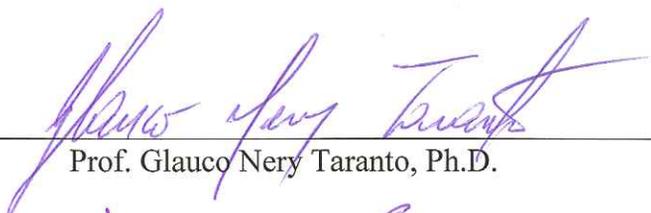


SEGURANÇA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA SOB PEQUENAS
PERTURBAÇÕES CONSIDERANDO INCERTEZAS

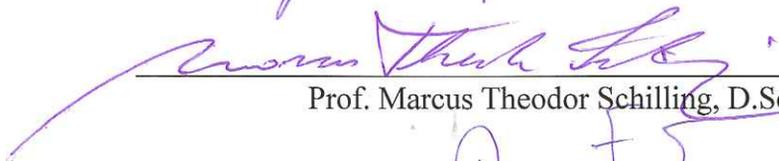
Amélia Yukie Takahata

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

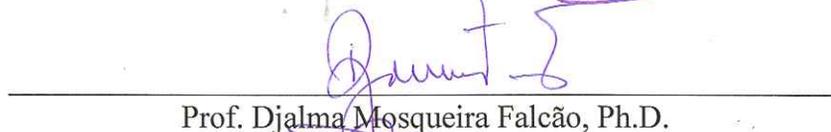
Aprovada por:



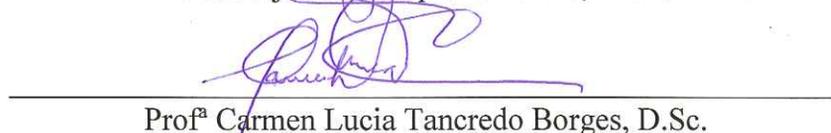
Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.



Prof. Marcus Theodor Schilling, D.Sc.



Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



Profª Carmen Lucia Tancredo Borges, D.Sc.



Prof. Luiz Cera Zanetta Junior, Dr.



Prof. Rodrigo Andrade Ramos, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO 2008

TAKAHATA, AMÉLIA YUKIE

Segurança de Sistemas de Potência sob
Pequenas Perturbações Considerando Incertezas
[Rio de Janeiro] 2008

XXI, 324 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2008)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Segurança de Sistemas de Potência
2. Autovalor
3. Confiabilidade
4. Método Probabilístico

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Este trabalho é dedicado a vocês, meus pais Kunivo e Clara, meu esposo Walter, meus filhos Lílian e Leonardo e meu irmão Mário. Sem o apoio que sempre recebi, jamais teria chegado até aqui.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, a Deus, por tudo.

Aos meus pais pela educação, apoio e carinho durante todas as fases da minha vida, que possibilitaram a realização deste trabalho.

Ao meu esposo Walter, à minha filha Lílian e ao meu filho Leonardo pela compreensão e carinho mostrados durante todo este tempo.

Meu especial agradecimento aos orientadores deste trabalho, Prof. Glauco Nery Taranto e Prof. Marcus Theodor Schilling, cujas dedicações, paciência e apoios demonstrados em vários momentos, além das palavras encorajadoras e companheirismo, permitiram a elaboração dessa Tese.

Ao meu amigo da LIGHT, Dr. João Carlos de Oliveira Aires pelo apoio e motivação para realização do curso de doutorado.

Aos meus ex-gerentes da LIGHT, Eng^o Adalésio Vieira Guimarães e Eng^o Marco Antônio de Araújo, que permitiram a realização do curso de Doutorado e também aos gerentes do ONS, Eng^o Dalton de Oliveira Camponês do Brasil, Eng^o Fernando José de Carvalho França, Dr. Roberto Nogueira Fontoura Filho e Eng^o Gilson Mussi Machado pelo apoio e interesse demonstrados durante o trabalho.

Ao Prof. Pedro Paulo de Carvalho Mendes (UNIFEI) pela presteza em fornecer os dados para aplicações. Ao Prof. Federico Milano (Universidad Castilla, La Mancha, Espanha) pelo inestimável auxílio e orientação de uso do programa PSAT (Power Systems Analysis Toolbox), utilizado intensivamente nesta Tese. Ao Prof. Zhao Yang Dong (University of Queensland, Austrália) pelo generoso envio de material bibliográfico.

Aos colegas, Dr. Antonio Luiz Bergamo do Bomfim (ELETROBRÁS), Eng^o Camilo Braga Gomes (CEPEL), Dr. Waltencir de Andrade (COPPE/UFRJ), Eng^o João

Magalhães Dahl (ONS) e Eng^o Neyl Hamilton M. Soares (ONS), pelo apoio e ajuda na solução de alguns problemas encontrados durante o processo de implementação. Aos colegas, Dr. Jorge Luiz de Araujo Jardim (Ex-ONS, Nexant), Eng^o Marcelos Groetaers dos Santos (ONS), Prof^a Tatiana M. Lessa de Assis (UFF) e Eng.^a Roseane de Souza Nunes (ONS), pelo apoio técnico na fase de implementação e execução do programa protótipo desenvolvido. Aos colegas do ONS, Eng^o Sergio Luiz Pinto de Castro Valinho e Eng^o Lenilson Veiga Mattos que contribuíram para dirimir dúvidas relacionadas ao MATLAB. Aos colegas do ONS, Eng^o Dinemayer Silva e Samir da Silva Pereira pelo auxílio técnico na formatação do presente documento.

A Light Serviços de Eletricidade – LIGHT e ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS pela oportunidade de cursar o Doutorado. Aos professores do curso de Doutorado da área de sistemas de potência, pelo conhecimento transmitido. Aos amigos da LIGHT e ONS que me ajudaram a percorrer esse longo e difícil caminho. A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Nota: A elaboração deste trabalho contou com o auxílio indireto do CNPq e FAPERJ (PRONEX).

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

SEGURANÇA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA SOB PEQUENAS
PERTURBAÇÕES CONSIDERANDO INCERTEZAS

Amélia Yukie Takahata

Maio/2008

Orientadores: Glauco Nery Taranto

Marcus Theodor Schilling

Programa: Engenharia Elétrica

Esta Tese propõe uma nova extensão da análise probabilística clássica de confiabilidade, sob o ponto de vista de adequação de sistemas de potência, para o âmbito da análise probabilística linearizada da estabilidade dos sistemas sujeitos a pequenas perturbações. A estratégia de solução proposta baseia-se em nova abordagem para tratamento dos diferentes tipos de incertezas, inerentes aos sistemas de potência utilizando técnicas de enumeração e Monte Carlo. Novos indicadores de segurança são formulados e implementados em um protótipo computacional capaz de tratar sistemas de pequeno porte. Vários experimentos são apresentados utilizando sistemas fictícios com 5, 39 e 1762 barras.

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

POWER SYSTEMS SMALL SIGNAL SECURITY ANALYSIS
CONSIDERING UNCERTAINTIES

Amélia Yukie Takahata

May/2008

Advisors: Glauco Nery Taranto
Marcus Theodor Schilling

Department: Electrical Engineering

This Thesis proposes a new extension of the conventional power system reliability analysis, from the point of view of probabilistic adequacy, to the realm of the linearized stability analysis of a power system, subject to small signals and uncertainties. The adopted solution strategy is based on a new approach to classify several types of uncertainties, inherent to power systems using enumeration and Monte Carlo techniques. A set of new reliability indexes are formulated and tested with the aid of a computational prototype developed to deal with small fictitious systems. A number of practical experiments are presented using test-systems with 5, 39, 1762 busses.

Sumário

Lista de Tabelas	xiii
Lista de Figura	xvi
Nomeclatura e Símbolos.....	xxi
Capítulo I Introdução	1
I.1 Considerações Preliminares	1
I.2 Objetivo da Tese	3
I.3 Estrutura	3
I.4 Publicações.....	4
Capítulo II Estado-da-Arte	5
II.1 Introdução	5
II.2 Premissas da Pesquisa	5
II.3 Revisão Bibliográfica.....	5
II.4 Diagnóstico	25
II.5 Sumário	37
Capítulo III Conceituação e Metodologia	38
III.1 Introdução	38
III.2 Modelagem de Incertezas.....	40
III.2.1 Evolução Temporal das Incertezas.....	40
III.2.2 Tratamento das Incertezas Estacionárias	41
III.2.3 Composição de Incertezas Estacionárias	52
III.2.4 Convexidade do Espaço Probabilístico	52
III.3 Modelagem de Estratégias Corretivas.....	55
III.4 Lógica do Procedimento Conceitual Generalizado.....	57
III.5 Indicadores de Segurança Estática Probabilística	62
III.6 Categorias de Indicadores de Segurança Estática Probabilística.....	65

III.6.1	Índices Baseados em Medidas de Probabilidades	65
III.6.2	Índices Baseados em Medidas Centrais	69
III.6.3	Índices Baseados em Medidas de Dispersão.....	75
III.6.4	Índices de Desempenho.....	75
III.7	Considerações Adicionais Sobre a Modelagem.....	76
III.8	Sumário	76
Capítulo IV	Protótipo Computacional	78
IV.1	Introdução	78
IV.2	Premissas Básicas	78
IV.2.1	Seleção dos Estados do Sistema.....	78
IV.2.2	Análise do Estado Selecionado	79
IV.2.3	Cálculo dos Indicadores	79
IV.3	Obstáculos Práticos	81
IV.3.1	Escolha dos Cenários a Serem Avaliados	81
IV.3.2	Natureza Combinatorial do Espaço de Estados	81
IV.4	Estrutura Lógica do Protótipo Computacional.....	82
IV.4.1	Tratamento Computacional Apenas para Incertezas em Cenários	84
IV.4.2	Tratamento Computacional Apenas para Incertezas do Tipo Ruído	107
IV.4.3	Tratamento Computacional para a Combinação de Incertezas em Cenários e Ruídos	116
IV.5	Sumário	119
	Adendo ao Capítulo IV: Cenários.....	120
	Adendo ao Capítulo IV: Ruídos.....	156
Capítulo V	Aplicação e Resultados	190
V.1	Introdução	190
V.2	CrITÉrios Adotados para Avaliação da Segurança Estática	191

V.3	Simulações para Análise Considerando Incertezas	
	Somente em Cenários.....	191
V.4	Resultados Obtidos: Incertezas Somente em Cenários	197
V.4.1	Interpretação dos Resultados: Experimentos	
	#C1, #C2, #C3.....	198
V.4.2	Interpretação dos Resultados: Experimentos	
	#C4, #C5, #C6.....	206
V.4.3	Interpretação dos Resultados: Experimentos	
	#C7, #C8, C#9.....	213
V.4.4	Interpretação dos Resultados: Experimentos	
	C10,#C11,#C12.....	220
V.4.5	Requisitos Computacionais	224
V.5	Resultados Obtidos: Influência da Carga, Topologias	
	e Dados Estocásticos sobre Indicadores.....	225
V.5.1	Influência da Carga	225
V.5.2	Influência dos Dados Estocásticos	226
V.5.3	Influência da Topologia	227
V.6	Simulações para Análise Considerando Incertezas	
	Somente em Ruídos	229
V.7	Resultados Obtidos: Incertezas Somente em Ruídos.....	230
V.7.1	Interpretação dos Resultados: Experimentos	
	#R1 e #R2.....	231
V.7.2	Interpretação dos Resultados: Experimento	
	#R3	241
V.7.3	Interpretação dos Resultados: Experimentos	
	#R4 e R#5.....	244
V.7.4	Interpretação dos Resultados: Experimentos	
	#R6	249
V.7.5	Requisitos Computacionais	252
V.8	Simulações para Análise Considerando Incertezas em	
	Cenários e Ruídos	253
V.9	Resultados Obtidos: Incertezas em Cenários e Ruídos.....	253

V.9.1	Interpretação dos Resultados: Experimento	
#H1	254
V.9.2	Interpretação dos Resultados: Experimento	
#H2	264
V.9.3	Requisitos Computacionais	265
V.10	Sumário	266
Capítulo VI	Conclusões	267
VI.1	Retrospectiva	267
VI.2	Principais Contribuições	267
VI.3	Sugestões para Futuros Trabalhos	268
	Referências Bibliográficas	270
Anexo A	Dados Elétricos dos Sistemas de Potência Analisados	282
A.1	Sistema-Teste 5 Barras [53]	282
A.2	Sistema New England de 39 barras [104],[105]	286
A.3	Sistema Equivalentado Sul/Sudeste de 1762 Barras	
[59]	291
Anexo B	Manual de Utilização do Programa APPS – Versão 1.0	
	(Análise Probabilística de Pequenos Sinais)	294
B.1	Manual de Utilização	294
B.2	Capacidade do programa	294
B.3	Dados de Entrada	295
B.4	Dados de Modelos Estocásticos	295
B.5	Encerramento dos Arquivos de Dados	304
B.6	Dados Determinísticos da Rede Elétrica	304
B.7	Execução do Programa	311
Anexo C	Arquivo de Dados Para o Sistema Teste 5 Barras	313
C.1	Arquivo de Dados de Entrada	313
C.1.1	Arquivo de Dados Probabilísticos	313
C.1.2	Arquivo de Dados Determinísticos	314
C.2	Arquivo de Dados de Saída	316
C.2.1	Arquivo de Saída com Dados Determinísticos	
Lidos	316

	C.2.2	Arquivo de Saída com Dados Probabilísticos	
		Lidos.....	317
	C.2.3	Arquivo de Saída com Dados do Espaço	
		Probabilístico de Cenários.....	318
	C.2.4	Arquivo de Saída com os Indicadores	
		Obtidos	319
Anexo D		Validação PSAT vs ANAREDE & PACDYN.....	322
Anexo E		APPS: Programa Fonte Executável	324

Lista de Tabelas

Tabela II-1	– Síntese da Revisão da Literatura	26
Tabela III-1	– Características e Viabilidade de Tratamento dos Espaços Probabilísticos de Estados	42
Tabela III-2	– Requisitos de Dados Estatísticos para os Cenários de Adequação e Segurança Estática	47
Tabela III-3	– Confiabilidade Preditiva Probabilística Perante Combinações de Incertezas	53
Tabela III-4	– Possibilidades de Uso de Medidas Corretivas no Âmbito da Análise Probabilística	56
Tabela III-5	– Tipologia Simplificada de Indicadores Probabilísticos de Adequação e Segurança Estática Probabilística	63
Tabela IV-1	– Número de Combinações para Formação do Espaço de Estados.....	82
Tabela IV-2	– Resultados Gerados pelo Programa para o Sistema Duas Barras	96
Tabela IV-3	– Tratamento dos Estados Viáveis e Inviáveis do Espaço Probabilístico de Cenários	100
Tabela V-1	– Critérios Adotados	191
Tabela V-2	– Experimentos Considerando Incertezas Apenas em Cenários.....	192
Tabela V-3	– Probabilidade dos Cenários de Intercâmbios – Sistema 5 Barras.....	194
Tabela V-4	– Probabilidade dos Cenários de Patamares de Carga – Sistema 5 barras	195
Tabela V-5	– Desempenho Estocástico da Topologia – Sistema New England	196
Tabela V-6	– Desempenho Estocástico da Topologia – Sistema Equivalentado Sul/Sudeste	197
Tabela V-7	– Espaços Probabilísticos do Sistema 5 Barras	198
Tabela V-8	– Autovalores do Sistema 5 Barras.....	199
Tabela V-9	– Indicadores de Segurança Probabilística do Sistema 5 Barras – Sem Estabilizadores.....	203

Tabela V-10 – Indicadores de Segurança Probabilística do Sistema 5 Barras – Com Estabilizadores.....	209
Tabela V-11 – Espaços Probabilísticos do Sistema New England.....	214
Tabela V-12 – Indicadores de Segurança Probabilística – Sistema New England.....	217
Tabela V-13 – Indicadores de Segurança Estática Probabilística do Sistema Equivalente Sul//Sudeste.....	222
Tabela V-14 – Análise de Sensibilidade: Variação de Dados Probabilísticos	226
Tabela V-15 – Análise de Sensibilidade – Incertezas em Cenários de Intercâmbios: Topologias Distintas.....	228
Tabela V-16 – Experimentos Considerando Incertezas Somente em Ruídos	230
Tabela V-17 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos – Experimento #R1.....	237
Tabela V-18 – Variação do Desvio Padrão x Número de Sorteios das Variáveis Aleatórias.....	240
Tabela V-19 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos Experimento #R2.....	241
Tabela V-20 – Experimentos Considerando Incertezas em Cenários e Ruídos	253
Tabela V-21 – Probabilidade dos Cenários de Patamares de Carga – Sistema 5 barras	254
Tabela V-22 – Indicadores – Teste 5 Barras – Com Estabilizadores – Incertezas Somente em Cenários.....	255
Tabela V-23 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos – Somente Ruídos.....	261
Tabela V-24 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos – Experimento #H1	263
Tabela V-25 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos – Experimento #H2	265
Tabela A-1 – Dados do Sistema Teste 5 Barras	283
Tabela A-2 – Parâmetros Dinâmicos dos Geradores Síncronos do Sistema	284
Tabela A-3 – Parâmetros do Regulador de Tensão	285
Tabela A-4 – Parâmetros do Estabilizador de Sistema de Potência	286
Tabela A-5 – Patamares de Carga – Sistema New England.....	286

Tabela A-6	– Distribuição de Carga e Geração por Barras — Sistema New England ..	287
Tabela A-7	– Dados dos Ramos do Sistema New England	288
Tabela A-8	– Dados das Máquinas Síncronas	290
Tabela A-9	– Dados dos Sistemas de Excitação	291
Tabela A-10	– Condições de Fluxo de Potência do Sistema Sul/Sudeste	293
Tabela A-11	– Valor de Geração nas Regiões Sul, Sudeste e Itaipu.	293
Tabela B-1	– Capacidade Atual do Programa APPS – Versão 1.0.....	295
Tabela B-2	– Formato de Linha para Dados de Medidas Corretivas.....	297
Tabela B-3	– Formato de Linha para Dados de Arquivos de Cenários	298
Tabela B-4	– Formato de Linha Típica para Dados Estocásticos de Cenários de Intercâmbios	299
Tabela B-5	– Formato da Linha de Identificação dos Modelos Estocásticos Fornecidos pelo Arquivo de Saída do Programa MODCAR.....	300
Tabela B-6	– Formato da Linha de Identificação dos Modelos Estocásticos de Cenários de Patamares de Carga	300
Tabela B-7	– Formato de Linha de Identificação do Tipo de Contingências	301
Tabela B-8	– Formato de Linha de Identificação do Nome de Arquivo de Saída do Programa NH2	301
Tabela B-9	– Formato de Linha Típica para Dados Estocásticos de Topologias N-1 ..	301
Tabela B-10	– Formato de Linha Típica para Dados de Carga por Barra	302
Tabela B-11	– Formato de Linha Típica para Dados de Barra	305
Tabela B-12	– Formato de Linha Típica para Dados de Barra Referência.....	305
Tabela B-13	– Formato de Linha Típica para Dados de Barra Controlada	306
Tabela B-14	– Formato de Linha Típica para Dados de Barra de Carga.....	306
Tabela B-15	– Formato de Linha Típica para Dados de Linhas e Transformadores	307
Tabela B-16	– Formato de Linha Típica para Dados de Linhas e Transformadores	308
Tabela B-17	– Formato de Linha Típica para Dados de Regulador de Tensão.....	309
Tabela B-18	– Formato de Linha Típica para Dados de Estabilizador de Tensão	310

* * *

Lista de Figuras

Figura II -1	– Processo de Análise de Segurança Dinâmica, Anderson & Bose [17].	13
Figura III -1	– Estratégias para Análise de Segurança Dinâmica a Pequenas Perturbações.....	40
Figura III -2	– Relacionamento Hierárquico entre as Incertezas de um Sistema de Potência.....	43
Figura III -3	– Avaliando Incertezas de Cenários e Distúrbios	48
Figura III-4	– Lógica do Procedimento Conceitual Generalizado.....	57
Figura IV-1	– Fluxograma Destacando a Composição das Incertezas.....	83
Figura IV-2	– Fluxograma Simplificado do Processamento de Somente Cenários	85
Figura IV-3	– Fluxograma Detalhado da Construção do Espaço Probabilístico de Cenários.....	87
Figura IV-4	– Leitura de Dados Determinísticos para Topologia N e/ou Formação de Arquivos de Dados Determinísticos das Topologias N-1 e N-2.....	90
Figura IV-5	– Diagrama Unifilar do Sistema Teste Duas Barras.....	93
Figura IV-6	– Determinação de Estados Viáveis de Cenários, Filtragem de Estados Inviáveis e Verificação de Convexidade dos Estados Viáveis.....	97
Figura IV-7	– Tratamento da Verificação da Convexidade dos Estados Viáveis	99
Figura IV-8	– Avaliação de Segurança Estática Sob Pequenas Perturbações (Apenas Cenários)	102
Figura IV-9	– Fluxograma Detalhado da Atuação de Medidas Corretivas para Cenários	105
Figura IV-10	– Tratamento Conceitual de Incertezas do Tipo Ruído.....	108
Figura IV-11	– Detalhamento do Processo de Geração da Incerteza do Tipo Ruído	109
Figura IV-12	– Avaliação de Segurança Sob Pequenas Perturbações dos Estados Viáveis em Presença de Ruídos	111

Figura IV-13 – Fluxograma Detalhado da Atuação de Medidas Corretivas para Ruídos	115
Figura IV-14 – Combinação de Incertezas em Cenários e Ruídos.....	117
Figura IV-15 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Intercâmbios	120
Figura IV-16 – Sistema Teste Fictício de 2 Barras	125
Figura IV-17 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Patamares de Carga	126
Figura IV-18 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste Duas Barras.....	129
Figura IV-19 – Construção do Espaço Probabilístico de Cenários Com Incertezas em Topologias	130
Figura IV-20 – Espaço de Estados Completo (22 = 4 Estados)	133
Figura IV-21 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Intercâmbios e Patamares de Carga.....	135
Figura IV-22 – Composição do Espaço de Estados do Sistema Teste 2 Barras Com Incertezas em Intercâmbios e Patamares de Carga.....	137
Figura IV-23 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Intercâmbios e Topologias.....	140
Figura IV-24 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste 2 Barras e o Espaço de Estados Com Incertezas em Intercâmbios e Topologias.....	142
Figura IV-25 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Patamares de Carga e Topologias	145
Figura IV-26 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste 2 Barras e o Espaço de Estados Com Incertezas em Patamares de Carga e Topologias	147
Figura IV-27 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Intercâmbios, Patamares de Carga e Topologias	150
Figura IV-28 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste 2 Barras e o Espaço de Estados Com Incertezas em Intercâmbios, Patamares de Carga e Topologias ..	152
Figura IV-29 – Leitura de Dados Determinísticos de um Cenário.....	156
Figura IV-30 – Discriminação por Barras de Dados Probabilísticos Lidos por Área Elétrica.....	159

Figura IV-31 – Atribuição Numérica de Ruídos nas Partes Ativa e Reativa de Barras de Carga	162
Figura IV-32 – Classificação das Barras por Tipologias de Ruído, Acoplamento, Sorteio e Distribuição Probabilística	164
Figura IV-33 – Modelagem de Ruídos na Magnitude da Carga	167
Figura IV-34 – Modelagem de Ruído na Magnitude Com Sorteio Conforme e Tipo de Distribuição Normal	168
Figura IV-35 – Modelagem de Ruído na Magnitude e Sorteio Não Conforme	171
Figura IV-36 – Ruído na Magnitude com Sorteio Não Conforme e Distribuição Normal	174
Figura IV-37 – Ruído nos Percentuais de Composição da Carga	176
Figura IV-38 – Modelagem de Ruídos nos Percentuais de Composição da Carga.....	178
Figura IV-39 – Ruído na Modelagem Percentual da Carga e Sorteio Não Conforme...	179
Figura IV-40 – Classificação do Tipo de Ruído e Sorteio	181
Figura IV-41 – Sorteio Conforme	183
Figura IV-42 – Composição do Sorteio Conforme na Magnitude da Carga.....	185
Figura IV-43 – Composição do Sorteio Conforme na Magnitude da Carga.....	187
Figura V-1 – Cenário 1 – Área 1 Exportadora	193
Figura V-2 – Cenário 2 – Área 2 Exportadora	194
Figura V-3 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C1.....	201
Figura V-4 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C2.....	202
Figura V-5 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C3.....	202
Figura V-6 – Expectância da Margem do Autovalor e Amortecimento Crítico.....	205
Figura V-7 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C4.....	207
Figura V-8 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C5.....	208
Figura V-9 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C6.....	208
Figura V-10 – Expectância da Margem do Autovalor e Amortecimento Crítico.....	212
Figura V-11 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C7.....	215
Figura V-12 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C8.....	216
Figura V-13 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C9.....	216

Figura V-14	– Expectância Média da Margem do Autovalor e Amortecimento Crítico.....	219
Figura V-15	– Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C10.....	220
Figura V-16	– Autovalores do Espaço Probabilístico– Experimento #C11.....	221
Figura V-17	– Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C12.....	221
Figura V-18	– Análise de Sensibilidade – Cenário 1 Exportador Máximo: Variação da Carga Total	225
Figura V-19	– Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R1.....	234
Figura V-20	– Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R2.....	239
Figura V-21	– Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R3.....	243
Figura V-22	– Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R4.....	246
Figura V-23	– Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R5.....	248
Figura V-24	– Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R6.....	252
Figura V-25	– Autovalores do Espaço Probabilístico – Sistema-Teste 5 Barras	255
Figura V-26	– Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Carga Média – Incertezas Somente em Ruídos.....	258
Figura V-27	– Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Carga Leve – Incertezas Somente em Ruídos.....	260
Figura V-28	– Incertezas em Cenários e Ruídos – Experimento #H1.....	263
Figura V-29	– Incertezas em Cenários e Ruídos – Experimento #H2.....	264
Figura A-1	– Sistema Teste 5 Barras.....	282
Figura A-2	– Modelo do Regulador de Tensão	284
Figura A-3	– Modelo do Estabilizador de Sistema de Potência.....	285

Figura A-4	– Sistema New England de 39 Barras [104],[105]	288
Figura A-5	– Sistema Equivalentado Sul/Sudeste de 1762 Barras [59]	292
Figura A-6	– Sistema de Atendimento a Área Rio de Janeiro/Espírito Santo.....	292

* * *

Nomeclatura e Símbolos

- EFA** – Expectância dos Amortecimentos Críticos
- EMA** – Expectância do Montante de Ajuste de Medidas Corretivas
- EMC** – Expectância das Margens Críticas
- ESP** – Número de Estados de Sucesso Parcial
- ESS** – Número de Estados de Insucesso
- EST** – Número de Estados de Sucesso Total
- MAC** – Média Aritmética dos Amortecimentos Críticos
- MAM** – Média Aritmética das Margens Críticas
- MDA** – Mediana dos Amortecimentos Críticos
- MDM** – Mediana das Margens Críticas
- PAM** – Probabilidade de Ocorrência do Fator de Amortecimento em Faixa Especificada
- PFE** – Probabilidade de Ocorrência da Frequência em Faixa Especificada
- PFS** – Probabilidade de Ocorrência da Frequência Superior a Valor Específico
- POE** – Probabilidade de Ocorrência da Estabilidade
- POI** – Probabilidade de Ocorrência da Instabilidade
- PSP** – Probabilidade de Sucesso Parcial
- PSS** – Probabilidade de Insucesso
- PST** – Probabilidade de Sucesso Total
- β** – Coeficiente de Variação
- ζ_{\min}** – Fator de Amortecimento Mínimo

* * *

Capítulo I

Introdução

“Prepare, and be forewarned in time. If thou has tried and failed, O dauntless fighter, yet lose not courage; fight on, and to the charge return again and yet again”.

(Āryasanga)

I.1 Considerações Preliminares

O uso prático das técnicas de análise de confiabilidade em sistema de potência, considerando 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 foi registrado no que concerne o aspecto da *monitoração preditiva* numérica. Os aspectos associados à *diagnose* dos índices probabilísticos e uso *gerencial* dos resultados obtidos ainda não atingiram maturidade relevante, tanto no Brasil como no exterior. Mesmo a prática da monitoração só encontrou razoável difusão 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, Schilling *et alii* [21,30]; Li [94], a espera de soluções realistas.

Um dos primeiros trabalhos, Kobayashi *et alii* [6], na área de estudos probabilísticos de estabilidade de sistemas de potência sofrendo de influências de pequenas perturbações ou em áreas afins, data de 1973, onde as incertezas em alguns parâmetros dos sistemas eram incorporadas. Portanto o enfoque não é recente, mas a difusão do tema não evoluiu de modo significativo até o presente.

Nos sistemas de potências existem diversas incertezas associadas aos elementos do próprio sistema, que incluem variações de cargas, de parâmetros de máquinas e sistemas de excitação, de configuração da rede de transmissão e disponibilidades de unidades geradoras. Na realidade, essas variações são fenômenos aleatórios, inerentes ao próprio sistema. Do lado dos parâmetros de máquinas e sistemas de excitação, essas variações

podem ser causadas por ajustes paramétricos que ainda estão em fase de sintonia. Do lado da disponibilidade de unidades geradoras, essas variações decorrem principalmente de incertezas associadas ao despacho viável para a unidade. Do lado da carga, as variações são provenientes das incertezas associadas à natureza da previsão da própria carga. Essas incertezas são tanto maiores quanto mais longínquos forem os horizontes envolvidos. Finalmente, do lado da configuração da rede de transmissão, as variações decorrem das saídas forçadas de equipamentos de transmissão, sejam eles linhas ou transformadores.

Como resultado, a análise de confiabilidade puramente determinística, que se baseia na adoção de grandezas com valores conservativos, visando à minimização dos riscos do sistema, não é satisfatoriamente suficiente para a avaliação mais realista do desempenho do sistema de potência. A adoção deste tipo de análise, embora predominante, admite dois tipos de crítica: (i) mesmo a adoção de folgas ou margens determinísticas de segurança acentuadas não garante a anulação absoluta de riscos; (ii) os custos associados ao potencial desperdício de recursos utilizados para a inserção de margens de segurança avantajadas, pode comparar-se desfavoravelmente com os custos associados aos modos de falha do sistema.

Nesse contexto justifica-se então o planejamento e a operação, levando-se em conta as incertezas intrínsecas a todo o sistema. Esse tipo de estratégia caracteriza a denominada *análise de confiabilidade em presença de incertezas*, na qual a monitoração preditiva do desempenho do sistema realiza-se extrapolando-se o desempenho pretérito constatado. Essa estratégia é respaldada pela experiência prática e a estatística.

Enquanto os desempenhos verificados por elementos, componentes e sistemas são espelhados através de estatísticas, o desempenho futuro do mesmo sistema pode ser relacionado a processos estocásticos, representados por distribuições probabilísticas. O tratamento de incertezas admite inúmeras outras variantes, Klir & Folger [27] que, por dificuldades de tratamento computacional e por ainda não gozarem de larga difusão, não serão aqui objeto de análise.

Nessa perspectiva, na presente Tese descrevem-se diversos requisitos de um emulador computacional adequado para a avaliação quantitativa e qualitativa da confiabilidade

estendida de sistemas elétricos de potência, enfatizando as suas características que o identificam como sistema complexo, submetido a uma variada gama de incertezas.

Propõe-se um procedimento computacional para o tratamento linearizado da dinâmica do sistema, sob a influência de diversas classes de incertezas (e.g. incertezas relacionadas a *cenários* e incertezas caracterizadas como *ruídos*), utilizando-se técnicas de enumeração (para incertezas em cenários) e simulação Monte Carlo (para incertezas do tipo ruído).

I.2 Objetivo da Tese

O objetivo desta Tese é *apresentar um novo procedimento computacional que subsidie a avaliação dinâmica linearizada da estabilidade do sistema de potência sob a influência de pequenas perturbações, através de um conjunto de novos indicadores de segurança dinâmica que levam em conta a presença de incertezas.*

I.3 Estrutura

Organizacionalmente, o Capítulo II desta Tese apresenta uma revisão bibliográfica abrangente do tema enfocado.

O Capítulo III tem um enfoque conceitual e como tal discute diversos tópicos correlatos ao tema em desenvolvimento, úteis para a proposição de um protótipo computacional.

No Capítulo IV, apresenta-se o detalhamento do protótipo computacional desenvolvido. Alguns detalhes da lógica computacional foram deslocados para um adendo visando à conveniência do leitor.

O Capítulo V apresenta um variado conjunto de aplicações e respectivos resultados comentados.

Finalmente, no Capítulo VI registram-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Os anexos A, B e C registram respectivamente os dados dos sistemas usados, o manual do usuário do programa desenvolvido (vide CD em apenso) e exemplos de arquivos usados. Os anexos D e E registram informações complementares.

I.4 Publicações

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

[82] A.Y. Takahata, G.A. Medeiros, L.P. Calôba, G.N. Taranto, M.Th. Schilling, “*Avaliação Prática de Estabilidade Transitória no Sistema Brasileiro Utilizando Redes Neurais*”, CBA 2004, Gramado, Rio Grande do Sul, Setembro, 2004.

[93] J.L.A. Jardim, A.Y. Takahata, G.N. Taranto, M.Th. Schilling, “*Fluxo de Potência Robusto: Formulação Dinâmica Sintética*”, XVIII SNPTEE, Grupo IV, Paraná, Curitiba, Outubro, 2005.

[96] A.Y. Takahata, G.N. Taranto, M.Th. Schilling, “*Análise Dinâmica de Sistemas de Potência a Pequenas Perturbações Considerando Incertezas*”, X SEPOPE, Florianópolis, 21-25, Maio, 2006.

[97] M.Th. Schilling, J.C. Stacchini de Souza, M.B. Do Couto Filho, A.Y. Takahata, M. Groetaers dos Santos, G.N. Taranto, “*Confiabilidade Estendida de Sistemas de Potência: Segurança Probabilística*”, X SEPOPE, Florianópolis, Maio, 2006.

[101] M.Th. Schilling, M.B. Do Couto Filho, J.C. Stacchini de 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 Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE, Foz do Iguaçu, Maio, 2007.

* * *

Capítulo II

Estado-da-Arte

II.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma visão geral do que vem sendo proposto nas últimas décadas, na área relacionada à análise linearizada da estabilidade de sistemas de potência sob a influência de pequenas perturbações, considerando a influência de incertezas.

II.2 Premissas da Pesquisa

A pesquisa bibliográfica encetada abrangeu um vasto conjunto de periódicos, livros-texto, anais de conferências, relatórios, dissertações, teses e portais, tanto no Brasil como no exterior. A principal motivação para a revisão de um item qualquer, foi devida à presença de palavras-chave, tais como “*estabilidade, segurança, confiabilidade, dinâmica, transitório, incerteza, probabilidade, autovalor, pequeno sinal*”.

Verificou-se, entretanto, que grande parte deste material não continha aspectos específicos relacionados estritamente ao tratamento de autovalores sob influência de incertezas [30]. Na verdade, foi de fato constatado que a bibliografia realmente específica do tema é relativamente reduzida. Mesmo assim, optou-se por manter o registro de todo o material revisado, a título de eventual subsídio para outros fins.

II.3 Revisão Bibliográfica

Inicialmente convém ressaltar que o tema é deveras escasso na literatura livresca da área. Verifica-se, por exemplo, que os textos de Endrényi [12], Heydt [22], Billinton &

Allan [37], Rogers [67] e Pai *et alii* [88], apesar de tratarem ou da estabilidade a pequenos sinais ou de metodologias probabilísticas e da análise de confiabilidade em geral, no que se refere à análise probabilística de estabilidade a pequenos sinais, o tema não é tratado em nenhuma dessas obras. O texto de Li [94] propõe um modelo analítico para avaliação de risco, porém considerando apenas a análise de estabilidade transitória. O texto de Anders [32] é o único que trata da modelagem probabilística para análise de estabilidade a pequenas perturbações utilizando metodologia analítica proposta por Burchet & Heydt [10], que será discutida adiante.

Também na academia nacional verifica-se que diversas dissertações e teses abordaram os temas ligados à confiabilidade sob o ponto de vista dinâmico, Rei [46], Ferreira [63],[73] posicionamento de autovalores mediante ajustes de reguladores Bomfim [59], relacionamento da capacidade de transmissão e amortecimento entre áreas Barbosa [53], Assis [100], solução numérica de espaços de estado de grande porte, etc, Borges [48]. Em alguns desses trabalhos encontra-se um viés de tratamento probabilístico, mas não há uma incursão direta ao tema aqui enfocado.

A avaliação probabilística para estudos dinâmicos de sistemas de potência foi iniciada na década de 70. Um dos primeiros trabalhos na área foi publicado em 1973 através do artigo de Kobayashi *et alii* [6]. Neste artigo foram discutidos modelos lineares e não-lineares com parâmetros não determinísticos. Ficou comprovado pelas simulações Monte Carlo que o modelo linear foi equivalente ao não-linear no sistema de uma máquina conectada à barra infinita. Além disso, eles propuseram a região de estabilidade chamada “região 3σ ” para discutir a margem de estabilidade.

Sob a perspectiva do desenvolvimento histórico do tema, cumpre notar que já em 1977 Zein El-Din & Alden [8] apresentam uma nova metodologia para cálculo de autovalores pela técnica de sensibilidade de segunda ordem, dando continuidade aos trabalhos de Van Ness *et alii* [3], que aplicaram a técnica de sensibilidade de primeira ordem. Esta técnica está detalhadamente desenvolvida no apêndice do artigo [3]. A importância prática desta proposta resulta do fato de que a mesma, embora determinística, pode ser encarada como prenúncio do uso das técnicas probabilísticas. Isso ocorre porque a

análise de sensibilidade pode ser associada às técnicas de enumeração combinatorial, utilizadas para o tratamento de espaços probabilísticos de dimensões reduzidas.

Em 1978, Burchett & Heydt [10] desenvolveram um *método analítico* considerando incertezas em parâmetros com distribuição normal, onde se fez uso das análises de sensibilidades dos autovalores em relação a esses parâmetros.

As metodologias analíticas para avaliação de estabilidade com incertezas são bastante complexas. Esses métodos descrevem os modelos do sistema através de equações, as quais são solucionadas explicitamente e numericamente. Os métodos analíticos apresentam dificuldades que podem impedir uma aplicação em sistemas de grande porte.

Na linha de desenvolvimento analítico proposta por Burchett & Heydt [10], descreve-se uma análise de estabilidade a pequenas perturbações através da determinação da função densidade de probabilidade da parte real dos autovalores da matriz de estados do sistema [A]. Esta função densidade de probabilidade é então utilizada para computar a probabilidade de que o sistema elétrico de potência apresentará um ponto de operação estável.

Todos os procedimentos de solução são analíticos, isto é, as equações descrevendo os modelos de sistema são também solucionadas explicitamente ou numericamente. Para encontrar essas soluções são efetuadas algumas simplificações, suposições e aproximações. Burchett & G.T. Heydt consideram que $\gamma_i, i = 1, 2, \dots, r$ são r parâmetros não determinísticos do sistema. Para pequenas mudanças na *i-ésima* componente do vetor γ , tem-se que

$$\Delta\lambda_j = \frac{\partial\lambda_j}{\partial\gamma_i} \Delta\gamma_i \quad (\text{II-1})$$

onde $\Delta\gamma_i$ é uma pequena mudança em um particular γ_i e $\Delta\lambda_j$ é o resultado da mudança no *j-ésimo* autovalor. $\partial\lambda_j/\partial\gamma_i$ é a derivada parcial em relação a *j-ésima* a sensibilidade do *j-ésimo* autovalor para um γ_i . Esta sensibilidade é computada [3]:

$$\frac{\partial \lambda_j}{\partial \gamma_i} = \frac{\left\langle \frac{\partial A}{\partial \gamma_i} W_j, V_j \right\rangle}{\langle W_j, V_j \rangle} \quad (\text{II-2})$$

onde W_j e V_j são os autovetores correspondentes de λ_j de $[A]$ e a transposta de $[A]$ respectivamente, e \langle, \rangle significa o produto escalar de dois vetores.

A equação (II-1) na forma matricial torna-se :

$$[\Delta \Lambda] = [S] [\Delta \Gamma] \quad (\text{II-3})$$

onde $[\Delta \Gamma]$ é o vetor de $\Delta \gamma_i$, $[\Delta \Lambda]$ é um vetor de $\Delta \lambda_j$, e $[S]$ é a matriz sensibilidade de autovalores. Nota-se que se:

$$[\Lambda] = [\Lambda_0] + [S] [\Delta \Gamma] \quad (\text{II-4})$$

onde $[\Lambda_0]$ e $[\Lambda]$ são os vetores de autovalores antes e após a introdução de uma mudança em $[\Gamma]$, então desde que $[\Delta \Gamma]$ é um vetor real, pode-se obter:

$$\text{Re}[\Lambda] = \text{Re}[\Lambda_0] + \text{Re}[S] [\Delta \Gamma] \quad (\text{II-5})$$

Burchett & Heydt consideram $[\Delta \Gamma]$ como um vetor aleatório normal com média zero e matriz de covariância $C_{\Delta \Gamma}$.

Porém sabe-se que, Schweppe [106], Cramér [1] e Anders [32, contém erro tipográfico], se um vetor aleatório qualquer $[x]$ é gaussiano, com vetor médio $[m]$ e matriz covariância $[K]$ – a notação usada para essa situação é $N([m], [K])$ –, então o vetor aleatório $[y]$, definido pela transformação linear $[y] = [H][x] + [r]$ também é gaussiano, representado por $N([H][m] + [r], [H][K][H^t])$, onde $[H^t]$ representa uma matriz transposta. Assim, a parte real da equação (II-5) também pode ser reordenada e comparada com o vetor $[y]$, ou seja:

$$[y] = [H] [x] + [r]$$

$$[\Lambda] = [S] [\Delta\Gamma] + [\Lambda_0] \quad (\text{II-6})$$

$$[\Lambda - \Lambda_0] = [\Delta\Lambda] = [S] [\Delta\Gamma] + [0] \quad (\text{II-7})$$

Logo, se $[\Delta\Gamma]$ é $N([0], [C_{\Delta\Gamma}])$

Então:

$$[\Lambda] \text{ é } N([S][0] + [\Lambda_0], [S][C_{\Delta\Gamma}][S'])$$

Ou seja,

$$[\Lambda] \text{ é } N([\Lambda_0], [S][C_{\Delta\Gamma}][S'])$$

Da mesma forma,

$$[\Delta\Lambda] \text{ é } N([S][0] + [0], [S][C_{\Delta\Gamma}][S'])$$

Ou seja,

$$[\Delta\Lambda] \text{ é } N([0], [S][C_{\Delta\Gamma}][S'])$$

Como apenas a parte real interessa tem-se que:

$$E[\Delta\Lambda] = [0] \quad (\text{II-8})$$

e

$$[C_{\Delta\Lambda}] = \text{Re} [S][C_{\Delta\Gamma}]\text{Re} [S'] \quad (\text{II-9})$$

Nota-se que as equações (II-8) e (II-9) são válidas para qualquer função densidade probabilidade de $\Delta\Gamma$.

