas associadas a grandezas diversas tais como amortecimento, magnitudes de tensão, fluxos de potência, correntes, expectâncias de corte seletivo de geração, indicadores econômicos, etc;
- Investigação do impacto de incertezas modeladas por variáveis difusas e intervalares;
- Investigação do impacto de incertezas paramétricas e do sistema de proteção.

Novos Desenvolvimentos para a Base de Dados Estatísticos

- Investigação da qualidade de resultados obtidos via uso de intensidades de transição corretamente calculadas;

- Levantamento estatístico de falhas catastróficas e falhas nodais, consoante *Arentz* [113].

Novos Desenvolvimentos de Modelos e Algoritmos

- Inclusão de modelos de elos CC, equipamentos de controle não linear (“FACTS”), modelos avançados da carga;
- Integração da proposta aqui desenvolvida com o ambiente de análise de pequenas perturbações, sob a influência de incertezas, consoante *Takahata* [10];
- Aperfeiçoamento da representação de incertezas relacionadas às durações dos distúrbios;
- Automatização do tratamento concatenado das probabilidades associadas aos estados de cenários (topologia + patamares de carga + intercâmbios);
- Investigação das medidas corretivas e novas funções objetivo sugeridas na Tabela III.4;
- Modelagem de falhas em subestações;
- Consideração de modelos mais rigorosos para a representação da dinâmica dos geradores.

Novas Técnicas de Simulação Computacional e Visualização de Resultados

- Aprofundamento da aplicação do método SIME, explorando suas características de cálculo de margens de estabilidade e identificação de máquinas críticas para implementação de análises de sensibilidade dinâmicas e aplicação de estratégias de controle, incluindo novas medidas corretivas e possibilidades de otimização do desempenho dinâmico viabilizadas pelo cálculo de índices de segurança dinâmica.

- Exploração da representação de controles e esquemas de proteção, viabilizada por técnicas de computação de alto desempenho, auxiliadas por recursos de visualização e mineração de dados;
- Emprego de técnicas de simulação Monte Carlo visando reprodução de seqüências cronológicas temporais e distribuições probabilísticas não convencionais.

Consolidação de Critérios de Decisão Baseados em Risco

- Identificação dos níveis de risco de segurança palatáveis ao operador do sistema vis-à-vis os custos incorridos;
- Identificação do ponto de operação ótimo estocástico, sob o ponto de vista da segurança, consoante *Silva Neto* [114];
- Acúmulo de experiência prática com base em resultados advindos dos sistemas-teste propostos em *Alves* [115].

“True humility becomes the source of our wisdom; the more a man knows, the more he realizes how little he knows, and the most wise is the most humble.”
(N. Sri Ram)

* * *

Referências

- [1] EPRI. *A Probabilistic Approach To Stability Analysis – Volume 1: Mathematical Models, Computing Methods, And Results*. **EPRI Report EL-2797, RP 1764-4**, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1983.
- [2] ONS. *Diretrizes E Critérios Para Estudos Elétricos*. **Procedimentos de Rede, Submódulo 23.3**, Resolução Normativa nº 372/09, Brasília, 5 de agosto de 2009, (<http://www.ons.org.br>).
- [3] CIGRE TF 38.03.12 Report. *Power System Security Assessment: A Position Paper*, **ELECTRA**, no. 175, Dec. 1997.
- [4] M. Th. Schilling, A.M. Leite da Silva, R. Billinton, M. A. El-Kady. *Bibliography On Power System Probabilistic Analysis (1962-1988)*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 5, pp. 1-11, 1990.
- [5] W. Li. **Risk Assessment Of Power Systems**. Piscataway, IEEE Press, 2005.
- [6] G. J. Anders. **Probabilistic Concepts in Electric Power Systems**, chapter 12, New York, USA, John Wiley & Sons, 1990.
- [7] M. Th. Schilling, R. Billinton, M. Groetaers dos Santos. *Bibliography On Power Systems Probabilistic Security Analysis 1968-2008*. **International Journal of Emerging Electric Power Systems**, Vol. 10, Iss. 3, Article 1, 2009.
- [8] IEEE Working Group Report. *Reliability Indices For Use In Bulk Power System Supply Adequacy Evaluation*. **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-97, pp. 1097–1103, Jul./Aug. 1978.
- [9] A. Y. Takahata, G. N. Taranto, M. Th. Schilling. *Análise Dinâmica De Sistemas De Potência Sob Pequenas Perturbações Considerando Incertezas*. **X SEPOPE**, Florianópolis, Brasil, 2006.

- [10] A. Y. Takahata. *Segurança De Sistemas De Potência Sob Pequenas Perturbações Considerando Incertezas*. Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, Maio 2008.
- [11] B. R. Light. *Transient Stability Aspects Of Power System Reliability (CEGB System)*. **International Conference on Reliability of Power Supply Systems**, IEE, Conference Publication no. 148, London, UK, Feb. 1977.
- [12] R. Billinton, P. R. S. Kuruganty. *A Probabilistic Index For Transient Stability*. **Proceedings of IEEE PES Winter Meeting**, A 78 231-3, New York, NY, Jan. 29-Feb. 3, 1978.
- [13] R. Billinton, P. R. S. Kuruganty. *A Probabilistic Approach To The Transient Stability Assessment Of A Power System*. **Canadian Communications & Power Conference**, Cat. No. 78 CH 1373-0 REG 7, Montréal, Canada, Oct. 18-20, 1978.
- [14] R. Billinton, P. R. S. Kuruganty. *Probabilistic Considerations In Transient Stability Assessment*. **Canadian Electric Engineering Journal**, Vol. 4, no. 2, pp. 26-30, 1979.
- [15] R. Billinton, P. R. S. Kuruganty. *Inclusion Of Probabilistic Considerations In Transient Stability Analysis*. **Transactions Engineering and Operating Division Canadian Electrical Association**, 79-SP-154, Vol. 18, part 3, March 1979.
- [16] R. Billinton, P. R. S. Kuruganty. *Probabilistic Evaluation Of Transient Stability In A Multimachine Power System*. **Proceedings of IEE**, Vol. 126, no. 4, pp. 321-326, Apr. 1979.
- [17] R. Billinton, P. R. S. Kuruganty. *Transient Security Of A Power System – A Probabilistic Approach*. **Proceedings of the Symposium on Computer Applications in Large Scale Power Systems**, Vol. 3, pp. 123-128, New Delhi, India, Aug. 16-19, 1979.
- [18] P. R. S. Kuruganty, R. Billinton. *Protection System Modeling In A Probabilistic Assessment Of Transient Stability*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-100, no. 5, pp. 2163-2170, May 1981.

- [19] R. Billinton, P. R. S. Kuruganty. *Probabilistic Assessment Of Transient Stability In A Practical Multimachine System*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-100, no. 7, pp. 3634-3641, Jul. 1981.
- [20] R. Billinton, P. R. S. Kuruganty. *Considerations In Stochastic Stability Assessment*. **Power System Planning & Operation Section - Canadian Electrical Association**, 82-SP-156, March 1982.
- [21] R. C. Burchett, G. T. Heydt. *A Generalized Method For Stochastic Analysis Of The Dynamic Stability Of Electric Power Systems*. **Proceedings of IEEE PES Winter Meeting**, A 78 528-2, Los Angeles, CA, July 16-21, 1978.
- [22] K. Loparo, G. Blankenship. *A Probabilistic Mechanism For Dynamic Instabilities In Electric Power Systems*. **Proceedings of IEEE PES Winter Meeting**, A 79 053-0, New York, NY, Feb. 4-9, 1979.
- [23] R. Doraiswami, C. R. Borenstein, C. C. Brasil Camargo, C. G. B. Marques. *Uma Avaliação Probabilística Da Segurança Estática, Transitória E Dinâmica Em Sistemas De Grande Porte*. **VI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Grupo VII, Balneário Camboriú, SC, Brasil, 1981.
- [24] P. M. Anderson, A. Bose. *A Probabilistic Approach To Power System Stability Analysis*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-102, no. 8, pp. 2430-2439, Aug. 1983.
- [25] C. H. Grigg, D. T. Tsai, W. D. Smith. *Operating Risk Evaluation For Bulk Power Systems*. **Proceedings of International Electrical, Electronics Conference**, Vol. 2, paper no. 83145, Toronto, Sep. 1983.
- [26] P. M. Anderson. *Reliability Modeling Of Protective Systems*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-103, no. 8, pp. 2430-2439, Aug. 1984.
- [27] F. F. Wu, Y. Tsai, Y. Yu. *Probabilistic Steady-State And Dynamic Security Assessment*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 3, no. 1, pp. 1-9, Feb. 1988.

- [28] Y. Hsu, C. Chang. *Probabilistic Transient Stability Studies Using The Conditional Probability*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 3, no. 4, pp. 1565-1572, Nov. 1988.
- [29] B. Porretta, D. L. Kiguel, G. A. Hamoud, E. G. Neudorf. *A Comprehensive Approach For Adequacy And Security Evaluation Of Bulk Power Systems*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 6, no. 2, pp. 433-441, May. 1991.
- [30] R. Billinton, E. Khan. *A Security Based Approach To Composite Power System Reliability Evaluation*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 7, no. 1, pp. 65-72, Feb. 1992.
- [31] A.M. Leite da Silva, J. Endrenyi, L. Wang. *Integrated Treatment Of Adequacy And Security In Bulk Power System Reliability Evaluations*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 8, no. 1, pp. 275-285, Feb. 1993.
- [32] E. Chiodo, F. Gagliardi, D. Lauria. *Probabilistic Approach To Transient Stability Evaluation*. **IEE Proc.-Ger., Transm. Distrib.**, Vol. 141, No. 5, September 1994.
- [33] E. Chiodo, D. Lauria. *Transient Stability Evaluation Of Multimachine Power Systems: A Probabilistic Approach Based Upon The Extended Equal Area Criterion*. **IEE Proc.-Ger., Transm. Distrib.**, Vol. 141, No. 6, November 1994.
- [34] R. Billinton, S. Aboreshaid. *A Basic Framework For Composite Power System Security Evaluation*. **IEEE WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing. Conference Proceedings**, Vol. 1, No. 6, pp. 151-156, 15-16 May 1995.
- [35] R. Billinton, S. Aboreshaid. *Stochastic Modelling Of High-Speed Reclosing In Probabilistic Transient Stability Studies*. **IEE Proc.-Ger., Transm. Distrib.**, Vol. 142, No. 4, July 1995.
- [36] R. Billinton, S. Aboreshaid. *Security Evaluation Of Composite Power Systems*. **IEE Proc.-Ger., Transm. Distrib.**, Vol. 142, No. 5, September 1995.

- [37] M. Th. Schilling, M. B. Do Coutto Filho, A. M. Leite da Silva, R. Billinton, R. N. Allan. *An Integrated Approach To Power System Reliability Assessment*. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Vol. 17, pp. 381-390, 1995.
- [38] S. Aboreshaid, R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad. *Probabilistic Transient Stability Studies Using The Method Of Bisection*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No. 4, November 1996.
- [39] J. D. McCalley, A. A. Fouad, B. L. Agrawal, R. G. Farmer. *A Risk-Based Security Index For Determining Operating Limits In Stability-Limited Electric Power Systems*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 12, No. 3, August 1997.
- [40] A.M. Rei. *Confiabilidade de Sistemas de Geração e Transmissão Considerando Aspectos Estáticos e Dinâmicos*. **Tese D.Sc., PUC/RJ**, Rio de Janeiro, Novembro, 1997.
- [41] A. A. Irizarry-Rivera, J. D. McCalley, V. Vittal. *Computing Probability Of Instability For Stability Constrained Electric Power Systems*. **Electric Power Systems Research**, 42, pp. 135-143, 1997.
- [42] S. Aboreshaid, R. Billinton. *A Framework For Incorporating Voltage And Transient Stability Considerations In Well-Being Evaluation Of Composite Power Systems*. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Vol. 1, pp. 219-224, 18-22 Jul. 1999.
- [43] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad. *A Basic Framework For Generating System Operating Health Analysis*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, No. 3, August 1994.
- [44] V. Vittal, J. D. McCalley, V. Van Acker, W. Fu, N. Abi-Samra. *Transient Instability Risk Assessment*. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Vol. 1, pp. 206-211, 18-22 Jul. 1999.
- [45] P.F. Albrecht et alii. *IEEE Reliability Test System*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-98, No.6, Nov./Dec. 1979.

- [46] J. D. McCalley, V. Vittal, N. Abi-Samra. *An Overview Of Risk Based Security Assessment*. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Vol. 1, pp. 173-178, 18-22 Jul. 1999.
- [47] J. A. Momoh, M. Elfayoumy, B. Mittelstadt, Y. V. Makarov. *Probabilistic Angle Stability Index*. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Vol. 1, pp. 212-218, 18-22 Jul. 1999.
- [48] A. M. Leite da Silva, J. L. Jardim, A. M. Rei, J. C. O. Mello. *Dynamic Security Risk Assessment*. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Vol. 1, pp. 198-205, 18-22 Jul. 1999.
- [49] J. L. A Jardim. *Advances in Power System Transient Stability Assessment Using Transient Energy Function Methods*. **Ph.D. Thesis**, Imperial College, London, 1994.
- [50] EPRI. *On-Line Risk-Based Security Assessment*. **EPRI Report 1000411**, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 2000.
- [51] L. S. Low, L. Goel. *Incorporating Deterministic Criteria In The Probabilistic Framework For Composite Generation And Transmission Systems*. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Vol. 4, pp. 2069-2074, 16-20 Jul. 2000.
- [52] I. A. Hiskens, M. A. Pai, T. B. Nguyen. *Bounding Uncertainty In Power System Dynamic Simulations*. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, Vol. 2, pp. 1533-1537, 23-27 Jan. 2000.
- [53] E. Vaahedi, W. Li, T. Chia and H. Dommel. *Large Scale Probabilistic Transient Stability Assessment Using B.C. Hydro's On-Line Tool*. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 15, no. 2, pp. 661-667, May 2000.
- [54] Y. Mansour, E. Vaahedi; A. Y. Chang, B. R. Corns, B. W. Garrett, K. Demaree. *BC Hydro's On-Line Transient Stability Assessment (TSA) Model Development, Analysis And Post-Processing*. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 10, no. 1, pp. 241-253, Feb. 1995.