Embora a média e a variância de Λ sejam informativos na análise de estabilidade a pequenas perturbações, estes momentos não permitem definir a função densidade e portanto não fornecem recursos para computação da probabilidade da estabilidade a pequenas perturbações. Quando $\Delta\Gamma$ é assumido ser uma função densidade normal, então

Λ é também uma função densidade normal da relação linear da equação (II-4), Kendall & Stuart [2].

A equação (II-4) é o termo linear de uma expansão da série de Taylor de Λ . Quando os termos de mais alta ordem são introduzidos, as estatísticas dos autovalores desviarão de uma distribuição normal.

A partir da função densidade de probabilidade da parte real dos autovalores, é possível computar a probabilidade que os autovalores apresentem a parte real negativa. Esta probabilidade é computada através da *série tetracórica** [5],[10].

Convém aqui enfatizar que os desenvolvimentos anteriormente apresentados somente são válidos quando as variações de incertezas em componentes do sistema são modeladas por uma distribuição normal, onde a técnica através da análise de sensibilidade de primeira ordem dos autovalores é considerada.

No entanto, quando as incertezas em componentes do sistema são modeladas por uma distribuição não-gaussiana, pode existir um grande número de situações onde a análise pela sensibilidade de primeira ordem não apresentará resultados suficientemente exatos para o problema. Neste caso, conforme proposto [8] por Zein El-Din & Alden em 1977, deve ser utilizado método de análise de sensibilidade de segunda ordem dos autovalores e a série de Gram-Charlier para determinar a probabilidade da estabilidade da parte real dos autovalores. A aplicação desta metodologia também foi avaliada por Burchett & Heydt em [11].

Ainda em [10], Burchett & Heydt mostraram também que a simulação Monte Carlo para o estudo de estabilidade dinâmica probabilística pode ser rápido, exato e eficiente. Assim, esse trabalho é, talvez, junto com o trabalho de Loparo & Blankenship [13], um dos primeiros a utilizar aspectos da teoria probabilística para tratar problemas linearizados de estabilidade dinâmica de sistemas de potência.

(*) *Séries Tetracóricas* ("Tetrachoric series")

$$p(z < U) = \sum_{s_1=0}^{\infty} \dots \sum_{s_m=0}^{\infty} \frac{q_{12}^{s_1} q_{13}^{s_2} \dots q_{n-1,n}^{s_m}}{s_1! s_2! \dots s_m!} \prod_{p=1}^n H_{s_p-1}(u) \Phi(u)$$

É uma formulação, desenvolvida por Pearson (1900), útil para o tratamento de vetores aleatórios gaussianos.

Em resumo, pode-se constatar que o método analítico proposto por Burchett & Heydt [10],[11] apresenta ao menos três grandes dificuldades:

- A obtenção da matriz de sensibilidade dos elementos da matriz $[A]$ não é isenta de esforço computacional. A consideração de incertezas na carga, geração e intercâmbio não é trivial, porque esses elementos não aparecem explicitamente na matriz $[A]$.
- Quando as incertezas modeladas são representadas por uma função densidade não-gaussiana, aparecem dificuldades de cálculo numérico e o tempo computacional envolvido pode tornar-se crítico.
- O método não permite determinar outros indicadores de confiabilidade, além de índices de probabilidade de estabilidade.

Um outro método analítico, proposto por Mori & Tuzuki em [23] utilizando técnica de transformação bi-linear, permitiu determinar somente os autovalores mais críticos, reduzindo desta forma o esforço computacional envolvido na análise, em relação ao método anteriormente proposto por Burchett & Heydt em [10].

Burchett & Heydt [11] aperfeiçoaram em 1978 uma outra metodologia analítica de análise de estabilidade dinâmica do sistema elétrico de potência a pequenas perturbações para um ponto de operação, levando em consideração as incertezas nos parâmetros do sistema, carga e/ou geração. O método anterior proposto em [10] pelos mesmos autores considerava apenas a distribuição normal para as incertezas. Neste novo trabalho [11], os autores consideram agora as incertezas em parâmetros do sistema com distribuições não-gaussianas. Se a variância dos parâmetros é pequena, os autovalores do sistema podem ser tratados aproximadamente como função linear das incertezas em parâmetros. Por outro lado, quando a variância dos parâmetros do sistema é grande, uma sensibilidade de segunda ordem dos autovalores relativos aos parâmetros do sistema deve ser utilizada. Neste caso, os autores propõem a utilização da série de Gram-Charlier para encontrar a probabilidade da estabilidade dinâmica a pequenas perturbações. Conforme já foi anteriormente comentado, esta técnica também foi

verificada utilizando simulação de Monte Carlo, onde, segundo os autores, excelentes resultados foram obtidos.

Em 2005, Pang *et alii* [90] baseados na metodologia proposta por Burchett, ou seja, nas variáveis aleatórias multivariáveis e série *tetracórica*, também propõem o cálculo da probabilidade de estabilidade do sistema com base na função densidade de probabilidade da parte real dos autovalores, com a média e covariância conhecidas. São consideradas incertezas nos ganhos de reguladores com distribuição normal. A abordagem é bastante conceitual e analítica, dificultando sua aplicação em sistemas reais. Uma aplicação no sistema New England 39 barras é apresentada.

Billinton & Kurunganty [14] apresentam o desenvolvimento de um novo índice de estabilidade transitória probabilística do sistema. O conceito é ilustrado através da aplicação para um sistema hipotético muito simples. A resposta desse índice para variações paramétricas que afetam a estabilidade do sistema é demonstrada utilizando este sistema hipotético. O procedimento básico parece relativamente simples e pode ser estendido para sistemas multi-máquinas. Os autores comentam que as dificuldades básicas para aplicação em grandes sistemas são similares aos que existem para avaliação de confiabilidade composta geração e transmissão do sistema.

Brucoli *et alii* [15] utilizam um sistema simples, constituído de uma máquina conectada à barra infinita, para ilustrar, com diferentes aproximações, os efeitos da natureza não determinística dos parâmetros do sistema de potência na estabilidade dinâmica do sistema. As estatísticas dos parâmetros do sistema são assumidas como conhecidas e aproximadas por uma distribuição normal. O método proposto é simples e prático: para um dado ponto de operação na região estável, determina-se a função densidade de probabilidade das margens de estabilidade, definida em termos de reserva de potência ativa e reativa disponível. A função densidade de probabilidade dos autovalores do sistema é também avaliada. Essas probabilidades são avaliadas utilizando uma técnica simples para determinar os momentos de distribuições dos processos estocásticos, baseado nas expansões de séries Taylor de primeira ordem. O método proposto pode ser estendido para um sistema multi-máquina e neste caso, uma técnica de decomposição pode ser utilizada.

Timko *et alii* [16] apresentam uma simulação Monte Carlo para a análise de estabilidade transitória de sistemas de potência. A simulação no tempo está na seqüência anual, na qual a ocorrência da perturbação e a conseqüente atuação da proteção são consideradas como processos aleatórios. Observa-se que em estudos clássicos de estabilidade transitória determinística são consideradas apenas as análises dos piores casos. Os autores comentam que uma análise probabilística é necessária para avaliar uma série de contingências cujas localizações e tipos de defeitos são aleatórios. Este artigo também descreve um programa computacional que foi desenvolvido usando uma simulação Monte Carlo. Apresentam-se alguns resultados para um sistema teste, onde é determinada a medida da probabilidade da estabilidade transitória. Não há menção ao cálculo probabilístico de autovalores.

Anderson & Bose [17] argumentam que a ocorrência de perturbações e seqüências contínuas de chaveamento de proteções são processos aleatórios, o que gera a necessidade de avaliação da probabilidade da estabilidade para um sistema de potência. Este artigo discute dois métodos para tratar do assunto de problema não-linear: transformação direta ou simulação Monte Carlo. Os autores comentam que é possível obter o desempenho do sistema sob variadas condições ou probabilidade de perturbações. Os autores dividem o processo de análise de estabilidade dinâmica a pequenos sinais como mostrado na Figura II-1.

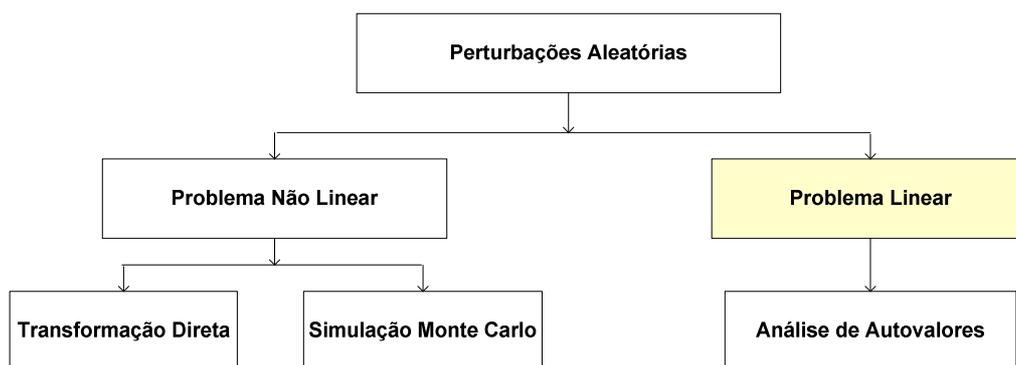


Figura II-1 – Processo de Análise de Segurança Dinâmica, Anderson & Bose [17]

A transformação direta proposta Anderson & Bose é uma aproximação atrativa porque a cada iteração fornece dados úteis do desempenho do sistema. A aproximação Monte

Carlo também é atrativa porque o objetivo é claramente atingível. O método proposto foi aplicado apenas para o sistema teste composto de 5 barras.

Wu & Tsai [18] apresentam uma estrutura de avaliação de segurança de sistema de potência que incorpora aspectos probabilísticos de perturbações nas magnitudes das cargas. São usados modelos convencionais para as análises em regime permanente e transitório. Uma equação diferencial é obtida, cuja solução fornece a distribuição de probabilidade da segurança no tempo. O trabalho apresentado aponta necessidade de mais pesquisas. A abordagem é conceitual e analítica sem aplicação em sistemas testes.

Em 1986, Mori & Tuzuki [23], apresentam um método sofisticado utilizando a transformação bi-linear e a análise de sensibilidade dos autovalores com os parâmetros não determinísticos. A transformação bi-linear possibilita-nos identificar o autovalor mais crítico, reduzindo o esforço computacional envolvido. Este artigo focaliza o comportamento do autovalor sendo afetado pela variação dos parâmetros do sistema. Os autores também propõem um índice escalar para estabilidade dinâmica denominado como *PDSI* (Índice de estabilidade dinâmica probabilística), definido como a probabilidade do autovalor mais crítico ser estável. Os autores comentam que é esperado que o índice contribua para a análise de segurança do sistema, assim como auxilie na monitoração de segurança do sistema. A abordagem, bastante conceitual e analítica, foi aplicada a sistema máquina barra infinita, não sendo mostrada sua aplicação em sistemas reais.

Shahidehpour & Qiu [24] estudam a estabilidade dinâmica de um sistema de potência sob perturbação aleatória utilizando a equação de movimento de Langevin (*). Em particular, a dinâmica de uma máquina conectada à barra infinita é modelada, na qual a variação da carga é considerada como um processo aleatório. O artigo descreve o cálculo do tempo médio da primeira saída da região de equilíbrio estável. Também discute o efeito das incertezas em parâmetros do sistema no cálculo desse tempo médio. A análise para um sistema representado por uma máquina síncrona conectada à barra infinita é descrita neste artigo. Os resultados apresentados para este exemplo simples

(*) A equação de movimento de Langevin é uma equação diferencial estocástica, utilizada na física estatística, que descreve o movimento Browniano em um potencial.

identificam a sensibilidade do tempo médio da primeira saída para variação em diferentes parâmetros do sistema e magnitudes de perturbação. Também é mostrado que, se ações remediadoras não trouxerem o sistema para ponto de equilíbrio estável, a variação aleatória da carga poderá levar o sistema para uma região instável. A expansão desta técnica para sistema multi-máquina deve ajudar os planejadores do sistema a definirem um índice de estabilidade de acordo com o nível de perturbação e a localização da contingência. O trabalho propõe um modelo analítico, o que dificulta a sua aplicação em sistemas reais. Apesar de o trabalho utilizar metodologias probabilísticas, a ênfase do trabalho é direcionada para a análise de estabilidade dinâmica a grandes perturbações.

Malek & Loparo [26] discutem o problema de avaliação de segurança dinâmica de sistema de potência. Uma aproximação probabilística foi proposta e um modelo de sistema de potência apropriado foi desenvolvido para a análise do comportamento dinâmico considerando incertezas no modelo de carga, chaveamento de geradores/linhas de transmissão e proteções. A região de segurança dinâmica é definida pelos autores como subconjunto do espaço estrutura-estado do sistema de potência, desde que os pontos de operação dentro dessa região satisfaçam todas as restrições para operação segura do sistema. Uma equação que descreve a evolução probabilística, dada as distribuições probabilísticas é desenvolvida. Com isso, uma medida de segurança probabilística é determinada como a probabilidade do sistema estar na região segura. Uma simulação para um exemplo simples máquina barra infinita foi apresentada e resultados encorajadores foram obtidos. A abordagem do trabalho é muito conceitual e analítica, dificultando sua aplicação em sistemas reais.

Wu, Tsai & Yu [25] apresentam a mesma metodologia proposta por eles em [18], porém neste artigo eles sugerem uma estrutura conceitual ampla para avaliações de regime permanente e segurança dinâmica probabilística. Uma aplicação em sistema simples máquina conectada a barra infinita é apresentada. A segurança de um sistema de potência é caracterizada em termos de injeção de potência (carga e geração). A região de segurança de regime permanente, para uma dada configuração do sistema, é definida pelo conjunto de injeções para as quais o sistema pode ser operado sem sobrecargas em linhas e transformadores e com as tensões dentro dos valores limites definidas. A região

de segurança dinâmica com respeito a um defeito é o conjunto de injeções para as quais o sistema é transitoriamente estável. Por causa da natureza aleatória das cargas e da ocorrência dos defeitos, a segurança no tempo é uma variável aleatória. Uma equação diferencial é obtida, cuja solução fornece a distribuição de probabilidade da segurança no tempo. Os autores preferem enfatizar o aspecto de insegurança, contraposto ao de segurança. Os coeficientes da equação diferencial são definidos em termos de taxas de falha e tempos médios de reparo de componentes, injeções e regiões de segurança. Embora a metodologia apresente um arcabouço conceitual bastante adequado ao problema, sua característica analítica dificulta sua aplicação em sistemas reais. O trabalho faz uma aplicação em um sistema máquina conectada à barra infinita.

Qiu *et alii* [28] apresentam uma nova metodologia para avaliação dinâmica de um sistema de potência multi-máquina, sujeita a pequenas variações aleatórias nos componentes do sistema (parâmetros de linhas de transmissão e cargas). Nessa metodologia as variações aleatórias são introduzidas nas equações dinâmicas do sistema. Os autores também propõem um índice baseado no tempo médio da primeira passagem do sistema pela região de estabilidade, calculado com base na função energia. A eficácia do índice proposto foi estudada considerando a dinâmica do sistema e as sensibilidades para diferentes variações nos componentes do sistema. A abordagem é conceitual e analítica com aplicação em sistemas com 6, 15 e 21 barras.

Larsen & Baker [29] apresentam alguns exemplos práticos de problemas de sistemas de potência que têm sido solucionados através da utilização da técnica convencional determinística de análise de estabilidade a pequenos sinais. Os autores fazem algumas aplicações para análise de instabilidade do regulador de tensão de compensador estático, avaliação de ressonância subsíncrona, projeto de estabilizadores de sistemas de potência, análise de interações de harmônicos de baixa ordem entre o conversor HVDC, seus controles e a impedância de interconexão com o sistema de transmissão. Os autores também desenvolvem ferramenta analítica que fornece flexibilidade para montagem das matrizes de estado do sistema.

O problema de locação de estabilizadores de sistemas de potência (*PSS - "Power System Stabilizers"*) é tratado em vários artigos, Nwankpa & Shahidehpour [33], Tse *et alii* [60],[69], Wang *et alii* [57],[71], e Chung *et alii* [75],[78].

Nestes artigos é sugerido que os estabilizadores devem melhorar tanto a expectância assim como a variância do conjunto de todos os autovalores de interesse. A sensibilidade da expectância e variância dos autovalores são calculadas através de sensibilidades de autovalores de 2ª ordem considerando incertezas em injeções nodais e ganhos dos estabilizadores. Os índices de sensibilidade probabilística utilizados para seleção de localização dos estabilizadores robustos são equivalentes aos fatores de participação convencionais e resíduos. A aproximação probabilística proposta é validada em sistemas teste. Os casos estudados nestes artigos mostraram que o índice de sensibilidade probabilístico proposto pode fornecer a melhor localização dos estabilizadores para todas as condições de operação consideradas.

Os artigos de Tse *et alii* [69], Nwankpa & Shahidehpour [33] e Chung *et alii* [75], também aplicam a teoria probabilística para localização e ajustes de parâmetros de estabilizadores considerando várias condições de operação do sistema. Supondo uma distribuição normal de probabilidades para o ponto de operação, a análise convencional de sensibilidades de autovalores é estendida fazendo uso de expectâncias e variâncias. Os dois índices probabilísticos derivados da sensibilidade de expectâncias e variâncias de autovalores são considerados para a localização dos estabilizadores e os respectivos ajustes de parâmetros. A robustez do sistema pode ser garantida, porque uma larga faixa de variação de carga é levada em conta na representação probabilística. A análise da simulação transitória também é utilizada para avaliar o desempenho dos estabilizadores propostos. Essa aproximação probabilística foi aplicada para o projeto dos estabilizadores de um sistema composto de 3 máquinas, baseado na análise de 480 amostras de pontos de operação do sistema. Dois tipos de índices de sensibilidade probabilística foram utilizados para projeto dos estabilizadores. Um foi para a seleção de localização, enquanto que o outro foi para o ajuste de parâmetros. Nestes artigos os exemplos restringiram-se a sistema fictício de pequeno porte.

Chung *et alii* [78] novamente aplicam a teoria probabilística para a análise de sensibilidade de autovalores e projeto de estabilizadores em sistemas multi-máquinas, levando a superar o problema de baixa robustez dos métodos convencionais de projetos. Os autores propõem uma função objetivo para selecionar a localização dos sinais adicionais estabilizadores e determinar os valores iniciais desses parâmetros, através da utilização da técnica Quasi-Newton de programação linear. A metodologia é testada para um sistema de 8 máquinas. Os autores também comentam que as incertezas são consideradas somente em injeções nodais. Outras incertezas como saídas de geradores e mudanças na configuração da rede/parâmetros não foram levadas em consideração.

Maslennikov *et alii* [74] apresentam o uso do método de otimização na análise de estabilidade a pequenas perturbações de sistemas de potência considerando incertezas. O método proposto possibilita coordenação robusta de ajuste de estabilizadores para várias condições de operação e com incertezas em parâmetros da rede (geradores e linhas de transmissão), pontos de operação e modelos de carga. Neste trabalho a aplicação restringiu-se apenas ao sistema New England de 39 barras. A técnica de otimização pode também ser utilizada para avaliação da faixa de amortecimento dos modos críticos do sistema, devido à incerteza nos parâmetros de sistema.

Nwankpa *et alii* [34] utilizam a metodologia proposta em [28] e apresentam uma aplicação para um sistema de potência multi-máquinas, levando em consideração a modelagem dinâmica do sistema e as variações aleatórias de pequena magnitude nas características operacionais de linhas de transmissão e cargas. O trabalho também utiliza o mesmo índice proposto em [28], baseado no tempo médio da primeira passagem do sistema pela região de estabilidade. O resultado das simulações apresentado neste artigo para o sistema de 30 barras, mostra que o índice é muito sensível às variações aleatórias nos componentes do sistema. Neste trabalho a abordagem também é bem conceitual e analítica.

Cao *et alii* [36], apresentam um critério probabilístico para estabilidade dinâmica de sistemas de potência considerando as variações aleatórias em linhas de transmissão, dado que a operação do sistema elétrico de potência em regime permanente é constantemente sujeita às variações de parâmetros e carga. A análise apresentada neste

artigo sugere um critério de estabilidade probabilístico para o sistema de potência real. Os autores comentam que o critério de estabilidade analítica é bastante complexo, mas acreditam que com o desenvolvimento de computação digital, o critério proposto neste trabalho poderia ser facilmente utilizado para avaliar a estabilidade probabilística de sistemas de potência reais. A metodologia foi aplicada para um sistema máquina conectada à barra infinita. Os autores comentam que não haverá dificuldade para aplicação em sistemas multi-máquinas. A principal desvantagem do método proposto é abordagem estritamente conceitual e analítica, dificultando a aplicação em sistemas reais.

Angelidis & Semlyen [40] apresentam uma nova metodologia para o cálculo do conjunto selecionado de autovalores críticos na análise de estabilidade a pequenas perturbações. Os autores testam a técnica de agregação (“cluster”) e o método de Arnoldi modificado e verificam que embora robusta, é muito lenta. Portanto, os autores propõem que essas técnicas sejam utilizadas para obtenção de valores iniciais satisfatórios. A principal contribuição desse artigo é o desenvolvimento do método de refinamento iterativo, Jennings [9], para atingir eficientemente um alto nível de exatidão. Um algoritmo implementado utilizando MATLAB foi testado para os sistemas IEEE de 14, 30, 57 e 118 barras. Cumpre, entretanto notar que o tratamento é essencialmente determinístico, embora com potencial de extensão probabilística.

McCalley *et alii* [45] apresentam uma nova avaliação aproximada para limites de estabilidade do sistema. Esta aproximação considera as ferramentas básicas e procedimentos de aproximação determinística tradicional, mas também computa risco, que leva em consideração a probabilidade e o impacto da instabilidade. A aplicação da aproximação baseada em risco foi ilustrada para o problema de instabilidade transitória, ocorrendo em um sistema teste da WSSC. Há que se notar dois importantes atributos que distinguem a aproximação baseada em risco das aproximações determinísticas: o índice de risco é influenciado por todas as contingências definidas e não somente pelo caso limite. Além disso, leva-se em consideração a variação no tipo e localização do defeito.

Em 1997 um grupo de trabalho da CIGRÉ [47] publica um relatório reconhecendo a importância da modelagem de incertezas de natureza probabilística na análise de segurança em geral. O trabalho aborda conceitos e discute alternativas de tratamento para a superação de dificuldades.

Em 1998 Schilling, Rei & Mello [51] propuseram uma iniciativa visando estudar o problema da estabilidade sob pequenas perturbações com incertezas cujo desenvolvimento não vingou.

Wang *et alii* [52] apresentam um algoritmo probabilístico para determinação do efeito da variação do estado inicial na estabilidade dinâmica do sistema. A variação da condição de operação devido às incertezas nas cargas e gerações é representada estatisticamente pelas tensões nodais. A expectância e covariância são empregadas para descrever a natureza de distribuição das variáveis aleatórias. A matriz de estado [A] obtida é corrigida pela covariância de tensões nodais. A solução obtida fornece a distribuição de probabilidade e a probabilidade condicional dos autovalores. O algoritmo proposto é testado para sistema de 8 barras com 3 máquinas e 25 barras com 8 máquinas utilizando o programa *PSASP* (Power System Analysis Software Package).

Uhlen *et alii* [61] publicam artigo em conferência realizada no Brasil (VII SEPOPE) descrevendo vários aspectos de operação do sistema de transmissão de potência com ênfase na avaliação de estabilidade e controle. O principal objetivo do trabalho é mostrar como os ajustes dos controladores podem contribuir para aumento da capacidade da transmissão, e assim reduzir os custos operativos. Esta análise foi aplicada ao sistema interconectado da Normandia, Suécia e Finlândia e excelentes resultados foram obtidos. Não obstante, o tratamento do problema ignora a presença de incertezas.

Hiskens *et alii* [68], propõem uma aproximação para a quantificação da incerteza em simulações do comportamento dinâmico do sistema de potência. Sabe-se que os parâmetros dos sistemas de potência nunca podem ser exatamente conhecidos. Contudo, a avaliação da segurança dinâmica depende das simulações obtidas sob a influência destas incertezas. Mesmo assim, os resultados dos estudos de simulação de sistema de potência são rotineiramente utilizados nas decisões de planejamento e operação.

Portanto, os autores argumentam que é importante quantificar os erros induzidos pelas incertezas em parâmetros. As faixas de erros podem ser obtidas a partir da simulação Monte Carlo consistindo de: **(a)** Geração aleatória dos conjuntos de parâmetros do sistema de acordo com suas distribuições estatísticas e; **(b)** Computação aproximada de primeira ordem da trajetória correspondente a cada conjunto de parâmetros. Essa trajetória fornece uma faixa dentro da qual estaria o comportamento dinâmico do sistema.

As faixas de erro assim obtidas permitem uma melhor avaliação dos riscos tais como tensões inadmissíveis ou operação de proteções não previstas. Os autores ainda comentam que o custo computacional seria mínimo para obtenção dessas sensibilidades.

O artigo de Berizzi *et alii* [77] comenta que a aproximação probabilística para a avaliação de segurança estática de sistemas de potência tem sido objeto de pesquisa há alguns anos, mas implementações práticas são ainda relativamente raras. Os operadores do sistema, na maioria das vezes, confiam mais nos procedimentos determinísticos. No meio desregulamentado, a avaliação de segurança beneficiaria nitidamente a aproximação probabilística, por razões técnicas e econômicas. Este artigo enfoca em particular a determinação de limites de transferência de potência sob a ótica de segurança estática do sistema, determinando-se o índice de risco do sistema.

McCalley *et alii* [79] comentam que em sala de controle os operadores são deparados com freqüentes situações de tomada de decisões, onde se exige crescente necessidade de ferramentas para suporte de decisões econômicas e seguras. Os autores comentam que embora os métodos probabilísticos sejam promissores nesta consideração, eles têm sido utilizados principalmente em níveis de planejamento. Dois exemplos são utilizados para facilitar essa comparação, através da avaliação de sobrecarga e segurança da tensão para um pequeno sistema de 5 barras e para sistema teste de confiabilidade do IEEE. Os resultados desta comparação mostram que a aproximação probabilística oferece várias vantagens.

Henry *et alii* [86] e [83] mostram novas tendências para a avaliação da adequação e segurança dinâmica de sistemas de potências sob grande conjunto de incertezas e através do cálculo de índice de risco do sistema. Os autores comentam que, face ao

aumento de incertezas em todo horizonte de planejamento e operação do sistema de potência, tem-se estimulado o desenvolvimento de metodologias amplas e novas ferramentas práticas e avançadas para a avaliação de adequação e segurança dinâmica. A metodologia e ferramentas utilizadas (programas computacionais EUROSTAG e ASTRE) fornecem uma facilidade geral para avaliação do risco no sistema de transmissão. Os autores fazem uma aplicação em redes reais da França.

O assunto tratado em *Zhang et alii* [87] está relacionado à determinação da margem de confiabilidade de transmissão sob incertezas. Os autores apresentam uma maneira de estimar a margem de confiabilidade da transmissão levando-se em conta as incertezas relacionadas às condições do sistema de transmissão, contingências e valores de parâmetros. Eles propõem uma equação que quantifica a margem de confiabilidade da transmissão baseada na sensibilidade da capacidade de transferência com caracterização probabilística de várias incertezas. A equação é verificada pela comparação com resultados de dois sistemas pequenos de 8 e 118 barras, suficientes para permitir simulações Monte Carlo detalhadas. A equação contribui para cálculos mais exatos e justificáveis da capacidade de transferência do sistema sob incertezas, porém o tratamento é estritamente de adequação. Apesar do trabalho utilizar metodologia probabilística, a ênfase do trabalho é direcionada para estudos de adequação.

Hockenberry e Lesieutre [80], apresentam o uso de uma nova técnica, denominado como *método de colocação probabilística*, para possibilitar a avaliação de incertezas em simulações de sistemas de potência. O método considera modelos polinomiais da relação entre a incerteza em parâmetros do sistema e a saída de interesse. Os autores acreditam que o método proposto é bastante promissor. Eles esperam que o mesmo encoraje interesse em estudos de incertezas em simulações de sistema de potência e ao mesmo tempo tornem possíveis análises mais sofisticadas sob incertezas, sem tornar o tempo proibitivamente elevado. O método proposto pelos autores é conceitual e analítico e a aplicação é estritamente na adequação e estabilidade transitória.

Kirschen *et alii* [81] propõem uma técnica probabilística para medição do nível de segurança ou o nível de estresse de um sistema elétrico de potência no ambiente de operação. O método fornece uma avaliação mais completa e confiável de um estado do

sistema, porque não considera somente as contingências mais prováveis de ocorrer. Ele também leva em conta a menos provável, as contingências múltiplas de alto risco e as falhas em sistemas de proteção. Para reduzir o tempo computacional para um nível mais compatível com a aplicação em tempo real, esta avaliação probabilística compara as novas condições de operação com um conjunto de casos de referência pré-estabelecidos, classificando-os na escala de aumento do nível de estresse. Uma nova técnica de amostragem em estratos foi desenvolvida para assegurar a convergência da simulação Monte Carlo utilizada para graduar os casos de referência, na escala de aumento do nível de estresse. A expectativa de energia não suprida é utilizada como uma medida do estresse no sistema, porque combina a probabilidade, o grau e a duração da interrupção dos consumidores resultante de falhas nos sistemas. A abordagem dos autores é probabilística, porém com aplicação em análise de estabilidade transitória.

Dong *et alii* [85] propõem a inclusão de ganhos dos sinais estabilizadores como parâmetros não determinísticos na matriz de sensibilidade de autovalores críticos. Os resultados são apresentados utilizando método analítico e numérico. O método proposto foi aplicado ao sistema New England e concluiu-se que para variações menores que 1% é razoável computar os fatores de sensibilidade por aproximação numérica. Valores de variações superiores a 1% podem causar erros significativos. Os autores também indicam quais são os autovalores mais sensíveis para mudanças no ganho e constante de tempo dos reguladores de velocidade. Novamente indica-se que na análise de estabilidade a pequenos sinais, os reguladores de velocidade precisam ser modelados como variáveis aleatórias, se os mesmos têm impacto significativo na margem de estabilidade.

Os autores K. Morison, L. Wang e P. Kundur [84] apresentam ferramenta capaz de modelar sistemas de potência apropriadamente e computar limites de segurança de maneira rápida e segura, fornecendo informações significativas ao operador. O sistema é de baixo custo e de fácil implementação. A avaliação de segurança dinâmica em tempo real pode fornecer uma primeira linha de defesa contra a extensão da perturbação pela rápida visualização dos potenciais problemas no sistema e fornecer ações para subsidiar o operador na tomada de decisões. A abordagem dos autores é estritamente determinística com avaliação de segurança dinâmica sistema.

Uma avaliação aproximada de estabilidade a pequenos sinais baseado em simulação Monte Carlo é proposta pelos autores Z. Xu, Z.Y. Dong, P. Zhang [89]. O método foi testado em dois sistemas, o primeiro de 13 barras e o segundo New England com 39 barras. A análise de estabilidade a pequenos sinais nos dois sistemas foi avaliada pela análise de autovalores no contexto probabilístico. Esse método de avaliação de estabilidade pode ser estendido para determinar a faixa de estabilidade a pequenos sinais probabilísticos para diferentes parâmetros de interesse. Estão previstos desenvolvimentos adicionais ao método proposto, incluindo consideração de mais incertezas, aperfeiçoamento nos modelos probabilísticos de carga e geração com consideração do mercado de eletricidade.

Xu *et alii* [99] propõem um novo arcabouço para análise probabilística aproximada de estabilidade a pequenos sinais. Dois sistemas testes são avaliados, o primeiro é um sistema de 13 barras e 4 geradores e o segundo é o sistema New England. Os autores comentam que os resultados obtidos foram satisfatórios. É demonstrado que a nova aproximação tem um excelente desempenho em termos de velocidade computacional, estabilidade e exatidão. Essa nova aproximação proposta fornece uma solução prática baseada na análise probabilística pelo método de simulação Monte Carlo considerando incertezas na carga e geração. O arcabouço proposto pelos autores também mostra um quadro para futuro desenvolvimento do procedimento computacional.

Finalmente Castellanos *et alii* [103] propõem em 2008 uma interessante aplicação da denominada “*teoria do valor singular estruturado*” (“*structured singular value theory*”, também referida como “*referencial – μ* ”, desenvolvida por J. Doyle). Conforme os autores, esta teoria pode ser considerada como sendo a mais precisa para a análise de influências de múltiplas incertezas paramétricas sobre a estabilidade de sistemas. O tratamento utilizado baseia-se na formulação da equação (II-10):

$$\dot{x} = A(p) x \quad (\text{II-10})$$

Onde $p = p_1, p_2, \dots, p_m$ é o conjunto de parâmetros incertos, variando no intervalo $p = p_k^{\min} \leq p_k \leq p_k^{\max}$, no entorno dos valores nominais. Os autores ilustram sua

proposta efetuando uma análise de autovalores considerando a influência de incertezas sobre um sistema real mexicano com 377 barras.

O panorama até aqui apresentado bem reflete o estado-da-arte do tema aqui tratado. A literatura adicional, McCalley *et alii* [54],[55], Wan *et alii* [56], Allan & Billinton [58], Tuglie *et alii* [64], Cheng *et alii* [62], Uhlen *et alii* [65], Endrenyi & Wellsow [72], Fu & McCalley [70], Ni *et alii* [76], Kim & Singh [95] ainda discute vários temas conceitualmente próximos do assunto desta Tese, porém fica evidente a necessidade de mais contribuições, o que justifica o desenvolvimento desta.

II.4 Diagnóstico

Com base na lista de referências analisada, a **Tabela II-1** apresenta uma síntese do panorama levantado sobre o assunto. A partir daí, fica facilitado o diagnóstico sobre as principais lacunas, dificuldades, enfoques e soluções já encontradas para o tema em pauta.

Em particular, a última coluna da **Tabela II-1** apresenta um diagnóstico de cada proposta consoante a seguinte lista:

- (1) *Premissas são inadequadas para a modelagem de incertezas*
- (2) *Método não contempla ampla modelagem de diferentes tipos de incertezas para fenômenos e componentes.*
- (3) *Método não demonstrado para diferentes tipos de modos de falha.*
- (4) *Exemplo restringiu-se a sistema fictício de pequeno porte.*
- (5) *Método não é facilmente aplicável em sistemas de grande porte.*
- (6) *Método não contempla uso de medidas corretivas.*
- (7) *Método não comporta a modelagem de cenários topológicos diversos.*
- (8) *Proposta não discute critérios de diagnose.*
- (9) *Dificuldade de interpretação.*
- (10) *Abordagem matemática do método exige premissas simplificadoras irreais.*
- (11) *Método não é adequado para linearizações.*
- (12) *Método contempla visão estritamente determinística*