- [55] E. Vaahedi, Y. Mansour, A . Y. Chang, B. R. Corns, E. K. Tse. *Enhanced "Second Kick" Methods For On-Line Dynamic Security Assessment*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996.
- [56] R. Allan, R. Billinton. *Probabilistic Assessment Of Power Systems*. **Proceedings of the IEEE**, Vol. 88, No. 2, Feb. 2000.
- [57] A. M. Rei, A. M. Leite da Silva, J. L. Jardim, J. C. O. Mello. *Static And Dynamic Aspects In Bulk Power System Reliability Evaluations*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 15, No. 1, pp. 189-195, Feb. 2000.
- [58] C. M. Machado Ferreira, J. A. Dias Pinto, F. P. Maciel Barbosa. *Dynamic Security Analysis Of An Electric Power System Using A Combined Monte Carlo-Hybrid Transient Stability Approach*. **2001 IEEE Porto Power Tech Conference**, Porto, Portugal, 10-13 Sep., 2001.
- [59] V. A. Levi, J. M. Nahman, D. P. Nedic. *Security Modeling For Power System Reliability Evaluation*. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 16, No. 1, Feb. 2001.
- [60] D. Ming; L. Sheng-hu. *Research On Integrated Evaluation Framework Of Probabilistic Adequacy And Stability Of Composite Power Systems*. **2002 PowerCon International Conference on Power System Technology**, vol. 4, pp. 2067-2071, 13-17 Oct. 2002.
- [61] J. M. F. Ferreira. *Avaliação Da Confiabilidade Composta Considerando A Análise Da Estabilidade Transitória*. **Proposta de Tese de Doutorado**, UFSC, Abril, 2002.
- [62] G. M. Huang; Y. Li. *Power System Reliability Indices To Measure Impacts Caused By Transient Stability Crises*. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, Vol. 2, pp. 766-771, 27-31 Jan. 2002.
- [63] H. Kim, C. Singh. *Probabilistic Security Analysis Using SOM And Monte Carlo Simulation*. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, Vol. 2, pp. 755-760, 27-31 Jan. 2002.

- [64] F. Allella, E. Chiodo, D. Lauria. *Transient Stability Probability Assessment And Statistical Estimation*. **Electric Power Systems Research**, 67, pp. 21-33, 2003.
- [65] A. Berizzi, C. Bovo, E. Fumagalli, E. A. Grimaldi. *Security Assessment In Operation: A Comparative Study Of Probabilistic Approaches*. **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**, Vol. 1, 6 pp., 23-26 Jun. 2003.
- [66] M. Ni, J. D. McCalley, V. Vittal, S. Greene, Chee-Wooi Ten, V. S. Ganugula, T. Tayyib. *Software Implementation Of Online Risk-Based Security Assessment*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 18, No. 3, pp. 1165-1172, Aug. 2003.
- [67] R. Adapa. *Framework For Stochastic Reliability Of Bulk Power System With Stability Constraints*. **EPRI & Bonneville Power Administration 1009506**, Palo Alto, CA, Vancouver, WA, 2004.
- [68] N. Amjady. *A Framework Of Reliability Assessment With Consideration Effect Of Transient And Voltage Stabilities*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 19, No. 2, pp. 1005-1014, May 2004.
- [69] D. S. Kirschen, D. Jayaweera, D. P. Nedic, R. N. Allan. *A Probabilistic Indicator Of System Stress*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 19, No. 3, pp. 1650-1657, Aug. 2004.
- [70] J. R. Hockenberry, B. C. Lesieutre. *Evaluation Of Uncertainty In Dynamic Simulations Of Power System Models: The Probabilistic Collocation Method*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 19, No. 3, pp. 1483-1491, Aug. 2004.
- [71] H. Kim, C. Singh. *Power System Probabilistic Security Assessment Using Bayes Classifier*. **Electric Power Systems Research**, 74, pp. 157-165, 2005.
- [72] X. Yu, C. Singh. *Probabilistic Analysis Of Loadability In Composite Power Systems Considering Security Constraints*. **2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition PSCE '06**, pp. 832-838, Oct. 29-Nov. 1 2006.

- [73] Song Y., He H., Zhang D., Guo J.. *Probabilistic Security Evaluation Of Bulk Power System Considering Cascading Outages*. **International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006**, pp. 1-6, Oct. 22-26 2006.
- [74] I.A. Hiskens and J. Alseddiqui. *Sensitivity, Approximation, And Uncertainty In Power System Dynamic Simulation*. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 21, no. 4, Nov. 2006.
- [75] M. Anghel, K. A. Werley, A. E. Motter. *Stochastic Model For Power Grid Dynamics*. **Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on System Sciences**, pp. 113-122, Jan. 2007.
- [76] M. Ali, Z. Y. Dong, P. Zhang, X. Li. *Probabilistic Transient Stability Analysis Using Grid Computing Technology*. **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting**, pp. 1-7, 24-28 Jun. 2007.
- [77] M. Th. Schilling, J. C. Stacchini de Souza, M. B. Do Coutto Filho. *Power System Probabilistic Reliability Assessment: Current Procedures In Brazil*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 23, No. 3, pp. 868-876, Aug. 2008.
- [78] E. Allen, A. Keri, A. DeGroff, D. Kosterev and P. Tatro. *Importance Of Dynamic Stability Phenomena In Power System Planning*. **2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting**, Calgary, Canada, 26-30 Jul. 2009.
- [79] A. Pizano-Martinez, C.R. Fuerte-Esquivel and D. Ruiz-Vega. *Global Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow Using The SIME Method*. **2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting**, Calgary, Canada, 26-30 Jul. 2009.
- [80] H.M. Tan, D.J. Vowles and R. Zivanovic. *Implementation Of The Enhanced Binary-SIME Method For Finding Transient Stability Limits With PSS/ETM*. **2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference**, Bucharest, Romania, Jun. 28th–Jul. 2nd 2009.
- [81] U. Kerin, M. Bojan and G. Bizjak. *Performance Evaluation Of Indices For Transient Stability*. **2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference**, Bucharest, Romania, Jun. 28th–Jul. 2nd, 2009.

- [82] A. D. Patton. *Short-Term Reliability Calculation*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. 89, pp. 509-514, Apr. 1970.
- [83] H. J. Bremermann. *Complexity And Transcomputability* in the **Encyclopaedia of Ignorance**, edited by R. Duncan & M. Weston-Smith, Pergemon Press, Oxford, U.K., pp. 167-174, 1977.
- [84] J. Endrényi. **Reliability Modeling In Electric Power Systems**. John Wiley & Sons, New York, 1978.
- [85] Subgrupo de Confiabilidade (SGC), M.Th. Schilling (Editor). *Confiabilidade De Sistemas Elétricos: Índices E Critérios*, **Eletrobrás**, Rio de Janeiro, Dezembro, 1983.
- [86] Subgrupo de Confiabilidade (SGC). *Base De Dados Para Estudos De Confiabilidade Em Planejamento E Operação. II Seminário de Confiabilidade - II SECON*, Light, Rio de Janeiro, 25-26, Abril, 1984.
- [87] D. S. Ramos, M. Th. Schilling, E. J. Robba, H. P. Schmidt. *Uncertainties Emulator: A New Concept For Power Systems Probabilistic Studies*. **Conference Proceedings of IEEE LATINCON'92**, Santiago, Chile, August 17-21, pp. 146-150, 1992.
- [88] ONS/DAT/GAT. *Desempenho Probabilístico De Linhas De Transmissão No Brasil*. **ONS**, Rio de Janeiro, Outubro, 2000.
- [89] E. N. de Oliveira, A. Padilha, C. R. Minussi. *Use Of Transient Stability Indices To Dynamic Security Assessment*. **IEEE Latin America Transactions**, vol. 1, no. 1, October 2003.
- [90] M. Th. Schilling. *Procedimentos E Critérios Para Análise Computacional De Confiabilidade Preditiva Composta Probabilística De Sistemas Elétricos De Potência De Grande Porte*. **RT 06/04, Universidade Federal Fluminense, Instituto de Computação**, Rio de Janeiro, Junho 2004. (<http://www.ic.uff.br/PosGraduacao/RelTecnicos/29.gz>).

- [91] M. Th. Schilling, J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, A. Y. Takahata, M. Groetaers dos Santos. *Confiabilidade Estendida De Sistemas De Potência: Segurança Probabilística*. **X SEPOPE**, Florianópolis, Brasil, 2006.
- [92] M. Groetaers dos Santos, J. L. A. Jardim, F. F. Pazo Blanco, M. Th. Schilling, M. B. Do Coutto Filho, J. C. Stacchini de Souza. *Nova Metodologia Para Análise De Segurança Probabilística De Sistemas De Potência*. **X SEPOPE**, Florianópolis, Brasil, 2006.
- [93] M. Th. Schilling, M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, A. Y. Takahata, M. Groetaers dos Santos, G. N. Taranto. *Subsídios Para A Análise De Desempenho Generalizado De Sistemas De Potência Sob Incertezas*. **XII ERIAC**, Foz do Iguaçu, Brasil, 2007.
- [94] P. M. Anderson, A. A. Fouad. **Power System Control and Stability**. The Iowa State University Press, vol. 1, 1st ed., chapter 2, Iowa, USA, 1977.
- [95] T. Athay, R. Podmore, S. Virmani. *A Practical Method For Direct Analysis Of Transient Stability*. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-98, no.2, pp.573-584, March/April 1979.
- [96] M.A.Pai. **Energy Function Analysis for Power System Stability**. Kluwer Academic Publishers, ISBN: 0792390350, 256 pages, August 1989,
- [97] J. Arrillaga, C. P. Arnold. **Computer Analysis Of Power Systems**. John Wiley & Sons Inc., England, 1991.
- [98] Y. Xue, Th. Van Cutsem, M. Ribbens-Pavella. *A New Decomposition Method And Direct Criterion For Transient Stability Assessment Of Large-Scale Electric Power Systems*. **IMACS/IFAC Symposium on Modeling and Simulation**, Lille, France, pp. 183-186, 1986.
- [99] F.A. Rahimi, G. Shaffer. *Power System Transient Stability Indexes For On-Line Analysis Of 'Worst Case Dynamic Contingencies'*. **IEEE Transactions on Power Systems**, PWRS-2, pp. 660-668, 1987.

- [100] Y. Xue, Th. Van Cutsem, M. Ribbens-Pavella. *A Simple Direct Method For Fast Transient Stability Assessment Of Large Power Systems*. **IEEE Transactions on Power Systems**, PWRS-3, pp. 400-412, 1988.
- [101] Y. Xue. *A New Method For Transient Stability Assessment And Preventive Control Of Power Systems*. **Ph.D. Thesis**, University of Liège, Belgium, December 1988.
- [102] Y. Xue, Th. Van Cutsem, M. Ribbens-Pavella. *Extended Equal Area Criterion Justifications, Generalizations, Applications*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 4, No. 1, February 1989.
- [103] F.A. Rahimi. *Generalized Equal-Area Criterion: A Method For On-Line Transient Stability Analysis*. **Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, Los Angeles, California, pp. 684-688, November 1990.
- [104] Y. Xue, M. Pavella. *Critical Cluster Identification In Transient Stability Studies*. **IEE Proceedings-C**, Vol. 140, no. 6, Nov. 1993.
- [105] Y. Xue, P. Rousseaux, L. Wehenkel, Z. Gao, M. Pavella, M. Trotignon, A. Duchamp, B. Heilbronn. *Dynamic Extended Equal-Area Criterion. Part Ii: Recent Extentions*. **Athens Power Tech**, NTUA-IEEE/PES Joint International Power Conference, Sep. 1993.
- [106] M. Pavella, P.G. Murthy. **Transient Stability Of Power Systems, Theory And Practice**, John Wiley, 1993.
- [107] Y. Zang. *Hybrid Extended Equal-Area Criterion: A General Method For Transient Stability Assessment Of Multimachine Power Systems*. **Ph.D. Thesis**, University of Liège, Feb. 1995.
- [108] M. Pavella, D. Ernst, D. Ruiz-Vega. **Transient Stability Of Power Systems – A Unified Approach To Assessment And Control**. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 2000.

- [109] A. M. Turing. *On Computable Numbers, With An Application To The Entscheidungsproblem*. **Proceedings of the London Mathematical Society**, 2 42: 230–65, 1937.
- [110] A. F. C. de Aquino, B. A. S. da Silva and A. G. Massaud. *A Criterion For Simulating Single-Phase Short Circuits When Lacking Zero-Sequence Network Information*. **Proposição de artigo**, disponível sob solicitação, 2004.
- [111] J. C. Lapponi. **Estatística Usando Excel**. Editora Campus, Brasil, 2005.
- [112] A. B. Rodrigues. *Análise Probabilística Da Estabilidade De Tensão Em Sistemas Compostos De Geração E Transmissão*. **Tese de D.Sc.**, Depto de Eng. Elétrica, PUC/RJ, Rio de Janeiro, Novembro, 2009.
- [113] D. S. Arentz. *Confiabilidade Nodal Em Sistemas De Potência*. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Outubro, 2001, (on-line: http://www.ic.uff.br/PosGraduacao/lista_dissertacao.php?ano=2001).
- [114] C. A. Silva Neto. *Otimização De Segurança De Sistemas De Potência Via Metaheurísticas E Simulação Eletromecânica Completa*. **Tese de D.Sc.**, Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, Niterói, (em elaboração, término previsto: 2010), vide referência adicional [118].
- [115] W. F. Alves. *Proposição de Sistemas-Teste para Análise Computacional de Sistemas de Potência*. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Agosto, 2007, (on-line: http://www.ic.uff.br/PosGraduacao/lista_dissertacao.php?ano=2007).
- [116] F. Xiao, J. D. McCalley. *Power System Risk Assessment and Control in a Multiobjective Framework*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 24, No. 1, February 2009.
- [117] S. S. Halilcevic, F. Gubina, A. F. Gubina. *Prediction of Power System Security Levels*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 24, No. 1, February 2009.

- [118] C. A. S. Neto, M. T. Schilling, J. C. S. Souza. *Melhorando a Segurança de Sistemas de Potência com a Utilização de Metaheurísticas*. **The 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE 2009**, Ubatuba, 18-22 Outubro, 2009.

* * *

Anexo A Dados Elétricos dos Sistemas-Testes

A.1 Introdução

O programa ASTP V1.0 tem entrada de dados similar aos programas convencionais utilizados na indústria, tanto para estudos de fluxo de potência quanto para estudos de estabilidade. Para os dados estocásticos o programa ASTP V1.0 possui entrada de dados específica (para esses dados referir-se aos Anexos B e C).

As máquinas síncronas são representadas da forma que se segue.

Equações mecânicas

Essas duas equações diferenciais estão sempre presentes na modelagem do comportamento eletromecânico das máquinas síncronas, exceto quando a máquina é representada como uma máquina infinita.

$$\begin{aligned} p\omega &= \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e - D_a(\omega - \omega_0)) \\ p\delta &= \omega - \omega_0 \end{aligned} \quad (A-1)$$

Dados (unidades): H (MWs/MVA), D_a (W/rad/s) e f_0 (Hz)

Equações elétricas

Nas equações elétricas da máquina síncrona as reatâncias são dadas em p.u. e as constantes de tempo em segundos.

Modelo 0

Máquina infinita - tensão constante (módulo e fase) atrás da reatância transitória de eixo d (X'_d).

$$\tilde{E}' = cte = \tilde{E}_{t_0} + R_a \tilde{I}_{t_0} + jX'_d \tilde{I}_{t_0} \quad (A-2)$$

Dados: R_a, X'_d

Modelo 2

Efeitos transitórios de eixo d , requerendo uma equação diferencial (pE'_q).

$$\tilde{E}_q = \tilde{E}_t + R_a \tilde{I}_t + jX_q \tilde{I}_t \quad (\text{A-3})$$

$$\tilde{E}'_q = \tilde{V}_q + R_a \tilde{I}_q - jX'_d \tilde{I}_d \quad (\text{A-4})$$

$$pE'_q = (E_f - E_q) / T'_{d0} = (E_f + (X_d - X'_d)I_d - E'_q) / T'_{d0} \quad (\text{A-5})$$

Dados: $R_a, X_d, X'_d, X_q, T'_{d0}$

A.2 Sistema-Teste de 4 Barras

O sistema-teste de 4 barras foi criado para realização dos exemplos didáticos apresentados no Capítulo VI, item VI.4. A Figura A.1 apresenta a topologia desse sistema. Nessa figura indicam-se, também, as áreas do sistema e os locais de defeito estudados nos exemplos apresentados. Finalmente apresenta-se a listagem da solução de um caso de fluxo de potência para o sistema de 4 barras.

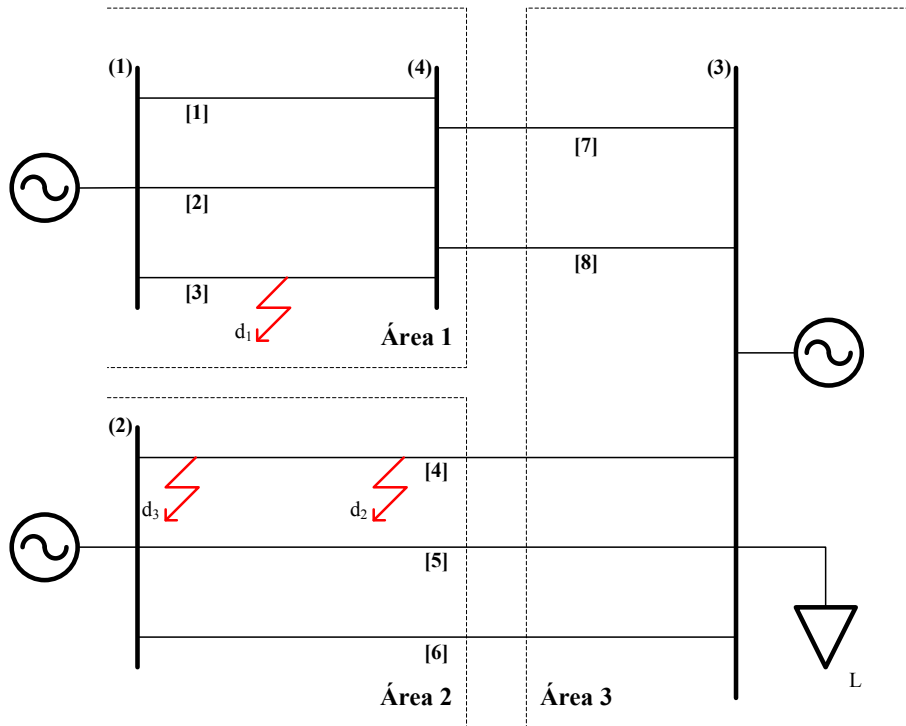


Figura A.1 – Sistema-teste de 4 barras

A.2.1 Sistema-teste de 4 Barras: Dados de Linhas

A Tabela A.1 apresenta os dados de linhas para o sistema de 4 barras. Os dados estão em por cento na base de 100 MVA.

Tabela A.1 – Dados de linhas

Linha	De	Para	Nº do circ.	R	X	B
[1]	1	4	1	0,0	12,60	0,0
[2]	1	4	2	0,0	12,60	0,0
[3]	1	4	3	0,0	4,28	0,0
[4]	2	3	1	0,0	6,27	0,0
[5]	2	3	2	0,0	26,98	0,0
[6]	2	3	3	0,0	26,98	0,0
[7]	3	4	1	0,0	4,28	0,0
[8]	3	4	2	0,0	4,28	0,0

A.2.2 Sistema-teste de 4 Barras: Dados de Geradores

A Tabela A.2 apresenta os dados de geradores para o sistema de 4 barras. Os dados de inércia estão em segundos, na base de 100 MVA. Resistências e reatâncias estão em por cento, na base de 100 MVA, e as constantes de tempo são dadas em segundos.

Tabela A.2 – Sistema de 4 barras: dados de geradores

Gerador	MVA	H	R_a	X'_d	X_d	X_q	T'_{do}
1	1110	38,85	0,0003	2,7	16,31	15,86	8,0
2	1110	38,85	0,0003	2,7	16,31	15,86	8,0
3	555	19,43	0,0006	5,4	32,62	31,72	8,0

A.2.3 Sistema-teste de 4 Barras: Solução do Fluxo de Potência

A Figura A.2 apresenta a listagem de uma solução de fluxo de potência para o sistema de 4 barras.

PAG. 1

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO
SISTEMA DE 4 BARRAS - 100% DA CARGA
CASO BASE - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09

DADOS DE LINHA E TRANSFORMADOR

DA BARRA	P/ BARRA	RESIST (%)	REATAN (%)	SUSCEP (MVAR)	T A P MIN	ANG DEFAS CONT. (MVA)	CAPAC
1	4	1	0.00	12.60	0.000	0.000	0
1	4	2	0.00	12.60	0.000	0.000	0
1	4	3	0.00	4.28	0.000	0.000	0
2	3	4	0.00	6.27	0.000	0.000	0
2	3	5	0.00	26.98	0.000	0.000	0
2	3	6	0.00	26.98	0.000	0.000	0
4	3	7	0.00	4.28	0.000	0.000	0
4	3	8	0.00	4.28	0.000	0.000	0

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO
SISTEMA DE 4 BARRAS - 100% DA CARGA
CASO BASE - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09

PAG. 2

DADOS DE BARRA

NUM.	BARRA NOME	TP AR CONT.	BARRA MOD	TENSAO ANG	GER LT	GER ESPEC	MIN	GER ESPEC	MAX	CARGA MW	MVAR	SHUNT MVAR
1	BARRA-----01	1	1	0	1.000	0.0	0	940.0	-9999.0	0.0	99999.0	0.0
2	BARRA-----02	1	2	0	1.000	0.0	0	710.0	-9999.0	0.0	99999.0	0.0
3	BARRA-----03	2	3	0	0.901	0.0	0	0.0	-9999.0	0.0	99999.0	2100.0
4	BARRA-----04	0	3	0	0.918	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO												
SISTEMA DE 4 BARRAS - 100% DA CARGA												
CASO BASE - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09												

PAG. 3

Figura A.2 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 4 barras

2	BARRA-----02	1	1.000	19.7	710.0	=	354.5	0.0	0.0	0.0	0.0
---	--------------	---	-------	------	-------	---	-------	-----	-----	-----	-----

Figura A.2 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 4 barras (continuação)

PAG. 6

PAG. 6

PAG. 6

PAG. 6

PAG. 6

PAG. 6

PAG. 6

PAG. 6

PAG. 8

TOTAIS DA AREA 1

Figura A.2 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 4 barras (continuação)

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO									
SISTEMA DE 4 BARRAS - 100% DA CARGA									
CASO BASE									
- MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09									
RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA ** AREA 2 ** * AREA 2 / BARRAS 2 *									
X-----D A D O S - B A R R A-----X-----F L U X O S - L I N H A S -----X-									
DA BARRA TENSAO GERACAO CARGA SHUNT INJ EQV									
NUM. TIPO MOD/ MW/ MVAR/ MW/ PARA BARRA									
NOME ANG MVAR MVAR EQUIV MVAR NUM. NOME CIRC MW MVAR TAP DEFAS TL									
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
2 1 1.000 710.0 0.0 0.0 0.0 0.0									
BARRA-----02 19.7 354.5 0.0 0.0 0.0									
3 BARRA-----03 4 484.5 242.0 TL									
3 BARRA-----03 5 112.6 56.2 TL									
3 BARRA-----03 6 112.6 56.2 TL									
TOTAIS DA AREA 2									
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
GERACAO CARGA SHUNT INJ EQV EXPORT. IMPORT. PERDAS									
MW/ MW/ MVAR/ MW/ MW/ MW/ MW/									
MVAR MVAR EQUIV MVAR MVAR MVAR MVAR									
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
710.0 0.0 0.0 0.0 0.0 709.7 0.0 0.0									
354.5 0.0 0.0 0.0 0.0 354.5 0.0 0.0									

Figura A.2 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 4 barras (continuação)

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO
SISTEMA DE 4 BARRAS - 100% DA CARGA
CASO BASE

RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA																			
** AREA								3 ** * AREA 3 / BARRAS 3 E 4						*					
X-----X-	D A D O S -	B A R R A	CARGA	SHUNT	INJ EQV	F L U X O S -	L I N H A S	-----X--X-											
DA BARRA	TENSÃO GERACAO	MVAR/ MW/	EQUIV MVAR/	MVAR/ MW/	NOME PARA BARRA	NOME CIRC	FLUXOS	DEFAS TL	TAP	MVAR	MW	---	X----	X----	X----	X----	X----	X----	X----
NUM.	TIPO MOD/ ANG	MVAR	MVAR	MVAR	NUM.	NOME	CIRC	TL	TAP	MVAR	MW	---	X----	X----	X----	X----	X----	X----	X----
3	2	0.901	451.5	2100.0	0.0	0.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
BARRA-----03		0.0	119.6	150.0	0.0	0.0	2 BARRA-----02	4	-484.5	-58.1									
							2 BARRA-----02	5	-112.6	-13.5									
							2 BARRA-----02	6	-112.6	-13.5									
							4 BARRA-----04	7	-469.4	27.4									
							4 BARRA-----04	8	-469.4	27.4									
4	0	0.916	0.0	0.0	0.0	0.0	1 BARRA-----01	1	-190.0	-36.1									
BARRA-----04		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1 BARRA-----01	2	-190.0	-36.1									
							1 BARRA-----01	3	-559.4	-106.2									
							3 BARRA-----03	7	469.4	89.2									
							3 BARRA-----03	8	469.4	89.2									

[illegible]

Figura A.2 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 4 barras (final)

A.3 Sistema-Teste de 9 Barras

O sistema-teste de 9 barras é um sistema encontrado na literatura [94,108] e foi utilizado para realização dos exemplos apresentados no Capítulo VI, item VI.5. A Figura A.3 apresenta a topologia desse sistema. Finalmente apresenta-se a listagem da solução de um caso de fluxo de potência para o sistema de 9 barras.

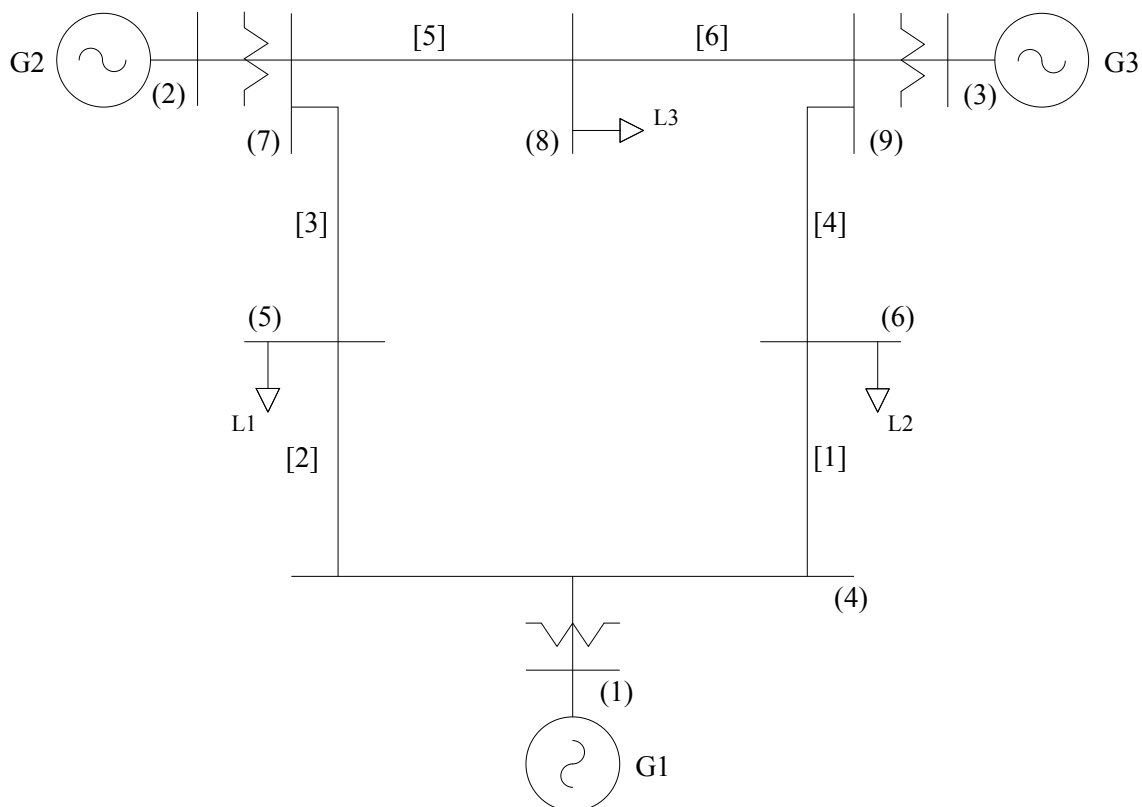


Figura A.3 – Sistema-teste de 9 barras

A.3.1 Sistema-teste de 9 Barras: Dados de Linhas

A Tabela A.3 apresenta os dados de linhas e transformadores para o sistema de 9 barras. Os dados estão em por cento na base de 100 MVA. As susceptâncias das linhas (B) são dadas em seus equivalentes em Mvar.