Tabela II-1 – Síntese da Revisão da Literatura

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
[6] <i>apud</i> [10]	Um dos primeiros trabalhos na área de estudos probabilísticos de estabilidade de sistemas de potência sofrendo de influências de pequenas perturbações	(?)	(?)	(?)	(?)	(?)	(?)	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8)
[8] <i>apud</i> [10]	Os autores apresentam uma nova metodologia para cálculo de autovalores pela técnica de sensibilidade de segunda ordem, dando continuidade aos trabalhos de Van Ness et alii [3], que aplicaram a técnica de sensibilidade de primeira ordem.	(?)	(?)	(?)	(?)	(?)	(?)		
[10]	Os autores propõem a metodologia que computa as diversas variáveis aleatórias na matriz [A] e calcula a função densidade de probabilidade da parte real de todos os autovalores da matriz [A]	Probabilidade da estabilidade	Parâmetros do sistema ou cargas/geração	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	- Cálculo de todos os autovalores do sistema considerando incertezas e determinação da função densidade de probabilidade da parte real de todos os autovalores da matriz [A] - Através da função densidade de probabilidade dos autovalores, computa-se a probabilidade da estabilidade	Sistema Fictício de 11 barras, equivalentado	Planejamento e operação do sistema	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8) (10)
[11]	Os mesmos autores do [10] propõem uma nova metodologia para determinação da matriz [A] incorporando incertezas não-gaussianas em parâmetros do sistema	Probabilidade da estabilidade	Parâmetros de máquinas e carga	Posicionamento da parte real de todos os autovalores no semi-plano da esquerda	Quando a variação dos parâmetros do sistema é grande, o autor propõe a técnica de série de Gram-Charlier, utilizada para encontrar a probabilidade da estabilidade com incertezas em parâmetros não-gaussianos	Sistema de 11 barras e 2 geradores	Planejamento e operação	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
[13] <i>apud</i> [10]	Este trabalho é talvez um dos primeiros a utilizar aspectos da teoria probabilística para tratar problemas linearizados de estabilidade dinâmica de sistemas de potência.	(?)	(?)	(?)	(?)	(?)	(?)		
[14]	Um índice de estabilidade transitória baseada na natureza probabilística do sistema é desenvolvido pela análise de sensibilidade dos parâmetros do sistema	Probabilidade da estabilidade	Localização, tipo, tempo de eliminação do defeito, parâmetros do sistema e carga	Perda de sincronismo	Cálculo do índice de probabilidade da instabilidade variando com incertezas em parâmetros da rede que afetam a estabilidade transitória do sistema	Sistema simples consistindo de uma máquina conectada à barra infinita em circuito duplo	Planejamento e operação	Estabilidade transitória	(11)
[15]	O autor ilustra com diferentes aproximações os efeitos da natureza não determinística dos parâmetros do sistema de potência na estabilidade dinâmica do sistema	Função densidade probabilidade das margens de estabilidade e de autovalores	Parâmetros do sistema	Reserva de potência ativa e reativa disponível	<ul style="list-style-type: none"> - As estatísticas dos parâmetros do sistema são assumidas como conhecidas e aproximadas por uma distribuição normal - Para um dado ponto de operação estável é determinada a função densidade de probabilidade das margens de estabilidade, definida em termos de reserva de potência ativa e reativa disponível. A função densidade de probabilidade dos autovalores do sistema é também avaliada - Essas probabilidades têm sido avaliadas utilizando uma técnica simples para determinar os momentos de distribuições baseado na expansão de série Taylor de 1ª ordem 	Sistema de uma máquina e barra infinita	Planejamento e operação	Estabilidade transitória e de pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8)
[16]	Desenvolvimento de um protótipo	Medida da	Localização da	Perda de	- Simula uma seqüência de perturbações	Dois sistemas : 5	Planejamento	Estabilidade	(11)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
	computacional utilizando simulação Monte Carlo para análise de estabilidade transitória de um sistema elétrico de potência	probabilidade de estabilidade	falta e seqüência de atuações da proteção	sincronismo	- Utiliza-se a simulação Monte Carlo para determinar a estabilidade do sistema em cada contingência. Devido ao grande número de análises é recomendado o método de função energia	barras e 49 barras do sistema EPRI	o	transitória	
[17]	Aproximação probabilística para análise de estabilidade transitória	Distribuição de probabilidade da estabilidade	Ocorrência da perturbação e chaveamento de proteções	Perda de sincronismo	Análise de estabilidade transitória através de métodos computacionais automatizados para determinação da probabilidade da estabilidade por meio analítico ou de simulação	Sistema de 5 barras	Planejamento	Estabilidade transitória	(11)
[18]	Apresenta uma metodologia de avaliação de adequação e segurança do sistema elétrico de potência incorporando aspectos probabilísticos	Distribuição de probabilidade da insegurança no tempo	Distribuição probabilidade das faltas	Violações tensão/carregamento e perda de sincronismo	Modelos matemáticos padrão de análise de fluxo de potência (regime permanente) de um sistema elétrico de potência (SEP) e análise de estabilidade transitória (dinâmica) são utilizadas. Uma equação diferencial é obtida, da qual a solução fornece a distribuição de probabilidade da insegurança no tempo	Nenhuma	Operação	Adequação e estabilidade transitória	(11)
[23]	Uma Análise de sensibilidade do autovalor mais crítico em relação aos parâmetros não determinísticos do sistema de excitação é proposta	Índice escalar (Índice de estabilidade dinâmica probabilística)	5 parâmetros do sistema de excitação	Posicionamento do autovalor mais crítico dentro o círculo unitário do plano Z	- Apenas os autovalores mais críticos da matriz do sistema [A] são identificados através da utilização do método de transformação bilinear - É possível determinar um índice escalar que auxilia o operador a entender quantitativamente a margem de estabilidade	Sistema com uma máquina conectada à barra infinita	Em tempo real	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8)
[24]	É estudada a estabilidade dinâmica sob variações aleatórias nas cargas	Tempo médio da 1ª saída da região de	Parâmetros do sistema e	-	Cálculo do tempo médio da 1ª saída da região de equilíbrio estável. Discute o efeito das incertezas em parâmetros do sistema e carga	Uma máquina conectada à barra	Planejamento e operação	Estabilidade transitória	(11)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
	utilizando equação de movimento de Langevin	equilíbrio estável	Cargas		no cálculo desse tempo médio	infinita			
[26]	Uma aproximação probabilística é definida e um modelo apropriado de sistema de potência é desenvolvido para avaliação de segurança dinâmica	Probabilidade do sistema estar na região segura.	Modelo de carga, chaveamento de geradores/linhas de transmissão e proteções dos sistemas	Níveis de tensão e perda de sincronismo	A região de segurança dinâmica é definida pelos autores como subconjunto do espaço de estado do sistema, onde os pontos de operação dentro dessa região satisfazem todas as restrições para operação segura do sistema. Uma equação que descreve a evolução probabilística, dada as distribuições probabilísticas é desenvolvida. Com isso, uma medida de segurança probabilística é determinada como a probabilidade do sistema estar na região segura	Sistema de 2 geradores e 2 barras	Operação em tempo real	Estabilidade dinâmica	(11)
[25]	Os mesmos autores do [18] apresentam novamente a metodologia proposta em [18], porém neste artigo eles sugerem uma estrutura conceitual ampla para avaliações de adequação e segurança dinâmica probabilística e uma aplicação em sistema simples máquina conectada a barra infinita é apresentada	Função distribuição de probabilidade da insegurança no tempo $F(t)$	Na carga e ocorrência de defeito	Níveis de tensão/carregamento e perda de sincronismo	- Através da solução da equação diferencial, determina-se a distribuição de probabilidade da insegurança no tempo - Os coeficientes dessa equação diferencial são expressos em termos da taxa de falha e tempo médio de reparo dos componentes, das injeções (carga e geração) e regiões de segurança	Sistema com uma máquina conectada à barra infinita	Planejamento e operação	Estabilidade Transitória	(9) (11)
[28]	Estabilidade dinâmica de um sistema multi-máquina, quando as cargas ficam sujeitas às variações aleatórias	Tempo médio da 1ª passagem do sistema pela região de estabilidade	Magnitude das Cargas	Perda de sincronismo	Incluem incertezas nas equações dinâmicas do sistema	Sistema de 6, 15 e 21 barras	Planejamento	Estabilidade dinâmica	(9) (11)
[29]	Os autores apresentam alguns exemplos práticos de problemas de	Não se aplica	Sem incertezas	Posicionamento da parte real dos	Os autores também desenvolvem ferramenta analítica que fornece flexibilidade para	Sistema New England – Fase	Operação	Estabilidade a pequenas	(1) (12)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
	sistemas de potência que tem sido solucionado através da utilização da técnica convencional de análise de estabilidade a pequenos sinais			autovalores no semi-plano da esquerda	montagem das matrizes de estado do sistema. Os autores destacam alguns aspectos que merecem atenção	II – Sistema com HVDC		perturbações	
[34]	Os autores utilizam a mesma metodologia proposta em [28] e apresentam uma aplicação em sistema multi-máquinas com 30 barras	Tempo médio da 1ª passagem do sistema pela região de estabilidade	Magnitude das Cargas	Perda de sincronismo	Variações aleatórias de pequena magnitude nas cargas são consideradas como fontes de eventual perda de estabilidade. Uma medida de segurança baseado no tempo médio da 1ª passagem pela região de estabilidade é utilizada para determinar o limite de estabilidade dinâmica probabilística	Sistema de 30 barras	Planejamento e operação	Estabilidade dinâmica	(9) (11)
[36]	O critério probabilístico para análise de estabilidade dinâmica considerando as variações aleatórias em parâmetros (máquinas e linhas) e cargas é apresentado	Não se aplica	Elementos da linha de transmissão, parâmetros de máquinas e cargas	Posicionamento da parte real dos autovalores	<ul style="list-style-type: none"> - A análise apresentada neste artigo sugere um critério de estabilidade probabilístico para sistema de potência real - Através de metodologia baseada na função Liapunov quadrática e análise da parte real dos autovalores determinam-se a região de estabilidade (estável e instável) referente à intensidade da perturbação aleatória - Os autores comentam que o critério de estabilidade analítica é complexo, mas acreditam que com o desenvolvimento de computação digital, o critério proposto neste trabalho poderia ser facilmente utilizado para avaliar a estabilidade de sistema de potência 	Sistema com uma máquina conectada à barra infinita	Planejamento e operação	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)
[40]	Apresenta uma nova metodologia para o cálculo do conjunto	Não se aplica	Sem incertezas	Posicionamento da parte real dos	A principal contribuição desse artigo é o desenvolvimento do método de refinamento	Sistema teste da IEEE de 14, 30,	Planejamento	Estabilidade a pequenas	(1) (12)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
	selecionado de autovalores críticos na análise de estabilidade a pequenas perturbações			autovalores	iterativo [9] para atingir eficientemente um alto nível de exatidão no cálculo desses autovalores críticos	57 e 118 barras		perturbações	
[45]	Os autores consideram as ferramentas básicas e procedimentos de aproximação determinística tradicional na análise de estabilidade transitória probabilística	Risco = probabilidade da instabilidade * impacto	Tipo e localização do defeito	Perda de sincronismo	<ul style="list-style-type: none"> - Determina-se o risco que leva em consideração a probabilidade e impacto da instabilidade - O índice de risco é influenciado por todas as contingências definidas e não somente do caso mais crítico - Considera o tipo e localização do defeito 	Sistema WSSC, 1443 barras e 126 geradores	Planejamento e operação	Estabilidade Transitória	(11)
[52]	Os autores apresentam um algoritmo probabilístico para determinação da matriz de estado [A] corrigida considerando incertezas nas cargas e gerações representadas estatisticamente pelas tensões nodais	Distribuição probabilidade e probabilidade condicional dos autovalores	Carga e geração	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	<ul style="list-style-type: none"> - A expectância e covariância são empregadas para descrever a natureza de distribuição das variáveis randômicas - A matriz de estado [A] obtida é corrigida pela covariância de tensões nodais - A solução obtida fornece a distribuição probabilidade e probabilidade condicional dos autovalores 	Sistema de 8 barras com 3 máquinas e 25 barras com 8 máquinas	Planejamento e operação	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)
[61]	O artigo descreve vários aspectos de operação do sistema de transmissão de potência com ênfase na avaliação de estabilidade e controle com visão determinística	Não se aplica	Sem incertezas	Posicionamento da parte real dos autovalores	O principal objetivo do trabalho é mostrar como os ajustes dos controladores podem contribuir para aumento da capacidade da transmissão, e assim reduzir os custos operativos	Sistema interconectado da Normandia, Suécia e Finlândia	Operação	Estabilidade a pequenas perturbações	(12)
[68]	Utilizando a simulação Monte Carlo com as ferramentas básicas de estabilidade para quantificação das incertezas na análise de estabilidade transitória	Risco associado a tensões inadmissíveis e operação de proteção não	Parâmetros do sistema	Perda de sincronismo	<ul style="list-style-type: none"> - A faixa de erro pode ser obtida pela simulação Monte Carlo que consiste em gerar conjuntos aleatórios de parâmetros - A partir da faixa de erro obtida, avalia-se o risco associado a tensões inadmissíveis e 	Sistemas de 39 barras e 10 máquinas do IEEE	Planejamento e operação	Estabilidade Transitória	(11)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
		prevista			operação de proteção não prevista				
[71]	Este artigo apresenta uma aproximação probabilística para seleção de localização dos estabilizadores através da análise de sensibilidade de autovalores de 2ª ordem	Índice de sensibilidade probabilística	Injeções nodais e ganhos de estabilizadores	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	<ul style="list-style-type: none"> - São consideradas várias condições operação de um sistema elétrico de potência - A distribuição de probabilidade de um autovalor será expressa pela expectância e variância com distribuição normal - A sensibilidade da expectância e variância dos autovalores com as incertezas são calculadas através da análise de sensibilidade de autovalores de 2ª ordem 	Sistema de 9 barras e 3 geradores e sistema de 24 barras e 8 geradores	Planejamento	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8)
[74]	Apresenta um procedimento de otimização numérica na coordenação robusta de ajustes de estabilizadores	-	Parâmetros de sistema e pontos de operação	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	Determinação da faixa de variação de amortecimento dos modos críticos do sistema como função de valores de incerteza em parâmetros	Sistema teste New England 39 barras	Planejamento	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8)
[75]	Apresenta projeto robusto de estabilizadores considerando várias condições de operação, através do método de análise dos autovalores probabilísticos e simulação de resposta transitória para o pior caso	Dois índices probabilísticos de sensibilidade derivados da sensibilidade da expectância e variância de autovalores	Magnitude da carga	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	Formar a matriz derivada da sensibilidade da expectância e variância de autovalores, para representar sensibilidade relacionada entre os autovalores de interesse e todos os parâmetros dos estabilizadores ajustáveis	Sistema de 3 máquinas	Planejamento e operação	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
[78]	Propõe uma função objetivo para selecionar a localização dos sinais adicionais estabilizadores e determinar os valores iniciais de parâmetros através da técnica Quasi-Newton de programação linear	Não se aplica	Carga	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	Propõe-se uma função objetivo para o ajuste de estabilizadores, tratado pelo método Quasi-Newton	Sistema de 24 barras e 8 máquinas	Planejamento e operação	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (5) (6) (7) (8)
[77]	Analisa algumas das aproximações probabilísticas na avaliação de segurança do sistema de transmissão com ênfase na determinação do limite de transferência de potência.	Risco	Contingências	Instabilidade de tensão, violações de tensão, carregamento e desligamento em cascata	O artigo ilustra diferentes aproximações para encontrar índices de risco para avaliação de segurança do sistema de transmissão		Operação em tempo real	Segurança	(2) (3) (4) (6) (7) (8) (11)
[86]	Propõe-se avaliação probabilística na análise de adequação e segurança dinâmica de uma rede real considerando um grande conjunto de incertezas. O método é baseado na simulação Monte Carlo	Não se aplica	Capacidade de geração, preços e localização; nível e localização da carga; tempo de eliminação da falta; tempo de atuação da proteção	Violações de tensão e carregamento para adequação e perda de sincronismo para estabilidade transitória	<ul style="list-style-type: none"> - Amostragem aleatória (preço, localização e capacidade de geração, nível e localização da carga, seqüência de eventos que podem ocorrer na rede) - Avaliação de segurança estática (N-1) - Avaliação dinâmica (através dos programas EUROSTAG e ASTRE) - Análise probabilística através do cálculo do risco do sistema 	Sistema da França	Planejamento e operação	Adequação e estabilidade transitória	(11)
[80]	Explora o uso do método de alocação probabilística. Este método permite estudar as incertezas em uma dada saída de interesse através de simples simulações	Não se aplica	Carga e duração de defeito	Perda de sincronismo	Baseia-se nos modelos polinomiais da relação entre a incerteza em parâmetros do sistema e a saída de interesse. Os modelos polinomiais são criados baseados na cuidadosa seleção de simulação e não são aproximações, como é o	Sistema teste de 10 barras	Planejamento e operação	Adequação e estabilidade transitória	(11)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
					caso da aproximação por expansão em séries de Taylor				
[81]	Os autores propõem uma técnica probabilística para medição do nível de segurança ou o nível de estresse de um sistema elétrico de potência no ambiente de operação	Expectância de energia não suprida é utilizada como uma medida do estresse no sistema	Contingências simples/ múltiplas e falhas no sistema de proteção	Perda de sincronismo	<ul style="list-style-type: none"> - O método fornece uma avaliação mais completa e confiável de um estado do sistema, porque não considera somente as contingências mais prováveis de ocorrer. Ele também leva em conta a menos provável, as contingências múltiplas de alto risco e as falhas em sistemas de proteção - Uma nova técnica de amostragem em estratos foi desenvolvida para assegurar a convergência da simulação Monte Carlo utilizado para graduar os casos de referência, na escala de aumento do nível de estresse 	-	Operação em tempo real	Estabilidade transitória	(11)
[85]	Os autores propõem a inclusão de ganhos de sinais estabilizadores como parâmetros não determinísticos na matriz de sensibilidade de autovalores críticos	Não se aplica	Ganhos dos sinais estabilizadores e parâmetros de reguladores de velocidade	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	<ul style="list-style-type: none"> - Os resultados são apresentados utilizando o método analítico e numérico Os autores também indicam quais são os autovalores mais sensíveis para mudanças no ganho e constante de tempo dos reguladores de velocidade 	Sistema New England	Planejamento	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (6) (8)
[84]	Os autores apresentam ferramenta capaz de modelar sistemas apropriadamente e computar limites de segurança de maneira rápida e segura, fornecendo informações significativas ao operador	-	Sem incerteza	Violações de tensão/carregamento e perda de sincronismo	O Sistema é de baixo custo e de fácil implementação. A avaliação de segurança dinâmica em tempo real pode fornecer como primeira linha de defesa contra extensão da perturbação pela rápida visualização dos potenciais problemas no sistema e fornecer ações para subsidiar o operador na tomada de	-	Operação	Adequação e Estabilidade transitória	(1) (12)

Ref	Metodologia (s) Empregada	Índice (s) de Confiabilidade	Tipos de Incertezas	Modos de Falha	Algoritmo de Solução	Aplicação	Utilidade	Tipo de Estabilidade	Principais Debilidades
					decisões				
[89]	Avaliação aproximada de estabilidade a pequenos sinais baseado em simulação Monte Carlo é proposto pelos autores e pode ser aplicado no planejamento e operação de sistema de potência devido a muitas incertezas oriundas com a desregulamentação	Não se aplica			- Discute-se também que maior grau de estabilidade pode ser conseguido pela alocação de controladores utilizando o método proposto - Esse método de avaliação de estabilidade pode ser estendido para determinar a faixa de estabilidade a pequenos sinais probabilísticos para diferentes parâmetros de interesse	Sistema de 13 barras e o segundo sistema de New England com 39 barras	Planejamento e operação	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (6) (8)
[90]	Os autores propõem o cálculo da probabilidade de estabilidade do sistema considerando incertezas nas cargas e com base na função densidade de probabilidade da parte real dos autovalores.	Probabilidade de estabilidade	Cargas	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	A metodologia utilizada é aquela proposta por Burchett, ou seja, nas variáveis randômicas multivariáveis e série tetracrônica	Sistema New England 39 barras	Planejamento	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (6) (8)
[99]	Os autores propõem um novo arcabouço para análise probabilística aproximada de estabilidade a pequenos sinais	Não se aplica	Geração e carga	Posicionamento da parte real dos autovalores no semi-plano da esquerda	Essa nova aproximação proposta fornece uma solução prática baseada na análise probabilística pelo método de simulação Monte Carlo, que normalmente são de difícil aceitação e não são frequentemente utilizados devido ao tempo computacional envolvido e massivo tratamento de dados	Sistema de 13 barras e 4 geradores e o segundo é o sistema New England	Planejamento e operação	Estabilidade a pequenas perturbações	(2) (4) (6) (8)

Notas:

- (1) *Premissas para a modelagem de incertezas são inadequadas*
- (2) *Método não contempla ampla modelagem de diferentes tipos de incertezas para fenômenos e componentes.*
- (3) *Método não demonstrado para diferentes tipos de modos de falha.*

- (4) *Exemplo restringiu-se a sistema fictício de pequeno porte.*
- (5) *Método não é facilmente aplicável em sistemas de grande porte.*
- (6) *Método não contempla uso de medidas corretivas.*
- (7) *Método não comporta a modelagem de cenários topológicos diversos.*
- (8) *Proposta não discute critérios de diagnose.*
- (9) *Dificuldade de interpretação.*
- (10) *Abordagem matemática do método exige premissas simplificadoras irrealis.*
- (11) *Método não é adequado para linearizações.*
- (12) *Método contempla visão estritamente determinística.*

II.5 Sumário

Este capítulo apresentou o estado-da-arte do que vem sendo pesquisado na área relacionada à análise linearizada de estabilidade de sistemas de potência sob a influência de pequenas perturbações, considerando as incertezas do sistema de potência.

Como fica evidenciado na **Tabela II-1**, pode-se constatar que a literatura técnica aborda diversas estratégias de tratamento do problema de avaliação de estabilidade sob pequenas perturbações considerando incertezas. Entretanto, com base na literatura pesquisada, não foi possível identificar uma metodologia capaz de tratar sistemas de grande porte com diferentes tipos de incertezas em ocorrências e componentes e que seja também capaz de determinar os índices probabilísticos de segurança, considerando ou não, as medidas corretivas eventualmente existentes no sistema.

Este panorama qualificará então como originais, as contribuições propostas nesta Tese, apresentadas no Capítulo VI.

* * *

Capítulo III

Conceituação e Metodologia

III.1 Introdução

A análise de estabilidade sob a influência de pequenas perturbações (*) pode ser realizada consoante duas vertentes, quais sejam: (i) *determinística* (ii) *probabilística*. A vertente determinística, Kundur & Dandemo [7], Larsen *et alii* [29], Rogers & Chow [38], Martins [44], Barbosa [53], Uhlen *et alii* [61], Rogers [67], Pai *et alii* [88] é tradicional e concentra todo o cálculo sobre um único ponto de operação, que supostamente ocorrerá com probabilidade unitária. A análise determinística é então uma técnica restrita a valores fixos de disponibilidades de unidades geradoras, cargas, configuração da rede de transmissão, parâmetros de máquinas e controladores, que não têm incertezas ou variabilidade. A partir desses valores, são univocamente determinados os autovalores e as demais grandezas de interesse.

A desvantagem dos métodos determinísticos é que não refletem a verdadeira natureza do comportamento do sistema. Sabe-se que os sistemas estão freqüentemente sujeitos a alterações, que incluem variações de cargas, de configuração da rede de transmissão, disponibilidade de unidades geradoras e parâmetros de máquinas e controladores. Conseqüentemente, as alternativas de análise do sistema que consideram apenas técnicas determinísticas podem gerar soluções inadequadas, implicando um aumento de custos.

Portanto, o enfoque determinístico para a análise de segurança dinâmica a pequenos sinais só conseguiria analisar a influência de tais variações nos autovalores e demais grandezas de interesse através da realização de um conjunto exaustivo de estudos que

(*) Nota: Nesta Tese, a denominação “análise de estabilidade a pequenas perturbações” é tomada como sinônimo de “análise de segurança estática”, tratada sob o enfoque probabilístico. Embora essa denominação seja um abuso de linguagem ela é conveniente para enfatizar a diferença com a análise de segurança dinâmica sob enfoque transitório.

pudessem simular todas as possíveis combinações das variações envolvidas. Essas alternativas, além de exigir um tempo computacional proibitivo, iriam produzir uma quantidade enorme de resultados que, por não fornecerem ao analista uma informação quantitativa e qualitativa das possibilidades de ocorrência das configurações simuladas, dificultariam sobremaneira a elaboração de conclusões definitivas. Portanto, esta técnica pode resultar em sobrestimação ou subestimação do desempenho de análise de segurança dinâmica a pequenos sinais.

A vertente probabilística leva em consideração a variabilidade possível do ponto de operação, devida a diferentes influências. Neste caso, uma alternativa possível utiliza, intrinsecamente, uma abrangente análise de sensibilidades como forma de análise. Na verdade, essa estratégia pode ser encarada como uma realização intensiva da análise determinística, porém de forma indireta e conveniente.

Ao contrário da alternativa tradicional determinística, anteriormente citada, a aplicação de métodos probabilísticos permite resolver o problema da análise de segurança dinâmica a pequenos sinais, indiretamente através do cálculo dos chamados índices de risco desse sistema. O cálculo destes índices é feito de um modo mais realista, porque leva em consideração a influência de incertezas de componentes do sistema, e como consequência, os autovalores na análise de segurança dinâmica a pequenos sinais também passariam a ser encarados como variáveis aleatórias.

A análise probabilística propriamente dita comporta duas sub-variantes: (i) analítica; (ii) simulação. A metodologia analítica, Burchett & Heydt [10] embora elegante, invoca premissas cujas existências práticas nem sempre são verificadas (i.e. definição a priori de distribuições probabilísticas, etc). Por outro lado, a metodologia via simulação, embora computacionalmente intensiva, permite a obtenção de resultados práticos para uma ampla variedade de situações. A **Figura III-1** resume o panorama exposto.

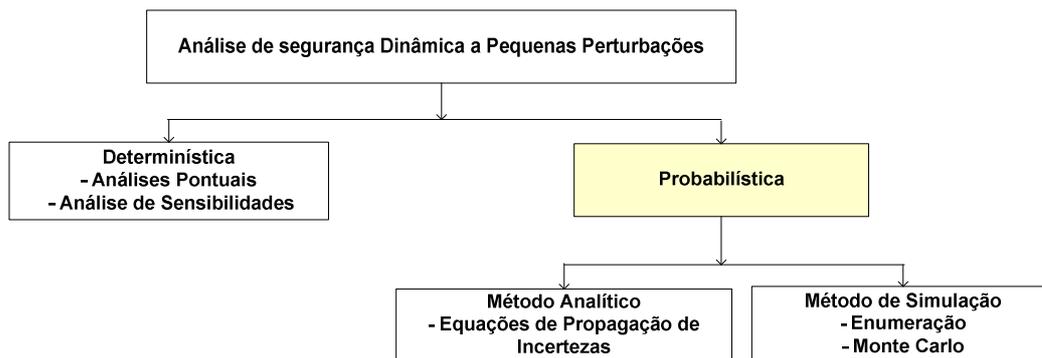


Figura III-1 – Estratégias para Análise de Segurança Dinâmica a Pequenas Perturbações

III.2 Modelagem de Incertezas

III.2.1 Evolução Temporal das Incertezas

A análise da segurança sob incertezas envolve a consideração de duas dinâmicas, quais sejam, aquela associada aos fenômenos físicos (eletromecânicos e eletromagnéticos) e aquela relacionada à evolução temporal da própria incerteza, Schilling *et alii* [39],[41],[42]. Uma das proposições pioneiras abordando a representação da temporalidade das incertezas foi feita por Patton [4], através da função segurança $S(t)$, definida pela Equação (III-1):

$$S(t) = \sum_i p_i(t) q_i(t) \quad \text{(III-1)}$$

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 $p_i(t)$ exige que as incertezas sejam tratadas via processos estocásticos, sabidamente de tratamento não trivial.

Assim, a análise realista da segurança, sob a influência de incertezas, torna-se praticamente inviável se não forem adotadas premissas facilitadoras. Uma primeira hipótese, usualmente invocada, é a que tenta representar a dinâmica das incertezas

evoluindo num espaço probabilístico Markoviano, preferivelmente homogêneo (i.e. com intensidades de transições invariantes no tempo). Além dessa, uma outra hipótese simplificadora e condicionante de todas as considerações levadas a cabo nesta Tese, é a que presuppõe que a influência das incertezas, (tratadas como probabilidades), ocorra sempre quando as mesmas já tenham atingido o estado estacionário (i.e. $t \rightarrow \infty$). Essas duas premissas, aparentemente singelas, mas essenciais, viabilizam, na prática, uma análise computacional da segurança probabilística de sistemas de potência.

III.2.2 Tratamento das Incertezas Estacionárias

Enquanto 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 a segurança está associada à predição da evolução temporal do sistema. Nesse contexto, a denominação *segurança estática* seria um abuso de linguagem, enquanto *segurança dinâmica* seria uma redundância, porém ambos são de uso corriqueiro. No caso da segurança, dita estática, também avalia-se um único instante visando inferir-se sobre a tendência evolutiva 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 de reguladores, máquinas e demais fenômenos com dinâmicas intrínsecas.

Um dos mais relevantes problemas com o qual o analista de confiabilidade probabilística se depara é a combinação adequada de horizontes temporais (e.g. curtos, médios e longos 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 devem 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 Schilling *et alii* [41]. 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 longínquo o horizonte temporal, devem ser consideradas mais incertezas com dinâmicas mais lentas. Em contraposição, quanto mais próximo do tempo presente for o horizonte temporal de interesse, perdem relevância as incertezas com dinâmicas muito lentas (*i.e.* estas podem admitir um tratamento determinístico), e ganham 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. Cabe aqui repetir que, embora o tratamento de incertezas admita uma ampla variedade de modelos Klir & Folger [27], Kai-Yuan [43] Mielczarski [49], El-Hawary [50], o enfoque aqui abordado concentra-se tão somente na alternativa de modelagem probabilística, com as incertezas já no regime estacionário.

A seleção e combinação conveniente das incertezas vis-à-vis 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 título comparativo, a **Tabela III-1** tece considerações sobre as características dos espaços probabilísticos convencionais gerados nos casos de adequação e segurança estática e a viabilidade de tratamento computacional simplificado.

Tabela III-1 – Características e Viabilidade de Tratamento dos Espaços Probabilísticos de Estados

Adequação	Segurança Estática
<p><i>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 (ctg simples e, em alguns caso, duplas) ou simulação Monte Carlo independente ou pseudo-seqüencial.</i></p>	<p><i>Espaço probabilístico transcomputacional de pelo menos uma ordem de grandeza acima daquele gerado no problema de adequação. Super - explosão combinatorial é causada pela inserção das variáveis de estado, representativas da dinâmica dos parques geradores. Vislumbra-se a possibilidade de um tratamento via enumeração simplificada parcial. Solução deve beneficiar-se do uso de processamentos paralelos ou distribuídos.</i></p>

Nota: Espaço transcomputacional é aquele teoricamente intratável, mesmo por uma máquina virtual de Turing (Computador Ideal).

A composição de um espaço probabilístico de estados, cuja análise seja praticamente factível, constitui então o cerne 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, Schilling *et alii* [97],[101]:

- *Incertezas Associadas a Cenários*
- *Incertezas Associadas a Distúrbios (ou “Grandes” Perturbações)*
- *Incertezas Associadas a Ruídos e Parâmetros (ou “Pequenas” Perturbações)*

Uma categoria adicional, associada ao ponto de operação do sistema (incerteza operacional) poderia ainda ser conceitualmente caracterizada, muito embora a mesma seja de difícil tratamento numérico e não será aqui abordada. A **Figura III-2** resume a taxinomia proposta para o tratamento das incertezas de um sistema de potência.

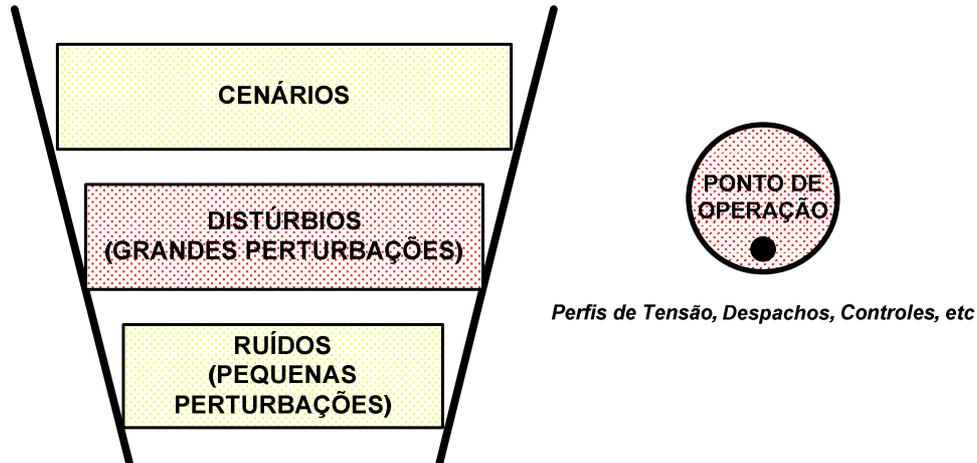


Figura III-2 – Relacionamento Hierárquico entre as Incertezas de um Sistema de Potência

III.2.2.1 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 tratadas.

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.

Para a análise estática de segurança, no âmbito do planejamento da operação, a consideração simultânea de diversos perfis de intercâmbio é útil para uma especificação mais abrangente do conjunto de parâmetros de reguladores que influenciam o amortecimento dos modos de oscilação inter-áreas do sistema. Com base na prática dos estudos determinísticos, ora praticados no Brasil, sugere-se, nesse caso, *a consideração de até oito cenários de intercâmbios*. A título de esclarecimento, comenta-se que uma ponderação equiprovável ($1/8 = 0,125$) é comumente adotada para cada perfil de intercâmbio analisado. Um procedimento mais rigoroso baseia-se na extração dos valores de probabilidades a partir das curvas de permanência de intercâmbios, estabelecidas nos estudos de planejamento mensal da operação.

No que concerne aos cenários oriundos das *incertezas do parque gerador*, os mesmos já são tradicionalmente considerados, de forma abrangente, nos estudos clássicos de adequação. Entretanto, cumpre observar que pelas peculiaridades das estatísticas de desempenho de geradores, os estados associados a falhas de ordem superior (*i.e.* duplas, triplas, etc) assumem probabilidades elevadas, tornando computacionalmente penoso um tratamento por enumeração Rei *et alii* [98]. A extensão da análise de confiabilidade probabilística para a segurança estática, considerando os cenários oriundos das incertezas do parque gerador, provocaria necessariamente uma explosão do número de estados a serem analisados. Isso ocorre porque já para um único cenário do parque gerador, o número de autovalores do sistema já é bastante elevado, pois na estratégia de análise proposta as unidades geradoras são dinamicamente representadas por modelos de ordem superior, ainda associados a reguladores de tensão, velocidade e estabilizador.

Suponha-se por exemplo, um sistema cujo parque gerador tem da ordem de 700 unidades geradoras, das quais aproximadamente 200 são dinamicamente representadas com modelos detalhados de reguladores, estabilizadores e geradores. Estimando que cada conjunto máquina mais controles gere da ordem de 30 autovalores, o conjunto total de autovalores gerados alcançaria um total de 6000, para cada cenário do parque gerador. Essa consideração prática justifica então que o desenvolvimento inicial da análise probabilística de segurança estática se *faça condicionalmente para cada cenário do parque gerador*.

Nos estudos tradicionais de adequação, quando a *topologia ramal* 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 com duração inferior, quando de interesse, devem ser tratados no âmbito da análise de segurança. A extensão da análise da topologia para o foco da segurança estática probabilística, sugere que a monitoração usual se *restrinja às contingências simples e, no caso particular de sistemas de porte reduzido, às contingências duplas*.

Os cenários originados pelas incertezas da *topologia nodal*, embora passíveis de consideração, não são comumente levados em conta nos estudos de adequação probabilística. Essa situação sugere a adoção da mesma estratégia para a análise probabilística da segurança estática.

Finalmente, 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 abordado adiante. Os denominados patamares de carga geram os cenários de carga. A avaliação das probabilidades de ocorrência de cada patamar são obtidas através de técnicas tradicionais de agregação estatística. Na análise da adequação há referências ao uso de até 36 cenários de carga. Para a análise probabilística da segurança estática sugere-se o

emprego de até 5 *cenários*, o que permitirá a representação, com folga, dos níveis tradicionalmente estudados (*i.e.* carga pesada, média, leve, mínima).

III.2.2.2 Tratamento Estatístico de Cenários

Um dos principais empecilhos para a realização de estudos de confiabilidade de cunho probabilístico advém da dificuldade de obtenção de dados estatísticos de boa qualidade, representativos do desempenho de componentes, ocorrências, circunstâncias e práticas operativas do sistema. No passado, a ausência de dados estatísticos confiáveis era superada com o uso de dados típicos oriundos de sistemas similares ou pela prática de uma análise de sensibilidade com dados estimados. No Brasil, registram-se, ao longo dos anos, diversos esforços SGC [19], ONS [66] 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 estática. 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.

Tabela III-2 – Requisitos de Dados Estatísticos para os Cenários de Adequação e Segurança Estática

Incertezas	Adequação	Segurança Estática
Fontes Primárias de Energia (i.e. Intercâmbios)	Status estabelecido: São usualmente conhecidas ou estimadas as incertezas de séries hidrológicas (sintéticas ou históricas) e as disponibilidades de fontes fósseis. Algumas estatísticas de fontes eólicas já são disponíveis. Os cenários de intercâmbios nas interligações podem ser ponderados por probabilidades de ocorrências, extraídas de curvas de permanência (oriundas do planejamento da operação). São também disponíveis estatísticas meteorológicas auxiliares.	Para o sistema brasileiro propõe-se ou um tratamento individual por cenário ou a composição de até 8 cenários de intercâmbio (pois bem espelham a prática atual), ponderados por suas probabilidades de ocorrência, dado que as dinâmicas associadas às disponibilidades de fontes primárias são lentas e as excursões entre diferentes cenários normalmente não caracterizam distúrbios. Estatística necessária: idêntica àquela da adequação.
Parque Gerador	Status bem estabelecido: São conhecidas as estatísticas de falhas de unidades geradoras. Se necessário, a capacidade geradora de uma usina pode ser ponderada por probabilidades de ocorrências de montantes de geração. A estatística disponível permite a modelagem de contingências simples e de ordem superior. São também disponíveis as estatísticas da manutenção.	Por simplicidade, propõe-se o tratamento de um único (probabilidade unitária) parque gerador, por vez, porque as excursões entre diferentes capacidades são amiúde relacionadas a distúrbios com significativo impacto na ordem de grandeza do modelo dinâmico do sistema. Sem requisitos estatísticos.
Topologia Ramal (linhas e trafos)	Status bem estabelecido: São conhecidas as estatísticas de disponibilidades de ramos. A estatística disponível permite ainda que uma dada capacidade de transmissão seja ponderada pela probabilidade da topologia respectiva. É usual a modelagem de contingências simples e de ordem superior.	Sugere-se tão-somente a consideração de topologias oriundas de contingências simples. Em sistemas de pequeno porte, o tratamento de contingências duplas pode ser tentado. Estatística necessária: idêntica àquela da adequação, pois a análise é estática.
Topologia Nodal (subestações)	Status mal estabelecido: Escassez de estatísticas confiáveis. Entretanto, as topologias das subestações podem ser relacionadas com probabilidades de ocorrência, através de cálculo indireto laborioso.	Por simplicidade, os nós podem ser considerados robustos e sem falhas, ou seja não contribuem para a formação do espaço probabilístico de estados. Sem requisitos estatísticos.
Carga	Status estabelecido: Curva de carga pode ser agregada em patamares representativos de permanências, às quais são atribuídas probabilidades.	Para o sistema brasileiro, sugere-se a modelagem de até 5 patamares, ponderados por suas respectivas durações relativas (pesada, média, leve, mínima, extraordinária). Estatística necessária: idêntica àquela da adequação.

III.2.2.3 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-3**), 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-2):

$$I_{\text{distúrbio}} = \left(\frac{f_{\text{ocorrência}}}{t_{\text{exposição}}} \right) * t_{\text{observação}} \quad (\text{III-2})$$

Onde:

$I_{\text{distúrbio}}$ é a intensidade de distúrbio;

$f_{\text{ocorrência}}$ é a frequência de ocorrência;

$t_{\text{exposição}}$ é o tempo de exposição;

$t_{\text{observação}}$ é o tempo de observação.

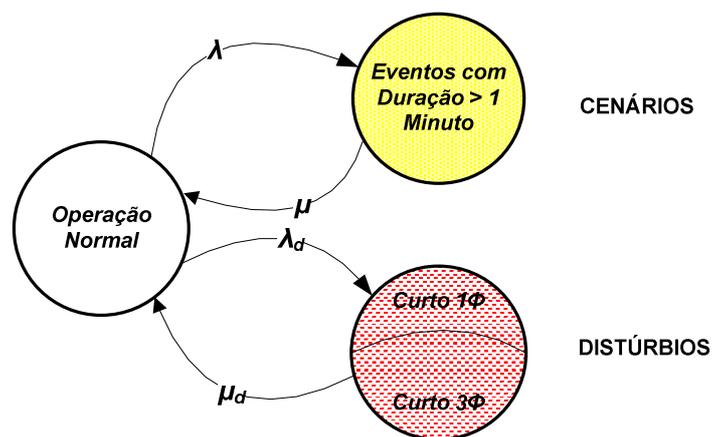


Figura III-3 – Avaliando Incertezas de Cenários e Distúrbios

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-3** 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 solicitação ceráunia em uma 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. O cálculo pode ser refinado, caso sejam conhecidas as estatísticas sobre tipos, causas e locais de distúrbios, verificados no sistema.

Os efeitos dos distúrbios não são modelados nem na análise probabilística da adequação, nem na análise probabilística da segurança estática. No primeiro caso, porque a análise de adequação pressupõe transições entre estados já em regimes permanentes, ou seja, a trajetória dinâmica entre estados é ignorada. No caso da análise

probabilística da segurança estática, o desprezo dos distúrbios ocorre porque, conceitualmente, a mesma (por motivo das linearizações utilizadas) restringe-se à influência dos “pequenos sinais” ou “pequenos distúrbios”. (*Nota: justifica-se aqui a apresentação deste tipo de incerteza tão-somente para fins de organização conceitual*).

III.2.2.4 Ruídos (Pequenas Perturbações)

A última categoria da hierarquia de incertezas aqui proposta é denominada como *ruído*. Esse tipo de incerteza pode ser interpretado como um reflexo da lei dos grandes números (composição de um grande número de pequenos distúrbios, resultando em efeitos com características Gaussianas) ou como oriundo do chamado “*ruído branco*”, naturalmente presente em sistemas físicos. Como o tratamento analítico desse efeito não é trivial, admite-se uma aproximação justificada pelo teorema do limite central, Kendall & Stuart [2], o que pode permitir uma aproximação por variáveis aleatórias com distribuições gaussianas convenientes.

Como a própria denominação sugere, os ruídos são incertezas de pequena magnitude, geralmente de alta frequência, naturalmente presentes em qualquer sistema físico. Na prática, os ruídos se evidenciam como presentes nos parâmetros do sistema (*e.g.* imprecisões em ajustes de reguladores, variabilidade de parâmetros topológicos, tais como resistências e reatâncias, em função de condições atmosféricas, etc) e, fundamentalmente, através do comportamento aleatório (não necessariamente caótico), da carga. Por conveniência, aqui enquadrou-se também na categoria ruído, a incerteza associada aos percentuais de modelagem das parcelas de carga do tradicional modelo ZIP (impedância, corrente e potência constantes), Jardim [102].

Os ruídos, quando modelados por distribuições probabilísticas específicas, podem ser tratados por: *(i)* valores de probabilidade oriundas de discretizações de faixas convenientes; *(ii)* pela definição de probabilidades de grandezas se situarem em valores iguais ou inferiores (ou superiores) a marcos específicos; *(iii)* por valores de oriundos de simulação Monte Carlo.

Na prática, a inserção da influência dos ruídos na análise de confiabilidade pode ser realizada pela estimação de magnitudes, que podem ser posteriormente compostas com as grandezas resultantes das incertezas de cenários ou distúrbios.

As distribuições probabilísticas de maior interesse para a simulação numérica dos ruídos abrangem, entre outras, as seguintes: *gaussiana, retangular, triangular, Weibull, lognormal, Laplace, exponencial*.

Aquelas distribuições com domínio $[0, \infty)$ podem ser utilizadas através de soma ou subtração, quando de suas composições com um dado cenário.

A presença de ruídos pode ser considerada em praticamente todos os segmentos do sistema. Entretanto, a discussão aqui subsequente aborda tão-somente a incorporação dos mesmos na carga. Sob esse enfoque, o primeiro aspecto a destacar se refere à localização dos ruídos: visando a simplicidade, propõe-se aqui que o tratamento ocorra por discriminação de áreas.

Quanto ao tipo de ruído a ser considerado no conjunto de barras de uma dada área, podem ser reconhecidas três categorias: *(i) magnitude; (ii) modelagem; (iii) híbrida*.

Como a própria denominação sugere, o ruído na *magnitude* é aquele que é incorporado diretamente pela soma ou subtração de valores numéricos em relação a uma determinada grandeza de um cenário, tomado como referência. O tratamento por magnitude ainda engloba os aspectos de *acoplamento e grau de conformidade*.

O *acoplamento* diz respeito ao tipo de influência que será imposto às componentes ativa e reativa da carga (e.g. ruídos podem se associados somente à componente ativa, somente à reativa, à potência aparente, ou com desacoplamento entre as componentes). O *grau de conformidade* informa qual o conjunto de barras em cujas cargas serão somados ou subtraídos a mesma magnitude de ruído.

O tratamento de ruído na *modelagem* se refere aos erros percentuais a serem considerados na composição da carga via modelo ZIP (*i.e. percentuais de impedância constante, corrente constante e potência constante*). Sob este enfoque, são ainda possíveis incorporações *duplas e triplas*. No caso das duplas, os ruídos são introduzidos

apenas em dois percentuais (*e.g.* *ZI*, *ZP*, *IP*), sendo o terceiro mantido fixo. Na outra alternativa, todos os três percentuais sofrem alteração em cada nova avaliação.

Por último, o denominado tratamento *híbrido* combina as duas formulações anteriores. Cabe ainda comentar que a modelagem numérica do efeito dos ruídos é computacionalmente penosa. Por conveniência, uma estratégia merecedora de atenção propugna que as avaliações sejam realizadas por lotes, abrangendo entre 10^3 e 10^5 gerações de valores numéricos, por vez.

III.2.3 Composição de Incertezas Estacionárias

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.

III.2.4 Convexidade do Espaço Probabilístico

A composição combinatorial direta automática e exaustiva de um espaço probabilístico de estados, gerado por incertezas oriundas exclusivamente de cenários, pode apresentar situações operacionalmente inviáveis (*i.e.* sem solução física). Esse fato decorre da usual hipótese de independência estatística entre as variáveis aleatórias geradoras dos cenários.

A perda de convexidade ocorre quando alguns estados são descartados quando do processamento computacional que visa classificá-lo como sendo “*sucesso*” ou “*insucesso*”, ou simplesmente quando se aquilata as grandezas de interesse (margens, energias, etc). Ou seja, essa perda advém quando parcelas do espaço não são contabilizadas por dificuldades de simulação (*e.g.* fluxo de potência não convergiu, autovalores não foram calculados, simulação dinâmica inconclusa, etc). Diversas

estratégias para a manutenção aproximada dessa convexidade podem ser investigadas, sendo uma delas a que particiona o problema por cenários de despacho.

Tabela III-3 – Confiabilidade Preditiva Probabilística Perante Combinações de Incertezas

Incertezas em	Adequação	Segurança Estática
(1) Cenários	É a aplicação tradicional mais consolidada da análise probabilística da confiabilidade em regime estático.	Aplicação conceitualmente abonada, porém quase inexplorada na literatura [96].
(2) Distúrbios (Grandes Perturbações)	Aplicação conceitualmente inviável pois a análise de adequação só reflete a situação de estados em regimes estacionários. A trajetória dinâmica entre estados não é tratada.	Aplicação conceitualmente inviável, pois distúrbios não são convenientemente representáveis pelas linearizações intrínsecas na análise probabilística da segurança estática.
(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.	Aplicação conceitualmente abonada, porém quase inexplorada na literatura [96].
(4) Cenários + Distúrbios	Vide linha (2)	Vide linha (2)
(5) Cenário + Ruídos	Aplicação já explorada, mormente aquela combinando patamares de cargas com ruídos Gaussianos. Entretanto, inúmeras possibilidades desta combinação permanecem virtualmente inexploradas.	Aplicação conceitualmente abonada, porém ainda inexplorada. Apresenta grande potencial de interesse.
(6) Cenários + Distúrbios + Ruídos	No âmbito da adequação esta combinação não é admitida pela mesma razão apontada no item (2).	Vide linha (2)

Isso significa, por exemplo, que a combinação de uma certa topologia de transmissão, associada a um dado parque gerador e um patamar de carga específico, embora caracterize um estado do espaço com uma probabilidade teoricamente definida, possa não admitir nenhum ponto de operação real. Essa peculiaridade não ocorre nas

formações oriundas de distúrbios porém pode ocorrer, em menor escala, nas formações oriundas de ruídos. Neste ponto convém alertar que a caracterização de um ponto de operação real, embora com violações, não destrói a convexidade desejada. (*Nota*: o conceito de convexidade é aqui interpretado como sendo o fato de que a soma das probabilidades de todos os estados de sucesso e insucesso, representativos da operação real do sistema, devem atingir o valor unitário).