Tabela A.3 – Sistema de 9 barras: dados de linhas e transformadores

Linha/Trafo	De	Para	Nº do circ.	R	X	B	TAP
[1]	4	6	1	1,00	8,50	17,6	-
[2]	4	5	1	1,70	9,20	15,8	-
[3]	5	7	1	3,20	16,10	30,6	-
[4]	6	9	1	3,90	17,00	35,8	-
[5]	7	8	1	0,85	7,20	15,0	-
[6]	8	9	1	1,19	10,08	20,9	-
[1]	1	4	1	0,00	5,76	-	1,0
[2]	2	7	1	0,00	6,25	-	1,0
[3]	3	9	1	0,00	5,86	-	1,0

A.3.2 Sistema-teste de 9 Barras: Dados de Geradores

A Tabela A.4 apresenta os dados de geradores para o sistema de 9 barras. Os dados de inércia estão em segundos, na base de 100 MVA. Resistências e reatâncias estão em por cento, na base de 100 MVA, e as constantes de tempo são dadas em segundos.

Tabela A.4 – Sistema de 9 barras: dados de geradores

Gerador	MVA	H	R_a	X'_d	X_d	X_q	T'_{do}
1	247,5	23,64	0,0	6,08	14,60	9,69	8,96
2	192,0	6,40	0,0	11,98	89,58	86,45	6,00
3	128,0	3,01	0,0	18,13	131,20	125,7	5,89

A.3.3 Sistema-teste de 9 Barras: Solução do Fluxo de Potência

A Figura A.4 apresenta a listagem de uma solução de fluxo de potência para o sistema de 9 barras.

PAG. 1

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO
SISTEMA DE 9 BARRAS - (N) (P1) (M1)
CASO BASE - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09

DADOS DE LINHA E TRANSFORMADOR

DA BARRA	P/ BARRA	RESIST (%)	REATAN (%)	SUSCEP (MVAR)	ESPEC	T A P MIN	ANG DEFAS CONT. (MVA)	CAPAC
1	4	1	0.00	5.76	0.000	1.000	0.000	0
2	7	2	0.00	6.25	0.000	1.000	0.000	0
3	9	3	0.00	5.86	0.000	1.000	0.000	0
4	5	4	1.00	8.50	17.600	0.000	0.000	0
4	6	5	1.70	9.20	15.800	0.000	0.000	0
5	7	6	3.20	16.10	30.600	0.000	0.000	0
6	9	7	3.90	17.00	35.800	0.000	0.000	0
7	8	8	0.85	7.20	15.000	0.000	0.000	0
8	9	9	1.19	10.08	20.900	0.000	0.000	0

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO
SISTEMA DE 9 BARRAS - (N) (P1) (M1)
CASO BASE - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09

PAG. 2

DADOS DE BARRA

NUM.	BARRA NOME	TP	AR	CONT.	MOD	TENSAO	ANG	LT	ESPEC	GER	MIN	ESPEC	MAX	CARGA MW	MVAR	SHUNT MVAR
1	BARRA----	01	2	1	0	1.040	0.0	0	71.6	-9999.0	27.0	99999.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	BARRA----	02	1	2	0	1.025	9.3	0	163.0	-9999.0	6.6	99999.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	BARRA----	03	1	3	0	1.025	4.7	0	85.0	-9999.0	-10.9	99999.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA----	04	0	1	0	1.026	-2.2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	BARRA----	05	0	1	0	0.996	-4.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	125.0	50.0	0.0
6	BARRA----	06	0	3	0	1.013	-3.7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	90.0	30.0	0.0
7	BARRA----	07	0	2	0	1.026	3.7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	BARRA----	08	0	2	0	1.016	0.7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	35.0	0.0
9	BARRA----	09	0	3	0	1.032	2.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura A.4 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 9 barras

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO
SISTEMA DE 9 BARRAS - (N) (P1) (M1)
CASO BASE

X- NUM. -X- ERRO MAX -X- BARRA -X

1	1.66	4	REFC						
NUMERO DE ITERACOES P : 1									
FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO									
NUMERO DE ITERACOES Q : 1									
FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RÁPIDO - V01-00/09									
REFC									

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09

RELATORIO DE BARRAS DO SISTEMA ** AREA 1 ** * AREA 1 / BARRAS 1, 4 E 5 *

NUM.	BARRA	TP	MOD	ANG	TENSÃO		GERAÇÃO		LIM	MVAR	LIM	MW	CARGA	MVAR	SHUNT	SHUNT	INJECAO	EQUIV	MVAR
	NOME						MW	LIM											
1	BARRA----	01	2	1.040	0.0	0.0	71.6	S	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA----	04	0	1.026	-2.2	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	BARRA----	05	0	0.996	-4.0	0.0	0.0		0.0	125.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO

- MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09

RELATORIO DE BARRAS DO SISTEMA ** AREA 2 ** * AREA 2 / BARRAS 2, 7 E 8 *

NUM.	BARRA		TENSÃO			GERAÇÃO			CARGA			SHUNT		INJECAO		EQUIV
	NOME	TP	MOD	ANG	MW	LIM	MVAR	LIM	MW	MVAR	MVAR	EQUIV	MW	MVAR		
2	BARRA----	02	1	1.025	9.3	163.0	=	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	BARRA----	07	0	1.026	3.7	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	BARRA----	08	0	1.016	0.7	0.0		0.0	100.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Figura A.4 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 9 barras (continuação)

- MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - VOT

AREA 3 / BARRAS 3, 6 E 9 *

[illegible]

3	BARRA-----03	1	1.025	4.7	85.0	=	-10.9	0.0	0.0	0.0	0.0
6	BARRA-----06	0	1.013	-3.7	0.0		0.0	90.0	30.0	0.0	0.0
9	BARRA-----09	0	1.032	2.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO											
- MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09											

PAG. 7

ARRAS 1, 4 E 5
*[illegible]

1.6	S	-9999.0	99999.0	27.0	0.0
-----	---	---------	---------	------	-----

ARRAS 2, 7 E 8 *

[illegible]

3.0	=	-9999.0	99999.0	6.6	0.0
-----	---	---------	---------	-----	-----

Figura A.4 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 9 barras (continuação)

[illegible]

Figura A.4 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 9 barras (continuação)

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO
SISTEMA DE 9 BARRAS - (N) (P1) (M1)
CASO BASE

RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA ** AREA 2 ** * AREA 2 / BARRAS 2, 7 E 8 *

X-----X	D A D O S - B A R R A	F L U X O S - L I N H A S											
DA BARRA	TENSAO GERACAO	CARGA SHUNT INJ EQV											
NUM.	TIPO	NOME	MW/MVAR	EQUIV MVAR	MW/MVAR	PARA BARRA	FLUXOS						
---	ANG	MOD/ ANG	MW/ MVAR	MVAR EQUIV	MVAR	NUM.	CIRC	MW	MVAR	TAP	DEFAS TL		
-X-	-X-	-X-	-X-	-X-	-X-	-X-	-X-	-X-	-X-	-X-	-X-		
2	1	1.025	163.0	0.0	0.0	0.0							
BARRA----	02	9.3	6.6	0.0	0.0	0.0							
							7	BARRA----	07	2	163.0	6.6	1.000
7	0	1.026	0.0	0.0	0.0	0.0							
BARRA----	07	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0							
							2	BARRA----	02	2	-163.0	9.2	
							5	BARRA----	05	6	86.6	-8.4	TL
							8	BARRA----	08	8	76.3	-0.9	
8	0	1.016	0.0	100.0	0.0	0.0							
BARRA----	08	0.7	0.0	35.0	0.0	0.0							
							7	BARRA----	07	8	-75.9	-10.7	
							9	BARRA----	09	9	-24.2	-24.3	TL

TOTAIS DA AREA 2

GERACAO	SHUNT	INJ EQV	EXPORT.	IMPORT.	PERDAS
MW/	MVAR/	MW/	MW/	MW/	MW/
MVAR	EQUIV	MVAR	MVAR	MVAR	MVAR
163.0	100.0	0.0	0.0	84.3	24.2
6.6	35.0	0.0	0.0	11.3	24.3
					-15.5

Figura A.4 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 9 barras (continuação)

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO									
SISTEMA DE 9 BARRAS - (N) (P1) (M1)									
CASO BASE									
- MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09									
RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA ** AREA 3 ** * AREA 3 / BARRAS 3, 6 E 9 *									
X-----D A D O S - B A R R A-----X-----F L U X O S - L I N H A S -----X									
DA BARRA TENSÃO GERACAO CARGA SHUNT INJ EQV PARA BARRA FLUXOS									
NUM. TIPO	MOD/	MW/	MW/	MVAR/	MW/	NUM.	NOME	CIRC	MW MVAR TAP DEFAS TL
NOME	ANG	MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR	NUM.	NOME	CIRC	MW MVAR TAP DEFAS TL
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
3	1	1.025	85.0	0.0	0.0	0.0			
BARRA-----03	4.7	-10.9	0.0	0.0	0.0				
						9 BARRA-----09	3	85.0	-10.9 1.000
6	0	1.013	0.0	90.0	0.0	0.0			
BARRA-----06	-3.7	0.0	30.0	0.0	0.0				
						4 BARRA-----04	5	-30.6	-16.5
						9 BARRA-----09	7	-59.5	-13.4
									TL
9	0	1.032	0.0	0.0	0.0	0.0			
BARRA-----09	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
						3 BARRA-----03	3	-85.0	15.0
						6 BARRA-----06	7	60.9	-18.1
						8 BARRA-----08	9	24.3	3.1
									TL
TOTAIS DA AREA 3									
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
GERACAO	CARGA	SHUNT	INJ EQV	EXPORT.	IMPORT.	PERDAS			
MW/	MW/	MVAR/	MW/	MW/	MW/	MW/			
MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR	MVAR	MVAR	MVAR			
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
85.0	90.0	0.0	0.0	24.2	30.7	1.6			
-10.9	30.0	0.0	0.0	24.3	1.0	-64.1			

Figura A.4 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 9 barras (final)

A.3.4 Sistema-teste de 9 Barras: Probabilidades de Ocorrência e Impedâncias de Defeito

A Tabela A.4.1 apresenta os valores de probabilidade de ocorrência de defeito adotados para o sistema-teste de 9 barras. Esses valores foram calculados adotando-se a premissa de proporcionalidade entre as reatâncias e os comprimentos dos circuitos.

Tabela A.4.1 – Sistema de 9 barras: probabilidades de ocorrência de defeitos

Circuito		Reatância	Probabilidade de ocorrência de defeito
de	para		
4	6	0,0920	0,135135
4	5	0,0850	0,124853
5	7	0,1610	0,236486
6	9	0,1700	0,249706
7	8	0,0720	0,105758
8	9	0,1008	0,148061

A Tabela A.4.2 apresenta os valores de impedâncias de curto-circuito adotados para o sistema-teste de 9 barras.

Tabela A.4.2 – Sistema de 9 barras: impedâncias de defeito

Barra	Impedâncias de defeito (%)				
	1F	FF	2F	3F	OT
4	12,500	4,500	2,000	0,000	7,600
5	18,180	6,300	3,000	0,000	7,600
6	18,180	6,500	3,100	0,000	7,600
7	13,700	5,000	2,300	0,000	7,600
8	16,670	5,900	2,800	0,000	7,600
9	14,290	5,057	2,400	0,000	7,600

A.4 Sistema-Teste de 39 Barras

O sistema-teste de 39 barras é um sistema também encontrado na literatura [95,96] e foi utilizado para realização dos exemplos apresentados no Capítulo VI, item VI.6. A Figura A.5 apresenta a topologia desse sistema. Finalmente apresenta-se a listagem da solução de um caso de fluxo de potência para o sistema de 39 barras.

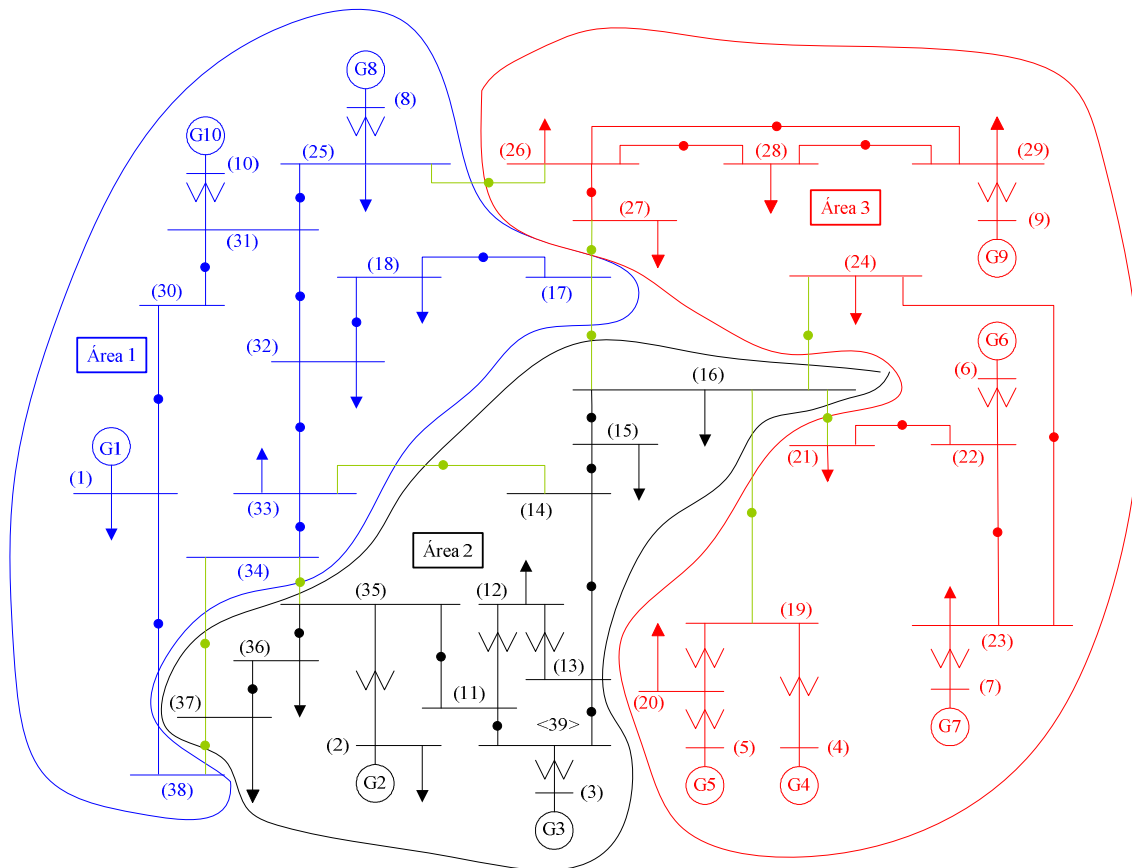


Figura A.5 – Sistema-teste de 39 barras

A.4.1 Sistema-teste de 39 Barras: Dados de Linhas

A Tabela A.5 apresenta os dados de linhas e transformadores para o sistema de 39 barras. Os dados estão em por cento na base de 100 MVA. As susceptâncias das linhas (B) são dadas em seus equivalentes em Mvar.