Assim, considerando que todos os cenários reais admitem sempre pelo menos um ponto de operação também real, constata-se que a simples construção matemática do espaço de estados, se divorciada da realidade operacional, poderá resultar na eliminação da convexidade que deve prevalecer na composição dos índices probabilísticos. Destarte, quando da composição do espaço probabilístico de cenários, precauções podem ser a *priori* tomadas no sentido de forçar uma aproximação que garanta a presença da convexidade dos índices probabilísticos (*i.e.* é conveniente que não sejam automaticamente gerados estados que embora tenham valores não nulos de probabilidade, sejam inviáveis na prática).

Por exemplo, uma estratégia eventualmente factível poderia basear-se, grosso modo, nos seguintes passos, usando-se a premissa simplificadora de que uma certa topologia de transmissão seria capaz de gerar estados viáveis para os patamares de cargas pesada, média e leve (vide **Figura IV-7** e **Exemplo A.3** da **Seção IV.4.1**):

- (a) Para um dado nível hierárquico de cenário (*e.g.* patamar de carga pesada), associado a uma topologia (N-1), some as probabilidades de todos os estados que se revelarem fisicamente inviáveis, resultando no valor δ ;
- (b) Repita o procedimento para o patamar de carga imediatamente inferior (*e.g.* carga média);
- (c) Ajuste as probabilidades dos estados viáveis associados ao patamar de carga média, rateando proporcionalmente o valor δ entre os próprios estados viáveis desse cenário (*i.e.* carga média e topologia N-1);

- (d) Repita o procedimento para os demais cenários, supondo a hipótese de comportamento coerente (sob o ponto de vista da confiabilidade), até esgotar o conjunto de estados enumerados. Nesse ponto dispõe-se de um espaço de estados já ajustados e viáveis;
- (e) Finalmente estime o valor da probabilidade do conjunto de estados não enumerados e, caso o mesmo se releve significativo, rateie proporcionalmente esse valor entre os estados viáveis obtidos no passo anterior.

Convém ainda esclarecer que a estratégia clássica do cálculo de adequação usualmente ignora a questão de convexidade: *os estados probabilísticos inviáveis são simplesmente retirados da estatística*. Essa alternativa também pode ser contemplada quando do cálculo da segurança estática probabilística.

III.3 Modelagem de Estratégias Corretivas

Na análise de confiabilidade de sistemas de potência, podem ser identificadas duas classes distintas de problemas, envolvendo o emprego de medidas corretivas, a saber:

Problema A: *é a formulação tradicional. Trata-se aqui do cálculo do nível de risco sistêmico, condicionado ao ponto de operação especificado, simulando o uso de medidas corretivas para cada ponto do espaço probabilístico de estados.*

Problema B: *determinação do ponto de operação de menor risco sistêmico.*

O **problema A** envolve um processo de otimização de cada estado do espaço, quando submetido às condições operacionais impostas ao caso-base. Da solução desse problema podem resultar, entre outras, indicadores sob forma de expectâncias e probabilidades. A **Tabela III-4** ilustra as estratégias de controle pertinentes para a segurança estática, comparando-as com a análise clássica de adequação. Enfatiza-se, não obstante, que os resultados obtidos no problema A são estritamente condicionados ao ponto de operação inicial, que permanece inalterado. Para cada ponto de operação, a absoluta eficácia das medidas corretivas liberadas ficaria demonstrada caso não sejam detectados riscos.

Tabela III-4 – Possibilidades de Uso de Medidas Corretivas no Âmbito de Análise Probabilística

Controles	Adequação	Segurança Estática
Redespacho ativo & reativo	Uso tradicional amplo	Influência sobre modos de oscilação inter-áreas
Variação de tapes	Uso tradicional amplo	Efeito não investigado
Chaveamentos (seccionamentos, conexões, desligamentos, vinculações)	Pouco difundido mas essencial para carga leve e sistemas de subtransmissão	Sem registros
Controles flexíveis (FACTS)	Raros registros na literatura	A ser investigado
Ajustes de reguladores	Não se aplica	Principal aplicação
Ajustes de proteção	Uso indireto por vinculações	Sem registro
Funções - Objetivo	Estado da Arte	
Mínimo corte de carga	Formulação clássica do problema de fluxo de potência ótimo(FPO)	Possível adaptação
Corte mínimo ou seletivo de geração	Rara utilização indireta por simulação de vinculações	Sem registro
Máxima margem para perda de sincronismo	Não se aplica	Não se aplica
Máxima distância de autovalores ao semiplano positivo	Adaptação da função objetivo ao problema de FPO	Adaptação da função objetivo ao problema de FPO
Máximo amortecimento, otimizações de correntes, tensões, etc.	Adaptação da função objetivo ao problema de FPO	Adaptação da função objetivo ao problema de FPO

Já no **problema B**, os resultados do problema A são utilizados na busca do ponto de operação de risco mínimo, caso os mesmos sejam combinados com um procedimento de otimização (*e.g.* algoritmo genético), uma estratégia de controle sistêmica e um conjunto de restrições operativas. Idealmente, a validação da solução do problema **B** (*i.e.* novo ponto de operação) poderá ser verificada submetendo-se este novo ponto de operação novamente ao problema **A**. O resultado será “correto” se for caracterizado o ponto de operação com risco mínimo. O procedimento a seguir exemplifica uma formulação conceitual do problema **B**, via algoritmo genético, onde os recursos liberados para controle são os reguladores de tensão e velocidade de um sistema:

Passo A: Início. Define os conjuntos de valores iniciais dos parâmetros dos reguladores (indivíduos iniciais da população);

Passo B: Processa análise de confiabilidade (e.g. segurança estática). Avalia aptidão (índices de confiabilidade) de cada indivíduo (conjunto de parâmetros) da população;

Passo C: Critério de parada (tolerância, número de iterações, etc). Caso haja atendimento do critério de parada seleciona indivíduo de melhor aptidão e *finaliza*;

Passo D: Gera geneticamente nova população. Vá para o **Passo B**.

III.4 Lógica do Procedimento Conceitual Generalizado

A proposição de um arcabouço lógico generalizado para a análise de confiabilidade, sob o ponto de vista de segurança estática (i.e. estabilidade a pequenas perturbações), pode ser mais facilmente alcançada se forem precipuamente enfocadas as semelhanças conceituais com a análise clássica da adequação. Assim, a estrutura lógica conceitual apresentada a seguir procura enfatizá-las. Observa-se, entretanto, que a implementação computacional efetiva exigirá detalhamentos adicionais. Seja o seguinte procedimento conceitual genérico, esboçado na **Figura III-4** e comentado a seguir:

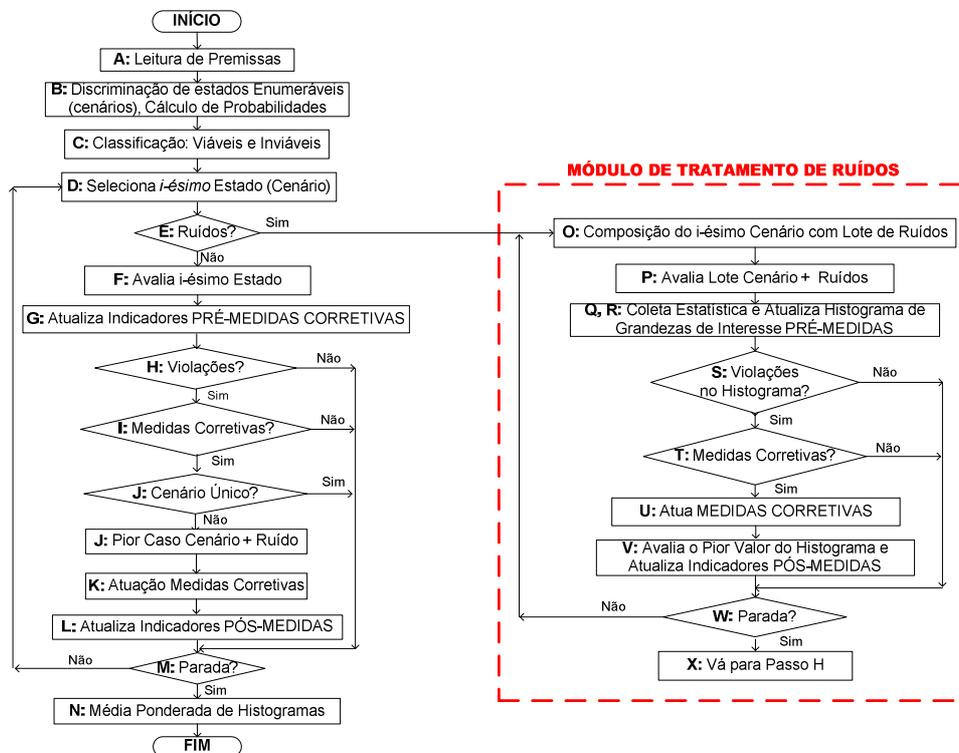


Figura III-4 – Lógica do Procedimento Conceitual Generalizado

Passo A: Início Avaliação Probabilística de Segurança Estática. Leitura e diagnose de dados, critérios, medidas corretivas para cenários e ruídos, composição de incertezas e obtenção de casos base. Testes de consistência e diagnóstico;

Passo B: Caracteriza conjunto de *estados enumeráveis*: número total de estados, probabilidades dos estados enumeráveis (virtuais e “reais”). Na análise de segurança estática probabilística os estados enumeráveis são compostos pelas incertezas em *cenários* envolvendo topologias (N, N-1 e N-2), patamares de carga e intercâmbios (Vide seção III.2.2.1 e **Tabela III-2**);

Passo C: Se for o caso, testa convexidade (existência de solução real) e sanidade (existência de violações e/ou modos de falha já no caso-base) do espaço probabilístico de cenários e, também se for o caso, promove ajuste e sinaliza sobre a posterior estratégia de contabilização (Vide seção III.2.4). Se esta etapa é processada, os estados probabilísticos originais caem em duas classes: estados *viáveis* ou estados *inviáveis*;

Passo D: Seleciona via Monte Carlo ou enumeração, o *i-ésimo* estado enumerável: neste ponto conhece-se a probabilidade de ocorrência deste *i-ésimo* estado e todas as suas grandezas de interesse (Nota: nesta Tese, em particular, apenas a opção via enumeração será implementada para cenários);

Passo E: Verifica se há incertezas do tipo ruídos. Caso positivo vá para o **Passo O**;

Passo F: Efetua a avaliação do *i-ésimo* estado selecionado enumerável (viável ou inviável) com probabilidade conhecida oriunda dos cenários (Nota: deve ser novamente aqui enfatizado que estados oriundos de cenários têm suas probabilidades conhecidas). A avaliação inclui análise de fluxo de potência convencional e análise de estabilidade a pequenas perturbações. Em princípio, seriam passíveis de uso os programas tipicamente utilizados no setor elétrico brasileiro, tais como PACDYN, ORGANON, PSAT (vide **Anexo D**), etc;

Passo G: Diagnose e armazenagem estatística das propriedades do *i-ésimo* estado enumerável. Atualiza as funções-teste para os indicadores de interesse (probabilidades de instabilidades, probabilidades de amortecimentos, probabilidades e expectâncias de

violações e/ou grandezas, etc). Os índices contabilizados nesta etapa caracterizam variáveis aleatórias pré-medidas corretivas.

Passo H: Testa se há violações de critérios pontuais (cenários) ou oriundos de histogramas (ruídos). Caso não haja violações vá para o **Passo M**;

Passo I: Verifica se há medidas corretivas liberadas para o *i-ésimo* estado enumerável (oriundo de cenários) ou, se for o caso, para o pior caso da composição (*i-ésimo* estado enumerável + ruído). Caso negativo, vá para o **Passo M**;

Passo J: Caso haja apenas *um cenário*, vá para o **Passo M** (Isso ocorre porque as medidas corretivas já terão sido aplicadas no módulo de tratamento de ruídos). Quando existir mais de um cenário, identifique, se for o caso, o pior caso da composição cenário + ruído;

Passo K: Tenta operar as medidas corretivas liberadas e obter o estado manipulado pós-medidas corretivas (vide **Tabela III-4**). No caso da análise de segurança estática, algumas das medidas corretivas passíveis de atuação são redespacho de geração, ajuste de controladores e corte de carga (*caso as medidas corretivas eventualmente liberadas para o tratamento de ruídos sejam as mesmas que as liberadas para o tratamento de cenários, este passo revelar-se-á inócuo*);

Passo L: Atualiza estatística de indicadores pós-medidas corretivas tais como: (i) probabilidades e expectâncias de perdas de carga, de geração, de níveis de intercâmbios, de violações (ii) probabilidades de instabilidades e níveis de amortecimentos (iii) expectâncias de ajustes de reguladores e de redução de intercâmbios, etc. Efetua a diagnose das propriedades do *i-ésimo* estado enumerável, já composto, se for o caso, com ruídos. Avalia resultados e classifica o estado em insucesso (*i.e.* fluxo diverge, nenhuma violação eliminada, não consegue cortar carga, etc), insucesso parcial (*i.e.* algumas violações eliminadas, algum corte de carga, ajustes insatisfatórios de grandezas, estado estável porém com baixo amortecimento, etc) e sucesso total (nenhum critério violado, ajustes adequados de grandezas, não há penalizações ou cortes de carga, estado estável e com bom amortecimento);

Passo M: Testa se o critério de parada foi atingido (*e.g.* esgotamento da enumeração, atendimento do coeficiente de variação estabelecido, término de número de lotes/sorteios, convergência em distribuição, delimitação por tolerâncias). Caso negativo vá ao **Passo D**;

Passo N: Se for o caso, efetua o tratamento estatístico de histogramas (cenários + ruídos) gerados no **Passo V**, visando estimação de funções de distribuições e densidades de probabilidades. Obtenção da média ponderada de histogramas e cálculo de estatísticas diversas (médias, medianas, amplitudes, variâncias, etc). Diagnose e registro de resultados. **Fim** .

Passo O: Tratamento de Incertezas do Tipo Ruído. Se for o caso, para o *i-ésimo* estado selecionado no **Passo D**, sorteia lotes (*i.e.* conjuntos entre 10^3 e 10^5) de magnitudes de ruído (*i.e.* valor da carga ativa e reativa) ou sorteia tipos de modelagens de ruído (parcelas de carga representadas por corrente, impedância e potência constante). Opera a composição (soma ou subtração) de magnitudes de grandezas envolvendo cenário + ruído (*Nota:* a probabilidade da magnitude resultante não é determinada);

Passo P: Efetua a avaliação do *i-ésimo* estado selecionado, já composto, com ruídos (*i.e.* estado viável) levando em conta o respectivo lote de ruídos. Cada lote de ruídos deve ser ajustado de tal forma que haja atendimento satisfatório de um critério de parada, *e.g.* aderência a uma dada distribuição, coeficiente de variação β , término de lote de sorteios. A inserção do efeito do lote de ruídos gera apenas magnitudes passíveis de avaliação, cujas probabilidades são desconhecidas. Daí a necessidade da coleta estatística de resultados, nesta etapa, visando à posterior montagem de histogramas que viabilizam a obtenção de índices. As avaliações incluem análise de fluxo de potência convencional e análise de estabilidade a pequenas perturbações. Em princípio, seriam passíveis de uso os programas utilizados no setor elétrico brasileiro, tais como PACDYN, ORGANON, PSAT, etc;

Passo Q: Coleta estatística das grandezas de interesse (parte real dos autovalores e amortecimentos, etc) levando em conta o *i-ésimo* lote de ruídos;

Passo R: Atualiza histograma de indicadores levando em conta o *i-ésimo* lote de ruídos pré-medidas corretivas;

Passo S: Testa se no histograma há violações de critérios (e/ou modos de falha). Caso não haja violações de critérios (e/ou modos de falha), vá para o **Passo W**;

Passo T: Verifica se há medidas corretivas liberadas no procedimento. Caso negativo vá para o **Passo W**;

Passo U: Tenta operar as medidas corretivas liberadas: por exemplo, ajuste de controladores para o pior caso de autovalor situado à direita do semi-plano. Convém lembrar que as medidas corretivas selecionadas para o tratamento de ruídos podem não ser as mesmas selecionadas para o tratamento de cenários (vide bloco K). Assim podem ocorrer diversas combinações, que entretanto fogem ao escopo desta Tese;

Passo V: Avalia o histograma e atualiza indicadores levando em conta o *i-ésimo* lote de ruídos pós-medidas corretivas (uma opção simplificadora pode admitir que se o pior caso tratado for convertido em sucesso, todo o histograma também o será);

Passo W: Testa se o critério de parada foi atendido (e.g. término de lote de sorteios, aderência à distribuição probabilística, atendimento a coeficiente de variação). Caso negativo vá ao **Passo O**;

Passo X: Retorna para o **Passo H**.

Em relação ao procedimento aqui proposto, cabem os seguintes comentários, a título de esclarecimentos: **(i)** A consideração de incertezas do tipo ruído sugere a necessidade de uso de histogramas porque as probabilidades associadas a esse gênero de incerteza não são definidas; **(ii)** Nota-se que podem ser gerados duas diferentes categorias de indicadores de confiabilidade: *indicadores pré e pós-medidas corretivas*; **(iii)** A distribuição no plano complexo dos valores reais e imaginários dos autovalores gerados na análise de segurança a pequenos sinais pode ser tratada via histogramas associados às ordenadas, abscissas e ângulos de amortecimento; **(iv)** Todas as grandezas físicas associadas a combinações de incertezas oriundas de cenários (ou seja, com probabilidades definidas), quando selecionadas via enumeração, são diretamente

tratadas por expectâncias, e não via histogramas; (v) O procedimento sugerido possibilita a obtenção de grandes variedades diversas de análises. Por este motivo, é fundamental enfatizar o aspecto de forte condicionamento entre resultados e premissas; (vi) Para o problema clássico de adequação, a detecção (sem ajustes) de eventuais violações já no caso-base, enseja o cálculo de índices de confiabilidade não convencionais (*Nota:* o estudo tradicional da confiabilidade sob a ótica da adequação impõe que o caso-base não apresente violações. Entretanto, na prática, sabe-se que os sistemas operam sob diversos níveis de violações); (vii) O tratamento das combinações de cenários (*i.e.* apenas cenários oriundos de topologias, cargas, intercâmbios) pode ser efetuado via enumerações ou simulações Monte Carlo. Já o tratamento dos ruídos admite um tratamento computacionalmente factível através de simulações Monte Carlo; (viii) O tratamento via enumeração, quando factível, sugere a obtenção direta de probabilidades e expectâncias; (ix) Duas categorias distintas de medidas corretivas podem ser consideradas: aquelas aplicadas somente no âmbito do tratamento de cenários e as aplicadas no âmbito do tratamento de ruídos. É possível a ativação combinada das duas categorias.

O procedimento computacional generalizado aqui proposto será utilizado de forma particularizada no Capítulo IV.

III.5 Indicadores de Segurança Estática Probabilística

Grande parcela dos indicadores típicos, oriundos da análise probabilística de confiabilidade pode ser extraída a partir do conhecimento da descrição da variável aleatória de interesse. A descrição ideal, através das funções densidade de probabilidades (*fdp*) ou funções distribuição de probabilidades (*FDP*), é raramente disponível como resultado da maioria dos aplicativos computacionais existentes. Deve aqui ser comentado que a grande maioria dos indicadores probabilísticos utilizados na indústria retrata o comportamento das incertezas apenas sob o ponto de vista estacionário. A proposição de funções indicadoras, relacionadas a processos estocásticos, ainda se encontra no estágio infantil de desenvolvimento. A situação mais comum informa ao analista apenas um conjunto de probabilidades de eventos de interesse ou alguns momentos de primeira ordem (expectâncias) convenientes.

Por exemplo, a Tabela III.5 registra alguns dos possíveis indicadores que podem ser relacionados aos estudos de adequação ou segurança estática probabilística. Cumpre notar que a variedade de indicadores possíveis é vastíssima SGC [20] e a tabela em questão tenta apenas enfatizar o enquadramento conceitual de uma parcela dos indicadores possíveis.

Tabela III-5 – Tipologia Simplificada de Indicadores Probabilísticos de Adequação e Segurança Estática Probabilística

Adequação	Segurança Estática
<p>Probabilidades de Situações</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interrupção de Carga (PPC) - Ilhamento - Desbalanço Carga/Geração - Violações de Limites ou Critérios 	<p>Probabilidades de Situações</p> <ul style="list-style-type: none"> - Autovalores no Semi-plano Direito - Autovalores em Faixa Especificada de Amortecimento - Autovalores em Faixa Especificada de Frequência - Autovalores entre Distâncias Especificadas ao Eixo - Violações de Limites ou Critérios
<p>Expectâncias</p> <ul style="list-style-type: none"> - Potência não Suprida (PNS) - Energia não Suprida (ENS) - Frequências de Interrupções (FPC) - Durações de Interrupções (DPC) 	<p>Expectâncias</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estabilidade - Margens especificadas - Ajustes de medidas corretivas
<p>Outros Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> - Severidade (SEV) - Momentos de Ordem Superior - Coeficientes de Variação (β) - Estatísticas Diversas - Distribuições Estatísticas 	<p>Outros Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> - Momentos de Ordem Superior - Estatísticas Diversas - Distribuições Estatísticas

A grosso modo, a gênese de todos os indicadores probabilísticos se forma a partir da definição de um modo de falha, ou mais genericamente ainda, de uma situação de interesse. Ou seja, definida uma variável aleatória associada ao fenômeno de falha ou

situação que interessa ao analista, o índice respectivo se obtém pela contabilização estatística dessa variável aleatória.

Usualmente, indicadores associados a frequências e durações usualmente usadas na análise tradicional de adequação, presumem a adoção de espaços probabilísticos Markovianos homogêneos (*i.e.* intensidades de transições entre estados com valores invariantes no tempo e estados sem memória). Embora essa hipótese seja ambiciosa, apenas ela viabiliza, na prática, a estimativa desse tipo de indicador.

Também na análise de adequação clássica, essa contabilização é realizada com o suporte das denominadas *funções-teste*, cuja estrutura revela-se, em certos casos, bastante elaborada (*e.g.* as funções-teste para a contabilização de frequências Melo, [31]). Já para a análise de segurança probabilística, tanto estática quanto dinâmica, a elaboração de algumas funções-teste não é trivial, dada a extrema complexidade do espaço probabilístico correspondente. Isso ocorre porque não é simples a contabilização precisa das transições de interesse, ao longo das fronteiras desejadas. *Essa dificuldade tende a tornar bastante onerosa a obtenção de indicadores de frequências e durações para a análise de segurança dinâmica.*

Finalmente, deve aqui ser reiterado que todos os indicadores probabilísticos são estrita e essencialmente condicionados ao conjunto de premissas de modelagem e critérios de cálculo utilizados na avaliação. Dado o caráter multifacetado de possibilidades, indicadores probabilísticos quaisquer apresentados sem os respectivos condicionantes, perdem sua utilidade prática. Se essa afirmação já tem mérito no âmbito das análises determinísticas, no âmbito da análise estocástica ela assume dimensões de absoluta necessidade.

III.6 Categorias de Indicadores de Segurança Estática Probabilística

São propostas as seguintes categorias de índices:

- *índices baseados em medidas de probabilidades*
- *índices baseados em medidas centrais*
- *índices baseados em medidas de dispersão*

III.6.1 Índices Baseados em Medidas de Probabilidades

III.6.1.1 Probabilidade de Ocorrência da Instabilidade ($P_{instabilidade}$) – POI

O cálculo da probabilidade de ocorrência da instabilidade é o somatório de todos os estados instáveis do espaço probabilístico através da equação (III-3):

$$P_{instabilidade} = \sum_{i \in \psi} p_{estado}(i) \quad (III-3)$$

Onde :

$P_{instabilidade}$ é a probabilidade de ocorrência da instabilidade sistêmica;

p_{estado} é a probabilidade do i -ésimo estado instável;

i é o estado (estado 1, estado 2,...);

ψ são conjuntos de estados instáveis contabilizados do espaço probabilístico (presença de autovalores no semi-plano da direita).

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

III.6.1.2 Probabilidade de Ocorrência da Estabilidade ($P_{estabilidade}$) – POE

O cálculo da probabilidade de ocorrência da estabilidade é o somatório de todos os estados estáveis do espaço probabilístico através da equação (III-4):

$$P_{estabilidade} = \sum_{i \in \psi} P_{estado}(i) \quad (III-4)$$

Onde :

$P_{estabilidade}$ é a probabilidade de ocorrência da estabilidade sistêmica;

P_{estado} é a probabilidade do i -ésimo estado estável;

i é o estado (estado 1, estado 2,...);

ψ são os conjuntos de estados estáveis contabilizados do espaço probabilístico (todos os autovalores situam-se ao semi-plano da esquerda).

Interpretação: é o indicador complementar àquele expresso pela equação (III-3).

Nota: Em condições ideais tem-se que

$$P_{instabilidade} = 1 - P_{estabilidade} \quad (III-5)$$

Entretanto nem sempre é viável a análise completa do espaço de estados. Assim justifica-se a necessidade do cálculo dos indicadores III.6.1.1 e III.6.1.2. O resultado da soma de ambos dos indicadores revela a abrangência e a precisão da análise realizada: quanto mais próximo da unidade, mais abrangente/precisa terá sido a análise realizada.

III.6.1.3 Probabilidade de Ocorrência do Fator de Amortecimento Menor do que ζ_{\min} e Maior que Zero ($0 < P_{\text{amort}} < \zeta_{\min}$) – PAM

Este índice é determinado através do somatório de todos os estados do espaço probabilístico cujo autovalor crítico tem fator de amortecimento menor do que ζ_{\min} e maior que zero, da forma apresentada pela equação (III-6)

$$P_{0 < \text{amort} < \zeta_{\min}} = \sum_{i \in \psi} p_{\text{estado}}(i) \quad (\text{III-6})$$

Onde :

$P_{0 < \text{amort} < \zeta_{\min}}$ é a probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento entre 0 e ζ_{\min} .

p_{estado} é a probabilidade do i-ésimo estado com fator de amortecimento $0 < \zeta < \zeta_{\min}$;

i é o estado (estado 1, estado 2,...);

ψ são os conjuntos de estados contabilizados com amortecimento na faixa $0 < \zeta < \zeta_{\min}$.

Interpretação: número entre zero e um indicando a proporção de estados com autovalores críticos situados em faixa de amortecimento especificada.

O fator de amortecimento de um par de autovalores complexos conjugados $\alpha \pm j\beta$ pode ser definido da forma :

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (\text{III-7})$$

Quanto menor o fator de amortecimento, menos robusto é o sistema. Além disso, para garantir uma operação segura, os fatores de amortecimento de todos os modos do sistema deverão, se possível, estar acima de um mínimo especificado, ou seja :

$$\zeta > \zeta_{\min} \quad (\text{III-8})$$

Onde:

ζ_{\min} é o fator de amortecimento mínimo especificado;

α é a parte real do autovalor;

β é a parte imaginária do autovalor.

Nota: Esse indicador pode ser generalizado na forma expressa por: $\zeta_a < P_{\text{amort}} < \zeta_b$

III.6.1.4 Probabilidade de Ocorrência da Frequência em Faixa Especificada – PFE

Este indicador é determinado através do somatório de todos os estados do espaço probabilístico cujo autovalor crítico tem frequência entre F_{\min} e F_{\max} da forma apresentada pela equação (III-9).

$$P_{F_{\min} < \text{freq} < F_{\max}} = \sum_{i \in \psi} P_{\text{estado}}(i) \quad (\text{III-9})$$

Onde :

$P_{F_{\min} < \text{freq} < F_{\max}}$ é a probabilidade de ocorrência da frequência na faixa de F_{\min} e F_{\max} .

P_{estado} é a probabilidade do i -ésimo estado cujo autovalor crítico tem frequência entre F_{\min} e F_{\max} ;

i é o estado (estado 1, estado 2,...);

ψ são os conjuntos de estados contabilizados na faixa de frequência especificada.

Interpretação: número entre zero e um indicando a proporção de estados cujo autovalor crítico tem frequência dentro de determinada faixa.

Nota: Valores típicos de faixas de interesse são $F_{mín} = 0,1$ Hz e $F_{máx} = 2,5$ Hz.

III.6.1.5 Probabilidade de Ocorrência da Frequência Superior a Valor Específico ($P_{freq > F_{máx}}$) – PFS

Este indicador é determinado através do somatório de todos os estados do espaço probabilístico cujo autovalor crítico tem frequência superior a um valor especificado $F_{máx}$ da forma apresentada pela equação (III-10).

$$P_{freq > F_{máx}} = \sum_{i \in \psi} p_{estado}(i) \quad (III-10)$$

Onde :

$p_{freq > F_{máx}}$ é a probabilidade de ocorrência da frequência superior a $F_{máx}$.

p_{estado} é a probabilidade do i -ésimo estado cujo autovalor crítico tem frequência superior a $F_{máx}$ Hz;

i é o estado (estado 1, estado 2,...);

ψ são os conjuntos de estados contabilizados com frequência superior a $F_{máx}$.

Interpretação: número entre zero e um indicando a proporção de estados cujo autovalor crítico tem frequência superior a valor específico.

III.6.2 Índices Baseados em Medidas Centrais

Uma primeira proposta poderia basear-se na avaliação de medidas centrais (eg. média aritmética e mediana) de todos os autovalores e/ou amortecimentos de um dado ponto de operação, cuja probabilidade de ocorrência é conhecida. Entretanto dois aspectos não

incentivam essa alternativa: (i) a dificuldade de cálculo numérico para sistemas de grande porte; (ii) a falta de respaldo, sob o ponto de vista de significado do resultado.

Uma outra alternativa mais simples baseia-se então na avaliação de medidas centrais (eg. média aritmética e mediana) apenas dos autovalores e/ou amortecimentos críticos de cada ponto de operação do sistema. Considerando que a cada ponto de operação tem, em princípio, sua probabilidade definida, viabiliza-se também o cálculo de expectâncias sistêmicas das partes reais dos autovalores críticos e amortecimentos críticos.

III.6.2.1 Média Aritmética das Margens Críticas ($\bar{\lambda}_{crit}$) – MAM

Sendo λ_i ($i= 1,2,3,\dots,n$) o conjunto de autovalores críticos dos estados, definimos sua média aritmética ou, simplesmente, média dos autovalores críticos, por

$$\bar{\lambda}_{crit} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{crit_i}}{n} \quad (III-11)$$

Onde :

$\bar{\lambda}_{crit}$ é a média aritmética da parte real dos autovalores críticos associados aos diferentes pontos de operação do sistema.

λ_{crit_i} é a parte real do autovalor crítico do estado i ;

i é o estado (estado 1, estado 2,...);

n é o número de estados contabilizados do espaço probabilístico.

Interpretação: pretende indicar uma margem de estabilidade sistêmica. Quanto menor o seu valor, mais robusto o sistema. Esse indicador despreza a ponderação probabilística.

III.6.2.2 Mediana das Margens Críticas ($MD(\lambda_{crit})$) – MDM

A mediana é uma grandeza que, como a média, também procura caracterizar o centro da distribuição de frequências. Em certas situações a mediana é melhor indicador central

que a média, pois não sofre a influência de valores extremos. Ela é calculada com base na ordem dos valores que formam o conjunto de dados. A idéia ligada ao conceito de mediana é dividir o conjunto ordenado das partes reais de autovalores críticos em duas partes com igual número de elementos.

Definimos a mediana de um conjunto de n partes reais de autovalores críticos ordenados, sendo n ímpar, como igual à parte real do autovalor crítico de ordem $(\frac{n+1}{2})$ desse conjunto:

$$MD(\lambda_{crit}) = \lambda_{crit}(\frac{n+1}{2}) \quad (III-12)$$

Se n for par, a mediana pode ser definida como o valor médio entre os valores de ordem $(\frac{n}{2})$ e $(\frac{n}{2}+1)$, ou seja:

$$MD(\lambda_{crit}) = \frac{\lambda_{crit}(\frac{n}{2}+1) + \lambda_{crit}(\frac{n}{2})}{2} \quad (III-13)$$

Interpretação: pretende indicar uma margem de estabilidade sistêmica. Quanto menor o seu valor, mais robusto o sistema. Este indicador também despreza a ponderação probabilística.

III.6.2.3 Expectância das Margens Críticas ($E(\lambda_{crit})$) – EMC

Se $\lambda_{crit}(i)$ é a variável aleatória discreta representativa da parte real do autovalor crítico com probabilidade $p_{estado}(i)$, a expectância denotada por $E(\lambda_{crit})$, é dada por

$$E(\lambda_{crit}) = \sum_{i \in \Psi} p_{estado}(i) \lambda_{crit}(i) \quad (III-14)$$

Onde :

$E(\lambda_{crit})$ é a expectância da margem crítica.

p_{estado} é a probabilidade do estado i ;

λ_{crit} é a parte real do autovalor crítico do estado i ;

ψ são os conjuntos de estados contabilizados do espaço probabilístico;

i é o estado (estado 1, estado 2, ...).

Interpretação: sugere a estabilidade do sistema, caso seu valor seja negativo e vice-versa. Sofre a influência de valores extremos e da ponderação probabilística dos estados do sistema.

III.6.2.4 Média Aritmética dos Amortecimentos Críticos ($\bar{\zeta}_{crit}$) – MAC

Sendo ζ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) o conjunto de amortecimentos críticos dos estados, definimos sua média aritmética ou, simplesmente, média dos amortecimentos críticos, por

$$\bar{\zeta}_{crit} = \sum_{i=1}^n \frac{\zeta_{crit_i}}{n} \quad (III-15)$$

Onde :

$\bar{\zeta}_{crit}$ é a média aritmética da parte real dos amortecimentos críticos associados aos diferentes pontos de operação do sistema.

ζ_{crit_i} é o amortecimento crítico do estado i ;

i é o estado (estado 1, estado 2, ...);

n é o número de estados contabilizados do espaço probabilístico.

Interpretação: pretende indicar uma margem de estabilidade sistêmica. Quanto maior o seu valor, mais robusto o sistema.

III.6.2.5 Mediana dos Amortecimentos Críticos ($MD(\zeta_{crít})$) – MDA

Definimos a mediana de um conjunto de n amortecimentos críticos ordenados, sendo n ímpar, como igual ao amortecimento crítico de ordem $(\frac{n+1}{2})$ desse conjunto:

$$MD(\zeta_{crít}) = \zeta_{crít}(\frac{n+1}{2}) \quad (III-16)$$

Se n for par, a mediana pode ser definida como o valor médio entre os valores de ordem $(\frac{n}{2})$ e $(\frac{n}{2}+1)$, ou seja:

$$MD(\zeta_{crít}) = \frac{\zeta_{crít}(\frac{n}{2}+1) + \zeta_{crít}(\frac{n}{2})}{2} \quad (III-17)$$

Interpretação: pretende indicar uma margem de estabilidade sistêmica. Quanto maior o seu valor, mais robusto o sistema.

III.6.2.6 Expectância dos Amortecimentos Críticos ($E(\zeta_{crít})$) – EFA

Também pode-se obter a expectância do fator de amortecimento. Se $\zeta_{crít}(i)$ é a variável aleatória discreta representativa do amortecimento crítico com probabilidade $p_{estado}(i)$, a expectância denotada por $E(\zeta_{crít})$, é dada por

$$E(\zeta_{crít}) = \sum_{i \in \psi} p_{estado}(i) \zeta_{crít}(i) \quad (III-18)$$

Onde :

$E(\zeta_{crít})$ é a expectância do amortecimento crítico.

$p_{estado}(i)$ é a probabilidade do estado i ;

$\zeta_{crít}$ é o amortecimento do autovalor crítico do estado i ;

ψ são os conjuntos de estados contabilizados do espaço probabilístico;

i é o estado (estado 1, estado 2, ...).

Interpretação: sugere um valor de amortecimento ponderadamente global do sistema.

III.6.2.7 Expectância do Montante de Ajuste de Medidas Corretivas - EMA

Na análise clássica de adequação são bastantes comuns os índices de expectância de corte de carga ou expectância de energia não suprida. Estes indicadores são oriundos de medidas corretivas do tipo “*corte mínimo de carga*”. Este mesmo conceito pode ser utilizado na análise de segurança estática invocando diferentes tipos de medidas corretivas, como sugerido na **Tabela III-4**. Nesse caso, o ajuste pode estar relacionado à magnitude média das sintonias a serem aplicadas aos controles do sistema.

$$EMA = \sum_{i \in \psi} p_{estado}(i) ajuste(i) \quad (III-19)$$

Onde :

EMA é a expectância do montante de ajuste.

$p_{estado}(i)$ é a probabilidade do estado i ;

$ajuste(i)$ é o vetor de ajustes paramétricos do estado i , compatível com a medida corretiva selecionada;

ψ são os conjuntos de estados contabilizados do espaço probabilístico;

i é o estado (estado 1, estado 2, ...).

Interpretação: pretende sugerir o ajuste médio a ser aplicado ao sistema, considerando o efeito das probabilidades dos possíveis estados. Distingue-se da otimização clássica determinística, que pressupõe que os estados são equiprováveis.

Nota: Caso o índice EMA revele-se ineficaz, alternativas merecedoras de investigação seriam as seguintes: (i) ajuste único determinístico associado apenas ao estado mais provável; (ii) ajuste determinístico convencional otimizado, associado apenas aos k estados mais prováveis, $k=2,\dots,n$; (iii) ajuste associado aos k estados mais prováveis, porém considerando ponderação probabilística.

III.6.3 Índices Baseados em Medidas de Dispersão

São indicadores conceitualmente similares àqueles associados ao cálculo da expectância, porém enfocando o cálculo das variâncias das variáveis aleatórias envolvidas.

A variância amostral de um conjunto de variáveis aleatórias é, por definição, Kendall & Stuart [2]:

$$VAR^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{III-20})$$

Interpretação: indicadores deste tipo permitem avaliar o nível de precisão dos resultados.

III.6.4 Índices de Desempenho

São indicadores que mensuram o partilhamento dos estados do sistema em categorias de avaliação: *insucesso*, *sucesso parcial* e *sucesso total*. Para esses indicadores contabilizam-se tanto o aspecto puramente quantitativo (*i.e.* número de estados) quanto o aspecto probabilisticamente ponderado (*i.e.* soma das probabilidades de estados de sucesso, etc.). Podem ser calculados nos horizontes pré-medidas e pós-medidas corretivas. Para o problema em questão, um estado estável porém com baixo amortecimento irá caracterizar a categoria de sucesso parcial.

III.7 Considerações Adicionais Sobre a Modelagem

Dado que o foco do trabalho restringiu-se às pequenas perturbações, admitiu-se uma linearização das equações representativas da rede, em torno de um ponto de operação definido pelo analista. A obtenção deste ponto de operação foi alcançada via solução de um problema de fluxo de potência convencional determinístico, obtido pelo método de Newton-Raphson. Aspectos adicionais sobre a modelagem de cenários podem ser vistos na seção III.2.2.1.

A dinâmica da rede, representada pela influência dos geradores, compensadores síncronos e estáticos, reguladores de tensão, velocidade e estabilizadores foi incorporada ao processo de solução da rede através de equações determinísticas linearizadas em torno do ponto de operação. Neste trabalho também não foram considerados modelos de elos de corrente contínua e nem equipamentos de flexibilização da transmissão (“FACTS”).

No que concerne à carga, a modelagem da mesma foi efetivada considerando-se tanto aspectos determinísticos quanto probabilísticos. Como foi discutido na seção (III.2.2.1), aos patamares de carga foram atribuídas probabilidades de ocorrência. Porém, cada patamar de carga admite uma modelagem convencional determinística estática via composição de parcelas de impedâncias, correntes e potências constantes (modelo ZIP).

III.8 Sumário

Este capítulo apresentou subsídios conceituais relevantes para a análise probabilística de segurança estática de sistemas de potência. Em resumo, as principais contribuições do capítulo são as seguintes:

- *Proposição de um tratamento conceitual hierarquizado, inédito e estruturado para as incertezas de sistemas de potência (vide seção III.2);*
- *Proposição de estratégias corretivas adequadas à análise de segurança estática probabilística (vide Tabela III-4);*

- *Proposição de uma lógica generalizada de tratamento do desempenho de sistemas de potência sob a influência de incertezas (vide seção III.4);*
- *Proposição de uma coleção de novos indicadores probabilísticos para a análise de segurança estática probabilística (vide seções III.5 e III.6).*

* * *

Capítulo IV

Protótipo Computacional

IV.1 Introdução

Neste capítulo discute-se a estrutura do protótipo desenvolvido para o cálculo computacional dos indicadores de segurança estática probabilística propostos no capítulo precedente.

Aborda-se tanto o macro-arcabouço lógico adotado, quanto as minúcias de implementação e artifícios de cálculo utilizados.

IV.2 Premissas Básicas

Conforme foi conceitualmente discutido na seção III.4, pode-se afirmar que os mesmos princípios básicos utilizados na avaliação clássica da adequação podem (com as devidas adaptações), ser também empregados na avaliação de estabilidade a pequenas perturbações com incertezas, quais sejam:

IV.2.1 Seleção dos Estados do Sistema

Os métodos atualmente utilizados para a avaliação da confiabilidade composta tradicional diferem basicamente no método de seleção de estados a serem analisados e conseqüentemente nos cálculos de indicadores. Existem duas técnicas bastante conhecidas e utilizadas para seleção de estados que são enumeração e simulação Monte Carlo.

Para a incerteza de cenários, cuja probabilidade é conhecida, o tratamento por enumeração pode ser bastante conveniente. Por outro lado, para a categoria de

incertezas caracterizadas como ruídos, não é trivial uma atribuição prática de valores numéricos bem definidos de probabilidades, sob pena de uma explosão combinatorial absolutamente intratável, com os recursos computacionais usualmente disponíveis. Assim, no tratamento de ruídos, sugere-se que a seleção de estados seja realizada por simulação Monte Carlo não-seqüencial.

IV.2.2 Análise do Estado Selecionado

Após a seleção do estado, é efetuada uma análise modal para que seja possível verificar se a configuração do sistema é estável e com um nível de oscilações suficientemente amortecidas. Caso o sistema seja instável e/ou existam violações no fator de amortecimento, são eventualmente tomadas medidas corretivas, tais como ajustes de controladores, redespacho de geração ou cortes adequados de carga. Nesta Tese apenas a primeira medida corretiva é potencialmente considerada.

IV.2.3 Cálculo dos Indicadores

Supondo-se x como um estado genérico do sistema e tomando-se como exemplo ilustrativo o cálculo do indicador definido pela equação (III-3), POI ($p_{instabilidade}$) pode-se definir uma função teste $F(x)$ tal que:

$$F(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \text{ é um estado de falha (Sistema instável)} \\ 0, & \text{se } x \text{ é um estado de sucesso (Sistema estável)} \end{cases}$$

Através da análise de todos os possíveis estados, são calculados os indicadores de segurança estática probabilística, através da estimativa de $E(F)$. O cálculo de $E(F)$ varia conforme o método utilizado para seleção de estados.

No método de enumeração, o cálculo da estimativa $E(F)$ é direto, uma vez que $F(x)$ e $p(x)$ são conhecidas.

Então, conhecendo-se o estado de cada componente do sistema e suas probabilidades de ocorrência é possível determinar as probabilidades $p(x_i)$ das variáveis aleatórias x_i .

Como x é uma variável aleatória, $F(x)$ também será aleatória, cujo valor esperado é dado por Rei [46], Borges [48] e Ferreira [63]:

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x)p(x) \quad (\text{IV-1})$$

Para o método de simulação Monte Carlo não-sequencial a estimativa de $E(F)$ é aproximada por:

$$\bar{E}(F) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(x_i) \quad (\text{IV-2})$$

Onde:

N é o número de estados sorteados.

O critério de convergência do processo é baseado na variância do estimador dada por:

$$V(\bar{E}(F)) = \frac{V(F)}{N} \quad (\text{IV-3})$$

Onde :

$V(F)$ é a variância da função teste $F(x)$;

N é número de estados sorteados.

A precisão do processo e a convergência da simulação é normalmente representada pelo coeficiente de variação β , que pode ser calculado pela equação:

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\bar{E}(F))}}{\bar{E}(F)} \quad (\text{IV-4})$$

Deve ser observado que a composição de funções-teste associadas aos indicadores de frequências e durações foge ao escopo desta Tese.

IV.3 Obstáculos Práticos

Diversos obstáculos tiveram de ser superados durante o desenvolvimento do protótipo computacional.

IV.3.1 Escolha dos Cenários a Serem Avaliados

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 estática incluindo estabilidade a pequenas perturbações, sugere que a monitoração usual também se restrinja às contingências simples e, no caso particular de sistemas de porte reduzido, às contingências duplas. A consideração de outros componentes de cenários foi discutida na **Tabela III-2**.

IV.3.2 Natureza Combinatorial do Espaço de Estados

Também para as incertezas caracterizadas como ruídos não é conveniente uma atribuição prática de valores numéricos bem definidos de probabilidades, sob a pena de uma explosão combinatorial absolutamente intratável, com os recursos computacionais disponíveis. Para se ter uma idéia da dimensão do problema, suponha-se por exemplo, que para um dado cenário, o ruído da carga de cada barramento do sistema tenha sido discretizado em 3 valores. Suponham-se três sistemas com 100, 250 e 500 nós. Nesse exemplo o número de combinações torna-se elevadíssimo, conforme pode ser visto na **Tabela IV-1**.

Nessa situação, o método de seleção de estados por enumeração torna-se pouco atrativo. Uma alternativa viável baseia-se no método Monte Carlo.

Tabela IV-1 — Número de Combinações para Formação do Espaço de Estados

Número de Barras com Incertezas do Tipo Ruído Representado por 3 Valores	Número de Combinações
100	$3^{100} = 5.15E+47$
250	$3^{250} = 1.90E+119$
500	$3^{500} = 3.64E+238$

IV.4 Estrutura Lógica do Protótipo Computacional

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 ruídos (vide **Figura III-2**). As incertezas relacionadas a distúrbios 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 ruídos. O procedimento utilizado na aplicação a que se propõe este trabalho é mostrado na **Figura IV-1**.

Alerta-se o leitor que, por motivos de natureza prática, a estrutura lógica do protótipo computacional sofreu adaptações em relação à seqüência conceitual discutida na seção III.4. A **Figura IV-1** apresenta inicialmente um fluxograma simplificado enfocando as principais etapas levando-se em conta as incertezas em cenários, ruídos e combinação de cenários mais ruídos. O programa desenvolvido (APPS, versão 1.0) encontra-se no CD do **Anexo E**. O manual de utilização pode ser consultado no **Anexo B**.

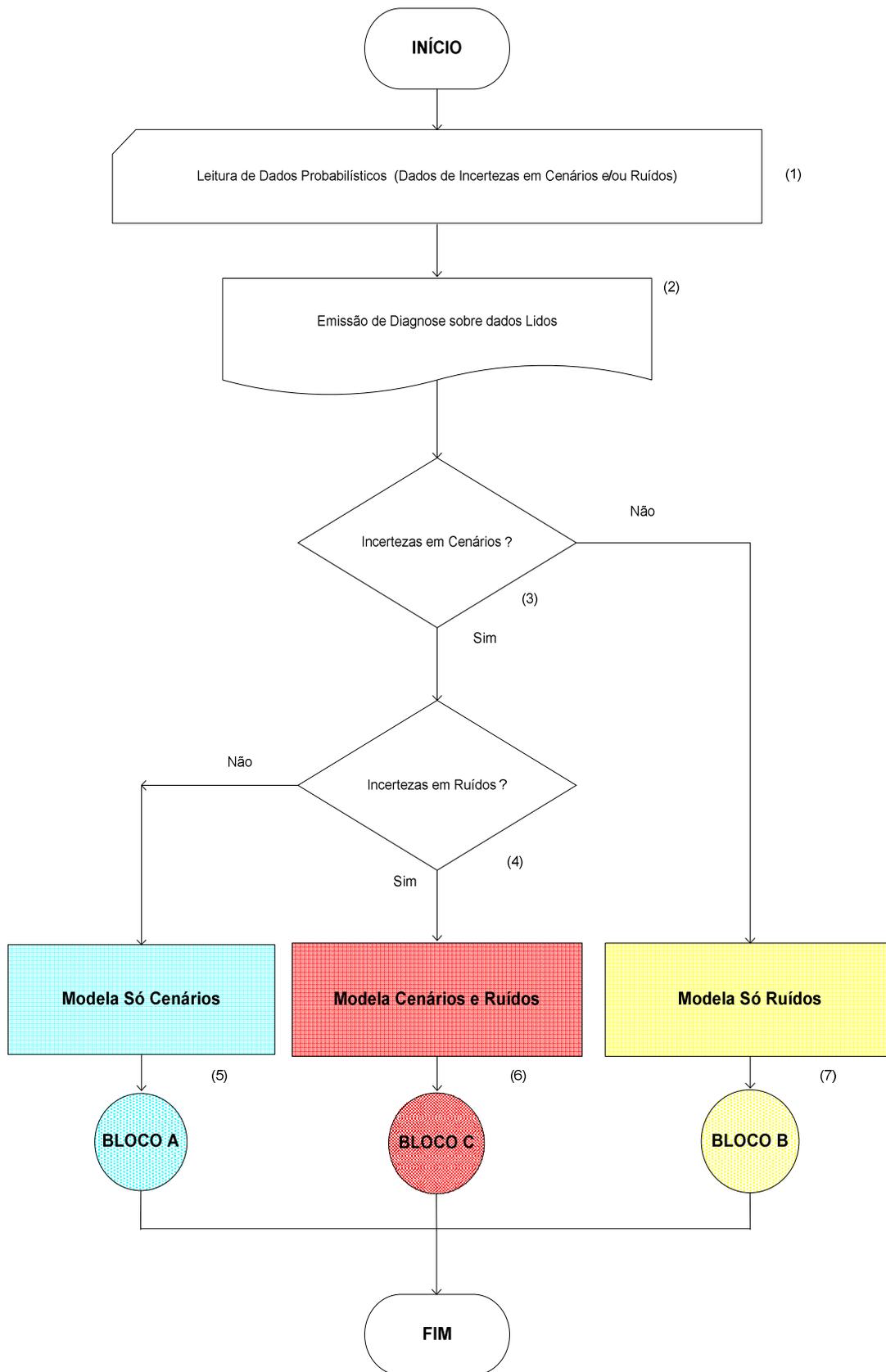


Figura IV-1 – Fluxograma Destacando a Composição das Incertezas

O **bloco 1** representa a leitura de dados do arquivo (com extensão *.dat*) contendo os dados probabilísticos dos elementos da rede elétrica (tipos de incertezas em componentes da rede elétrica e modelo estocástico associado).

O **bloco 2** representa apenas a armazenagem dos dados probabilísticos lidos no bloco 1. Emite também diagnóstico sobre os dados lidos.

Os **blocos 3 e 4** são indicativos da verificação se o sistema analisado apresenta incertezas em cenários, ruídos ou em ambos.

Os **blocos 5, 6 e 7** efetuam o processamento das incertezas em três categorias propostas na metodologia: modelagem apenas em cenários ou modelagem apenas em ruídos ou modelagem em cenários e ruídos.

Os detalhamentos para as três categorias de incertezas (blocos A, B e C) serão abordados à parte nas seções seguintes. Como já foi anteriormente mencionado, a modelagem de incertezas associadas a distúrbios não é contemplada nesta Tese (vide **Tabela III-3**).

IV.4.1 Tratamento Computacional Apenas para Incertezas em Cenários

Nas **Figuras IV-2, IV-3, IV-4, IV-6, IV-8 e IV-9** são apresentados fluxogramas para a avaliação do sistema de potência quando somente as incertezas em cenários são consideradas. Este aspecto corresponde ao bloco A mostrado na **Figura IV-1**. A **Figura IV-2** apresenta um fluxograma simplificado, enfocando a macro estrutura do processamento em cenários, enquanto que as **Figuras IV-3, IV-4, IV-6, IV-8 e IV-9** apresentam fluxogramas detalhados de cada etapa, identificados através dos blocos A.1, A.2, A.3 e A.4 apresentados na **Figura IV-2**.

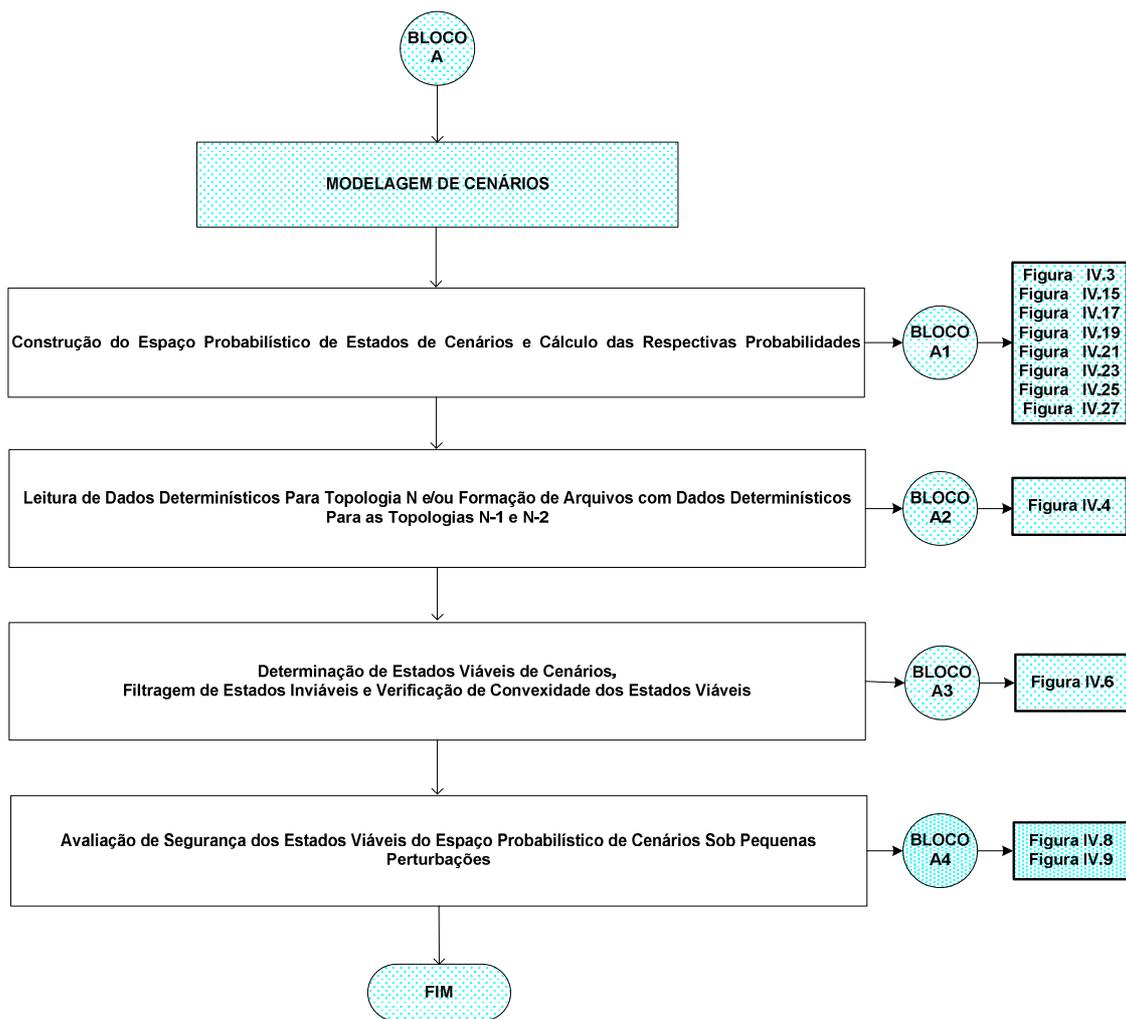


Figura IV-2 – Fluxograma Simplificado do Processamento de Somente Cenários

O **bloco A.1** representa a construção do espaço probabilístico (i.e. cálculo das probabilidades) de estados de cenários. Maiores detalhes sobre a construção do espaço probabilístico de cenários do sistema podem ser encontrados nas **Figuras IV-3 a IV-10**, nas quais o detalhamento dos blocos são apresentados.

O **bloco A.2** representa a leitura de dados determinísticos das topologias com rede *completa*, (ou seja, configuração N), que são compostos por dados da rede elétrica, máquinas e seus controladores. Esses dados e os respectivos diagnósticos são armazenados em um arquivo com extensão *.cena*.

Adicionalmente, com base nos dados determinísticos lidos para as topologias com a rede completa (configuração N), imprime-se em um arquivo com extensão .m, (ou seja, na mesma formatação de dados de entrada do programa PSAT), os dados da rede elétrica, máquinas e seus controladores, para cada topologia com a rede incompleta (configurações N-1 e N-2). O detalhamento desse bloco pode ser encontrado na **Figura IV-4**.

No **bloco A.3** efetua-se a filtragem e modelagem de convexidade dos estados viáveis através da simulação de fluxo de potência convencional utilizando o método de Newton Raphson. São considerados como estados de cenários inviáveis, os casos que não apresentarem convergência desse fluxo de potência. Mais adiante na **Figura IV-6** serão tecidos maiores comentários sobre esse bloco. O processamento desse bloco poderá ser opcional, de acordo com as premissas do usuário.

No **bloco A.4** efetua-se a análise de cada estado de cenários selecionado através do cálculo de fluxo de potência e em seguida, o cálculo de todos os autovalores pela utilização da análise modal. Mais adiante na **Figura IV-8** comentar-se-á mais sobre esse bloco.

Os **blocos A.1, A.2 e A.3** estão associados aos **blocos A, B e C** da **Figura III-4**. O **bloco A.4** engloba o processamento dos blocos D até M (exceto o Bloco E) da **Figura III-4**.

* * *

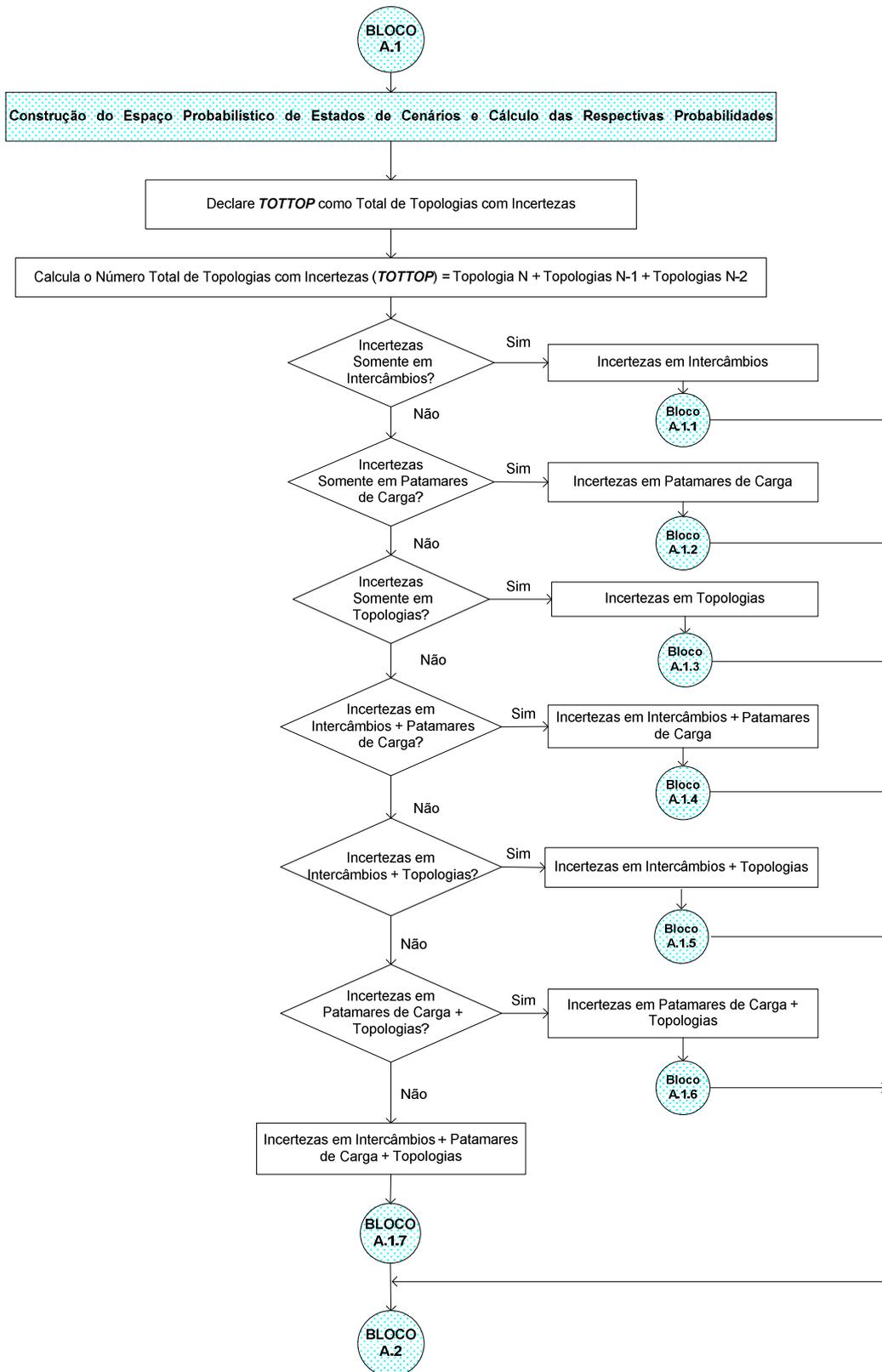


Figura IV-3 — Fluxograma Detalhado da Construção do Espaço Probabilístico de Cenários

O **bloco A.1** da **Figura IV-2** representa a etapa da construção do espaço probabilístico de cenários e merece destaque por ser o cerne do protótipo. As **Figuras IV-15, IV-17, IV-19, IV-21, IV-23, IV-25 e IV-27** mostram os fluxogramas detalhados das etapas de construção (vide o Adendo deste capítulo).

Na primeira etapa da construção é efetuado o cálculo do número total de topologias com incertezas (*TOTTOP*), determinada pelo somatório da topologia com todos os elementos da rede elétrica em operação - configuração N das topologias, com um elemento fora de operação - configurações N-1 e das topologias com dois elementos fora de operação - configurações N-2, conforme a equação (IV-5).

$$TOTTOP = 1 + n + \frac{n^2 - n}{2} \quad (IV-5)$$

Onde:

TOTTOP é o número total de topologias com incertezas em *n* elementos (linhas de transmissão e/ou transformadores);

n é o número total de topologias N-1 com incertezas (variável *TOTN1*);

$\frac{n^2 - n}{2}$ é o número total de topologias N-2 com incertezas (variável *TOTN2*).

Em seguida, a partir de dados probabilísticos lidos pelo protótipo é efetuada a verificação das tipologias de incertezas a serem consideradas na montagem do espaço probabilístico de cenários (intercâmbios, patamares de carga, topologias ou pela combinação dessas três classes, vide Tabela III.2). Os blocos seguintes representam a verificação dessas classes de incertezas:

- O primeiro bloco verifica se existem incertezas somente em *intercâmbios*, no caso afirmativo irá executar o **bloco A.1.1** para composição do espaço de estados e cálculo das suas respectivas probabilidades, em caso negativo, irá executar o bloco seguinte.

- O segundo bloco verifica se existem incertezas somente em *patamares de carga*, no caso afirmativo irá executar o **bloco A.1.2** para composição do espaço de estados e cálculo das suas respectivas probabilidades, em caso negativo, irá executar o bloco seguinte.
- O terceiro bloco verifica se existem incertezas somente em *topologias*, no caso afirmativo irá executar o **bloco A.1.3** para composição do espaço de estados e cálculo das suas respectivas probabilidades, em caso negativo, irá executar o bloco seguinte.
- O quarto bloco verifica se existem incertezas em *intercâmbios e patamares de carga*, no caso afirmativo irá executar o **bloco A.1.4** para composição do espaço de estados e cálculo das suas respectivas probabilidades, em caso negativo, irá executar o bloco seguinte.
- O quinto bloco verifica se existem incertezas em *intercâmbios e topologias*, no caso afirmativo irá executar o **bloco A.1.5** para composição do espaço de estados e cálculo das suas respectivas probabilidades, em caso negativo, irá executar o bloco seguinte.
- O sexto bloco verifica se existem incertezas em *patamares de carga e topologias*, no caso afirmativo irá executar o **bloco A.1.6** para composição do espaço de estados e cálculo das suas respectivas probabilidades, em caso negativo, irá executar o bloco seguinte.
- O sétimo bloco trata incertezas em *intercâmbios, patamares de carga e topologias*, e executa o **bloco A.1.7** para composição do espaço de estados e cálculo das suas respectivas probabilidades. A seguir processa o **bloco A.2**.

Terminada execução de um dos blocos A.1.1 a A.1.7, executa-se o **bloco A.2**.

Nota: Visando a conveniência do leitor, o detalhamento dos blocos A.1.1 a A.1.7 está apresentado no adendo ao fim deste capítulo, para fins de registro documental.

* * *

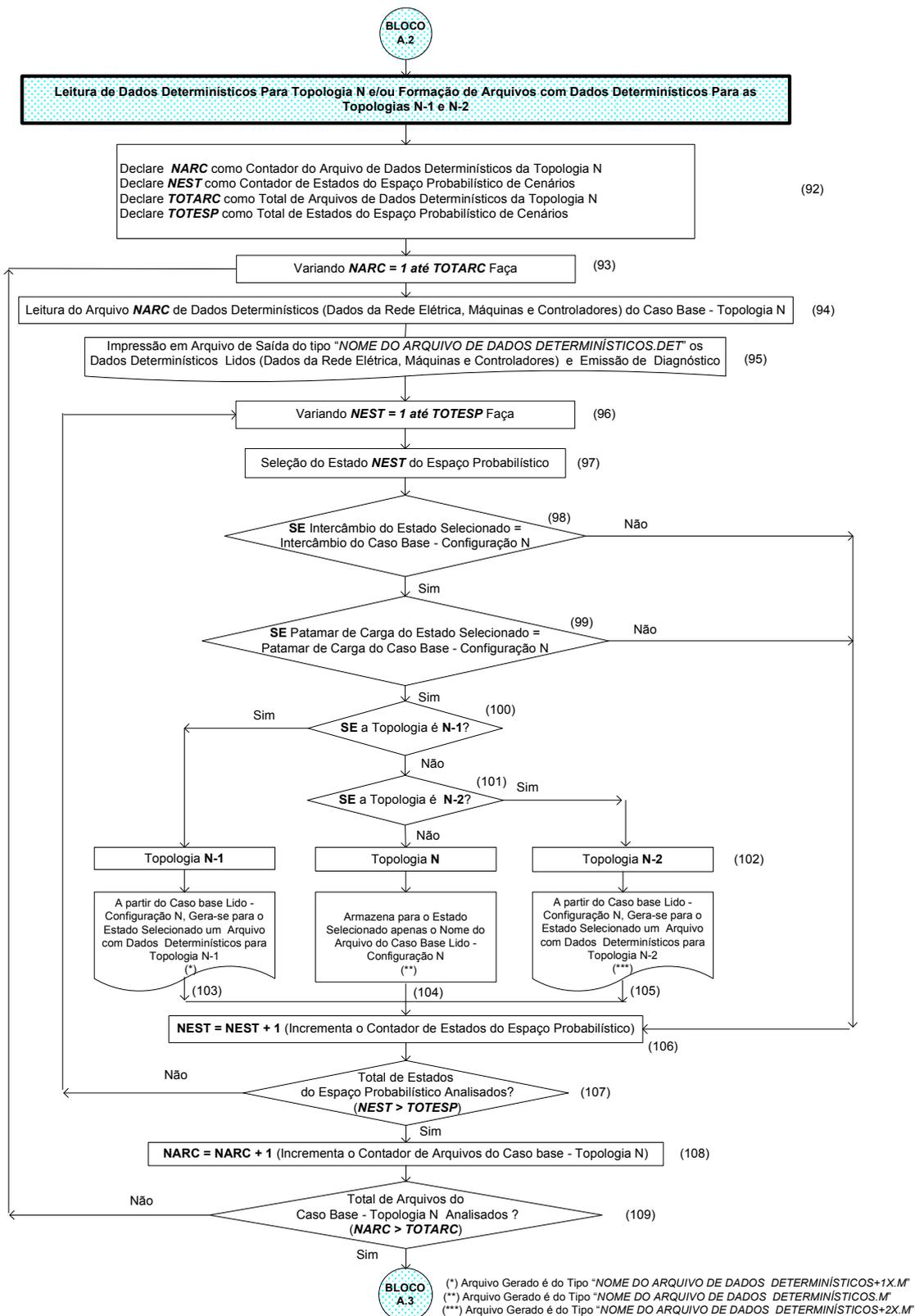


Figura IV-4 – Leitura de Dados Determinísticos para Topologia N e/ou Formação de Arquivos de Dados Determinísticos das Topologias N-1 e N-2

O **bloco A.2** da **Figura IV-2** permite a criação automática dos arquivos de dados determinísticos das topologias N-1 e N-2, se estas existirem. Estes arquivos são automaticamente gerados a partir da topologia N e da informação/identificação das topologias N-1 e N-2, conforme as informações registradas no arquivo de dados probabilísticos.

No **bloco 92** são declaradas as variáveis utilizadas na subrotina do procedimento computacional proposto. As seguintes variáveis são definidas:

NARC é contador do arquivo de dados determinísticos da topologia N;

NEST é o contador de estados do espaço probabilístico de cenários;

TOTARC é o total de arquivos de dados determinísticos da topologia N e é calculado como produto do total de incertezas em intercâmbios - *TOTINT* e total de incertezas em patamares de carga - *TOTNPAT* ;

TOTESP o total de estados do espaço probabilístico de cenários e é calculado como sendo o produto das três classes de incertezas (total de incertezas em intercâmbios - *TOTINT* , total de incertezas em patamares de carga - *TOTNPAT* e total de incertezas em topologias - *TOTTOP*).

Neste **bloco 93** a variável *loop NARC* inicia do valor um até atingir o *TOTARC* - total de arquivos de dados determinísticos da topologia N, em ordem crescente e executa os blocos 94 a 109.

O **bloco 94** representa a leitura de dados determinísticos das topologias com rede completa, ou seja, configuração N do arquivo *NARC* selecionado no bloco 93 anterior, que são compostos por dados da rede elétrica, máquinas e seus controladores.

No **bloco 95** armazena-se em um arquivo com extensão *.cena*, os dados determinísticos lidos dos estados de topologia com a rede completa - configuração N no bloco 94 anterior. Emite também os diagnósticos desses dados.

Os **blocos 96 a 107** com base nos dados determinísticos lidos das topologias com a rede completa imprimem em um arquivo com extensão *.m* e na mesma formatação de entrada de dados do programa *PSAT*, os dados determinísticos para os estados de topologia com a rede incompleta - configurações N-1 e N-2.

No **bloco 96** a variável *loop NEST* conta do valor um até *TOTEST* - total de estados do espaço probabilístico e processa os blocos 97 a 107.

O **bloco 97** efetua seleção de um estado *NEST* do espaço probabilístico.

O **bloco 98** corresponde à verificação se o intercâmbio do estado selecionado é idêntico ao intercâmbio do caso base *NARC* da configuração N. No caso afirmativo, executa o bloco 99, e em caso negativo seleciona um novo estado *NEST* do espaço probabilístico.

O **bloco 99** verifica se o patamar de carga do estado selecionado é igual ao patamar de carga do caso base. Em caso afirmativo, executa o bloco 100, e em caso negativo seleciona um novo estado *NEST* do espaço probabilístico.

Os **blocos 100, 101 e 102** permitem verificar os tipos de topologias (N, N-1 e N-2) para o estado selecionado. Se o estado selecionado for classificado como sendo de topologia N, executa-se o **bloco 104** para identificação do estado pelo nome do arquivo do caso base fornecido no arquivo de dados probabilísticos. Por outro lado, na condição do estado com as topologias N-1 ou N-2, o programa processa os **blocos 103 e 105** e gera automaticamente um arquivo com os dados determinísticos necessários para processamento de fluxo de potência e estabilidade a pequenos sinais. O nome dos arquivos gerados para as topologias N-1 e N-2 serão respectivamente dos tipos “*nome do arquivo de dados determinísticos + 1x.m*” e “*nome do arquivo de dados determinísticos + 2x.m*”, onde a variável *x* é o número da topologia.

O **bloco 106** corresponde ao incremento do contador de estados do espaço probabilístico – *NEST* para selecionar um novo estado.

O **bloco 107** é indicativo da verificação se todos os estados do espaço probabilístico já foram analisados. No caso afirmativo, irá executar o **bloco 108** para incrementar o

contador de arquivos dos casos base – configuração N e selecionar um novo arquivo, e em caso negativo, selecionam um novo estado.

O **bloco 109** é também indicativo da verificação se todos os arquivos dos casos base já foram selecionados. No caso afirmativo, finalizam a execução do procedimento do bloco A.2 e executa o procedimento do bloco A.3, e em caso negativo, selecionam um novo arquivo.

Exemplo A.2: Para ilustrar a questão da formação de arquivos de dados determinísticos para as topologias N-1 e N-2, gerados a partir de dados determinísticos da topologia N (fornecidos como dados de entrada), suponha-se um pequeno sistema composto de duas áreas, onde cada área possui uma barra e um gerador, com duas linhas de transmissão interconectando essas duas áreas. Esse sistema está mostrado em detalhe na **Figura IV-5**.

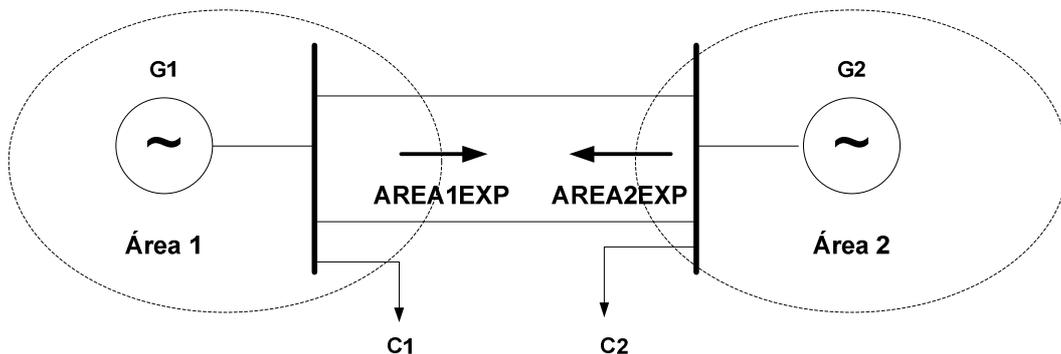


Figura IV-5 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste Duas Barras

Considere que neste caso o sistema apresenta três elementos modelados estocasticamente, ou seja, incertezas em intercâmbios, patamares de carga e topologias. Neste exemplo, o usuário deverá preparar *um arquivo de dados determinísticos (contém os dados da rede, máquinas e controladores)* para cada combinação de cenário de intercâmbio com os patamares de carga e topologia N, totalizando neste caso seis arquivos.

Assim sendo, para este exemplo, o bloco *ARQC* informado no arquivo de dados probabilísticos do programa, será composto de seis linhas de comando, onde cada linha será composta com a informação do nome de arquivo de dados determinísticos (*s2p_1d_n.n* ou *s2m_1d_n.m* ou ...), do tipo de cenário de intercâmbio (*area1exp* ou *area2exp*), do tipo de patamar de carga (*pesada* ou *média*) e a informação da topologia. Este campo é sempre igual a N representando a rede completa.

- Arquivo de Modelos Estocásticos

ARQC (Informação do Nome de Arquivo de Dados Determinísticos)
 % (NINT) (TINT) (NPAT) (TPAT) (NTOP) (NOME_ARQ)

1	AREA1EXP	1	PESADA	N	s2p_1d_n.m
1	AREA1EXP	2	MEDIA	N	s2m_1d_n.m
1	AREA1EXP	3	LEVE	N	s2l_1d_n.m
2	AREA2EXP	1	PESADA	N	s2p_2d_n.m
2	AREA2EXP	2	MEDIA	N	s2m_2d_n.m
2	AREA2EXP	3	LEVE	N	s2l_2d_n.m

9999

Além desses dados, serão informados também os dados probabilísticos relacionados aos intercâmbios (*IINT*), patamares de carga (*NPAT*) e topologias (*TOPU*) que também serão posteriormente utilizados pelo programa para composição do estado probabilístico de cenários.

- Arquivo de Modelos Estocásticos

IINT (Dados de Incertezas em Intercâmbios)
 % (NINT) (PROBi) (INTERC)

1	0.100000	AREA1EXP
2	0.900000	AREA2EXP

9999

NPAT (Dados de Incertezas em Patamares de Carga)
 % (NPAT) (PROBj) (PATAMAR)

1	0.200000	PESADA
2	0.800000	MEDIA

9999

TOPU (Dados de Incertezas em Topologias)
 % NTOP (DE) (PA) (CIRC) (TX_FALHA) (TM_REPAR) (PROB_FALHA)

%					(ocorr/ano)	(horas)	(%)
1	1	2	1		10.0	3.0	0.3413
2	1	2	2		10.0	3.0	0.3413

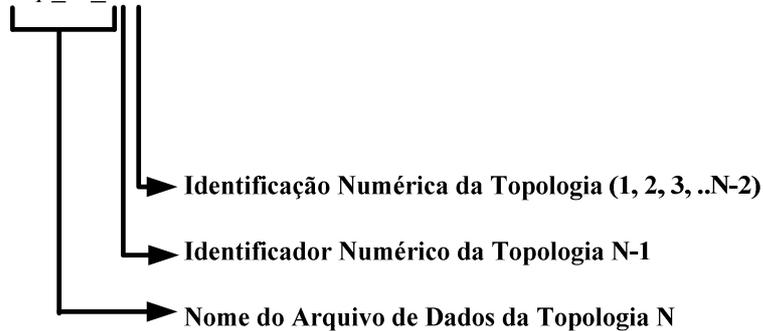
9999

Então, supondo que existem incertezas em dois cenários de intercâmbios (*arealexp* e *area2exp*), dois patamares de carga (*pesada* e *média*) e nas topologias *N*, *N-1* e *N-2*, após processamento do programa, serão gerados para cada um dos estados do espaço probabilístico, um arquivo contendo os dados determinísticos da rede (dados da rede elétrica e controladores). Os nomes desses arquivos serão gerados automaticamente respeitando as seguintes regras:

Topologia N = receberá o nome idêntico ao fornecido nos dados de entrada no bloco *ARQC*;

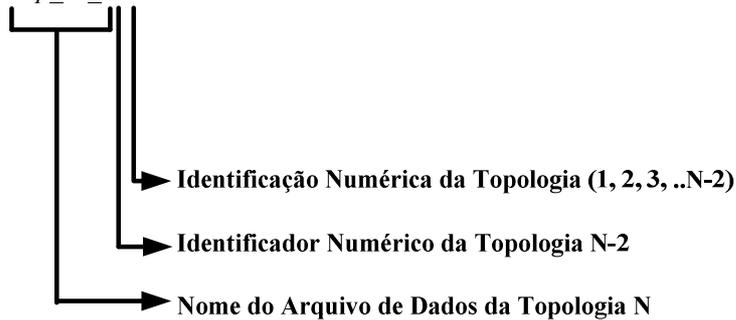
Topologias N-1 = receberá o mesmo nome do arquivo de dados para topologia *N* acrescido da extensão 1 (*identificador da topologia N-1*) + número da topologia (1, 2, 3, ... *N-1*), conforme mostrado na última coluna identificado por “*nome do arquivo de dados determinísticos*” da **Tabela IV-2** (*s2p_1d_n11.m*, *s2p_1d_n12.m*,... *s2p_1d_n1[N-1].m*);

Interpretação: *s2p_1d_n11.m*



Topologias N-2 = receberá o mesmo nome do arquivo de dados para topologia *N* acrescido da extensão 2 (*identificador da topologia N-2*) + número da topologia (1, 2, 3, ..*N-2*), conforme mostrado na última coluna identificado por “*nome do arquivo de dados determinísticos*” da **Tabela IV-2** (*s2p_1d_n21.m*, *s2p_1d_n212.m*,... *s2p_1d_n1[N-2].m*);

Interpretação: *s2p_1d_n21.m*



Portanto, neste exemplo, dado que a dimensão do espaço probabilístico é de 16 (2 cenários de intercâmbios x 2 patamares de carga x 4 possíveis topologias de linhas e transformadores), teremos um total de 16 arquivos de dados, conforme exemplificado na **Tabela IV-2**.

Tabela IV-2 – Resultados Gerados pelo Programa para o Sistema Duas Barras

Estados	Incertezas Modeladas			Nome do Arquivo
	Intercâmbio	Carga	Topologia	
1	Area1exp	Pesada	N	s2p_1d_n.m
2	Area1exp	Pesada	N-1	s2p_1d_n11.m
3	Area1exp	Pesada	N-1	s2p_1d_n12.m
4	Area1exp	Pesada	N-2	s2p_1d_n21.m
5	Area1exp	Média	N	s2m_1d_n.m
6	Area1exp	Média	N-1	s2m_1d_n11.m
7	Area1exp	Média	N-1	s2m_1d_n12.m
8	Area1exp	Média	N-2	s2m_1d_n21.m
9	Area2exp	Pesada	N	s2p_2d_n.m
10	Area2exp	Pesada	N-1	s2p_2d_n11.m
11	Area2exp	Pesada	N-1	s2p_2d_n12.m
12	Area2exp	Pesada	N-2	s2p_2d_n21.m
13	Area2exp	Média	N	s2m_2d_n.m
14	Area2exp	Média	N-1	s2m_2d_n11.m
15	Area2exp	Média	N-1	s2m_2d_n12.m
16	Area2exp	Média	N-2	s2m_2d_n21.m

* * *

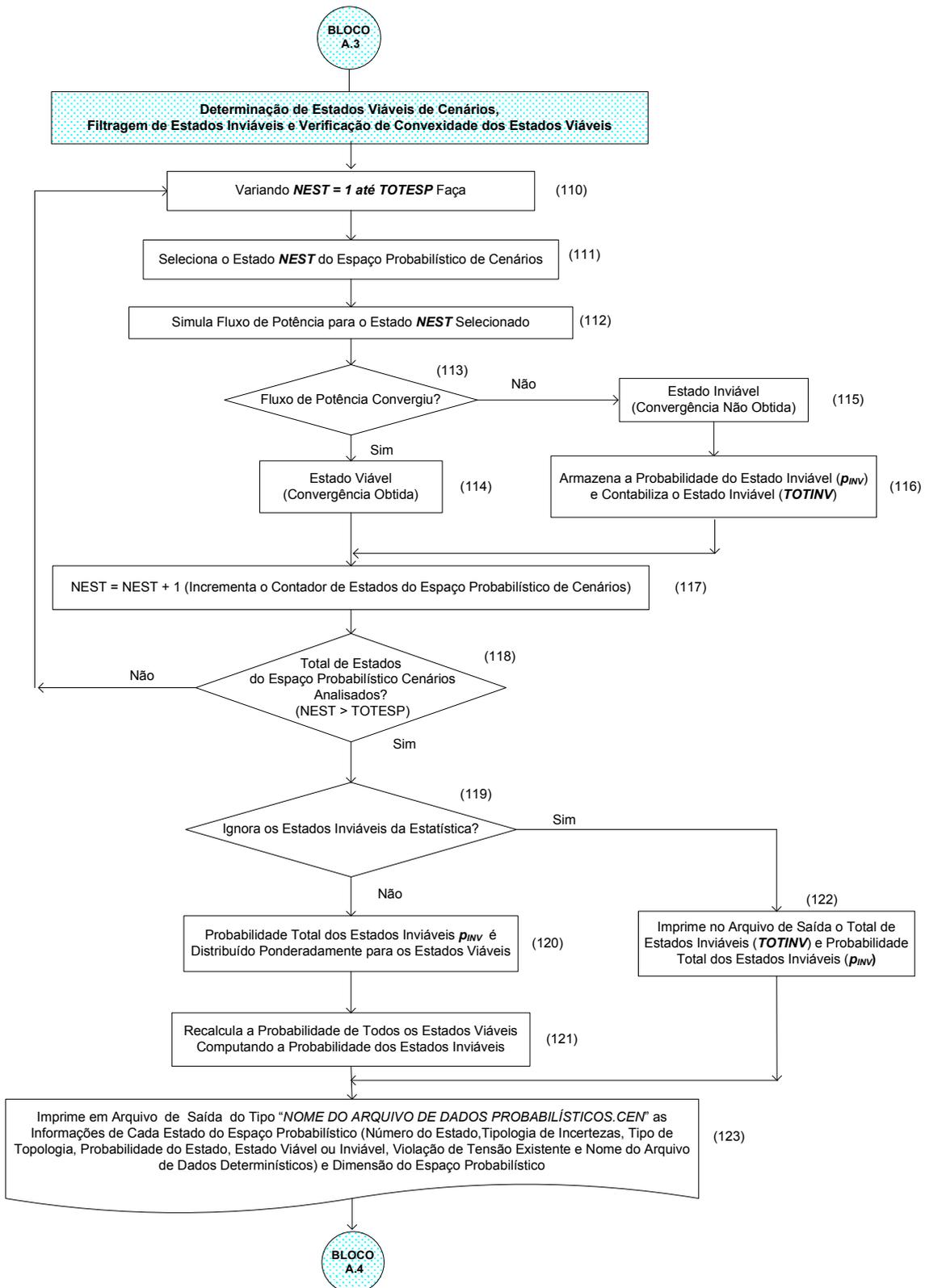


Figura IV-6 – Determinação de Estados Viáveis de Cenários, Filtragem de Estados Inviáveis e Verificação de Convexidade dos Estados Viáveis

Este **bloco A.3** da **Figura IV-2** permite efetuar a filtragem e modelagem de convexidade dos estados viáveis através da simulação de fluxo de potência convencional. Nesta Tese *são considerados como estados de cenários probabilisticamente inviáveis, os casos que não apresentarem convergência desse fluxo de potência.*

No **bloco 110** a variável loop *NEST* conta do valor um até *TOTEST* – total de estados do espaço probabilístico. Em seguida, o **bloco 111** seleciona um estado definido anteriormente no bloco A.1. Nessa fase os estados de cenários são todos analisados sem a consideração de tolerância mínima para truncagem (valor da probabilidade abaixo do qual os estados não seriam analisados). Ou seja, essa consideração economizaria o tempo computacional envolvido na análise, estados com uma probabilidade muito pequena de ocorrência não seriam analisados. Esta truncagem para sistemas de grande porte apresenta vantagem em relação ao tempo computacional envolvido. Para esta análise com incertezas somente em cenários, verificou ser viável a adoção de seleção de estados pelo método de enumeração e sem a consideração de tolerância mínima para truncagem, conforme descrito na seção IV.2.1.