Tabela A.5 – Sistema de 39 barras: dados de linhas e transformadores

Linha/Trafo	De	Para	Nº do circ.	R	X	B	TAP
[1]	30	31	1	0,35	4,11	69,87	-
[2]	30	1	1	0,10	2,50	75,00	-
[3]	31	32	1	0,13	1,51	25,72	-
[4]	31	25	1	0,70	0,86	14,60	-
[5]	32	33	1	0,13	2,13	22,14	-
[6]	32	18	1	0,11	1,33	21,38	-
[7]	33	34	1	0,08	1,28	13,42	-
[8]	33	14	1	0,08	1,29	13,82	-
[9]	34	35	1	0,02	0,26	4,34	-
[10]	34	37	1	0,08	1,12	14,76	-
[11]	35	36	1	0,06	0,92	11,30	-
[12]	35	11	1	0,07	0,82	13,89	-
[13]	36	37	1	0,04	0,46	7,80	-
[14]	37	38	1	0,23	3,63	38,04	-
[15]	38	1	1	0,10	2,50	120,00	-
[16]	39	11	1	0,04	0,43	7,29	-
[17]	39	13	1	0,04	0,43	7,29	-
[18]	13	14	1	0,09	1,01	17,23	-
[19]	14	15	1	0,18	2,17	36,60	-
[20]	15	16	1	0,09	0,94	17,10	-
[21]	16	17	1	0,07	0,89	13,42	-
[22]	16	19	1	0,16	1,95	30,40	-
[23]	16	21	1	0,08	1,35	25,48	-
[24]	16	24	1	0,03	0,59	6,80	-
[25]	17	18	1	0,07	0,82	13,19	-
[26]	17	27	1	0,13	1,73	32,16	-
[27]	21	22	1	0,08	1,40	25,65	-
[28]	22	23	1	0,06	0,96	18,46	-
[29]	23	24	1	0,22	3,50	36,10	-
[30]	25	26	1	0,32	3,23	51,30	-
[31]	26	27	1	0,14	1,47	23,96	-
[32]	26	28	1	0,43	4,74	78,02	-
[33]	26	29	1	0,57	6,25	102,90	-
[34]	28	29	1	0,14	1,51	24,90	-

Tabela A.5 – Sistema de 39 barras: dados de linhas e transformadores (cont.)

[1]	12	11	1	0,16	4,35	-	1,006
[2]	12	13	1	0,16	4,35	-	1,006
[3]	35	2	1	0,00	2,50	-	1,070
[4]	39	3	1	0,00	2,00	-	1,070
[5]	19	4	1	0,07	1,42	-	1,070
[6]	20	5	1	0,09	1,80	-	1,009
[7]	22	6	1	0,00	1,43	-	1,025
[8]	23	7	1	0,05	2,72	-	1, 000
[9]	25	8	1	0,06	2,32	-	1,025
[10]	31	10	1	0,00	1,81	-	1,025
[11]	29	9	1	0,08	1,56	-	1,025
[12]	19	20	1	0,07	1,38	-	1,060

A.4.2 Sistema-teste de 39 Barras: Dados de Geradores

A Tabela A.6 apresenta os dados de geradores para o sistema de 39 barras. Os dados de inércia estão em segundos, na base de 100 MVA. Resistências e reatâncias estão em por cento, na base de 100 MVA, e as constantes de tempo são dadas em segundos.

Tabela A.6 – Sistema de 39 barras: dados de geradores

Gerador	MVA	H	R_a	X'_d	X_d	X_q	T'_{do}
1	100,0	500,00	0,0	0,60	2,00	1,90	7,00
2	100,0	30,30	0,0	6,97	29,50	28,20	6,56
3	100,0	35,80	0,0	5,31	24,95	23,70	5,70
4	100,0	28,60	0,0	4,36	26,22	25,80	5,69
5	100,0	26,00	0,0	13,20	67,00	62,00	5,40
6	100,0	34,80	0,0	5,00	25,40	24,10	7,30
7	100,0	26,40	0,0	4,90	29,50	29,20	5,66
8	100,0	24,30	0,0	5,70	29,00	28,00	6,70
9	100,0	34,50	0,0	5,70	21,06	20,50	4,79
10	100,0	42,00	0,0	3,10	10,00	6,90	10,20

A.4.3 Sistema-teste de 39 Barras: Solução do Fluxo de Potência

A Figura A.6 apresenta a listagem de uma solução de fluxo de potência para o sistema de 39 barras (vide Caso 13(a)).

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09
 SISTEMA NEW ENGLAND - 39 BARRAS - CARGA PESADA
 CASO BASE

DADOS DE LINHA E TRANSFORMADOR

DA BARRA	P/ BARRA	CIRC	RESIST (%)	REATAN (%)	SUSCEP (MVAR)	ESPEC	T A P MIN	MAX	ANG DEFAS	BARRA CONT.	CAPAC (MVA)
30	31	1	0.35	4.11	69.870	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
30	1	2	0.10	2.50	75.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
31	32	3	0.13	1.51	25.720	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
31	25	4	0.70	0.86	14.600	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
32	33	5	0.13	2.13	22.140	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
32	18	6	0.11	1.33	21.380	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
33	34	7	0.08	1.28	13.420	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
33	14	8	0.08	1.29	13.820	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
34	35	9	0.02	0.26	4.340	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
34	37	10	0.08	1.12	14.760	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
35	36	11	0.06	0.92	11.300	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
35	11	12	0.07	0.82	13.890	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
36	37	13	0.04	0.46	7.800	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
37	38	14	0.23	3.63	38.040	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
38	1	15	0.10	2.50	120.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
39	11	16	0.04	0.43	7.290	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
39	13	17	0.04	0.43	7.290	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
13	14	18	0.09	1.01	17.230	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
14	15	19	0.18	2.17	36.600	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
15	16	20	0.09	0.94	17.100	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
16	17	21	0.07	0.89	13.420	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
16	19	22	0.16	1.95	30.400	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
16	21	23	0.08	1.35	25.480	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
16	24	24	0.03	0.59	6.800	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
17	18	25	0.07	0.82	13.190	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
17	27	26	0.13	1.73	32.160	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
21	22	27	0.08	1.40	25.650	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
22	23	28	0.06	0.96	18.460	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
23	24	29	0.22	3.50	36.100	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
25	26	30	0.32	3.23	51.300	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0
26	27	31	0.14	1.47	23.960	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0 9999.0

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras

[illegible]

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

15 bus#15	0	2	0	1.045	-7.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	320.0	153.0	0.0
16 bus#16	0	2	0	1.056	-7.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	329.0	32.3	0.0
17 bus#17	0	1	0	1.058	-7.7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18 bus#18	0	1	0	1.056	-8.2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	158.0	30.0	0.0
19 bus#19	0	3	0	1.062	-4.2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20 bus#20	0	3	0	1.002	-5.2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	628.0	103.0	0.0
21 bus#21	0	3	0	1.055	-5.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	274.0	115.0	0.0
22 bus#22	0	3	0	1.064	-2.8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23 bus#23	0	3	0	1.061	-3.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	247.5	84.6	0.0
24 bus#24	0	3	0	1.060	-7.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	308.6	-92.0	0.0
25 bus#25	0	1	0	1.068	-5.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	224.0	47.2	0.0
26 bus#26	0	3	0	1.072	-6.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	139.0	17.0	0.0
27 bus#27	0	3	0	1.063	-7.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	281.0	75.5	0.0
28 bus#28	0	3	0	1.067	-3.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	206.0	27.6	0.0
29 bus#29	0	3	0	1.063	-1.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	283.5	26.9	0.0
30 bus#01	0	1	0	1.053	-8.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31 bus#02	0	1	0	1.062	-6.5	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32 bus#03	0	1	0	1.053	-8.3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	322.0	2.4	0.0
33 bus#04	0	1	0	1.033	-8.5	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	500.0	184.0	0.0
34 bus#05	0	1	0	1.032	-7.5	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35 bus#06	0	2	0	1.033	-7.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36 bus#07	0	2	0	1.026	-8.5	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	233.8	84.0	0.0
37 bus#08	0	2	0	1.025	-8.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	522.0	176.0	0.0
38 bus#09	0	1	0	1.040	-8.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39 bus#10	0	2	0	1.050	-5.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09

SISTEMA NEW ENGLAND - 39 BARRAS - CARGA PESADA

CASO BASE

PAG. 3

RELATORIO DE CONVERGENCIA
OPCOES ATIVADAS:

X- ITER	NUM. P	-X- (MW)	ERRO MAX	-X- BARRA NUM	X- ITER	NUM. Q	-X- (MVAR)	ERRO MAX	-X- BARRA NUM	-X- REFC
1	203.37		8	REFC	1	603.61	39	REFC		
2	33.04		39		2	10.90	39			
3	5.17		35							
NUMERO DE ITERACOES P : 3 NUMERO DE ITERACOES Q : 2										

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

PAG. 4

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09
SISTEMA NEW ENGLAND - 39 BARRAS - CARGA PESADA
CASO BASE

RELATORIO DE BARRAS DO SISTEMA ** AREA 1 ** * AREA 1 / BARRAS 1. 4 E 5 *

NUM.	BARRA	NOME	TENSÃO			GERACAO			CARGA			SHUNT			INJECAO		
			TP	MOD	ANG	MW	LIM	MVAR	LIM	MW	MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR	MW	EQUIV	MVAR
1	bus#39		1	1.030	-10.0	1000.0	=	87.5	1104.0	250.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	bus#37		1	1.028	2.4	540.0	=	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	bus#30		1	1.048	-3.3	250.0	=	147.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	bus#17		0	1.034	-7.3	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	bus#18		0	1.031	-8.2	0.0		0.0	158.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	bus#25		0	1.058	-4.4	0.0		0.0	224.0	47.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	bus#01		0	1.047	-8.4	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	bus#02		0	1.049	-5.7	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	bus#03		0	1.030	-8.6	0.0		0.0	322.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	bus#04		0	1.004	-9.6	0.0		0.0	500.0	184.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	bus#05		0	1.005	-8.6	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	bus#09		0	1.028	-10.3	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FLUXO DE POTENCIA DESACOPLADO RAPIDO - MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09
SISTEMA NEW ENGLAND - 39 BARRAS - CARGA PESADA
CASO BASE

PAG. 5

RELATORIO DE BARRAS DO SISTEMA ** AREA 2 ** * AREA 2 / BARRAS 2. 7 E 8 *

NUM.	BARRA	NOME	TENSÃO			GERACAO			CARGA			SHUNT			INJECAO		
			TP	MOD	ANG	MW	LIM	MVAR	LIM	MW	MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR	MW	EQUIV	MVAR
2	bus#31		2	0.982	0.0	520.3	I	197.7	9.2	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	bus#32		1	0.983	2.6	650.0	=	204.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	bus#11		0	1.013	-6.3	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	bus#12		0	1.000	-6.2	0.0		0.0	7.7	88.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	bus#13		0	1.014	-6.1	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	bus#14		0	1.012	-7.6	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	bus#15		0	1.015	-7.7	0.0		0.0	320.0	153.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

[illegible]

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

RELATORIO DE GERADOR ** AREA 1 ** AREA 1 / BARRAS 1. 4 E 5 *

NUM.	BARRA		TENSÃO		GER		GER		FATOR			
	NUM.	NOTA	TP	MOD	ANG	MIN	MAX	ATUAL	MIN	MAX	ATUAL	NOTA
1	bus#39	1	1.030	-10.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	=	-9999.0	99999.0	87.5
8	bus#37	1	1.028	2.4	540.0	540.0	540.0	540.0	=	-9999.0	99999.0	0.2
10	bus#30	1	1.048	-3.3	250.0	250.0	250.0	250.0	=	-9999.0	99999.0	147.3

RELATORIO DE GERADOR ** AREA 2 ** AREA 2 / BARRAS 2. 7 E 8 *

NUM.	BARRA NOME	TP		TENSÃO		GER		MW		ATUAL		GER		MVAR		FATOR PART.
		X	X	ANG	MIN	MAX	ATUAL	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX			
2 bus#31		2	0.982	0.0	1800.0	1800.0	520.3	I	-9999.0	99999.0	197.7					
3 bus#32		1	0.983	2.6	650.0	650.0	650.0	=	-9999.0	99999.0	204.2					

RELATORIO DE GERADOR ** AREA 3 ** * AREA 3 / BARRAS 3. 6 E 9 *

NUM.	BARRA NOME	TP	MOD	TENSÃO ANG	MIN	GER MAX	MW MAX	ATUAL	MIN	GER MAX	MVAR MAX	ATUAL	FATOR PART.
4 bus#33		1	0.997	4.2	632.0	632.0	632.0	632.0	=	-9999.0	99999.0	109.2	0.0
5 bus#34		1	1.012	3.2	508.0	508.0	508.0	508.0	=	-9999.0	99999.0	165.1	0.0
6 bus#35		1	1.049	5.6	650.0	650.0	650.0	650.0	=	-9999.0	99999.0	210.5	0.0
7 bus#36		1	1.064	8.3	560.0	560.0	560.0	560.0	=	-9999.0	99999.0	102.8	0.0
9 bus#38		1	1.027	7.8	830.0	830.0	830.0	830.0	=	-9999.0	99999.0	23.1	0.0