No **bloco 112** para o estado selecionado *NEST* é efetuado o cálculo da solução do problema de fluxo de potência. O programa *PSAT* é processado com a opção de controle que gera um arquivo de saída com os resultados obtidos de fluxo de potência e relatórios de convergência do caso. Após leitura desse arquivo de saída e armazenagem de resultados, o arquivo de saída é automaticamente eliminado pelo protótipo computacional.

O **bloco 113** corresponde à leitura do arquivo de saída de fluxo de potência obtido no passo anterior e realiza automaticamente a verificação da convergência de fluxo de potência do estado selecionado. No caso afirmativo, o estado é contabilizado e identificado como estado viável, e em caso negativo, como estado inviável.

Em seguida executa o **bloco 116** para armazenar na variável p_{inv} a probabilidade do estado *NEST* inviável e contabilizar o estado inviável na variável *TOTINV*.

Lembramos ao leitor que a análise convencional da confiabilidade sempre descarta o estado inviável.

O **bloco 117** corresponde ao incremento do contador de estados – $NEST$, e em seguida processa o **bloco 118** para verificação se o total de estados do espaço probabilístico foi analisado. Em caso negativo, processa o **bloco 110** onde um novo estado é selecionado.

Em caso afirmativo irá executar o **bloco 119** para verificar se deseja retirar todos os estados inviáveis da estatística. Em caso positivo, processa o **bloco 122** apenas para imprimir em um arquivo de saída, o total de estados inviáveis – $TOTINV$ e a probabilidade total dos estados inviáveis – p_{inv} , em caso negativo, processa-se o **bloco 120** em que a probabilidade dos estados inviáveis – p_{inv} será distribuída ponderadamente para os estados viáveis.

No **bloco 121** recalculam-se a probabilidade dos estados viáveis, computando as parcelas de probabilidade de estados inviáveis, conforme ilustrado na **Figura IV-7**.

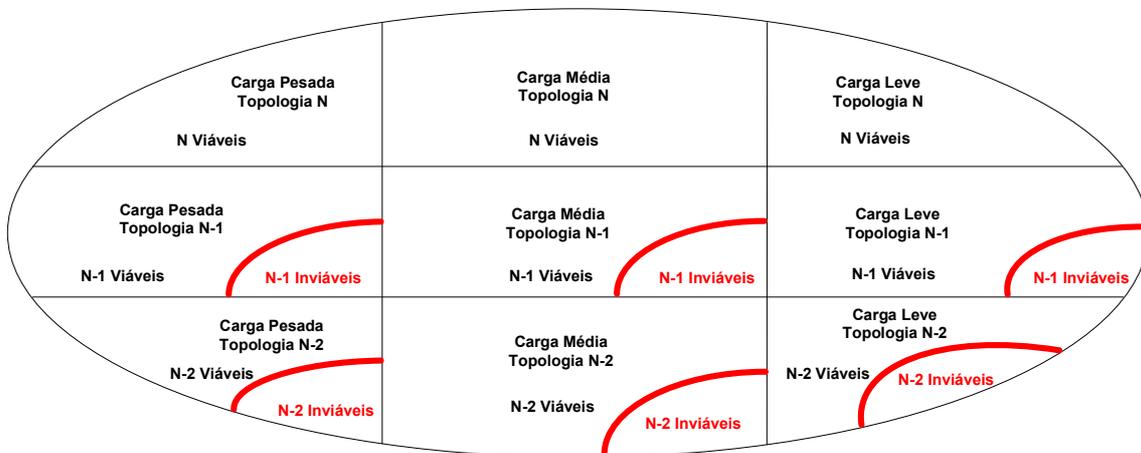


Figura IV-7 – Tratamento da Verificação da Convexidade dos Estados Viáveis

Por último executa-se o **bloco 123** para imprimir em um arquivo de saída, as informações de cada estado do espaço probabilístico, identificando o número do estado, tipologia de incertezas, tipo de topologia, probabilidade do estado, classificação do

estado em viável ou inviável, violação de tensão existente e nome do arquivo com dados determinísticos, bem como a dimensão do espaço probabilístico de cenários.

Exemplo A.3: Para exemplificar este bloco será utilizado o mesmo sistema apresentado no exemplo A.2.

Conforme exposto no exemplo A.2 anterior, o espaço probabilístico foi definido e um arquivo com dados determinísticos foi gerado para cada um dos estados do espaço probabilístico. Neste bloco, para cada um desses estados será efetuada a filtragem dos inviáveis e verificação da convexidade dos viáveis através da simulação do programa de fluxo de potência. A condição inviável será atribuída quando houver insucesso na convergência do caso.

Assim sendo, após processamento desse bloco teremos informação se o estado é viável ou inviável e o tratamento da convexidade dos estados inviáveis será efetuado, conforme apresentado na **Tabela IV-3**.

Tabela IV-3 – Tratamento dos Estados Viáveis e Inviáveis do Espaço Probabilístico de Cenários

Estado	Intercâmbio	Carga	Topologia	Probabilidade	Topologia	Probabilidade	Arquivo
1	Area1exp	Pesada	N	0,0198638000	Viável	0,024188000	s2p_1d_n.m
2	Area1exp	Pesada	N-1	0,0000680260	Viável	0,000082835	s2p_1d_n11.m
3	Area1exp	Pesada	N-1	0,0000680260	Viável	0,000082835	s2p_1d_n12.m
4	Area1exp	Pesada	N-2	0,0000002330	Viável	0,000000284	s2p_1d_n21.m
5	Area1exp	Média	N	0,0794554000	Viável	0,096752244	s2m_1d_n.m
6	Area1exp	Média	N-1	0,0002721000	Viável	0,000331334	s2m_1d_n11.m
7	Area1exp	Média	N-1	0,0002721000	Viável	0,000331334	s2m_1d_n12.m
8	Area1exp	Média	N-2	0,0000009318	Viável	0,000001135	s2m_1d_n21.m
9	Area2exp	Pesada	N	0,17877460000	Inviável	-	s2p_2d_n.m
10	Area2exp	Pesada	N-1	0,00061223400	Viável	0,000745513	s2p_2d_n11.m
11	Area2exp	Pesada	N-1	0,00061223400	Viável	0,000745513	s2p_21d_n12.m
12	Area2exp	Pesada	N-2	0,00000209700	Viável	0,000002554	s2p_2d_n21.m
13	Area2exp	Média	N	0,71509800000	Viável	0,870769464	s2m_2d_n.m
14	Area2exp	Média	N-1	0,00244894000	Viável	0,002982056	s2m_2d_n11.m
15	Area2exp	Média	N-1	0,00244894000	Viável	0,002982056	s2m_21d_n12.m
16	Area2exp	Média	N-2	0,000008387000	Viável	0,000010213	s2m_21d_n21.m

Agora suponha que apenas o **Estado 9** apresentado na **Tabela IV-3** seja inviável. Conforme a metodologia definida neste trabalho, a probabilidade deste estado (0.1787746) será distribuída ponderadamente para os estados viáveis.

Seja

$$P_I = \sum_{i=1}^k p_{i-\text{ésimo estado original inviável}} \quad (\text{IV-6})$$

Onde:

k é o número de estados inviáveis;

$p_{i-\text{ésimo estado original inviável}}$ é a probabilidade do i -ésimo estado original inviável, isto é, anteriormente ao ajuste;

Defina-se,

$$P_V = 1 - P_I \quad (\text{IV-7})$$

O ajuste empírico proposto para o i -ésimo estado viável original é dado pela seguinte equação:

$$p_{i-\text{ésimo estado viável ajustado}} = p_{i-\text{ésimo estado viável original}} + \left(\frac{p_{i-\text{ésimo estado viável original}}}{P_V} \right) P_I \quad (\text{IV-8})$$

* * *

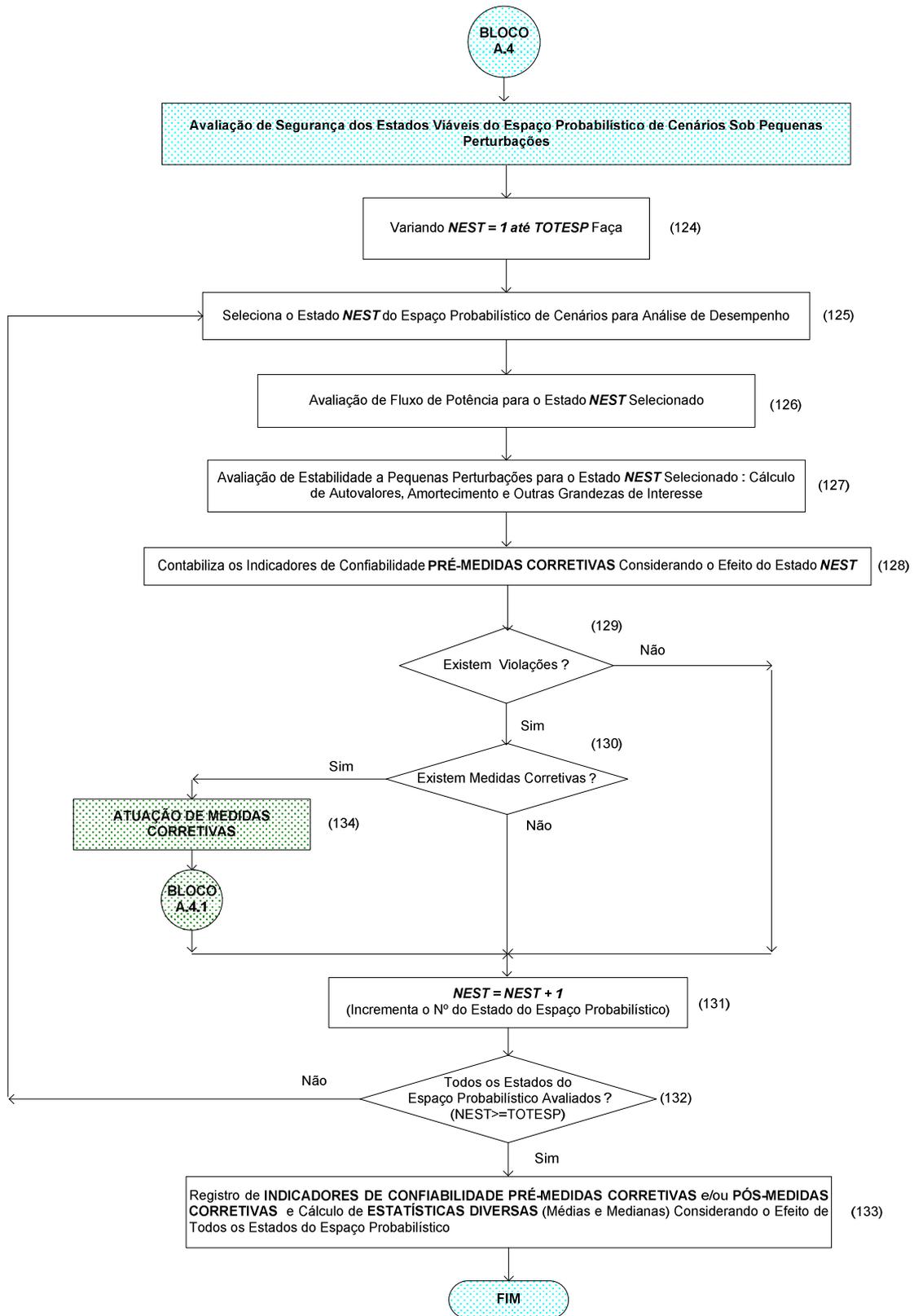


Figura IV-8 – Avaliação de Segurança Estática Sob Pequenas Perturbações (Apenas Cenários)

O **bloco A.4** da **Figura IV-2** é detalhado na **Figura IV-8**. Este bloco corresponde à análise de cada estado de cenários selecionado através do cálculo de fluxo de potência e em seguida, o cálculo de todos os autovalores pela utilização da análise modal.

Alerta-se aqui o leitor sobre o fato de que a **Figura IV-8** apresenta diferenças em relação à **Figura III-4** porque esta última retrata um procedimento generalizado, comportando a eventual presença simultânea de incertezas em cenários e ruídos.

No **bloco 124** a variável *loop NEST* conta do valor um até atingir o valor *TOTEST* – dimensão do espaço probabilístico de cenários. Em seguida executa o **bloco 125** para selecionar um estado do espaço probabilístico.

No **bloco 126** determina-se o ponto de operação do estado selecionado através da utilização do algoritmo de fluxo de potência não-linear.

O **bloco 127** corresponde à análise de estabilidade a pequenas perturbações através da determinação, via método *QR*, de todos os autovalores do estado viável selecionado através da técnica de análise modal. Se todos os autovalores do sistema tiverem a parte real negativa, isso indica a estabilidade do ponto de operação. O sistema é não oscilatório se a parte imaginária for igual a zero, ou oscilatório decrescente caso contrário. Caso algum autovalor tenha parte real positiva, o sistema é dito instável.

O **bloco 128** representa a contabilização dos indicadores de confiabilidade *pré-medidas corretivas* considerando o efeito do estado *NEST* selecionado. Em seguida, executa-se o **bloco 129** para verificar se existem modos de falha ou violações dos critérios estabelecidos. Em caso negativo, irá executar o **bloco 131** para incrementar o número de estado *NEST* do espaço probabilístico. Em caso afirmativo, executa-se o **bloco 130**.

Tipicamente o sistema analisado é considerado com modos de falha quando apresentar-se instável e/ou o fator de amortecimento for menor que o ζ_{\min} . Se o valor de $p_{\text{instabilidade}}$ (vide índice POI) é maior que zero significa que o sistema tem chance de apresentar instabilidade.

Se a $p_{0 < amort} < \zeta_{min} \neq 0$ (vide índice PAM) implica que o sistema tem chance de apresentar oscilações mal amortecidas.

Se o sistema é instável ou o fator de amortecimento é menor que o amortecimento mínimo (ζ_{min}), deve-se proceder ao uso de ações de controle que visem estabilizar o sistema e aumentar o amortecimento do mesmo. Caso possível, deve-se executar o **bloco 130** de forma a verificar se existem medidas corretivas para a melhoria da dinâmica do sistema.

O **bloco 130** é apenas indicativo da verificação se existem medidas corretivas para restaurar a estabilidade do sistema e atendimento ao critério estabelecido. No caso afirmativo, irá executar o **bloco 134** que efetua o ajuste de controladores. Em caso negativo, irá executar o **bloco 131** para incrementar o número de estado *NEST* do espaço probabilístico.

O **bloco 132** é também indicativo da verificação se todos os estados possíveis do espaço probabilístico gerados já foram analisados ou um novo estado selecionado de um conjunto do espaço probabilístico deve ser selecionado. Caso afirmativo, finaliza o procedimento do bloco A.4 e caso contrário executa-se o **bloco 125** para selecionar o novo estado.

O **bloco 133** corresponde ao registro de *indicadores de confiabilidade pré-medidas corretivas e/ou pós-medidas corretivas e cálculo de estatísticas diversas (médias e medianas)* considerando o efeito de todos os estados do espaço probabilístico. Em seguida, finaliza o processamento do bloco A.4.

* * *

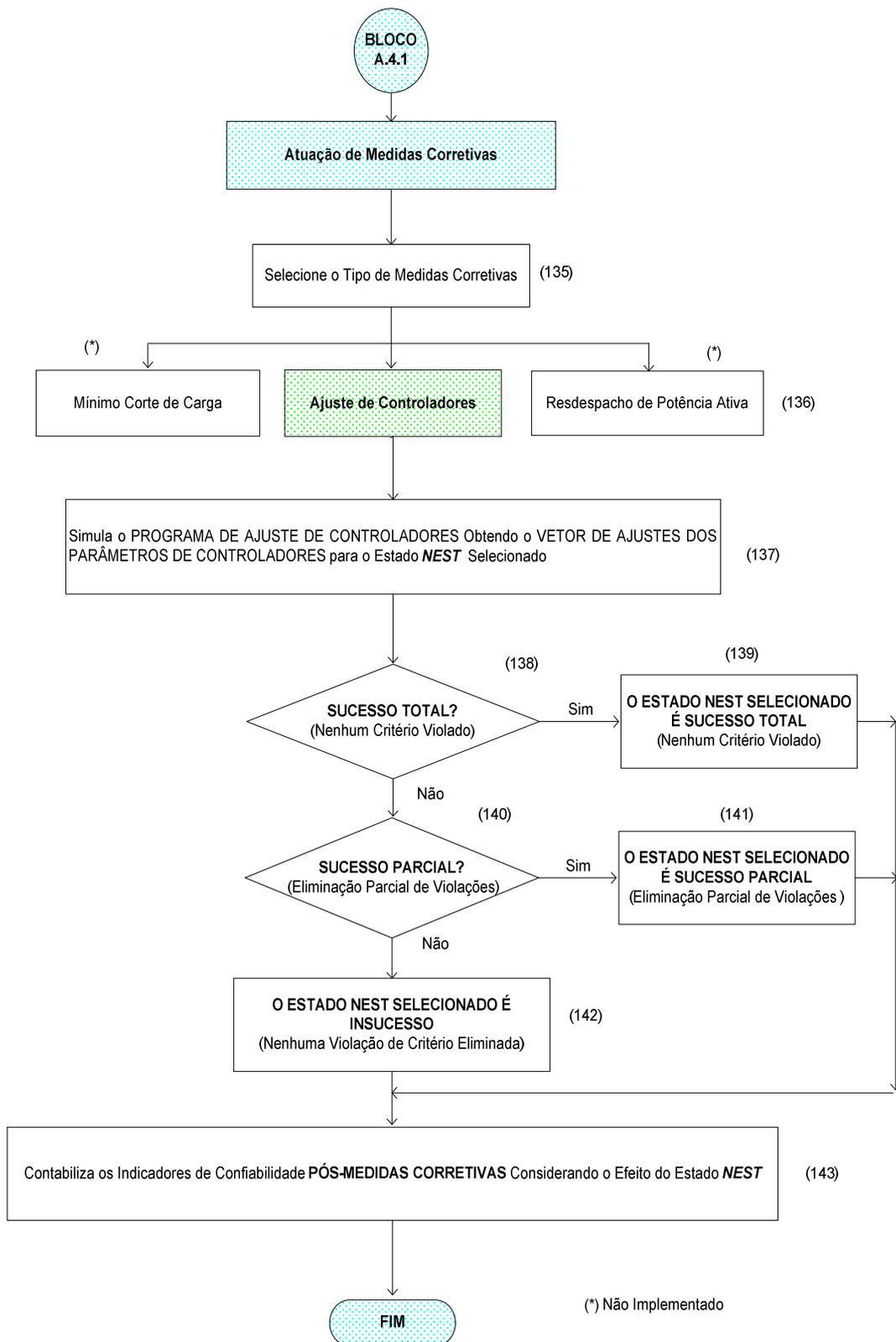


Figura IV-9 – Fluxograma Detalhado da Atuação de Medidas Corretivas para Cenários

A **Figura IV-9** corresponde ao detalhamento do **bloco A.4.1**, representado na **Figura IV-8**. Este bloco, quando acionado, opera as medidas corretivas eventualmente disponíveis. Entre estas, uma possível alternativa sugerida para uso refere-se ao ajuste otimizado de controladores proposto em Bomfim [59].

Os **blocos 135** e **136** indicam mais duas alternativas, que entretanto não serão implementadas nesta Tese.

Nesta Tese apenas a medida corretiva de ajuste de controladores será conceitualmente tratada. O passo seguinte é executar o **bloco 137** que consiste na simulação do programa de ajuste de controladores para o estado *NEST* selecionado, obtendo-se assim *um vetor de ajustes dos parâmetros de controladores*.

Para esse ajuste coordenado de controladores poderá ser utilizado o programa desenvolvido em [59] que consiste na aplicação do algoritmo genético (AG) ao problema de ajuste coordenado de estabilizadores de máquinas síncronas de um sistema elétrico de potência para múltiplas condições de operação oriunda da consideração de incertezas nos componentes do sistema de potência. A matriz de estado [A] é então calculada para todos os possíveis estados.

A finalidade desse ajuste é obter o máximo amortecimento do sistema para o estado *NEST* selecionado do espaço probabilístico. O passo seguinte é a execução dos **blocos 138 a 142** que consistem na avaliação de resultados obtidos e classificação do estado *NEST* selecionado em três categorias: *sucesso total* (nenhum critério violado), *sucesso parcial* (eliminação parcial de violações, e.g. eliminação da instabilidade mas permanência de nível de amortecimento inadequado) e *insucesso* (nenhuma violação de critério eliminada). Dependendo dos critérios estabelecidos poderão caracterizar-se apenas dois estados: sucesso e insucesso.

Finalizada a classificação do estado *NEST* selecionado, executa-se o **bloco 143** que corresponde à contabilização dos indicadores de confiabilidade *pós-medidas corretivas* considerando o efeito do estado *NEST* selecionado.

Após término de processamento das medidas corretivas, o programa irá executar o **bloco 131** do bloco A.4 (vide **Figura IV-8**) para incrementar o número de estado *NEST* do espaço probabilístico.

IV.4.2 Tratamento Computacional Apenas para Incertezas do Tipo Ruído

Nas **Figuras IV-10 a IV-13** desta seção IV.4.2 e as **Figuras IV-29 a IV-43** (vide o Adendo deste capítulo) são apresentados os fluxogramas para a avaliação do sistema de potência quando *somente as incertezas do tipo ruído* são consideradas. Este aspecto corresponde ao **bloco B** mostrado na **Figura IV-1**.

As **Figuras IV-10 e IV-11** apresentam fluxogramas simplificados, enfocando a macro estrutura da modelagem de ruídos, enquanto que as **Figuras IV-12 e IV-13, IV-29 a IV-43** apresentam fluxogramas detalhados de cada etapa identificados através dos **blocos B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 e B.6** mostrados na **Figura IV-11**.

Nota: visando a conveniência do leitor, os conjuntos de **Figuras IV-29 a IV-43** foram deslocadas para um adendo, situado ao fim deste capítulo. Essas figuras detalham os **blocos B1, B3, B4, B5 e B6** do fluxograma da **Figura IV-10** e o bloco 8 do Fluxograma da **Figura IV-12**.

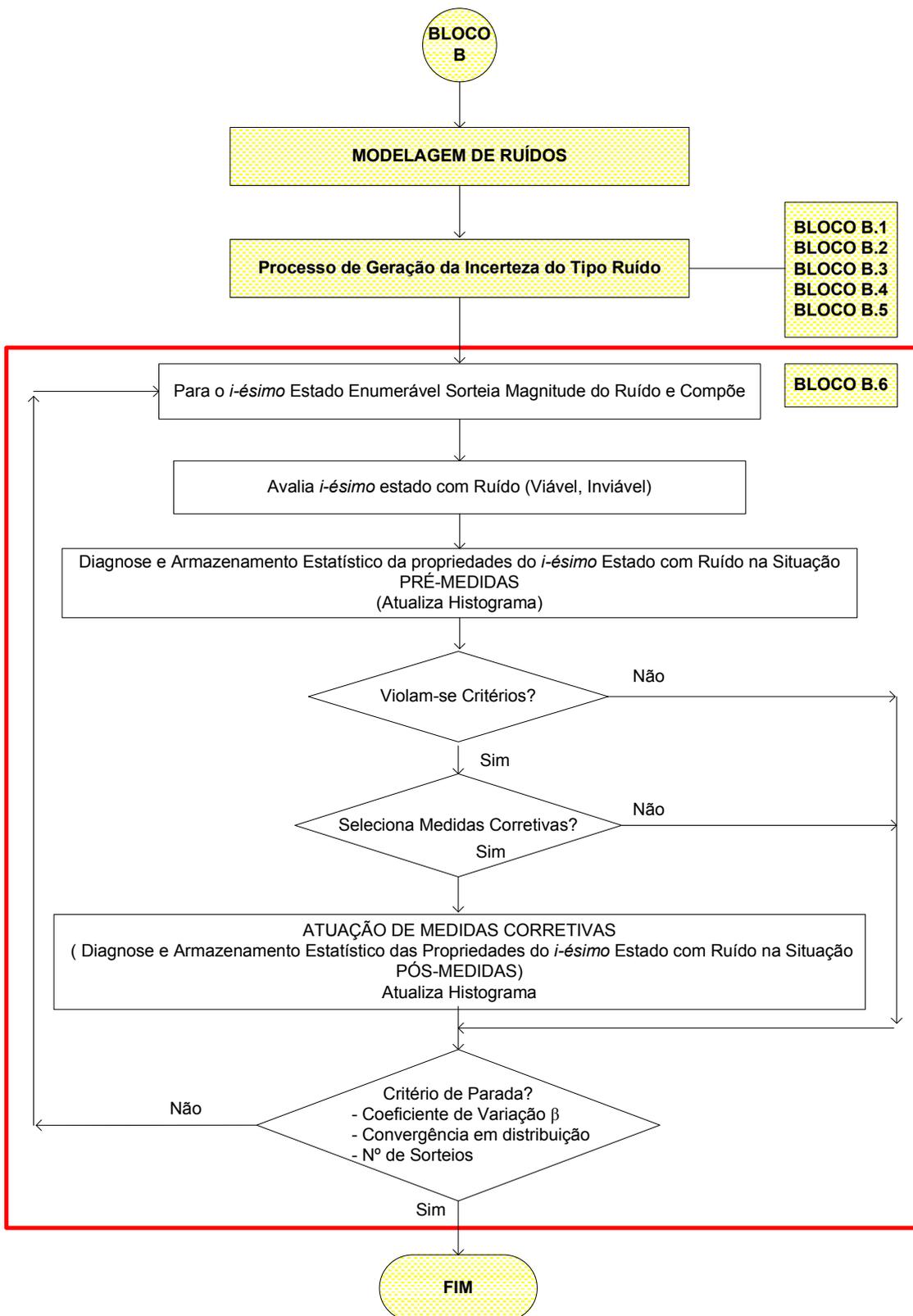


Figura IV-10 – Tratamento Conceitual de Incertezas do Tipo Ruído

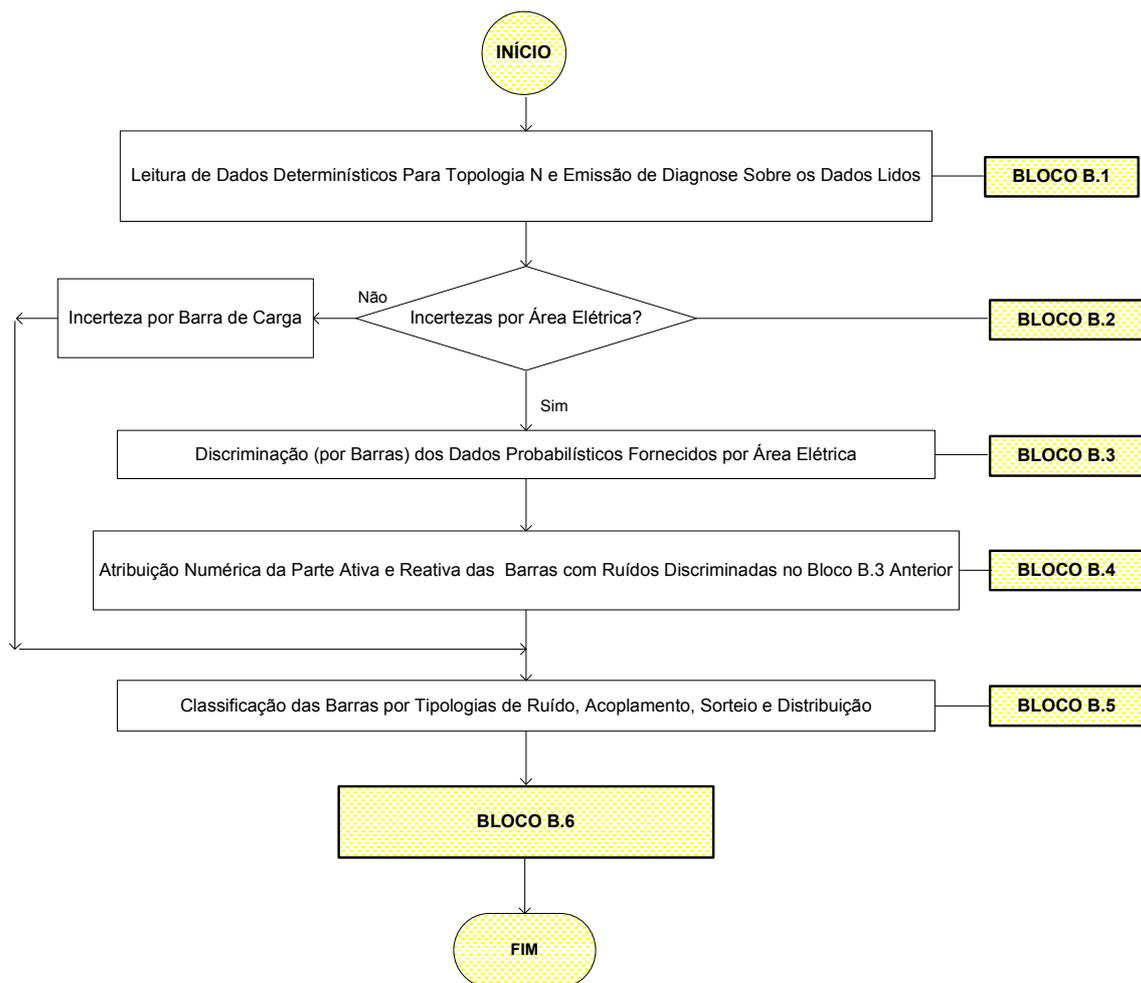


Figura IV-11 – Detalhamento do Processo de Geração da Incerteza do Tipo Ruído

Com relação à **Figura IV-11**, o **bloco B.1** (vide **Figura IV-29**) representa a leitura de dados determinísticos de um dado cenário (dados da rede elétrica, máquinas e seus controladores) fornecido pelo usuário considerando apenas a categoria de incerteza denominada como ruído. É fundamental lembrar que nessa região do aplicativo, *apenas um cenário de cada vez é avaliado*.

O **bloco B.2** é apenas indicativo da verificação se as incertezas foram fornecidas *por área elétrica*. No caso afirmativo, executa-se o **bloco B.3** para discriminação por barra de carga, de dados probabilísticos fornecidos por área elétrica. Em caso negativo, irá executar o **bloco B.5** para classificação das barras de carga por tipologias de ruídos, acoplamento, sorteio e distribuição probabilística (vide Seção III.2.2.4).

O **bloco B.4** representa a etapa da atribuição numérica da parte ativa em MW e reativa em MVAr das barras de carga com incertezas discriminadas no bloco B.3 anterior.

O **bloco B.6** consiste na avaliação de segurança sob pequenas perturbações dos estados viáveis considerando ruídos na magnitude ou percentuais de modelagem ZIP da carga.

A **Figura IV-12** detalha o procedimento de um cenário único, submetido a ruídos (ou seja, o bloco B.6 da **Figura IV-10**). É importante enfatizar que a **Figura IV-12** nada mais é do que a composição das **Figura IV-10** e **Figura IV-11** porém ressaltando com mais minúcias, aspectos de implementação computacional.

* * *

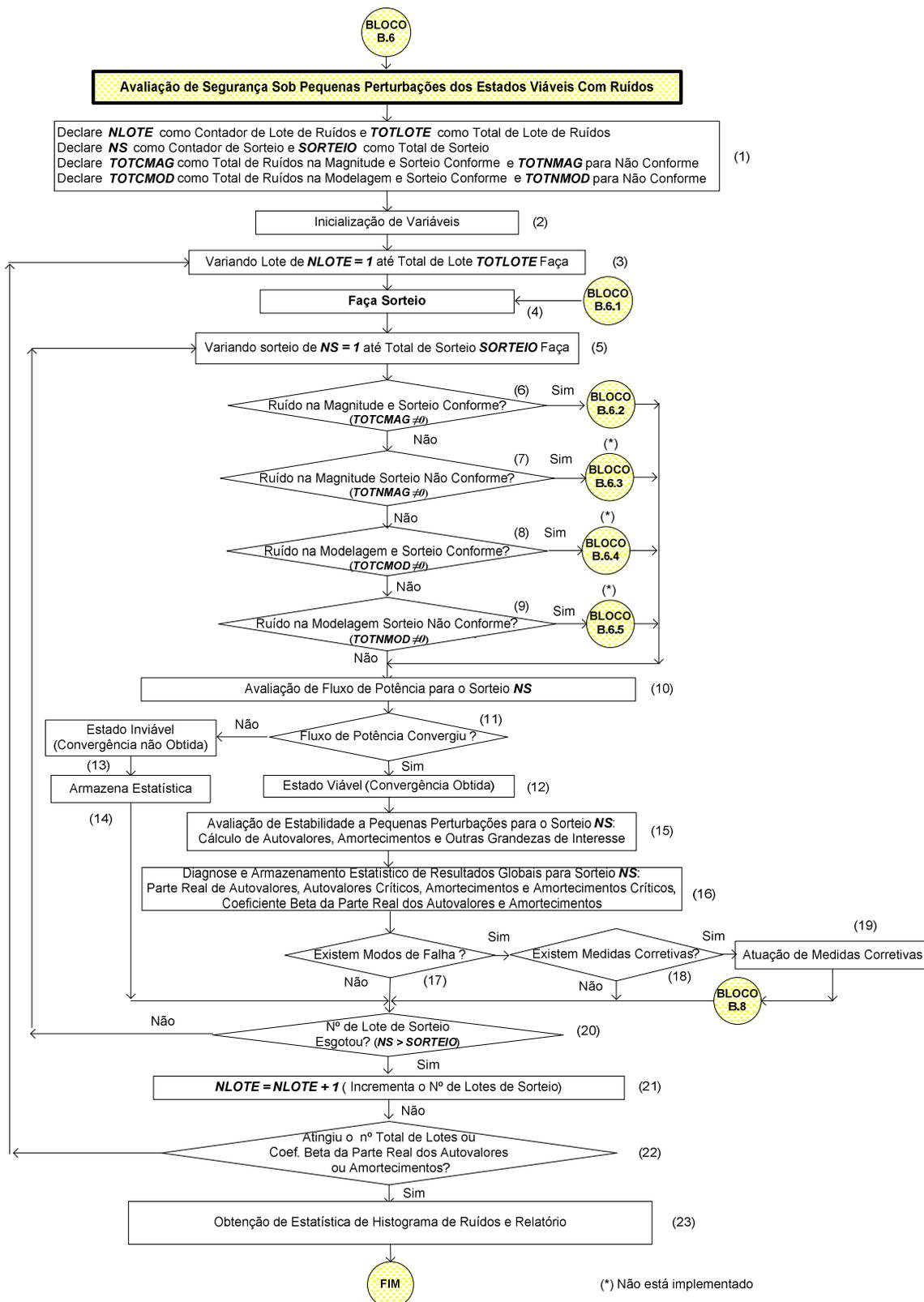


Figura IV-12 – Avaliação de Segurança Sob Pequenas Perturbações dos Estados Viáveis em Presença de Ruídos

O **bloco B.6** da **Figura IV-12** (Vide também a **Figura IV-10**) corresponde à análise de cada estado viável do sorteio *NS*, através do cálculo de fluxo de potência, e em seguida o cálculo de todos os autovalores pela utilização da análise modal, além da determinação de outras grandezas de interesse.

No **bloco 1** são declaradas as variáveis utilizadas durante a execução da subrotina do procedimento computacional proposto. As seguintes variáveis são definidas:

- *NLOTE* é contador de lotes de ruídos;
- *TOTLOTE* é o total de lotes de ruídos definido pelo usuário no arquivo de dados probabilísticos;
- *NS* é contador de sorteio;
- *SORTEIO* é o total de sorteios definido pelo usuário no arquivo de dados probabilísticos;
- *TOTCMAG* é o total de barras de cargas com ruídos na magnitude e sorteio conforme;
- *TOTNMAG* é o total de barras de cargas com ruídos na magnitude e sorteio não conforme;
- *TOTCMOD* é o total de barras de carga com ruídos na modelagem e sorteio conforme;
- *TOTNMOD* é o total de barras de carga com ruídos na modelagem e sorteio não conforme;

O **bloco 2** inicializa algumas variáveis necessárias para execução deste bloco do procedimento computacional proposto.

No **bloco 3** a variável loop *NLOTE* inicia do valor um até atingir *TOTLOTE* – total de lote de ruídos, e em seguida executa os blocos 4 a 22.

O **bloco 4** representa o início da etapa de sorteio pelo método de simulação Monte Carlo através da execução do **bloco B.6.1** definido mais adiante (vide **Figura IV-40**).

O **bloco 5** faz variar o contador de sorteio – NS , partindo-se do valor um até atingir o valor de $SORTEIO$ – total de sorteios definido pelo usuário no arquivo de dados probabilísticos.

O **bloco 6** representa apenas indicativo da verificação se o ruído é na magnitude da carga e o sorteio é conforme. Em caso afirmativo, executa-se o bloco B.6.2 e no caso negativo, irá processar o **bloco 7**, onde verifica se o ruído é na magnitude e o sorteio é não conforme. Em caso afirmativo, o bloco B.6.3 para ruído na magnitude e sorteio não conforme seria executado. Caso contrário, verifica se o ruído é na modelagem da carga (**blocos 8 e 9**), e a mesma lógica descrita nos **blocos 6 e 7** é considerada.

O **bloco 10**, similar ao procedimento descrito no **bloco 126** (vide **Figura IV-8**) para avaliação da metodologia com incertezas somente em cenários, efetua a análise de ruídos através do cálculo de fluxo de potência, e em seguida processa o **bloco 11** para verificar se o estado do sorteio NS analisado, é viável ou inviável. Define-se como estado viável, quando se consegue a convergência de fluxo de potência. Nesta condição, o **bloco 12** é executado. Por outro lado, o estado é considerado inviável quando não se obtém sucesso na convergência. Nesta situação os **blocos 13 e 14** são processados para armazenagem estatística desses casos inviáveis.

O passo seguinte é a execução do **bloco 15** para avaliação de estabilidade a pequenos sinais e o cálculo de todos os autovalores, amortecimentos e outras grandezas de interesse pela utilização da análise modal.

O **bloco 16** corresponde à diagnose e armazenamento estatístico de resultados globais de ruídos pré-medidas corretivas para o sorteio NS . Neste bloco, são atualizadas as estatísticas da *parte real dos autovalores*, *parte real dos autovalores críticos*, *amortecimentos* e *amortecimentos críticos*. Além disso, são calculados os coeficientes de variação (β) da parte real dos autovalores e dos amortecimentos para o sorteio NS selecionado.

O **bloco 17** é indicativo da verificação se existem modos de falha, ou seja, autovalores no semiplano direito e/ou amortecimentos inferiores ao estabelecido no critério. No caso afirmativo, executa o **bloco 18** que consiste em verificar se existem medidas corretivas. Em caso positivo, executa o **bloco 19** para atuação de medidas corretivas (O detalhamento da operação das medidas corretivas está no **bloco B.8**, descrito na **Figura IV-13**), a seguir. Para o ajuste coordenado de controladores poderá ser utilizado o programa desenvolvido por Bomfim em [59], adotando o mesmo procedimento descrito no **bloco 134** (vide **Figura IV-8**) para avaliação com incertezas apenas em cenários. A finalidade desse ajuste é obter o máximo amortecimento do sistema para todos os possíveis ruídos. Em caso negativo irá processar o bloco 20.

O **bloco 20** verifica se atingiu o número total de lotes de sorteio – *SORTEIO* especificados pelo usuário. Em caso afirmativo, executa o **bloco 21** que procede o incremento do número de lotes de sorteio – *NLOTE*, e em caso negativo é selecionado um novo sorteio através do processamento do bloco 5.

O **bloco 22** é indicativo da verificação se atingiu o número total de lotes de ruídos – *TOTLOTE* ou coeficiente de variação da parte real dos autovalores ou amortecimentos. No caso afirmativo, é terminada a execução do procedimento computacional e efetua tratamento estatístico global de resultados gerando *histogramas* e relatórios. Em caso negativo, seleciona o novo lote de ruídos – *NLOTE*.

No **bloco 23**, um relatório é impresso com os dados referentes ao total de sorteios, dados do histograma em cada sorteio (média da parte real dos autovalores, parte real dos autovalores críticos, média dos amortecimentos, amortecimentos críticos, variância da parte real dos autovalores, variância dos amortecimentos, coeficiente de variação da parte real dos autovalores e dos amortecimentos).

Além do relatório, são obtidos os histogramas da parte real dos autovalores, parte real dos autovalores críticos, amortecimentos, amortecimentos críticos, coeficiente de variação da parte real dos autovalores e dos amortecimentos.

* * *

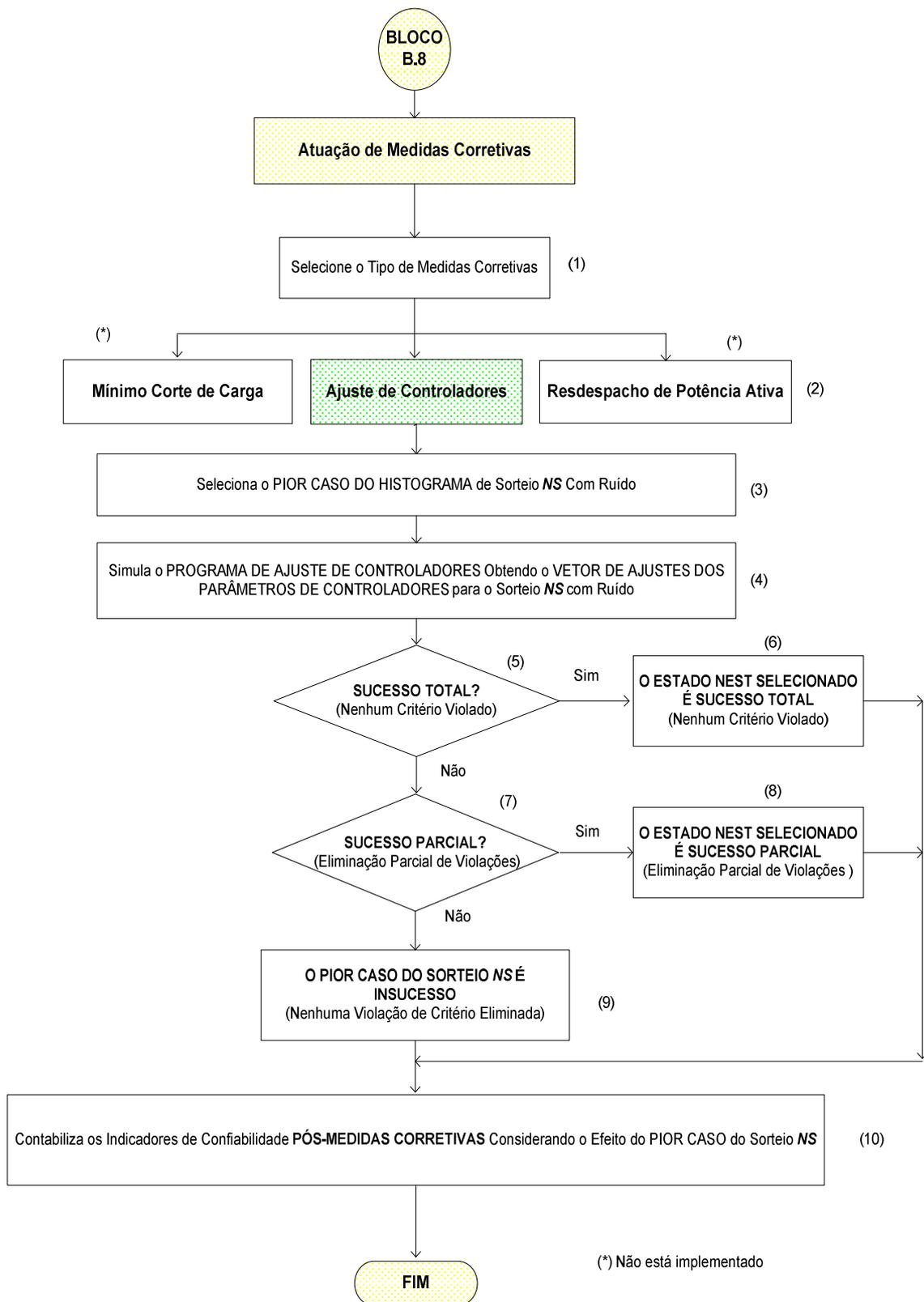


Figura IV-13 – Fluxograma Detalhado da Atuação de Medidas Corretivas para Ruídos

Tomando como referência a **Figura IV-12**, este **bloco B.8** representa a etapa de atuação de medidas corretivas na condição de modelagem somente em ruídos. Cabe destacar que esse bloco apresenta a mesma lógica descrita no procedimento computacional do **bloco A.4.1** (vide **Figura IV-9**), quando apenas as incertezas em cenários foram consideradas.

Na presença de ruídos, aplicam-se as medidas corretivas apenas para o pior caso do histograma de sorteio NS. Portanto, antes da execução do programa de ajuste de controladores (**Bloco 4**), executa-se o **bloco 3** para selecionar o pior caso do histograma de sorteio NS com ruído. Em seguida, o mesmo procedimento descrito anteriormente no **bloco A.4.1** da **Figura IV-9** é válido para essa análise.

Destaca-se apenas que neste **bloco B.8**, a variável *NEST* representa *cada estado do espaço probabilístico*, dado que a análise probabilística é efetuada pela simulação Monte Carlo e a variável *NEST* será substituída pela *NS* que representa *cada sorteio do lote*.

IV.4.3 Tratamento Computacional para a Combinação de Incertezas em Cenários e Ruídos

Esta seção aborda o **bloco C** mostrado na **Figura IV-1** conjugando incertezas em cenários e ruídos.

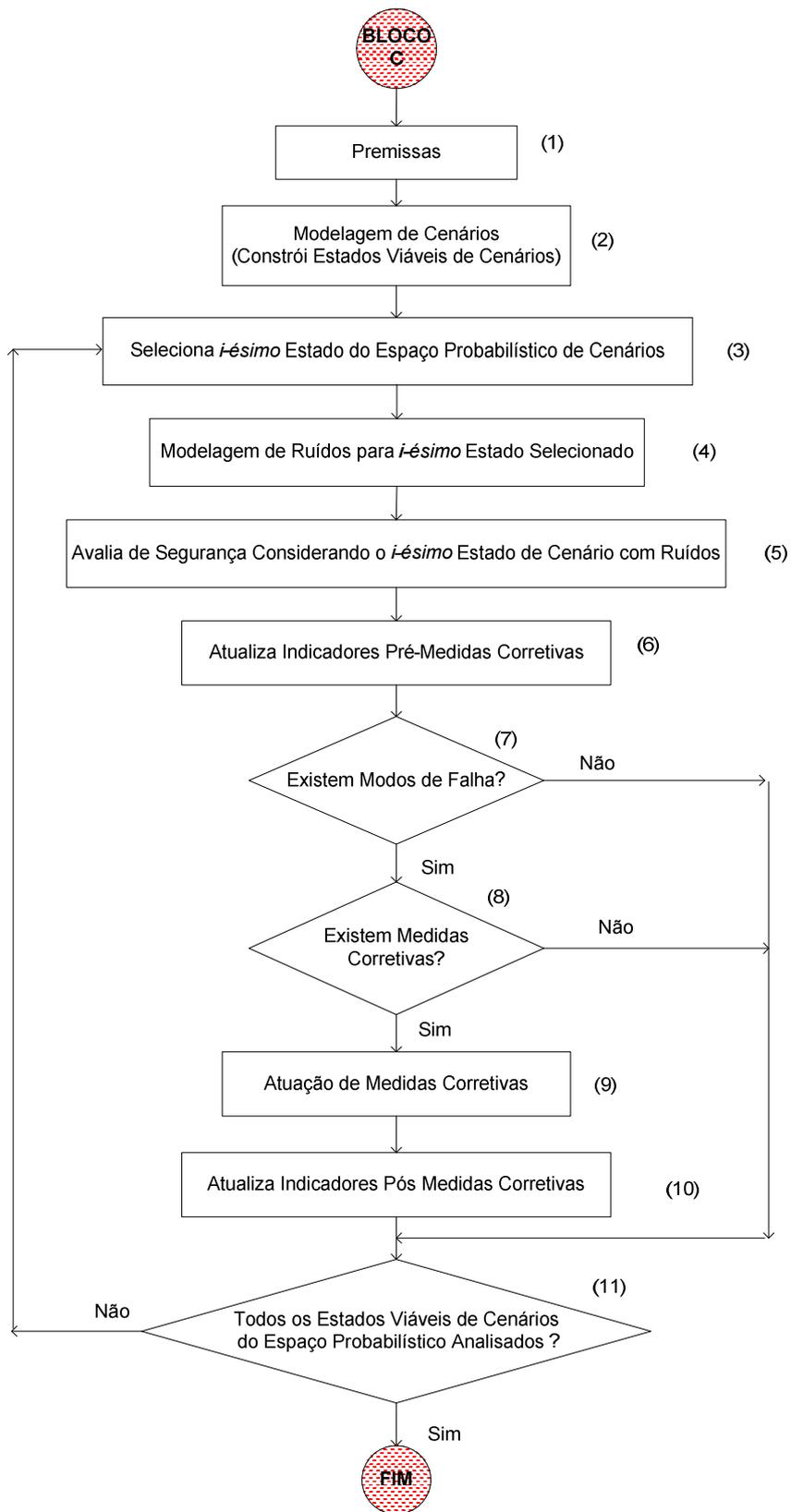


Figura IV-14 – Combinação de Incertezas em Cenários e Ruídos

A **Figura IV-14** apresenta um fluxograma simplificado do programa quando é considerado a *combinação de incertezas em cenários e ruídos*, enfocando as principais etapas. Do mesmo modo definido anteriormente, os números que aparecem ao lado de cada bloco do fluxograma representam os identificadores para referenciar os respectivos blocos no decorrer do texto. Sugere-se comparar a **Figura IV-14** com a **Figura III-4** e a **Figura IV-1**.

O **bloco 1** representa a leitura de dois arquivos de dados: primeiro contendo os dados determinísticos dos cenários a serem avaliados (dados da rede elétrica, máquinas e seus controladores) e o segundo contendo os modelos estocásticos de todos os elementos.

Como já detalhado anteriormente **Seção IV.4.1** (vide bloco A da **Figura IV-2**), o **bloco 2** representa a modelagem de cenários. Quando são consideradas incertezas em cenários e ruídos, apenas os **blocos A.1, A.2 e A.3** (vide **Figura IV-2**) são processados, onde são enumerados todos os estados viáveis de cenários.

No **bloco 3** seleciona *i-ésimo* estado do espaço probabilístico de cenários (vide **bloco D** da **Figura III-4**).

O **bloco 4** corresponde à etapa de modelagem de ruídos para o *i-ésimo* estado selecionado no bloco 3 anterior. Somente os **blocos B.2, B.3, B.4 e B.5** da modelagem em ruídos (vide **Figura IV-11**) são executados, atribuindo-se ruídos ao *i-ésimo* estado de cenários selecionado no bloco 3 anterior.

No diagrama, o **bloco 5** representa a etapa de análise de segurança estática.

O **bloco 7** é indicativo da verificação se existem modos de falha, ou seja, autovalores no semiplano direito e/ou amortecimentos inferiores ao estabelecido no critério. No caso afirmativo executa o **bloco 8** que consiste em verificar se existem medidas corretivas como ajuste de controladores através do uso de algoritmos de otimização (vide comentários dos **blocos K e U** da **Figura III-4**). Em caso afirmativo, o **bloco 9** pode ser processado para o ajuste coordenado de controladores. Em caso negativo, irá processar o **bloco 11** para verificar se todos os estados viáveis de cenários do espaço probabilístico foram avaliados.

IV.5 Sumário

Este capítulo *registra a principal contribuição desta Tese*. Apresentou-se aqui, em detalhes, o cerne do procedimento computacional que viabiliza o cálculo dos autovalores de um sistema de potência, submetido a um ambiente de incertezas.

Visando a conveniência do leitor, aspectos muito específicos do processo foram deslocados para um adendo a este capítulo.

A estrutura lógica seqüencial de todo o processo aqui discutido, constitui a base do protótipo computacional *APPS (Análise Probabilística de Pequenos Sinais), versão 1.0*, desenvolvido em linguagem *MATLAB, versão 7.1*, (vide **Anexos B e E**) utilizado para a obtenção dos resultados mostrados no **Capítulo V**, a seguir.

* * *

Adendo ao Capítulo IV: Cenários

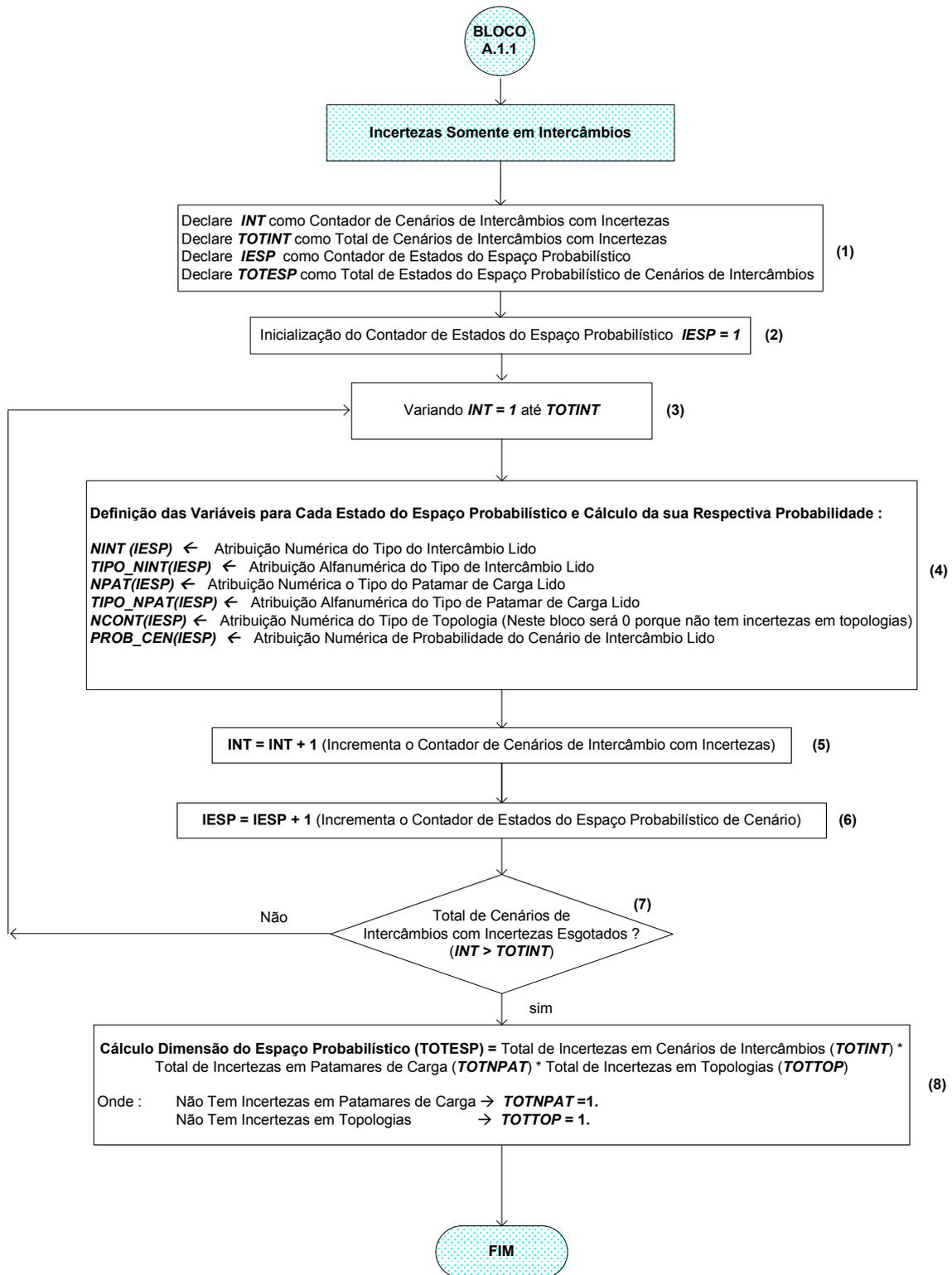


Figura IV-15 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Intercâmbios

Tomando como referência a **Figura IV-3**, o sumário computacional para construção do espaço probabilístico considerando *incertezas apenas em intercâmbios* é apresentado a seguir e o fluxograma está esboçado na **Figura IV-15**.

O **bloco 1** corresponde à declaração de variáveis do procedimento computacional do bloco A.1.1. As seguintes variáveis são definidas:

INT é o contador de cenários de intercâmbios com incertezas;

TOTINT é o total de cenários de intercâmbios com incertezas, sem limitação;

IESP é o contador de estados do espaço probabilístico;

TOTESP é o total de estados do espaço probabilístico.

O **bloco 2** efetua inicialização do contador de estados do espaço probabilístico – *IESP* , fazendo igual a um ($IESP = 1$).

O **bloco 3** faz variar o contador de cenários de intercâmbios com incertezas – *INT* , inicializando-se do valor 1 até atingir o valor total de cenários de intercâmbios com incertezas – *TOTINT* . Para cada cenário de intercâmbio selecionado – *INT* , executam-se os blocos 4, 5 e 6 até atingir o critério de parada definido no bloco 7 – $INT > TOTINT$.

O **bloco 4** corresponde à formação do espaço de estados através da definição de variáveis para caracterizar cada estado do espaço probabilístico – *IESP* , e em seguida calculam-se as suas respectivas probabilidades, a saber:

- Definição da variável $NINT(IESP)$ como sendo o tipo de intercâmbio, atribuindo-se numericamente os valores lidos do arquivo de dados probabilísticos. Como exemplo, podemos citar o cenário de intercâmbio com área 1 como exportadora de energia, identificando-o com o valor um ($NINT(IESP) = 1$) e para cenário de intercâmbio com área 2 como exportadora de energia, o valor dois ($NINT(IESP) = 2$).

- Definição da variável $TIPO_NINT(IESP)$ como sendo o tipo de intercâmbio alfanumérico, atribuindo-se alfanumericamente através da variável lida do arquivo de dados probabilísticos. Pode-se exemplificar através do mesmo caso citado anteriormente, onde podemos atribuir alfanumericamente (area1exp) para o cenário de intercâmbio com a área 1 como exportadora de energia e (area2exp) para a área 2 como exportadora de energia.
- Definição da variável $NPAT(IESP)$ como sendo o patamar de carga numérico, atribuindo-se numericamente à variável, o tipo do patamar de carga lido do arquivo de dados probabilísticos. Por exemplo, pode-se admitir o valor um para patamar de carga pesada ($NPAT(IESP) = 1$) ou o valor dois para patamar de carga média ($NPAT(IESP) = 2$) ou o valor três para patamar de carga leve ($NPAT(IESP) = 3$) ou o valor quatro para patamar de carga mínima ($NPAT(IESP) = 4$).
- Definição da variável $TIPO_NPAT(IESP)$ como patamar de carga alfanumérico, atribuindo-se alfanumericamente à variável, o tipo de patamar de carga lido do arquivo de dados probabilísticos. Da mesma forma que na etapa anterior, podem-se admitir três tipos de patamares de carga, porém alfanumericamente, a saber, pesada ou média ou leve ou mínima.
- Definição da variável $NCONT(IESP)$ como sendo a topologia numérica, atribuindo-se numericamente à variável, o tipo de topologia de cada estado do espaço probabilístico em construção. Na implementação desse protótipo adotou-se as seguintes especificações para essa variável. Deverá ser composto de um caracter entre 0 e 2, assim temos:
 - (a) Se a topologia for N, caracteriza que tem incertezas na topologia N e será atribuída o (valor 0) para a variável $NCONT(IESP)$;
 - (b) Se a topologia for N-1, caracteriza que tem incertezas na topologia N-1 e será atribuída o (valor 1) para a variável $NCONT(IESP)$;

- (c) Se a topologia for N-2, caracteriza que tem incertezas na topologia N-2 e será atribuída o (valor 2) para a variável $NCONT(IESP)$.

Neste **bloco A.1.1** como não existem incertezas em topologias, todos os estados terão atribuição (valor 0) para a variável $NCONT(IESP)$.

- Finalmente, calcula-se a probabilidade do $iesp$ -ésimo estado de cenários. No protótipo definiu-se a variável $prob_cen$ como sendo a probabilidade do estado $iesp$. Dessa forma, atribui-se numericamente à variável $prob_cen(iesp)$, a probabilidade do int -ésimo cenário de intercâmbio lido do arquivo de dados probabilísticos. Essa probabilidade é calculada como produto das probabilidades de ocorrência dos elementos da rede com incertezas, conforme apresentado na **equação (IV-9)**. Neste bloco, cuja análise é feita apenas com incertezas em cenários de intercâmbios, p_{estado} refere-se à probabilidade de ocorrência do int -ésimo intercâmbio entre áreas.

$$prob_cen(iesp) = \prod_{i \in \Psi} p_{estado}(i) \quad (IV-9)$$

Onde :

$prob_cen$ é a probabilidade do $iesp$ -ésimo estado de cenários;

p_{estado} corresponde à probabilidade de ocorrência do int -ésimo intercâmbio entre áreas;

i é o estado (intercâmbio 1, intercâmbio 2, ...);

$iesp$ é o $iesp$ -ésimo estado do espaço probabilístico;

Ψ é o conjunto incertezas em intercâmbios entre áreas.

O **bloco 5** efetua o incremento do contador de cenários de intercâmbio com incertezas – $INT = INT + 1$.

De forma similar ao bloco 5 mencionado anteriormente, o **bloco 6** corresponde ao incremento do contador de estados do espaço probabilístico de cenários – $IESP = IESP + 1$.

O **bloco 7** é indicativo da verificação se o total de cenários de intercâmbios com incertezas foram esgotados ou se o novo cenário de intercâmbio com incertezas deve ser processado. Caso afirmativo, deve executar a ação do bloco 8, caso contrário executa-se o bloco 3 para selecionar um novo cenário de intercâmbio.

O **bloco 8** efetua o cálculo da dimensão do espaço probabilístico considerando incertezas somente em cenários de intercâmbios. Neste bloco A.1.1, dado que não existem incertezas em patamares de carga e topologias, toma-se valor um para as variáveis $TOTNPAT$ e $TOTTOP$. Assim sendo, neste caso, a dimensão do espaço probabilístico será dado apenas pelo valor da variável $TOTINT$ – total de incertezas em cenários de intercâmbios, conforme a equação (IV-10)

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP \quad (IV-10)$$

Onde:

$TOTESP$ é a dimensão do espaço probabilístico de cenários;

$TOTINT$ é o total de incertezas em cenários de intercâmbios;

$TOTNPAT$ é o total de incertezas em patamares de carga;

$TOTTOP$ é o total de incertezas em topologias.

Exemplo A.1.1: Para melhor compreensão do conceito, o exemplo do sistema teste da **Figura IV-5** é aqui repetido para ilustrar o procedimento para cálculo do espaço probabilístico e da dimensão do espaço probabilístico ($TOTESP$) considerando incertezas apenas em cenários de intercâmbios.

Para este caso suponha-se que a probabilidade de ocorrência do cenário de intercâmbio com área 1 como exportadora seja de 10% e da área 2 como exportadora seja de 90%, conforme ilustrado na **Figura IV-16**.

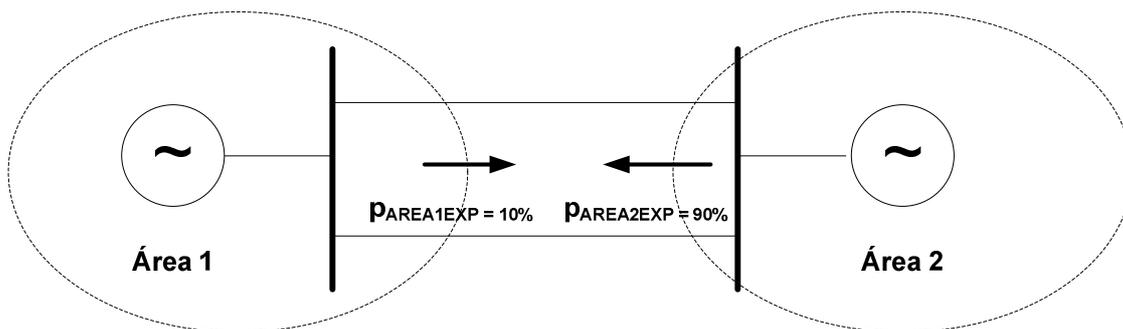


Figura IV-16 – Sistema Teste Fictício de 2 Barras

Adotando-se a premissa que somente os cenários de intercâmbios estejam modelados estocasticamente (ou seja, dois cenários de intercâmbios), isto é, os patamares de carga e topologias não possuem incertezas, podemos obter para este exemplo a seguinte dimensão do espaço probabilístico de cenários:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP$$

$$TOTESP = 2 * 1 * 1 = 2$$

Onde:

$TOTINT = 2$ é o total de incertezas em cenários de intercâmbios;

$TOTNPAT = 1$ é o total de incertezas em patamares de carga;

$TOTTOP = 1$ é o total de incertezas em topologias.

Logo, este sistema exemplo possui dois estados, onde:

Estado 1: representa o cenário de *intercambio com área 1 como exportadora*, cuja probabilidade é de $p_{area1exp} = 10\%$;

Estado 2: representa o cenário de *intercambio com área 2 como exportadora*, cuja probabilidade é de $p_{area2exp} = 90\%$.

* * *

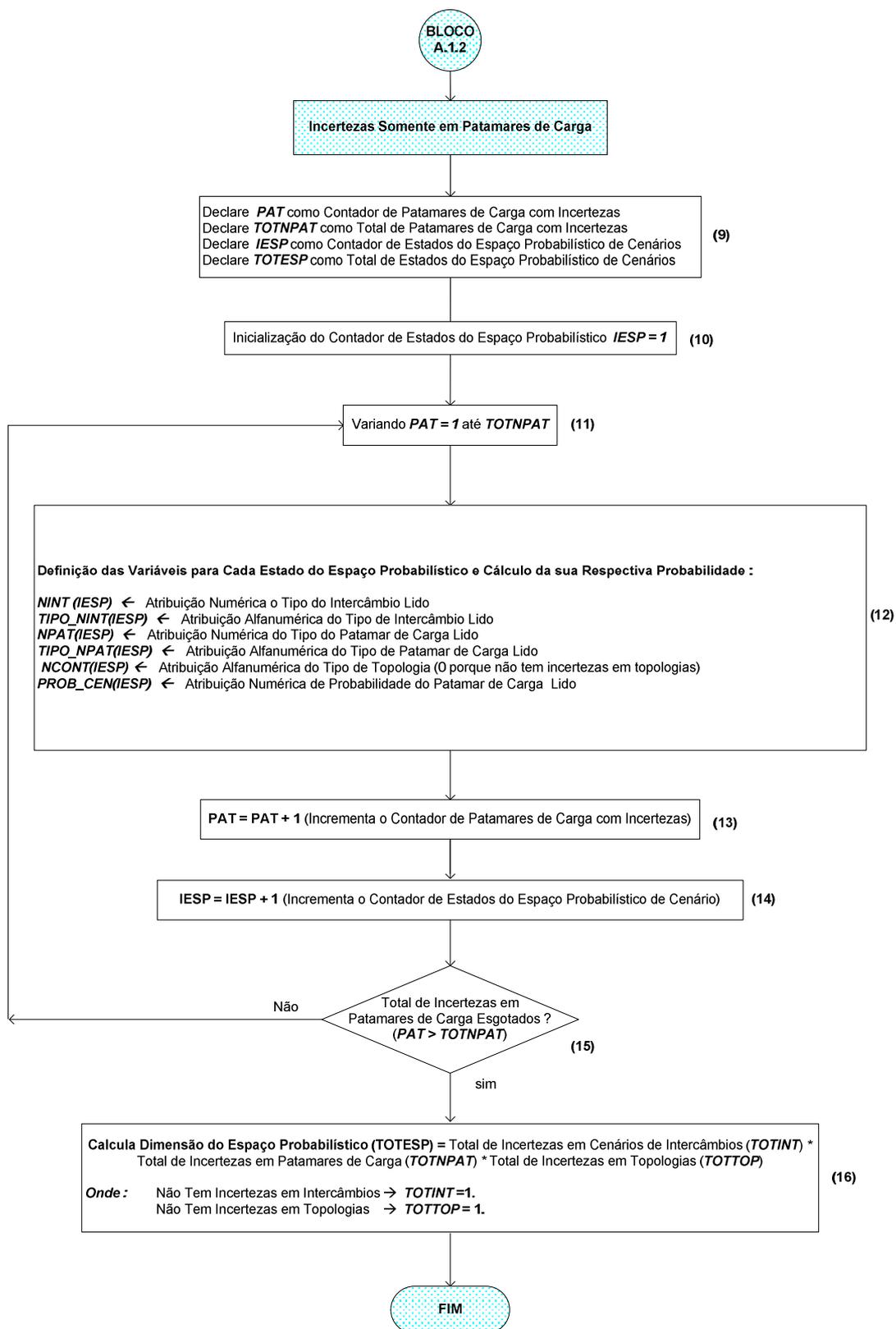


Figura IV-17 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Patamares de Carga

Tomando como referência a **Figura IV-3**, apresenta-se no **bloco A.1.2** o sumário computacional para construção do espaço probabilístico considerando *incertezas somente em patamares de carga*. O fluxograma está apresentado na **Figura IV-17**.

O **bloco 9** corresponde à declaração de variáveis utilizadas durante o processo de execução do bloco A.1.2 deste procedimento computacional. Além das variáveis *IESP* e *TOTESP* declaradas no bloco A.1.1 anterior, as seguintes variáveis devem ser acrescidas:

PAT é o contador de patamares de carga com incertezas;

TOTNPAT é o total de patamares de carga com incertezas.

De forma idêntica ao bloco 2 anteriormente mencionado, no **bloco 10** inicializa-se o contador de estados do espaço probabilístico, fazendo *IESP* = 1.

O **bloco 11** corresponde à variação do contador de patamares de carga com incertezas – *NPAT*, inicializando-se do valor um até atingir o valor total de patamares de carga com incertezas – *TOTNPAT*, podendo admitir futuramente até quatro patamares de carga (*pesada, média, leve e mínima*) (Nota: no estágio atual de desenvolvimento, só foram implementados os patamares pesada, média e leve). Para cada patamar de carga com incertezas – *NPAT*, executam-se os blocos 12, 13 e 14 até atingir o critério de parada definido no bloco 15, ou seja, $NPAT > TOTNPAT$.

Similarmente ao procedimento adotado para o bloco 4 anterior, no **bloco 12** deste fluxograma inicia-se a formação do espaço probabilístico de estados através da definição de variáveis para cada estado, e em seguida calculam-se as suas respectivas probabilidades. Assim sendo, neste bloco a variável p_{estado} corresponde à probabilidade do patamar de carga lida do arquivo de dados probabilísticos e Ψ é o conjunto de incertezas em patamares de carga, conforme apresentada na equação (IV-9).

$$prob_cen(iesp) = \prod_{i \in \Psi} p_{estado}(i) \quad (IV-9)$$

No **bloco 13** efetua-se o incremento do contador de patamares de carga com incertezas $PAT = PAT + 1$.

O **bloco 14** corresponde ao incremento do contador de estados do espaço probabilístico de cenários – $IESP = IESP + 1$.

O **bloco 15** é indicativo da verificação se o total de patamares de carga com incertezas foi esgotado ou se o novo patamar de carga com incertezas deve ser processado. Caso afirmativo, deve-se executar a ação do bloco 16, caso contrário executa-se o bloco 11 para selecionar o novo patamar de carga.

O **bloco 16** efetua o cálculo da dimensão do espaço probabilístico considerando incertezas somente em patamares de carga. Neste bloco A.1.2, dado que não existem incertezas em intercâmbios e topologias, toma-se (valor 1) para as variáveis $TOTINT$ e $TOTTOP$. Assim sendo, neste caso, a dimensão do espaço probabilístico será dado apenas pelo valor da variável $TOTNPAT$ - total de incertezas em patamares de carga, conforme a **equação (IV-10)** definida no bloco A.1.1, ou seja:

$$TOTESP = 1 * TOTNPAT * 1 \quad (IV-10)$$

Exemplo A.1.2: Neste exemplo apresenta-se como opera o **bloco A.1.2** do programa desenvolvido. Logo, para que seja possível acompanhar todos os passos, é necessário que o exemplo seja bastante simples, ainda que deixe de ser realista. Assim, o exemplo será baseado também no sistema fictício de duas barras apresentado no exemplo A.2, reproduzido na **Figura IV-18** e adotando como premissa que *somente os patamares de carga* serão modelados estocasticamente.

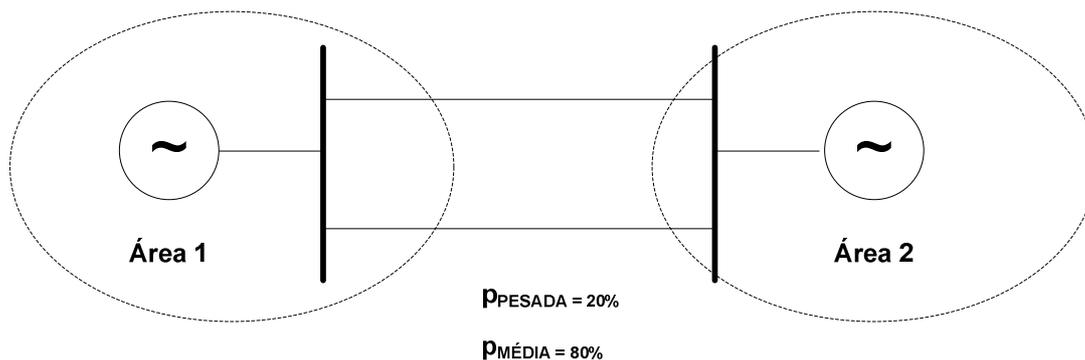


Figura IV-18 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste Duas Barras

Assim, a primeira etapa do bloco corresponde ao cálculo da probabilidade de cada estado do espaço probabilístico em formação. Neste caso como existem incertezas apenas nos dois patamares de carga (pesada e média), as seguintes probabilidades são atribuídas para cada estado do espaço probabilístico:

Estado 1: p_{pesada} = probabilidade do patamar de carga pesada = 20%

Estado 2: $p_{média}$ = probabilidade do patamar de carga média = 80%

Logo, esse sistema possui a seguinte dimensão do espaço probabilístico:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP$$

$$TOTESP = 1 * 2 * 1 = 2$$

Onde:

$TOTINT = 1$ é o total de incertezas em cenários de intercâmbios;

$TOTNPAT = 2$ é o total de incertezas em patamares de carga;

$TOTTOP = 1$ é o total de incertezas em topologias.

* * *

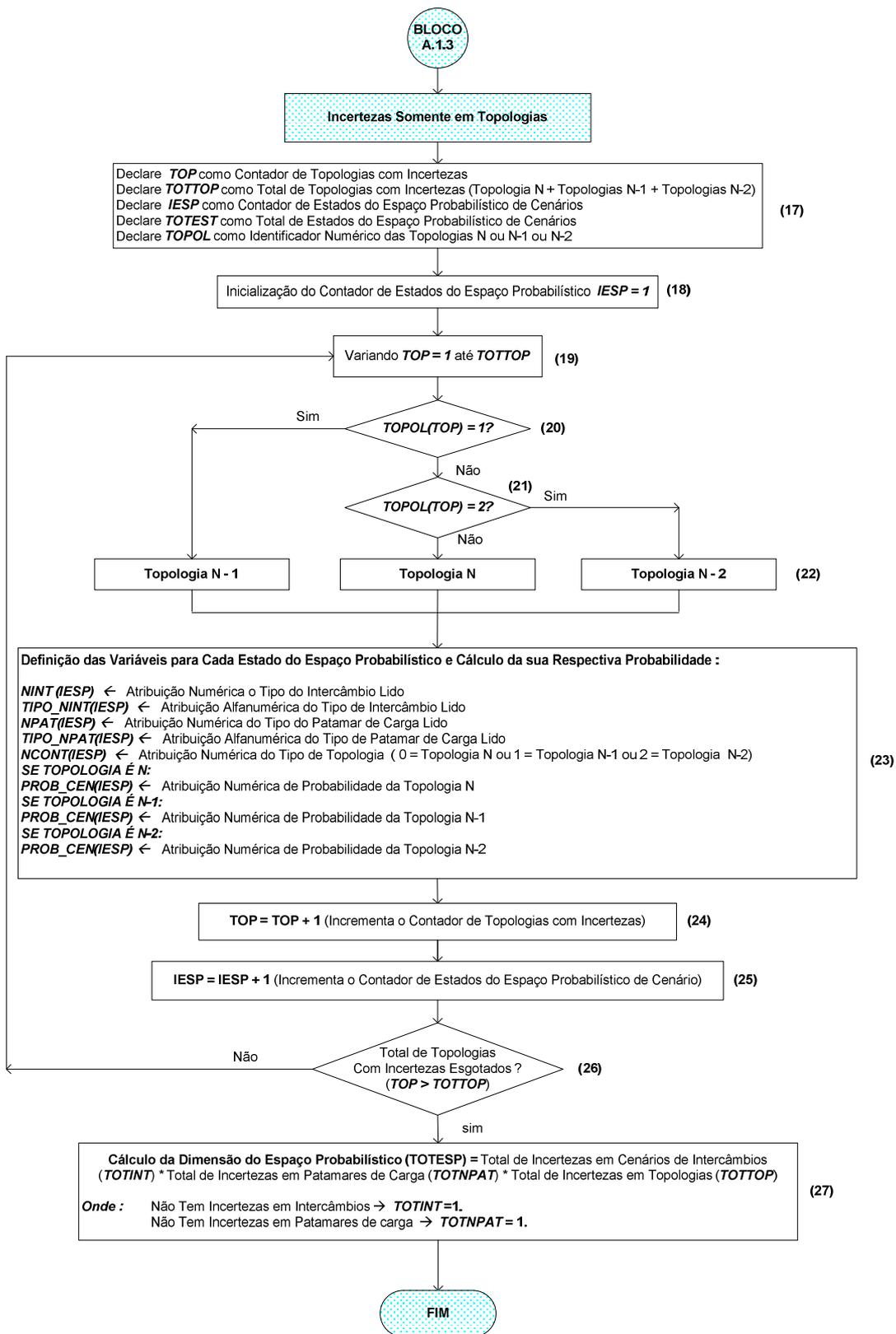


Figura IV-19 – Construção do Espaço Probabilístico de Cenários Com Incertezas em Topologias

Como terceira e última classe de incertezas em cenários, consideremos as *incertezas somente em topologias*. Apresentaremos agora no **bloco A.1.3** (vide **Figura IV-3**), o algoritmo computacional para construção do espaço probabilístico para essa categoria de incertezas. O fluxograma correspondente aparece na **Figura IV-19**.

O **bloco 17** corresponde à declaração de variáveis utilizadas durante o processo de execução do bloco A.1.3. Além das variáveis *IESP* e *TOTESP* declaradas nos blocos A.1.1 e A.1.2 anteriores, as seguintes variáveis devem ser acrescentadas:

TOP é o contador de topologias com incertezas;

TOTTOP é o total de topologias com incertezas.

Similarmente ao definido nos blocos 2 e 10 anteriormente mencionados, no **bloco 18** ocorre a inicialização do contador de estados do espaço probabilístico, fazendo *IESP* = 1.

O **bloco 19** corresponde à variação do contador de topologias com incertezas – *TOP*, iniciando do (valor 1) até atingir o valor total de topologias com incertezas – *TOTTOP*. Os **blocos 20, 21 e 22** correspondem à definição da topologia de cada estado do espaço probabilístico em formação. Se a variável *TOPOL(TOP)* apresentar valor zero, será identificado como topologia N, valor 1, será identificada como topologia N-1 e valor 2, será identificado como topologia N-2.

Em seguida, no **bloco 23** definem-se as variáveis para caracterizar cada estado e calcula-se a sua respectiva probabilidade, conforme detalhado anteriormente nos blocos A.1.1 e A.1.2. Neste caso, a variável *prob_cen(iesp)* refere-se à probabilidade da topologia determinada pelo protótipo computacional proposto, conforme **equação (IV-9)**, sendo que p_{estado} refere-se à probabilidade de ocorrência da topologia com incertezas e o Ψ é o conjunto de topologias com incertezas.

$$prob_cen(iesp) = \prod_{i \in \Psi} p_{estado}(i) \quad (IV-9)$$

Para cada topologia com incertezas TOP , executam-se os blocos 24, 25 e 26 até atingir o critério de parada definido no bloco 26 - $TOP > TOTTOP$.

No **bloco 24** efetua-se o incremento do contador de topologias com incertezas – $TOP = TOP + 1$.

De forma similar aos blocos 6 e 14 mencionados anteriormente, o **bloco 25** corresponde ao incremento do contador de estados do espaço probabilístico de cenários – $IESP = IESP + 1$.

O **bloco 26** é indicativo da verificação se o total de topologias com incertezas foram esgotados ou se a nova topologia com incertezas deve ser processada. Caso afirmativo deve-se executar a ação do bloco 27, caso contrário executa-se o bloco 19 para selecionar nova topologia.

O **bloco 27** efetua o cálculo da dimensão do espaço probabilístico considerando incertezas somente em topologias. Neste bloco A.1.3, dado que não existem incertezas em intercâmbios e patamares de carga, toma-se o (valor 1) para as variáveis $TOTINT$ e $TOTNPAT$. Assim sendo, neste caso, a dimensão do espaço probabilístico será dado apenas pelo valor da variável $TOTTOP$ - total de incertezas em topologias, conforme a equação (IV–10) definida no bloco A.1.1, ou seja:

$$TOTESP = 1 * 1 * TOTTOP \quad (IV-10)$$

Exemplo A.1.3: Este bloco corresponde à consideração de incertezas apenas na topologia da rede. Neste exemplo, são possíveis duas contingências simples e uma dupla, conforme ilustrado na **Figura IV-20**.

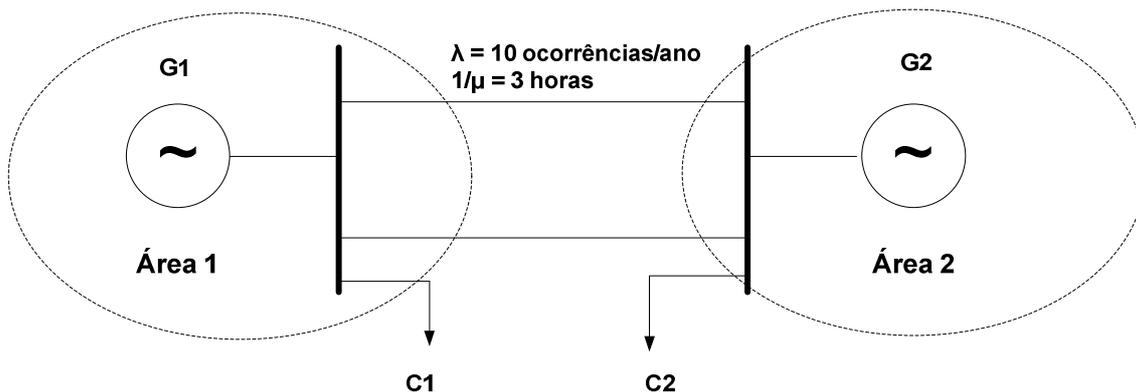


Figura IV-20 – Espaço de Estados Completo (22 = 4 Estados)

$LT1LT2$ Topologia N

$\overline{LT1}LT2$ Topologia N-1 (Circuito 1 indisponível)

$LT1\overline{LT2}$ Topologia N-1 (Circuito 2 indisponível)

$\overline{LT1}\overline{LT2}$ Topologia N-2 (Circuitos 1 e 2 indisponíveis)

Admitindo incertezas nas topologias N, N-1 e N-2, podemos obter para este caso exemplo a seguinte dimensão do espaço probabilístico de cenários:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP$$

$$TOTESP = 1 * 1 * 4 = 4$$

Onde:

$TOTINT = 1$ é o total de incertezas em cenários de intercâmbios;

$TOTNPAT = 1$ é o total de incertezas em patamares de carga;

$TOTTOP = 4$ é o total de incertezas em topologias.