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

FLUXO DE POTENCIA DESACOPADO RAPIDO														
- MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09														
SISTEMA NEW ENGLAND - 39 BARRAS - CARGA PESADA														
CASO BASE														
RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA ** AREA 1 ** * AREA 1 / BARRAS 1. 4 E 5 *														
X-----D A D O S - B A R R A-----X-----F L U X O S - L I N H A S -----X														
DA BARRA TENSÃO GERACAO CARGA SHUNT INJ EQV PARA BARRA FLUXOS														
NUM.	TIPO	MOD/	MW/	MVAR/	MW/	MVAR	NUM.	NOME	CIRC	MW	MVAR	TAP	DEFAS	TL
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X														
1	1	1.030	1000.0	1104.0	0.0	0.0								
bus#39		-10.0	87.5	250.0	0.0	0.0								
							30 bus#01	2	-124.1	-105.1				
8	1	1.028	540.0	0.0	0.0	0.0	38 bus#09	15	20.1	-57.3				
bus#37		2.4	0.2	0.0	0.0	0.0								
							25 bus#25	43	540.0	0.2				
10	1	1.048	250.0	0.0	0.0	0.0								
bus#30		-3.3	147.3	0.0	0.0	0.0								
							31 bus#02	44	250.0	147.3				
17	0	1.034	0.0	0.0	0.0	0.0								
bus#17		-7.3	0.0	0.0	0.0	0.0								
							16 bus#16	21	-229.7	34.9				TL
							18 bus#18	25	210.7	9.3				
18	0	1.031	0.0	158.0	0.0	0.0	27 bus#27	26	19.0	-44.2				TL
bus#18		-8.2	0.0	30.0	0.0	0.0								
							17 bus#17	25	-210.4	-19.9				
25	0	1.058	0.0	224.0	0.0	0.0	32 bus#03	6	52.4	-10.1				
bus#25		-4.4	0.0	47.2	0.0	0.0								
							8 bus#37	43	-538.3	63.8	1.025			
							26 bus#26	30	71.1	-17.2				TL
							31 bus#02	4	243.0	-94.2				
30	0	1.047	0.0	0.0	0.0	0.0								
bus#01		-8.4	0.0	0.0	0.0	0.0								
							1 bus#39	2	124.3	28.8				
							31 bus#02	1	-124.3	-28.8				

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

[illegible]

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

[illegible]

PAG. 10

[illegible][illegible]

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

13 bus#13	0	1.014 -6.1	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	12 bus#12 14 bus#14 39 bus#10	36 18 17	7.7 276.8 -284.5	46.6 -4.1 -42.6
14 bus#14	0	1.012 -7.6	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	13 bus#13 15 bus#15 33 bus#04	18 19 8	-276.1 5.1 271.0	-6.1 -36.0 42.1
15 bus#15	0	1.015 -7.7	0.0 0.0	320.0 153.0	0.0 0.0	0.0 0.0	14 bus#14 16 bus#16	19 20	-5.1 -314.9	-1.6 -151.5
16 bus#16	0	1.032 -6.2	0.0 0.0	329.0 32.3	0.0 0.0	0.0 0.0	15 bus#15 17 bus#17 19 bus#19 21 bus#21 24 bus#24	20 21 22 23 24	315.9 230.0 -502.7 -329.6 -42.7	144.4 -44.6 -47.3 13.4 -98.2
35 bus#06	0	1.008 -7.9	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	2 bus#31 11 bus#11 34 bus#05 36 bus#07	37 12 9 11	-511.1 -363.7 454.8 420.6	-115.7 -32.0 56.9 91.6

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

- MGS/UFF - TESE DE DOUTORADO - V01-00/09
FLUXO DE POTENCIA DESACOPLOADO RAPIDO
SISTEMA NEW ENGLAND - 39 BARRAS - CARGA PESADA
CASO BASE

[illegible]

TOTAIS DA AREA 2

[illegible]

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

[illegible]

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (continuação)

[illegible]

Figura A.6 – Listagem da solução do fluxo de potência para o sistema de 39 barras (final)

A.5 Dados de Controles dos Geradores

Os dados utilizados nas simulações com reguladores de tensão são apresentados a seguir. A Figura A.7 apresenta o modelo de regulador de tensão com excitatriz rotativa que foi utilizado em todas as simulações nas quais o controle de tensão foi representado.

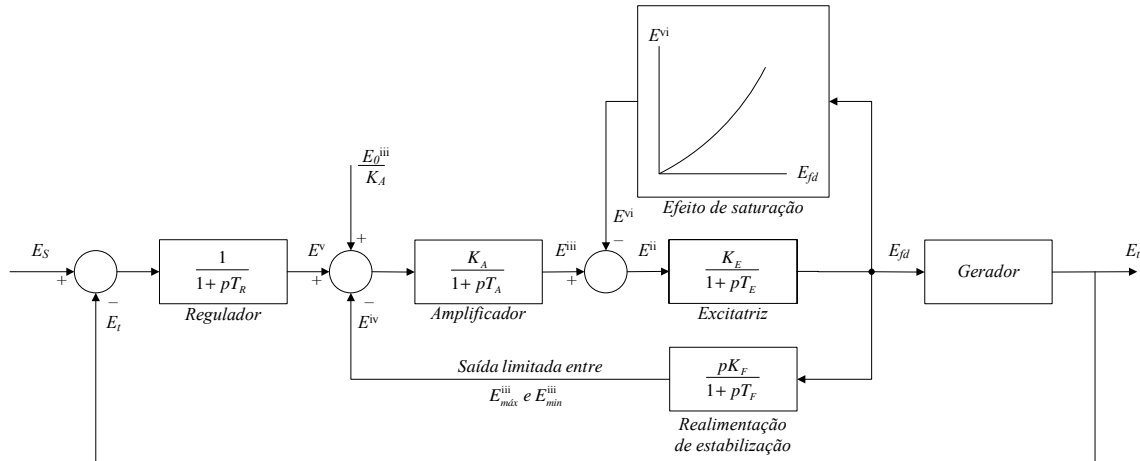


Figura A.7 – Regulador de tensão com excitatriz rotativa

A Tabela A.7 apresenta os dados utilizados para o regulador de tensão com excitatriz rotativa nas simulações com o sistema-teste de 4 barras.

Tabela A.7 – Sistema de 4 barras: dados do regulador com excitatriz rotativa

Gerador	CS	K_A	K_E	K_F	T_R	T_A	T_E	T_F	$E_{m\acute{a}x}^{iii}$	$E_{m\acute{i}n}^{iii}$
1	1	40,0	1,0	0,03	0,1	0,02	1,400	1,00	-5,0	5,0
2	1	40,0	1,0	0,03	0,1	0,02	1,400	1,00	-5,0	5,0
3	1	40,0	1,0	0,03	0,1	0,02	1,400	1,00	-5,0	5,0

A Tabela A.8 apresenta os dados utilizados para o regulador de tensão com excitatriz rotativa nas simulações com o sistema-teste de 9 barras.

Tabela A.8 – Sistema de 9 barras: dados do regulador com excitatriz rotativa

Gerador	CS	K_A	K_E	K_F	T_R	T_A	T_E	T_F	$E_{m\acute{a}x}^{iii}$	$E_{m\acute{i}n}^{iii}$
1	1	20,	1,0	0,0630	0,1	0,20	0,314	0,35	-1,8	1,8
2	1	20,	1,0	0,0630	0,1	0,20	0,314	0,35	-1,8	1,8
3	1	20,	1,0	0,0630	0,1	0,20	0,314	0,35	-1,8	1,8

A Tabela A.9 apresenta os dados utilizados para o regulador de tensão com excitatriz rotativa nas simulações com o sistema-teste de 39 barras.

Tabela A.9 – Sistema de 39 barras: dados do regulador com excitatriz rotativa

Gerador	CS	K_A	K_E	K_F	T_R	T_A	T_E	T_F	$E_{m\acute{a}x}^{iii}$	$E_{m\acute{i}n}^{iii}$
1	1	5,0	1,0	0,04	0,1	0,06	0,250	1,00	-5,0	5,0
2	1	6,2	1,0	0,057	0,1	0,05	0,410	0,50	-5,0	5,0
3	1	5,0	1,0	0,08	0,1	0,06	0,500	1,00	-5,0	5,0
4	1	5,0	1,0	0,08	0,1	0,06	0,500	1,00	-5,0	5,0
5	1	40,0	1,0	0,03	0,1	0,02	0,785	1,00	-5,0	5,0
6	1	5,0	1,0	,0754	0,1	0,02	0,471	1,24	-5,0	5,0
7	1	40,0	1,0	0,03	0,1	0,02	0,730	1,00	-5,0	5,0
8	1	5,0	1,0	0,0845	0,1	0,02	0,528	1,26	-5,0	5,0
9	1	40,0	1,0	0,03	0,1	0,02	1,400	1,00	-5,0	5,0
10	1	5,0	1,0	1,0	0,04	0,10	0,060	0,25	-5,0	-5,0

* * *

Anexo B Manual de Utilização do Programa ASTP Versão 1.0 (Análise de Segurança Transitória Probabilística)

B.1 Introdução

Neste anexo apresenta-se o manual de utilização do programa *ASTP V1.0 (Análise de Segurança Transitória Probabilística)*. O programa foi implementado em FORTRAN 95 e testado no sistema operacional Windows **XP**.

B.2 Manual de Utilização

O propósito deste manual é o de permitir a utilização das funções do protótipo que serviram para a demonstração da metodologia e dos resultados apresentados no Capítulo VI.

O protótipo construído apresenta as seguintes capacidades:

Nº de barras -	500
Nº de circuitos	1000
Nº de geradores	50
Nº de reguladores de tensão	50
Nº de estados probabilísticos	10000

B.2.1 Dados de Entrada

Um processamento de avaliação de segurança transitória probabilística com o programa ASTP V1.0 requer os seguintes dados de entrada:

- Rede elétrica: topologia e parâmetros
- Dados estocásticos de circuitos

- Taxas de falha e tempos médios de reparo
 - Probabilidades de ocorrência de defeitos nos circuitos
 - Probabilidades de localização do defeito
 - Probabilidades dos diferentes tipos de defeito
 - Valores das reatâncias de defeito
 - Probabilidades de atuação do religamento rápido
 - Médias e desvios padrões das proteções (duração do defeito)
- Dados de máquinas síncronas
 - Dados de reguladores de tensão
 - Dados de curvas de saturação das excitarizes
 - Dados do evento de referência

B.3 Funções de processamento executadas pelo programa

Para cada estado do espaço probabilístico a ser avaliado são executadas três funções básicas: *(i)* obtenção o ponto de operação; *(ii)* avaliação do desempenho transitório eletromecânico, e; *(iii)* cálculo e avaliação dos índices probabilísticos gerados.

A função *(i)* é executada através da execução de um programa de cálculo de fluxo de potência. A função *(ii)* é executada através de um programa de estabilidade eletromecânica. Finalmente, a função *(iii)* é executada por um programa de análise probabilística.

Embora essas funções estejam integradas em um único sistema computacional, as funções de fluxo de potência e de estabilidade eletromecânica podem ser executadas como funções independentes (*stand alone*).

Cada uma das funções, ou programas, requer um conjunto de dados específicos para sua execução. A forma de entrada desses dados é descrita a seguir.

B.4 Função de Fluxo de Potência

A função de fluxo de potência é executada através de um programa que utiliza o método desacoplado rápido. Esta função, ao final de sua execução, gera um arquivo de dados

que contém o ponto de operação a ser avaliado pela função de estabilidade eletromecânica. Essa função pode ser executada de forma isolada (*stand alone*) – sob controle do usuário - ou de forma recursiva – sob controle automático do programa ASTP - durante as avaliações probabilísticas.

Os recursos disponíveis na função fluxo de potência são os típicos de programas comerciais para o mesmo fim (PECO, Anarede, Organon).

O fluxo de execução da função de fluxo de potência é controlado através de comandos de controle e compreende:

- a. Leitura do título do caso (comando TITU)
- b. Leitura dos dados de linha (comando DLIN)
- c. Leitura dos dados de barra (comando DBAR)
- d. Leitura dos dados de área (comando DARE)
- e. Execução do caso (comando EXLF)
- f. Finalização do processamento (comando FIM!)

Os comandos acima podem estar acompanhados de subcomandos de controle e devem ser fornecidos na ordem apresentada.

B.4.1 Título do Estudo

O comando TITU deve ser obrigatoriamente a primeira linha de dados.

O seguinte conjunto de dados deve ser fornecido:

- a. Registro com o comando TITU
- b. Linha com o título do caso

Formato:

Campo	Colunas	Descrição
Título	01 – 04	Título do caso (alfanumérico) com até 80 caracteres.

B.4.2 Dados de Linhas

O comando DLIN deve vir em seguida ao comando TITU e deve estar acompanhado dos subcomandos de controle NCIR e IMPR.

O seguinte conjunto de dados deve ser fornecido:

- Registro com o comando e subcomandos DLIN NCIR IMPR
- Registros com os dados de linhas
- Registro contendo 9999 nas colunas de 1 a 4, indicando fim de dados de linha

Formato:

Campo	Colunas	Descrição
Barra 'de'	01 – 04	Número da barra de origem do circuito.
Barra 'para'	09 – 12	Número da barra de chegada do circuito.
Circuito	13 – 14	Número do circuito
Resistência	18 – 23	Valor da resistência em % do circuito ou do transformador.
Reatância	24 – 29	Valor da reatância em % do circuito ou do transformador.
Susceptância	30 – 35	Valor da susceptância em Mvar do circuito.
Tap	36 – 40	Valor do tap referido à barra definida no campo Barra 'de', em p.u..
Capacidade normal	61 – 64	Capacidade de carregamento normal do circuito, em MVA.
Capacidade de emergência	65 – 68	Capacidade de carregamento em emergência do circuito, em MVA.

B.4.3 Dados de Barras

O comando DBAR deve vir em seguida ao comando DLIN e deve estar acompanhado do subcomando de controle IMPR.

O seguinte conjunto de dados deve ser fornecido:

- Registro com o comando e subcomando DBAR IMPR

- b. Registros com os dados de barras
- c. Registro contendo 9999 nas colunas de 1 a 4, indicando fim de dados de linha

Formato:

Campo	Colunas	Descrição
Número	01 – 04	Número da barra.
Tipo	08 – 08	0 – barra de carga PQ 1 – barra de tensão regulada PV 2 – barra de referência V θ
Nome	10 – 21	Nome da barra (alfanumérico).
Tensão	23 – 26	Tensão especificada, em p.u.
Ângulo	27 – 30	Ângulo da tensão da barra, em graus.
Geração ativa	31 – 35	Geração ativa na barra, em MW.
Geração reativa	36 – 40	Geração reativa na barra, em Mvar.
Geração reativa mínima	41 – 45	Geração mínima de reativo na barra, Mvar.
Geração reativa máxima	46 – 50	Geração máxima de reativo na barra, Mvar.
Barra controlada	51 – 55	Número da barra controlada remotamente.
Carga ativa	56 – 60	Carga ativa da barra, em MW.
Carga reativa	61 – 65	Carga reativa da barra em Mvar.
Capacitor / reator	66 – 70	Valor do banco de reatores / capacitores na barra, em Mvar. Positivo para capacitores e negativo para reatores.
Área	71 – 72	Número da área a que pertence a barra.
Tensão para definição da carga	73 – 76	Tensão de medição das parcelas ativa e reativa da carga na barra, em p.u.

B.4.4 Dados de Áreas

O comando DARE deve vir em seguida ao comando DBAR.

O seguinte conjunto de dados deve ser fornecido:

- Registro com o comando DARE
- Registros com os dados de áreas
- Registro contendo 9999 nas colunas de 1 a 4, indicando fim de dados de linha

Formato:

Campo	Colunas	Descrição
Número	01 – 04	Número da área.
Nome	20 – 55	Nome da área (alfanunérico).

B.4.5 Execução do Caso de Fluxo de Potência

O comando EXLF deve vir em seguida ao comando DARE e deve estar acompanhado dos subcomandos de controle.

O seguinte conjunto de dados deve ser fornecido:

- Registro com o comando e subcomandos EXLF RCVG RGER RBAR RLIN

B.5 Função de Estabilidade Eletromecânica

A função de estabilidade eletromecânica é executada através de um programa que utiliza o método de Euler modificado para integração das equações diferenciais representativas da dinâmica do sistema. Essa função, no início de sua execução, lê um arquivo de dados gerado automaticamente pela função de fluxo de potência, que contém o ponto de operação. Essa função pode ser executada de forma isolada (*stand alone*) ou de forma recursiva durante as avaliações probabilísticas.

Os recursos disponíveis na função estabilidade eletromecânica são os seguintes:

- Máquinas síncronas representadas pelos Modelos 0 (tensão cte atrás da reatância transitória) e 2 (pE_q');
- Representação de reguladores de tensão;

- Representação da saturação das excitatrizes;
- Defeitos podem ser aplicados nas barras ou em qualquer ponto intermediário ao longo de uma linha de transmissão;
- Simulação de religamento rápido de linhas de transmissão;
- Permite chaveamento de linhas, transformadores e elementos em derivação (*shunts*);
- Detecção automática de instabilidade ou estabilidade;
- Método híbrido direto – simulação no tempo (SIME);
- Cálculo de margens de estabilidade.

São limitações da função de estabilidade eletromecânica:

- 500 barras, 1000 linhas, 300 transformadores e 100 geradores;
- Não aceita defasador de ângulo;
- Não permite modelagem de carga (cargas são representadas por impedância constante);
- Trabalha reduzindo a rede às barras internas dos geradores.

Os dados de entrada da função de estabilidade eletromecânica estão divididos em 10 conjuntos de dados, em dois arquivos distintos, e que devem aparecer, caso existam, na ordem a seguir.

B.5.1 Dados do Fluxo de Potência Convergado (ponto de operação)

O primeiro arquivo contém os dados do fluxo de potência no formato descrito no item B.4 deste anexo. Esses dados são obrigatórios.

Na sequência do diálogo inicial informa-se o nome do segundo arquivo, o qual contém os dados dinâmicos, conforme descrito a seguir.

B.5.2 Dados Dinâmicos

A primeira linha de dados contém o valor da **frequência nominal do sistema**.

Variável	Formato	Colunas	Significado
FS	F10.6	1 – 10	Frequência do sistema (Hz).

Os **dados dos geradores** seguem a linha de dados da frequência do sistema. Utiliza-se uma linha de dados para cada gerador. O fim de dados é sinalizado quando um valor igual a zero é lido na posição da variável N (nº do gerador).

Variável	Formato	Colunas	Significado
N	I5	1 – 5	Número do gerador.
R1	F10.6	6 – 15	Potência base do gerador (MVA).
RA	F10.6	16 – 25	Resistência da armadura (pu).
XLD	F10.6	26 – 35	Reatância transitória de eixo direto (pu).
XD	F10.6	36 – 45	Reatância síncrona de eixo direto (pu).
XQ	F10.6	46 – 45	Reatância síncrona de eixo em quadratura (pu).
TLD0	F10.6	56 – 65	Constante de tempo transitória de circuito aberto (s).
MM	F10.6	66 – 75	Constante de inércia do gerador (s).
I1	I2	76 – 77	Se igual a 0, o gerador não tem regulador de tensão. Se igula a 1, o gerador tem regulador de tensão.

Obs: se XLD = XQ = 0, o gerador é tratado como barra infinita (modelo 0)

Os **dados de reguladores de tensão** seguem os dados de de cada gerador (I1 = 1). Utiliza-se uma linha de dados para informar os dados de regulador de tensão.

Variável	Formato	Colunas	Significado
IRT	I5	1 – 5	Número do regulador de tensão.
ISAT	I5	6 – 10	Número da curva de saturação.
KA	F10.6	12 – 21	Ganho do regulador de tensão (pu).
KE	F10.6	22 – 31	Ganho da excitariz (pu).
KF	F10.6	32 – 41	Ganho da malha de realimentação (pu).
TR	F10.6	42 – 51	Constante de tempo da transdução de tensão (s).

TA	F10.6	52 – 61	Constante de tempo do regulador de tensão (s).
TE	F10.6	62 – 71	Constante de tempo da excitatriz (s)
TF	F10.6	72 – 81	Constante de tempo da malha de realimentação (s).
LMIN	F10.6	82 – 91	Limite inferior da tensão de saída do regulador de tensão (pu).
LMAX	F10.6	92 - 101	Limite superior da tensão de saída do regulador de tensão (pu).
TpLIM	-	-	Não utilizado.
TSCS	-	-	Não utilizado.
I2	I2	104 – 105	Se igual a 0, a excitatriz não tem saturação. Se igula a 1, a excitatriz tem saturação.

Os **dados de curva de saturação** seguem os dados de cada regulador de tensão (I2 = 1).

Utiliza-se uma linha de dados para informar os dados de curva de saturação.

Variável	Formato	Colunas	Significado
NCS	I5	1 – 5	Número de identificação da curva de saturação.
ITCS	I5	6 – 10	Indica o tipo de equação usada para a curva de saturação.
Variável	Formato	Colunas	Significado
AEX	F10.6	12 – 21	Parâmetro 1.
BEX	F10.6	22 - 31	Parâmetro 2.
CEX	F10.6	32 – 41	Parâmetro 3.

Obs: $y = A_{ex} e^{B_{ex}(x-C_{ex})}$

Os **dados de defeito** seguem-se aos dados de geradores (ou de reguladores de tensão, ou de curvas de saturação, caso estejam representados). Utiliza-se uma linha de dados para informar os valores dos dados de defeito.

Variável	Formato	Colunas	Significado
BD	I5	1 – 5	Barra “de” do elemento defeituoso.
BP	I5	6 – 10	Barra “para” do elemento defeituoso.
DIST	F10.6	11 – 20	Distância da barra “de” na qual ocorre o defeito (pu).
ZC	F10.6	21 - 30	Impedância de defeito. Parte real (pu).
	F10.6	31– 40	Impedância de defeito. Parte imaginária (pu).

Os **dados de configuração da simulação** seguem-se aos dados de defeito. Esses dados são informados em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
DELTAT	F10.6	1 – 10	Passo de integração (s).
T1	F10.6	11 – 20	Tempo no qual o defeito é eliminado (s).
T2	F10.6	21 - 30	Tempo no qual o elemento defeituoso é religado (s).
T3	F10.6	31– 40	Tempo no qual ocorre nova abertura do elemento defeituoso (s).
Variável	Formato	Colunas	Significado
TLIM	F10.6	41– 50	Tempo total de simulação (s).

Obs: O defeito ocorre sempre em $t = 0$ s.

Os **dados de tipos de elementos a retirar** seguem-se aos dados de configuração da simulação. Esses dados são informados em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
ILL	I1	01 – 01	Se for diferente de 0 há linhas a retirar.
ITT	I1	02 – 02	Se for diferente de 0 há transformadores a retirar.
ISS	I1	03 – 03	Se for diferente de 0 há elementos em derivação a retirar.

Os **dados de linhas a retirar** seguem-se aos dados de tipos de elementos a retirar. Cada linha a ser retirada é informada em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
I1	I5	01 – 05	Número do circuito que será retirado. Quando for igual a 0 sinaliza fim de linhas a retirar.

Os **dados de transformadores a retirar** seguem-se aos dados de linhas a retirar. Cada transformador a ser retirado é informado em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
I1	I5	01 – 05	Número do transformador que será retirado. Quando for igual a 0 sinaliza fim de transformadores a retirar.

Os **dados de elementos *shunt* a retirar** seguem-se aos dados de linhas a retirar. Cada elemento *shunt* a ser retirado é informado em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
I1	I5	01 – 05	Número da barra na qual o elemento <i>shunt</i> está ligado. Quando for igual a 0 sinaliza fim de elementos <i>shunt</i> a retirar.

Os **dados de tipos de elementos a religar** seguem-se aos dados de configuração da simulação. Esses dados são informados em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
ILL	I1	01 – 01	Se for diferente de 0 há linhas a religar.
ITT	I1	02 – 02	Se for diferente de 0 há transformadores a religar.
ISS	I1	03 – 03	Se for diferente de 0 há elementos em derivação a religar.

Os **dados de linhas a religar** seguem-se aos dados de tipos de elementos a religar. Cada linha a ser religada é informada em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
I1	I5	01 – 05	Número do circuito que será religado. Quando for igual a 0 sinaliza fim de linhas a religar.

Os **dados de transformadores a religar** seguem-se aos dados de linhas a religar. Cada transformador a ser religado é informado em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
I1	I5	01 – 05	Número do transformador que será religado. Quando for igual a 0 sinaliza fim de transformadores a religar.

Os **dados de elementos *shunt* a religar** seguem-se aos dados de linhas a religar. Cada elemento *shunt* a ser religado é informado em uma única linha de dados.

Variável	Formato	Colunas	Significado
I1	I5	01 – 05	Número da barra na qual o elemento <i>shunt</i> será religado. Quando for igual a 0 sinaliza fim de elementos <i>shunt</i> a religar.

Os **dados de tipos de elementos a retirar** devem aparecer em sequência para representar uma nova retirada de elementos em caso de religamento sem sucesso.

B.6 Função de Avaliação Probabilística

A função de avaliação probabilística é executada para cálculo e contabilização de índices probabilísticos derivados das avaliações de estabilidade transitória. Essa função lê um arquivo de dados que contém os dados estocásticos de circuitos, os nomes dos arquivos de cenários e os dados dinâmicos a serem utilizados nas chamadas recursivas à função de estabilidade eletromecânica durante as avaliações dos estados probabilísticos gerados para cenários e distúrbios. Essa função não pode ser executada de forma isolada (*stand alone*) sendo ela que comanda chamadas recursivas às funções de fluxo de

potência e de estabilidade eletromecânica durante as avaliações probabilísticas de cenários e de distúrbios.

O arquivo de dados probabilísticos apresenta as seguintes características:

- As linhas iniciadas por “(“ são linhas de comentários;
- Cada grupo de dados é iniciado por comandos de controle, assim descritos:
 - **TITU – Título do caso**

Uma linha com o código TITU, seguida de outra linha com o título de caso
 - **CREF – Arquivo de fluxo de potência com o caso de referência**

Uma linha com o código CREF, seguida de outra linha com o nome do arquivo de dados de fluxo de potência
 - **DCTS – Dados estocásticos de circuitos, seguido ou não da opção DIST**

Cada circuito é acompanhado por seu conjunto de dados estocásticos, codificados em três linhas de informação, conforme a Tabela B.1. O final de dados estocásticos de circuitos é indicado por uma linha com 9999 a partir da primeira coluna. Se a opção DIST estiver ativada será realizada a modelagem de distúrbios durante a avaliação probabilística de cenários (cenários são preparados *off-line* e processados em lote). O final de dados estocásticos de circuitos é indicado por uma linha com ‘9999’ nas colunas de 1 a 4.
 - **DMDG – Dados de geradores**

Nas avaliações probabilísticas os dados de geradores são informados através do código DMDG seguido da opção MD02, conforme a Tabela B.2. O final de dados de geradores é indicado por uma linha com ‘9999’ nas colunas de 1 a 4.
 - **DRGT – Dados de reguladores de tensão.**

Os dados de reguladores de tensão seguem os dados de geradores. O comando de controle DRGT deve ser seguido, na mesma linha, por um dos subcomandos MD01 (excitatriz rotativa) ou MD02 (excitatriz estática). No caso de excitatriz rotativa é possível especificar em campo de dados apropriado a existência de saturação cujos parâmetros são indicados em um conjunto específico de dados de curva de saturação (vide comando de controle DCST). A Tabela B.3 apresenta o formato dos dados para o caso de excitatriz rotativa. A Tabela B.4 apresenta os dados para o caso de excitatriz estática. O final de dados de reguladores de tensão é indicado por uma linha com ‘9999’ nas colunas de 1 a 4.

- **DCST – Dados de curvas de saturação.**

No caso de utilização de reguladores de tensão com excitatrizes rotativas é possível representar-se a saturação da excitatriz através de uma curva de saturação cujos dados são informados pelo comando de controle DCST, conforme mostrado na Tabela B.5. Este comando deve vir após o comando DRGT MD01. O final de dados de curvas de saturação é indicado por uma linha com ‘9999’ nas colunas de 1 a 4.

- **DMAQ – Associação das máquinas a seus controles.**

Esse comando de controle existe apenas para manutenção de compatibilidade com o programa Anatem. Deve-se codificar apenas uma linha com o comando DMAQ nas colunas de 1 a 4 e uma linha com ‘9999’ nas colunas de 1 a 4 para indicar fim de dados.

- **DEVT – Dados do evento determinístico.**

Esse comando de controle informa os dados do evento determinístico a ser simulado para o caso de representação de incertezas somente em cenários. A Tabela B.6 apresenta o formato de dados para o comando de controle DEVT.

- **FIM – Fim de dados.** O final do arquivo de dados estocásticos deve obrigatoriamente ser assinalado pelo comando de controle FIM, codificado nas colunas de 1 a 3.

Tabela B.1 – DCTS: Dados estocásticos de circuitos

1ª linha de dados		
Colunas	Variável	Significado
1 a 4	barra de	Barra de origem do circuito.
9 a 12	barra para	Barra de chegada do circuito.
42 a 47	PrOF	Probabilidade de ocorrer defeito no circuito (pu).
48 a 53	PrCE	Probabilidade de o defeito ser localizado no trecho inicial do circuito (pu).
54 a 59	PrML	Probabilidade de o defeito ser localizado no trecho intermediário do circuito (pu).
60 a 65	PrFE	Probabilidade de o defeito ser localizado no trecho final do circuito (pu).
2ª linha de dados		
18 a 23	Pr1F	Probabilidade de o defeito ser do tipo fase-terra (pu).
24 a 29	PrFF	Probabilidade de o defeito ser do tipo fase-fase (pu).
30 a 35	Pr2F	Probabilidade de o defeito ser do tipo fase-fase-terra (pu).
36 a 41	Pr3F	Probabilidade de o defeito ser do tipo trifásico (pu).
42 a 47	PrOT	Probabilidade de o defeito ser de outros tipos (pu).

Tabela B.1 – DCTS: Dados estocásticos de circuitos (cont.)

48	M	Seleciona o modo de agregação das probabilidades de tipos de defeitos M(1) = 0; concentra 2F, FF e OUTROS em 3F = 1; distribuição proporcional (soma 2F+FF+OUTROS e distribui proporcionalmente entre 1F e 3F) = 2; sem agregacao default = 0 (concentra em 3F)
49 a 54	X1F1	Reatância equivalente para defeito fase-terra no terminal de origem do circuito (%).
55 a 60	XFF1	Reatância equivalente para defeito fase-fase no terminal de origem do circuito (%).
61 a 66	X2F1	Reatância equivalente para defeito fase-fase-terra no terminal de origem do circuito (%).
67 a 72	X3F1	Reatância equivalente para defeito trifásico no terminal de origem do circuito (%).
73 a 78	XOT1	Reatância equivalente para outros tipos de defeito no terminal de origem do circuito (%).
3ª linha de dados		
24 a 29	PrBS	Probabilidade de sucesso no religamento (pu).
30 a 35	PrMS	Probabilidade de insucesso no religamento (pu).
36 a 41	Um	Média da distribuição de tempos de eliminação de defeitos (ciclos).
42 a 47	Sgma	Desvio padrão da distribuição de tempos de eliminação de defeitos (ciclos).

Tabela B.1 – DCTS: Dados estocásticos de circuitos (final)

48	F	Seleciona o tratamento a ser dado ao tempo de eliminacao $F(1) = 0 \rightarrow \text{Telim} = \mu$ $F(1) = 1 \rightarrow \text{Telim} = [\mu - 2\sigma ; \mu ; \mu + 2\sigma]$ (3 valores) $F(1) = 2 \rightarrow \text{Telim} = [\mu - 2\sigma ; \mu - \sigma ; \mu ; \mu + \sigma ; \mu + 2\sigma]$ (5 valores) $F(1) = 3 \rightarrow \text{Telim}$ obtido por Monte Carlo (não implementado)
49 a 54	X1F2	Reatância equivalente para defeito fase-terra no terminal de chegada do circuito (%).
55 a 60	XFF2	Reatância equivalente para defeito fase-fase no terminal de chegada do circuito (%).
61 a 66	X2F2	Reatância equivalente para defeito fase-fase-terra no terminal de chegada do circuito(%).
67 a 72	X3F2	Reatância equivalente para defeito trifásico no terminal de chegada do circuito (%).
73 a 78	XOT2	Reatância equivalente para outros tipos de defeito terminal de chegada do circuito (%).

Tabela B.2 – DMDG: Dados de geradores

1ª linha de dados		
Colunas	Variável	Significado
1 a 4	No	Número do gerador.
13 a 17	L_d	Indutância síncrona de eixo direto, em %.
18 a 22	L_q	Indutância síncrona de eixo em quadratura, em %.
23 a 27	L'_d	Indutância transitória de eixo direto, em %.
43 a 47	T'_{do}	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto, em segundos.

Tabela B.2 – DMDG: Dados de geradores (cont.)

2ª linha de dados		
1 a 4	No	Número do gerador.
08 a 12	R_a	Resistência de armadura, em %.
13 a 17	H	Constante de inércia, em segundos.
23 a 27	MVA	Potência nominal aparente do gerador, em MVA.

Obs: se $L_q = L'_d = 0$, o gerador é tratado como barra infinita (modelo 0)

Tabela B.3 – DRGT MD01: Dados de reguladores de tensão com excitatriz rotativa

Colunas	Variável	Significado
1 a 4	No	Número do gerador controlado pelo regulador de tensão.
08 a 11	CS	Número da curva de saturação conforme definido no comando de controle DCST.
13 a 17	K_a	Ganho do regulador de tensão, em p.u./p.u..
18 a 22	K_e	Parâmetro da excitatriz, adimensional..
23 a 27	K_f	Ganho do circuito de realimentação derivativa, em segundos.
33 a 37	T_a	Constante de tempo do regulador de tensão, em segundos.
38 a 42	T_e	Constante de tempo da excitatriz, em segundos.
43 a 47	T_f	Constante de tempo do circuito de realimentação derivativa, em segundos.
48 a 52	L_{min}	Limite inferior da tensão de saída do regulador, em p.u..
53 a 57	L_{min}	Limite superior da tensão de saída do regulador, em p.u..

Tabela B.4 – DRGT MD02: Dados de reguladores de tensão com excitatriz estática

Colunas	Variável	Significado
1 a 4	No	Número do gerador controlado pelo regulador de tensão.
13 a 17	K_a	Ganho do regulador de tensão, em p.u./p.u..
33 a 37	T_a	Constante de tempo do regulador de tensão, em segundos.
48 a 52	L_{min}	Limite inferior da tensão de saída do regulador, em p.u..
53 a 57	L_{min}	Limite superior da tensão de saída do regulador, em p.u..

Tabela B.5 – DCST: Dados de curvas de saturação para excitatrizes rotativas

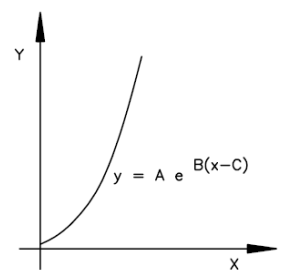
Colunas	Variável	Significado	
1 a 4	No	Número do gerador a cuja excitatriz está associada a curva de saturação.	
10 a 17	A	Valor de A_{ex} .	Obs: $y = A_{ex} e^{B_{ex}(x-C_{ex})}$ 
19 a 26	B	Valor de B_{ex} .	
28 a 35	C	Valor de C_{ex} .	

Tabela B.6 – DEVT: Dados do evento determinístico

1ª linha de dados		
Colunas	Variável	Significado
01 a 04	BD	Barra 'de' do circuito defeituoso.
06 a 10	BP	Barra 'para' do circuito defeituoso..

Tabela B.6 – DEVT: Dados do evento determinístico (final)

11 a 20	DIST	Distância a partir da barra 'de' na qual o defeito será aplicado, em %.
21 a 30	ZC_r	Parte real da impedância de defeito, em p.u..
31 a 40	ZC_i	Parte imaginária da impedância de defeito, em p.u..
2ª linha de dados		
Colunas	Variável	Significado
01 a 04	DELTAT	Passo de integração.
06 a 10	T1	Instante de eliminação do defeito, em segundos.
11 a 20	T2	Instante da tentativa de religamento do circuito defeituoso, em segundos.
21 a 30	T3	Instante da nova abertura do circuito defeituoso em caso de religamento malsucedido, em segundos.
31 a 40	TLIM	Instante final da simulação, em segundos.

B.7 Exemplos de Arquivos de Dados

Os exemplos de arquivos apresentados nas figuras a seguir correspondem ao Caso 1 (vide Capítulo VI).

```

TITU
SISTEMA DE 4 BARRAS - 100% DA CARGA
DLIN NCIR IMPR
  1      4 1      12.60
  1      4 2      12.60
  1      4 3       4.28
  2      3 1       6.27
  2      3 2      26.98
  2      3 3      26.98
  4      3 1       4.28
  4      3 2       4.28
9999
DBAR IMPR
  1  1 BARRA-----01 1000 0. 940.      -999999999      11000
  2  1 BARRA-----02 1000 0. 710.      -999999999      21000
  3  2 BARRA-----03 0901 0.      -999999999      2100. 150.      30901
  4  BARRA-----04 .918 0.      -999999999      31000
9999
DARE
  1      940.      * AREA 1 / BARRAS 1      * 930. 950.
  2      710.      * AREA 2 / BARRAS 2      * 700. 720.
  3     -1650      * AREA 3 / BARRAS 3 E 4      * -1660 -1640
9999
EXLF RCVG RGER RBAR RLIN
FIM!

```

Figura B.1 – Arquivo de dados de fluxo de potência (.dat)

```

60.000000
 1 100.00000 0.000003 0.027000 0.163100 0.158600 8.000000 38.85000 0
 2 100.00000 0.000003 0.027000 0.163100 0.158600 8.000000 38.85000 0
 3 100.00000 0.000006 0.054000 0.326200 0.317200 8.000000 19.43000 0
 0
 1 4 3 50.000000 0.000000 0.070000
0.005000 0.070000 5.010000 5.020000 5.000000
100
 3
 0
100
 3
 0
 0
100
 3
 0

```

Figura B.2 – Arquivo de dados de estabilidade (.stb)

```

(-> Comentarios sao sempre iniciados com o caracter '(' na coluna 1
(      1      2      3      4      5      6      7      8
-----0-----0-----0-----0-----0-----0-----0-----0
TITU
(-> Titulo do estudo em 80 colunas
Sistema 04 Barras - 100 % da carga
(=====
(Caso 1:
(CC 1F e 3F no ckt [3]M, da barra (1) para a barra (4), a 50% da barra (1)- local d1
(Impedancias de defeito: 1F (7 %), 3F (1 %)
(Incertezas      : 1F e 3F deterministicos
(Duracao do defeito      : fixa, igual a 70 ms
(=====
CREF
( -> Dados do cenario (rede) de referencia
( Utilizado da seguinte maneira:
(1 - quando o cenario for deterministico, este e o arquivo que contem a rede fixa
(   a ser estudada para disturbios probabilisticos
(2 - quando do estudo de incertezas somente em topologia, este e o arquivo que
(   contem a rede n
(3 - quando de estudos mistos de cenarios (com incertezas somente em topologia) e
(   disturbios
(4 - quando de estudos de cenarios mistos este arquivo nao precisa ser informado.
(   Caso seja, a informacao e ignorada
(-> Nome do arquivo de dados da rede de referencia (fluxo de potencia)
(      Nomarqref      )
04BARRAS.DAT
(DCEN TOPO
(-> Dados de cenario: incertezas em topologia
(Nivel de contingencia
(Nc = 0 - rede n, sem incertezas em topologia
(Nc = 1 - redes n e n - 1
(Nc = 2 - redes n, n - 1 e n - 2
(Os elementos com incertezas modeladas serao aqueles para os quais os valores de
(TxFa e Trep tiverem sido informados nos dados estocasticos de circuitos (DCTS)
(-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
(Nc)
( 2
(9999
DCTS DIST
(-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
(De) O (Pa)Nc (TxFa) (TRep) (RlDe) (RlPa) (PrOF) (PrCE) (PrML) (PrFE)

```

Figura B.3 – Arquivo de dados probabilísticos (.prb)

```

(
(Pr1F) (PrFF) (Pr2F) (Pr3F) (PrOT)M(X1F1) (XFF1) (X2F1) (X3F1) (XOT1)
(PrBS) (PrMS) (-mu-) (Sgma)F(X1F2) (XFF2) (X2F2) (X3F2) (XOT2)
(CKT 1
1      4
0.0      0.0      0.00 0.000 0.0000 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
0.00      0.00      4.233.3330 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
(CKT 2
1      4
0.0      0.0      0.00 0.000 0.0000 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
0.00      0.00      4.233.3330 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
(CKT 3
1      4
1.0      0.0      0.00 1.000 0.0000 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
0.00      0.00      4.233.3330 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
(CKT 4
2      3
0.0      0.0      0.00 0.000 0.0000 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
0.00      0.00      4.233.3330 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
(CKT 5
2      3
0.0      0.0      0.00 0.000 0.0000 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
0.00      0.00      4.233.3330 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
(CKT 6
2      3
0.0      0.0      0.00 0.000 0.0000 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
0.00      0.00      4.233.3330 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
(CKT 7
4      3
0.0      0.0      0.00 0.000 0.0000 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
0.00      0.00      4.233.3330 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
(CKT 8
4      3
0.0      0.0      0.00 0.000 0.0000 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
0.00      0.00      4.233.3330 7.000 4.500 2.0001.0000 7.600
9999
(=====
(MODELOS DE GERADORES
(=====
DMDG MD02
(No) (CS) (Ld ) (Lq ) (L'd) (L''d(Ll ) (T'do T''doT''qo
(No) (Ra ) ( H ) ( D ) (MVA)Fr C
0101 16.3115.86 2.7 2.072 1.35 8.0 0.03 0.07
0101 .000338.85 100.
0102 16.3115.86 2.7 2.072 1.35 8.0 0.03 0.07
0102 .000338.85 100.
0103 32.6231.72 5.40 8.0 0.03 0.07
0103 .000619.43 100.
9999
(
(=====
( DADOS DE MAQUINAS E ASSOCIACAO DAS MAQUINAS AOS CONTROLES
(=====
DMAQ
(No) Mq (P) (Q) Un (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd) (Nb)
1 1 101 1
2 1 102 2
3 1 103 3
9999
DEVT
(Dados do evento deterministico
(Utilizados qdo da representacao de incertezas somente em cenario
(BD ) (BP ) (DIST ) (ZCr ) (ZCi )
5 7 0.00000 0.00000 0.12500
( DELTAT ) ( T1 ) ( T2 ) ( T3 ) ( TLIM )
0.0050 0.1000 5.5000 5.8000 5.0000
FIM

```

Figura B.3 – Arquivo de dados probabilísticos (.prb) – final -

* * *

Anexo C Módulo Executável do Programa ASTP – Avaliação de Segurança Transitória Probabilística e Arquivos de Interesse

C.1 Conteúdo do CD de Instalação

O CD de instalação contém:

- Arquivo PDF correspondente ao texto da Tese;
- Arquivo PPS com a apresentação da Tese;
- Diretório com o módulo executável do programa ASTP;
- Diretório com arquivos de dados e outros arquivos de interesse.

C.2 Módulo Executável

O módulo executável do programa encontra-se no diretório **\ASTP**. Para sua instalação, simplesmente copie o arquivo para o diretório de trabalho do computador. Todos os arquivos de dados deverão residir no mesmo diretório de instalação do programa.

C.3 Arquivos de Interesse

O diretório **\Dados** contém uma árvore de subpastas com diversos arquivos, incluídos os arquivos de dados que geraram os resultados apresentados nesta Tese e os arquivos de saída correspondentes. Para instalação basta copiá-los para um diretório escolhido, lembrando que para executar o programa ASTP os arquivos de dados deverão ser copiados para o diretório no qual o programa foi instalado.

* * *