Considerando que as duas linhas de transmissão são exatamente idênticas e possuem os valores de taxa de falha (λ) e tempo médio de reparo ($1/\mu$) apresentados na **Figura**

IV-20, podemos obter a probabilidade de encontrar-se disponível (p_{LT1}, p_{LT2}) e indisponível ($p_{\overline{LT1}}, p_{\overline{LT2}}$) respectivamente pelas equações (IV-11) e (IV-12).

$$p_{LT1} = p_{LT2} = \frac{\frac{8760}{\mu}}{\lambda + \frac{8760}{\mu}} \quad (\text{IV-11})$$

$$p_{LT1} = p_{LT2} = \frac{\frac{8760}{3}}{10 + \frac{8760}{3}} = 99,659\%$$

$$p_{\overline{LT1}} = p_{\overline{LT2}} = \frac{\lambda}{\lambda + \frac{8760}{\mu}} \quad (\text{IV-12})$$

$$p_{\overline{LT1}} = p_{\overline{LT2}} = \frac{10}{10 + \frac{8760}{3}} = 0,34129\%$$

Assim, a probabilidade de cada um dos estados definidos na **Figura IV-20** pode ser calculada pela **equação (IV-9)**.

$$p_{LT1LT2} = p_{LT1} * p_{LT2} = 0,99659 * 0,99659 = 0,993192 = 99,3192 \%$$

$$p_{\overline{LT1}LT2} = p_{\overline{LT1}} * p_{LT2} = 0,0034129 * 0,99659 = 0,0034013 = 0,34013 \%$$

$$p_{LT1\overline{LT2}} = p_{LT1} * p_{\overline{LT2}} = 0,99659 * 0,0034129 = 0,0034013 = 0,34013 \%$$

$$p_{\overline{LT1}\overline{LT2}} = p_{\overline{LT1}} * p_{\overline{LT2}} = 0,0034129 * 0,0034129 = 0,000011648 = 0,0011648 \%$$

* * *

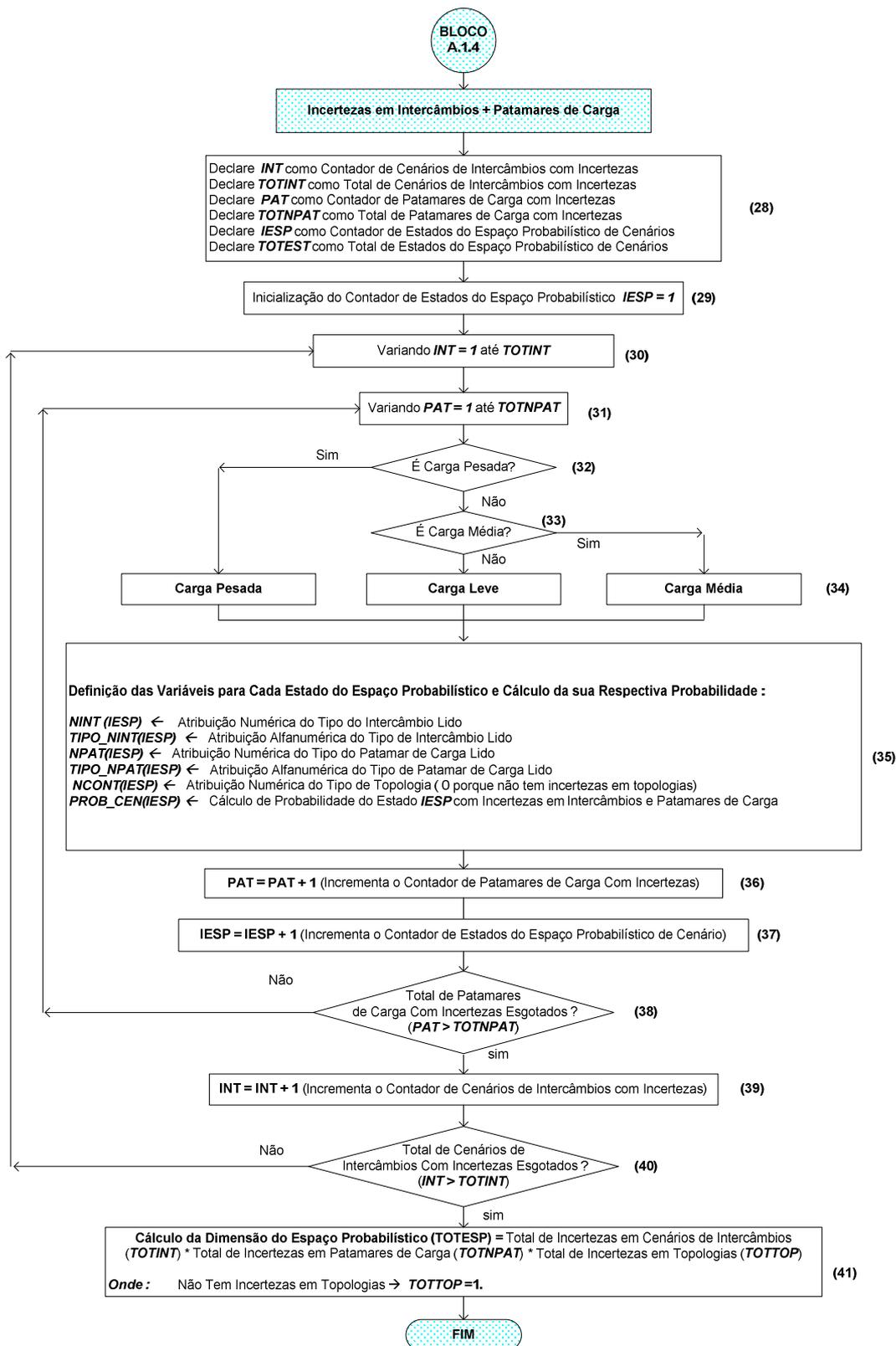


Figura IV-21 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Intercâmbios e Patamares de Carga

Neste **bloco A.1.4** detalhado na **Figura IV-21** (vide também a **Figura IV-3**) apresentamos um algoritmo que permitirá levar em consideração a combinação das duas classes de incertezas, a saber, intercâmbios entre áreas e patamares de carga, fornecendo o espaço probabilístico de estados e a sua dimensão. Uma vez que neste algoritmo temos incertezas nas duas categorias descritas nos blocos A.1.1 e A.1.2 anteriores, podemos adotar o procedimento de composição desses dois blocos, com exceção da parte relacionada ao cálculo da probabilidade de estados e da dimensão do espaço probabilístico de cenários. No protótipo implementado não foi considerada a representação de carga mínima.

O **bloco 35** corresponde à definição de variáveis para caracterizar cada estado do espaço probabilístico e cálculo de probabilidade como sendo o produto das probabilidades de ocorrência dos cenários de intercâmbios e patamares de carga, conforme apresentado na **equação (IV-9)**. Nesse caso, temos:

$$prob_cen(iesp) = \prod_{i \in \Psi} p_{estado}(i) \quad (IV-9)$$

Onde:

p_{estado} será composto pelo produto da probabilidade dessas duas classes de incertezas (intercâmbios e patamares de carga);

Ψ é o conjunto de intercâmbios e patamares de carga com incertezas.

O **bloco 41** corresponde ao cálculo da dimensão do espaço probabilístico. Como neste caso, não existem incertezas em topologias, toma-se o valor um para a variável $TOTTOP$ ($TOTTOP = 1$) Assim sendo, neste caso, a dimensão do espaço probabilístico será dado pelo produto dos valores das variáveis $TOTINT$ (total de incertezas em intercâmbios) e $TOTNPAT$ (total de incertezas em patamares de carga), conforme a **equação (IV-10)** definida no bloco A.1.1, ou seja:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * 1 \quad (IV-10)$$

Exemplo A.1.4: Nesse exemplo, consideraram-se incertezas em cenários de intercâmbios e patamares de carga. A **Figura IV-22** mostra a composição do espaço de estados e o diagrama unifilar do sistema exemplo. O diagrama apresentado na figura é útil para ilustrar o problema tratado, esclarecendo a composição do espaço de estados considerando incertezas em intercâmbios e patamares de carga.

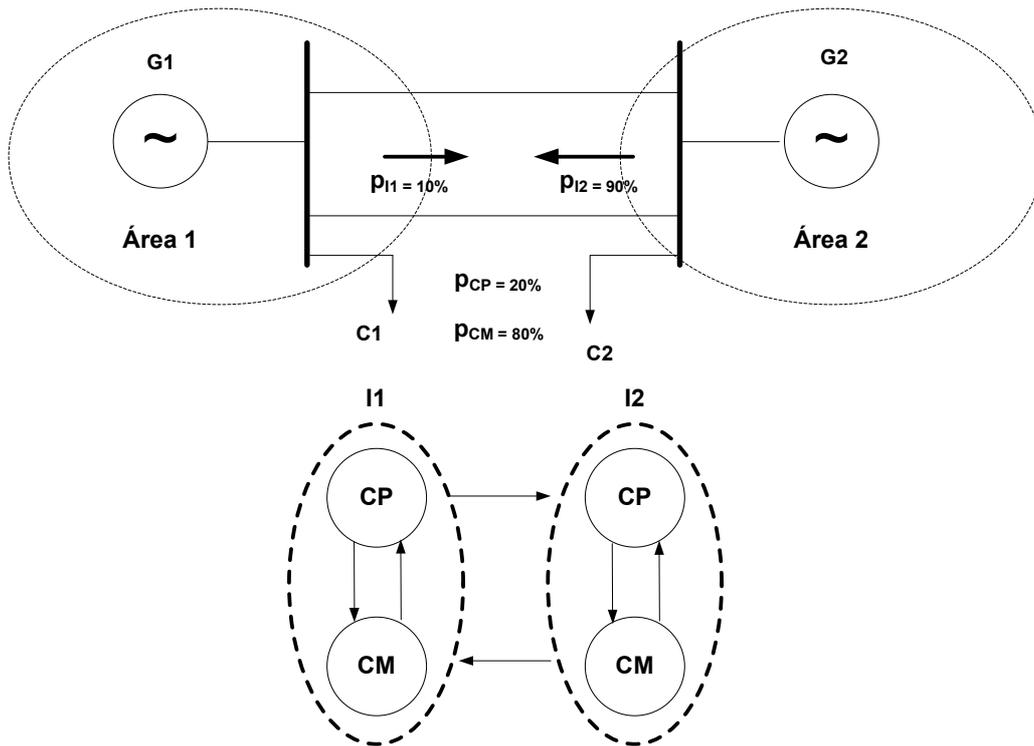


Figura IV-22 – Composição do Espaço de Estados do Sistema Teste 2 Barras Com Incertezas em Intercâmbios e Patamares de Carga

Os símbolos **I1**, **I2**, **CP** e **CM** representados na **Figura IV-22** correspondem aos estados dos componentes modelados estocasticamente, de acordo com as seguintes nomenclaturas:

I1 representa incerteza em cenário de intercâmbio com área 1 como exportadora;

I2 representa incerteza em cenário de intercâmbio com área 2 como exportadora;

CP representa incerteza no patamar de carga pesada;

CM representa incerteza no patamar de carga média;

Admitindo incertezas em dois cenários de intercâmbios e dois patamares de carga, podemos obter para este caso exemplo a seguinte dimensão do espaço probabilístico de cenários:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP$$

$$TOTESP = 2 * 2 * 1 = 4$$

Onde:

$TOTINT = 2$ é o total de incertezas em cenários de intercâmbios;

$TOTNPAT = 2$ é o total de incertezas em patamares de carga;

$TOTTOP = 1$ é o total de incertezas em topologias.

Portanto, neste caso teremos a seguinte composição do espaço de estados e suas respectivas probabilidades são calculadas pela **equação (IV-9)**:

$$P_{estado1} = P_{I1CP} = P_{I1} * P_{CP} = 0,1 * 0,2 = 0,02 = 2\%$$

$$P_{estado2} = P_{I1CM} = P_{I1} * P_{CM} = 0,1 * 0,8 = 0,08 = 8\%$$

$$P_{estado3} = P_{I2CP} = P_{I2} * P_{CP} = 0,9 * 0,2 = 0,18 = 18\%$$

$$P_{estado4} = P_{I2CM} = P_{I2} * P_{CM} = 0,9 * 0,8 = 0,72 = 72\%$$

Onde:

$P_{estado1} = P_{I1CP}$ = probabilidade do estado 1 com incertezas no cenário de intercâmbio 1 e patamar de carga pesada.

$P_{estado2} = P_{I1CM}$ = probabilidade do estado 2 com incertezas no cenário de intercâmbio 1 e patamar de carga média.

$P_{estado3} = P_{I2CP}$ = probabilidade do estado 3 com incertezas no cenário de intercâmbio 2 e patamar de carga pesada.

$P_{estado4} = P_{I2CM}$ = probabilidade do estado 4 com incertezas no cenário de intercâmbio 2 e patamar de carga média.

* * *

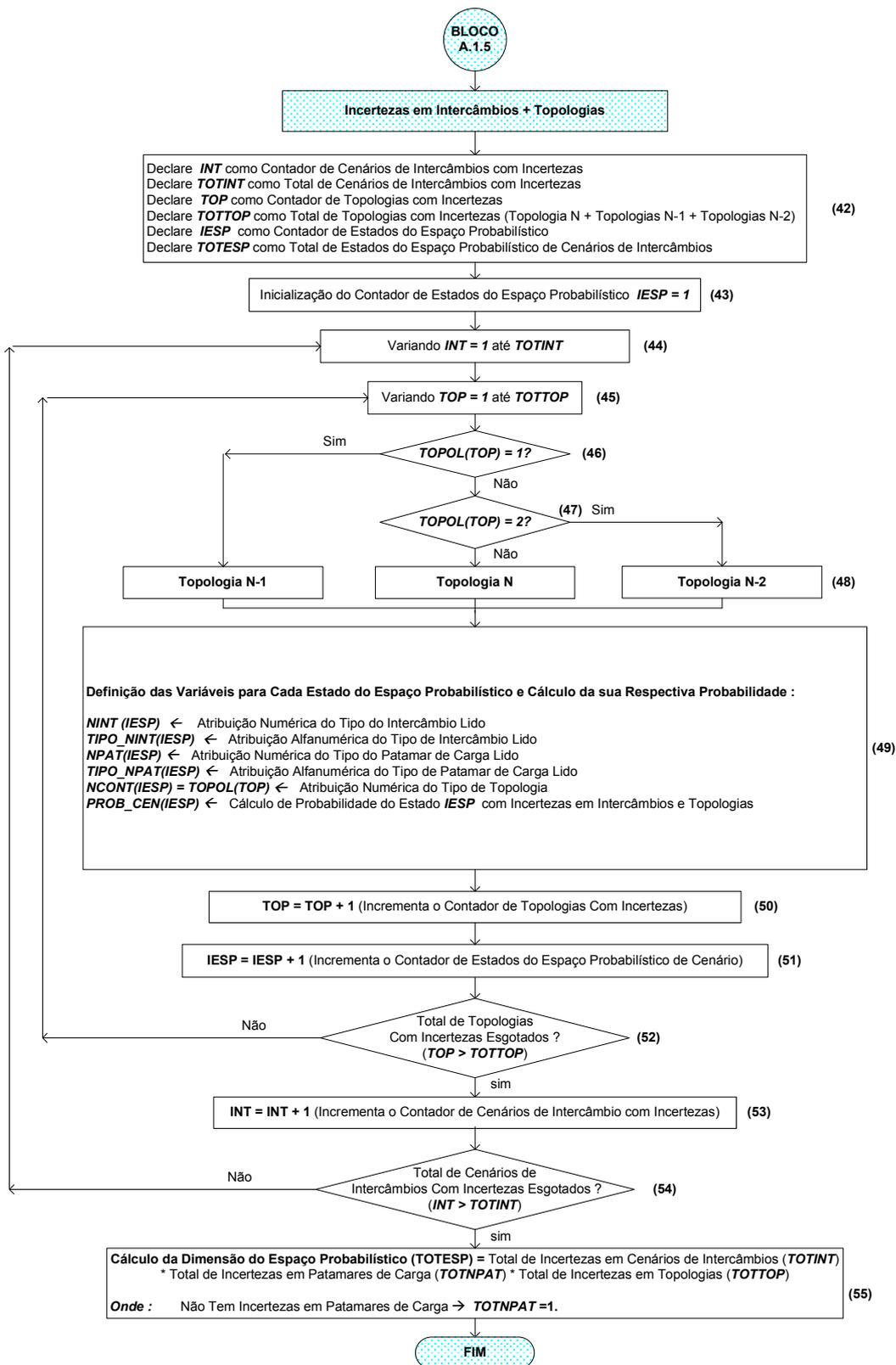


Figura IV-23 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Intercâmbios e Topologias

O procedimento do **bloco A.1.5** (vide **Figura IV-3**) a seguir apresenta o detalhamento para montagem do espaço probabilístico considerando incertezas nos cenários de intercâmbios e topologias, conforme mostrado na **Figura IV-23**. Essa combinação pode ser feita de forma idêntica ao apresentado no bloco A.1.4 anterior. Dessa forma, o procedimento desse bloco é uma combinação dos procedimentos descritos nos blocos A.1.1 e A.1.3 anteriores, com exceção no cálculo da probabilidade dos estados e da dimensão do espaço probabilístico.

Dessa maneira, no **bloco 49** temos que a probabilidade é calculada como produto das probabilidades de ocorrência dos cenários de intercâmbios e topologias, conforme apresentado na **equação (IV-9)**, como segue:

P_{estado} será composto pelo produto da probabilidade dessas duas classes de incertezas (incertezas em intercâmbios e topologias);

Ψ é o conjunto de intercâmbios e topologias com incertezas.

O **bloco 55** efetua o cálculo da dimensão do espaço probabilístico. Tendo em vista que não existem incertezas em patamares de carga, toma-se o valor um para a variável $TOTNPAT$ ($TOTNPAT = 1$). Assim sendo, neste caso, a dimensão do espaço probabilístico será dado pelo produto dos valores das variáveis $TOTINT$ – total de incertezas em intercâmbios e $TOTTOP$ – total de incertezas em topologias, conforme a **equação (IV-10)** definida no bloco A.1.1, ou seja:

$$TOTESP = TOTINT * 1 * TOTTOP \quad (IV-10)$$

Exemplo A.1.5: Considerando o mesmo exemplo A.1.4, reproduzida na **Figura IV-24**, onde os elementos modelados estocasticamente foram os cenários de intercâmbios e topologias até N-2. Assim, considere-se a **Figura IV-24** na qual é apresentado o espaço de estados desse sistema exemplo, assim como o diagrama unifilar com os dados estocásticos.

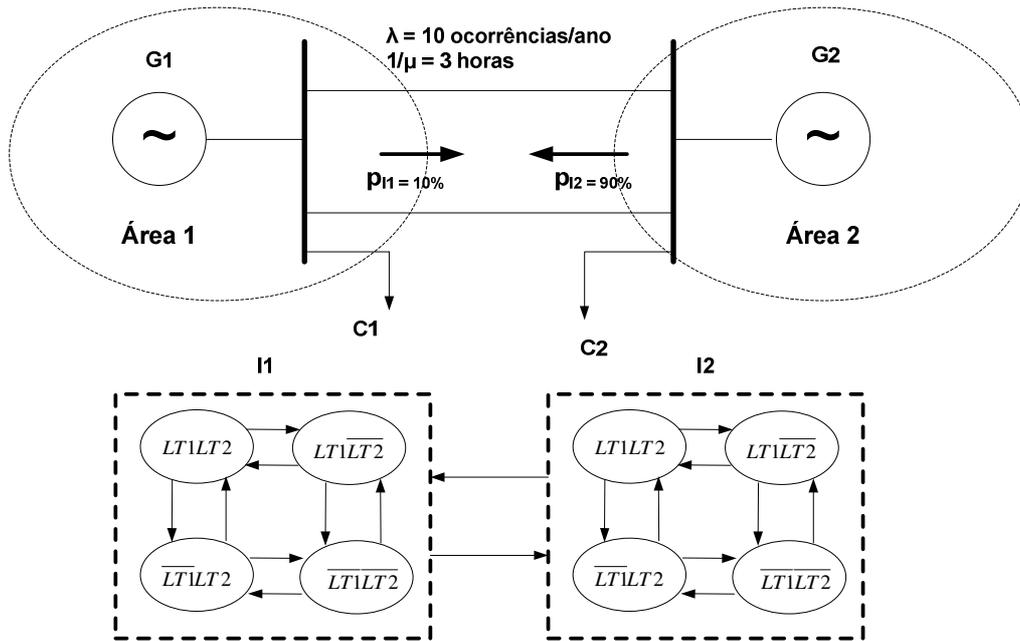


Figura IV-24 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste 2 Barras e o Espaço de Estados Com Incertezas em Intercâmbios e Topologias

Os símbolos **I1**, **I2**, **LT1** e **LT2** representados na **Figura IV-24** correspondem aos estados dos componentes modelados estocasticamente, de acordo com as seguintes nomenclaturas:

I1 está associado ao cenário de intercâmbio com área 1 como exportadora;

I2 está associado ao cenário de intercâmbio com área 2 como exportadora;

LT1 está associado ao circuito 1;

LT2 está associado ao circuito 2;

Admitindo incertezas em dois cenários de intercâmbios e topologias até N-2, podemos obter para este caso exemplo a seguinte dimensão do espaço probabilístico de cenários:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP$$

$$TOTESP = 2 * 1 * 4 = 8$$

Onde:

$TOTINT = 2$ é o total de incertezas em cenários de intercâmbios;

$TOTNPAT = 1$ é o total de incertezas em patamares de carga;

$TOTTOP = 4$ é o total de incertezas em topologias.

Portanto, neste caso teremos um total de 8 estados com a seguinte composição do espaço de estados e probabilidades dada pela **equação (IV-9)**:

$$P_{estado1} = P_{I1LT1LT2} = P_{I1} * P_{LT1LT2} = 0,1 * 0,993192 = 0,0993192 = 9,93192 \%$$

$$P_{estado2} = P_{I1\overline{LT1}LT2} = P_{I1} * P_{\overline{LT1}LT2} = 0,1 * 0,0034013 = 0,00034013 = 0,034013 \%$$

$$P_{estado3} = P_{I1LT1\overline{LT2}} = P_{I1} * P_{LT1\overline{LT2}} = 0,1 * 0,0034013 = 0,00034013 = 0,034013 \%$$

$$P_{estado4} = P_{I1\overline{LT1}\overline{LT2}} = P_{I1} * P_{\overline{LT1}\overline{LT2}} = 0,1 * 0,000011648 = 0,000001165 = 0,0001165 \%$$

$$P_{estado5} = P_{I2LT1LT2} = P_{I2} * P_{LT1LT2} = 0,9 * 0,993192 = 0,893873 = 89,3873 \%$$

$$P_{estado6} = P_{I2\overline{LT1}LT2} = P_{I2} * P_{\overline{LT1}LT2} = 0,9 * 0,0034013 = 0,00306117 = 0,306117 \%$$

$$P_{estado7} = P_{I2LT1\overline{LT2}} = P_{I2} * P_{LT1\overline{LT2}} = 0,9 * 0,0034013 = 0,00306117 = 0,306117 \%$$

$$P_{estado8} = P_{I2\overline{LT1}\overline{LT2}} = P_{I2} * P_{\overline{LT1}\overline{LT2}} = 0,9 * 0,000011648 = 0,000001048 = 0,0001048 \%$$

Onde:

$P_{estado1} = P_{I1LT1LT2}$ = probabilidade do estado 1 com incertezas no cenário de intercâmbio 1 e topologia N (Rede completa).

$P_{estado2} = P_{I1\overline{LT1}LT2}$ = probabilidade do estado 2 com incertezas no cenário de intercâmbio 1 e topologia N-1 (LT1 indisponível).

$P_{estado3} = P_{I1LT1\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 3 com incertezas no cenário de intercâmbio 1 e topologia N-1 (LT2 indisponível).

$P_{estado4} = P_{I1\overline{LT1}\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 4 com incertezas no cenário de intercâmbio 1 e topologia N-2 (LT1 e LT2 indisponíveis)

$P_{estado5} = P_{12LT1LT2}$ = probabilidade do estado 5 com incertezas no cenário de intercâmbio 2 e topologia N (Rede Completa).

$P_{estado6} = P_{12\overline{LT1}LT2}$ = probabilidade do estado 6 com incertezas no cenário de intercâmbio 2 e topologia N-1 (LT1 indisponível).

$P_{estado7} = P_{12LT1\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 7 com incertezas no cenário de intercâmbio 2 e topologia N-1 (LT2 indisponível).

$P_{estado8} = P_{12\overline{LT1}\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 8 com incertezas no cenário de intercâmbio 2 e topologia N-2 (LT1 e LT2 indisponíveis).

É interessante observar que a geração automática do espaço probabilístico do exemplo em questão ilustra o aparecimento de pelo menos dois estados potencialmente *inviáveis* (vide estados 4 e 8). Esses estados são inviáveis porque a ausência das duas linhas de transmissão não permite qualquer cenário de intercâmbio entre as áreas.

* * *

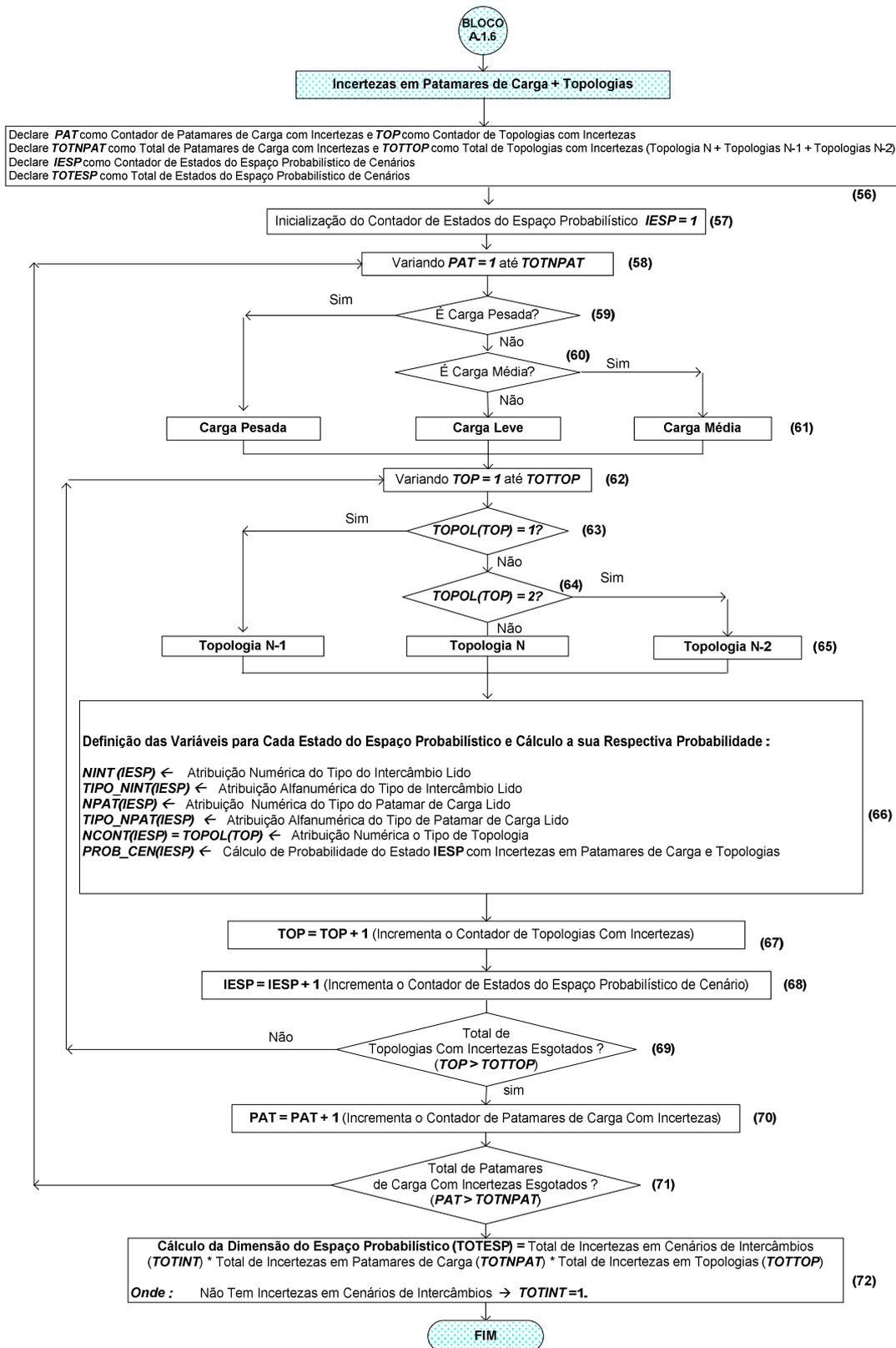


Figura IV-25 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Patamares de Carga e Topologias

Apresentamos no **bloco A.1.6** (vide as Figuras IV-3 e a IV-25) **Figura IV-25** um algoritmo conceitual que se valerá na consideração da composição combinatorial das incertezas oriundas de *patamares de carga e topologias*. Essa avaliação pode ser tratada pela combinação dos dois procedimentos (blocos A.1.2 e A.1.3) anteriormente mencionados. Assim, o **bloco 66** apresenta diferença apenas no cálculo de probabilidades dos estados e na definição do conjunto de incertezas. Portanto, para a **equação (IV-9)** apresentada na seção anterior temos:

p_{estado} é composto pelo produto da probabilidade das duas classes de incertezas (incertezas em patamares de carga e topologias);

Ψ é o conjunto de patamares de carga e topologias com incertezas.

O **bloco 72** corresponde ao cálculo da dimensão do espaço probabilístico. Dado que não existem incertezas em intercâmbios, toma-se o valor um para a variável *TOTINT* ($TOTINT = 1$). Assim sendo, neste caso, a dimensão do espaço probabilístico será dado pelo produto do valor da variável *TOTNPAT* – total de incertezas em patamares de carga e *TOTTOP* – total de incertezas em topologias, conforme a **equação (IV-10)** definida no bloco A.1.1:

$$TOTESP = 1 * TOTNPAT * TOTTOP \quad (IV-10)$$

Exemplo A.1.6: Para o mesmo exemplo A.1.5, reproduzida na **Figura IV-26**, foram consideradas as incertezas em dois patamares de carga (pesada e média) e topologias até N-2.

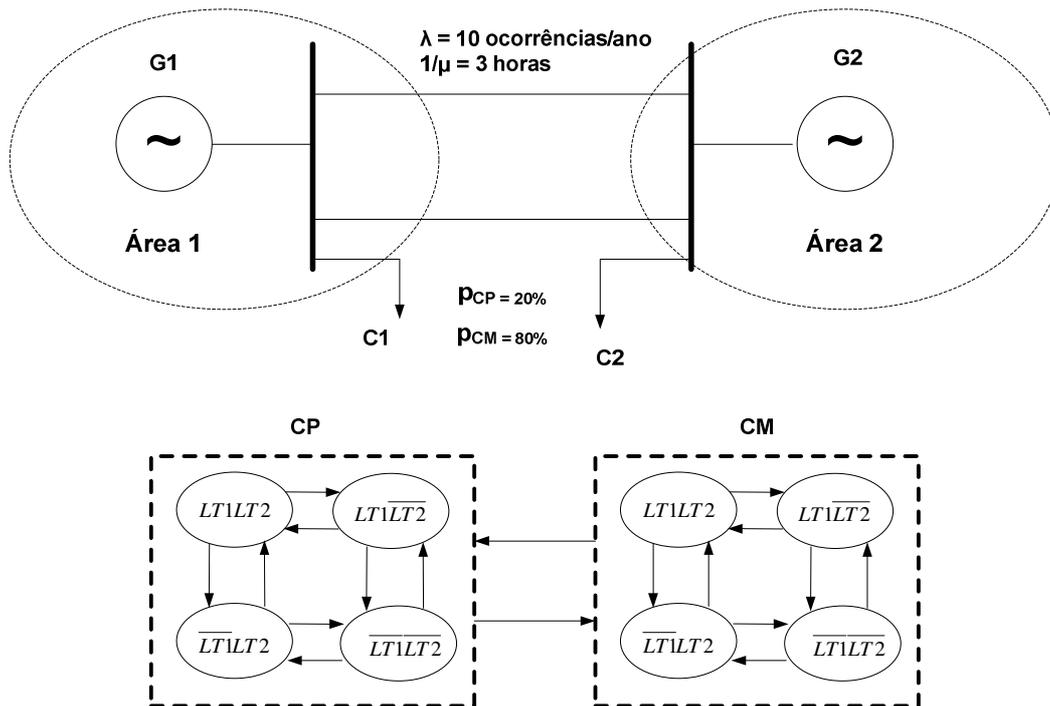


Figura IV-26 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste 2 Barras e o Espaço de Estados Com Incertezas em Patamares de Carga e Topologias

Os símbolos **CP**, **CM**, **LT1** e **LT2** representados na **Figura IV-26** correspondem aos estados dos componentes modelados estocasticamente, de acordo com as seguintes nomenclaturas:

CP está associado ao patamar de carga pesada;

CM está associado ao patamar de carga média;

LT1 está associado ao circuito 1;

LT2 está associado ao circuito 2;

Admitindo incertezas em dois patamares de carga (pesada e média) e topologias até N-2, podemos obter para este caso exemplo a seguinte dimensão do espaço probabilístico de cenários:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP$$

$$TOTESP = 1 * 2 * 4 = 8$$

Onde:

$TOTINT = 1$ é o total de incertezas em cenários de intercâmbios;

$TOTNPAT = 2$ é o total de incertezas em patamares de carga;

$TOTTOP = 4$ é o total de incertezas em topologias.

Portanto, neste caso, de forma idêntica aos exemplos A.1.4 e A.1.5, teremos um total de 8 estados com a seguinte composição do espaço de estados e probabilidades dada pela **equação (IV-9)**:

$$P_{estado1} = P_{CPLT\backslash LT2} = P_{CP} * P_{LT\backslash LT2} = 0,2 * 0,993192 = 0,198638 = 19,8638 \%$$

$$P_{estado2} = P_{CPLT\backslash \overline{LT2}} = P_{CP} * P_{\overline{LT}\backslash LT2} = 0,2 * 0,0034013 = 0,00068026 = 0,068026 \%$$

$$P_{estado3} = P_{CPLT\backslash \overline{\overline{LT2}}} = P_{CP} * P_{LT\backslash \overline{\overline{LT2}}} = 0,2 * 0,0034013 = 0,00068026 = 0,068026 \%$$

$$P_{estado4} = P_{CPLT\backslash \overline{\overline{\overline{LT2}}}} = P_{CP} * P_{\overline{\overline{LT}}\backslash \overline{\overline{LT2}}} = 0,2 * 0,000011648 = 0,00000233 = 0,000233 \%$$

$$P_{estado5} = P_{CMLT\backslash LT2} = P_{CM} * P_{LT\backslash LT2} = 0,8 * 0,993192 = 0,794554 = 79,4554 \%$$

$$P_{estado6} = P_{CMLT\backslash \overline{LT2}} = P_{CM} * P_{\overline{LT}\backslash LT2} = 0,8 * 0,0034013 = 0,0027210 = 0,27210 \%$$

$$P_{estado7} = P_{CMLT\backslash \overline{\overline{LT2}}} = P_{CM} * P_{LT\backslash \overline{\overline{LT2}}} = 0,8 * 0,0034013 = 0,0027210 = 0,27210 \%$$

$$P_{estado8} = P_{CMLT\backslash \overline{\overline{\overline{LT2}}}} = P_{CM} * P_{\overline{\overline{LT}}\backslash \overline{\overline{LT2}}} = 0,8 * 0,000011648 = 0,000009318 = 0,0009318 \%$$

Onde:

$P_{estado1} = P_{CPLT\backslash LT2}$ = probabilidade do estado 1 com incertezas no patamar de carga pesada e topologia N (Rede completa).

$P_{estado2} = P_{CPLT\backslash \overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 2 com incertezas no patamar de carga pesada e topologia N-1 (LT1 indisponível).

$P_{estado3} = P_{CPLT\backslash \overline{\overline{LT2}}}$ = probabilidade do estado 3 com incertezas no patamar de carga pesada e topologia N-1 (LT2 indisponível).

$P_{estado4} = P_{CPLT\backslash \overline{\overline{\overline{LT2}}}}$ = probabilidade do estado 4 com incertezas no patamar de carga pesada e topologia N-2 (LT1 e LT2 indisponíveis).

$P_{estado5} = P_{CMLT\overline{1}LT2}$ = probabilidade do estado 5 com incertezas no patamar de carga média e topologia N (Rede Completa).

$P_{estado6} = P_{CM\overline{LT}1\overline{LT}2}$ = probabilidade do estado 6 com incertezas no patamar de carga média e topologia N-1 (LT1 indisponível).

$P_{estado7} = P_{CMLT\overline{1}LT2}$ = probabilidade do estado 7 com incertezas no patamar de carga média e topologia N-1 (LT2 indisponível).

$P_{estado8} = P_{CM\overline{LT}1\overline{LT}2}$ = probabilidade do estado 8 com incertezas no patamar de carga média e topologia N-2 (LT1 e LT2 indisponíveis).

* * *

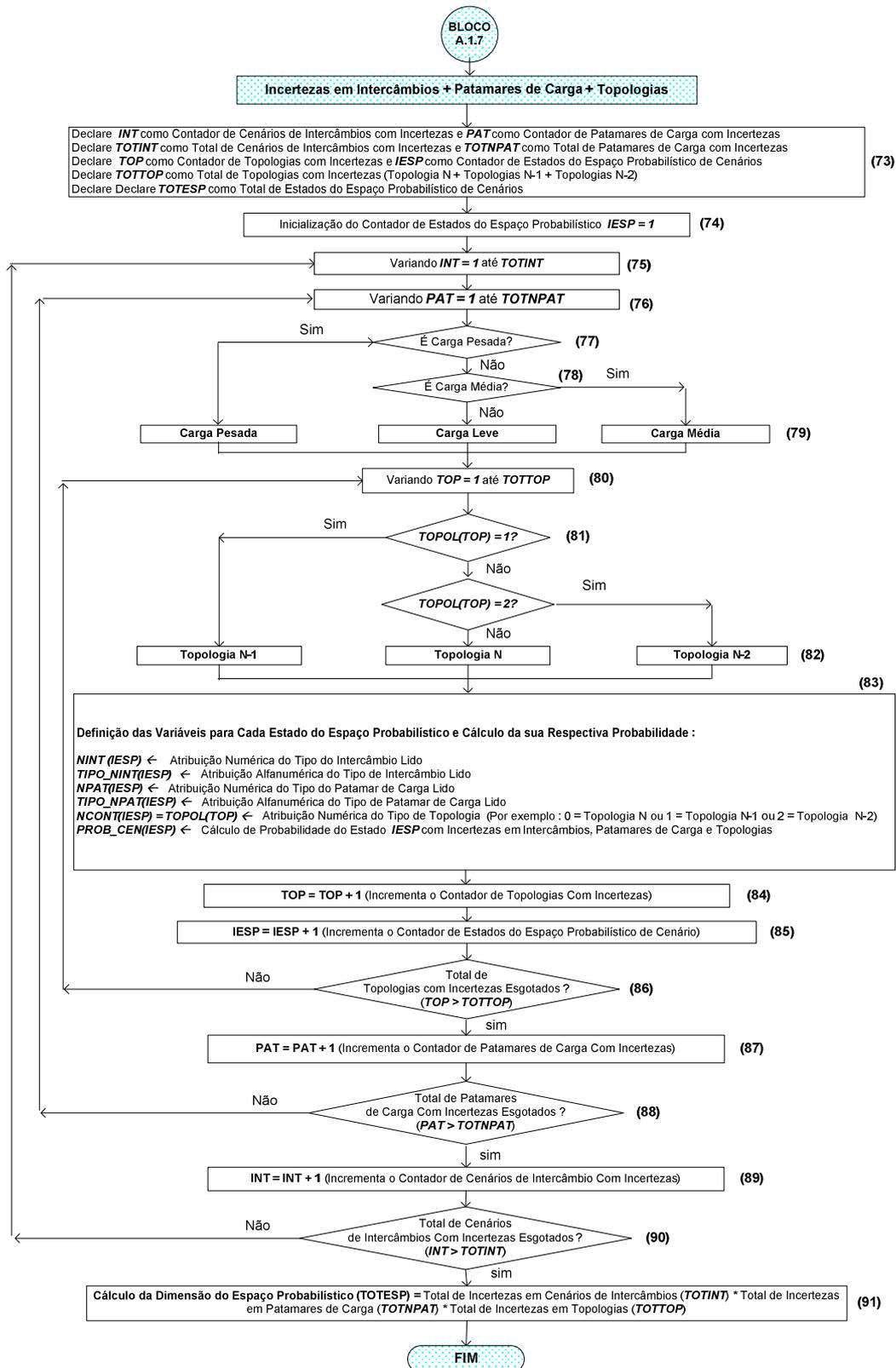


Figura IV-27 – Construção do Espaço Probabilístico Com Incertezas em Intercâmbios, Patamares de Carga e Topologias

Finalmente, neste **bloco A.1.7** (vide **Figuras IV-3 e IV-27**) considera-se a combinação das três categorias de incertezas em cenários. Assim, os blocos 73 a 91 correspondem à combinação dos três procedimentos descritos anteriormente nos blocos A.1.1, A.1.2 e A.1.3. Cabe destacar que no bloco 83 a diferença está apenas no cálculo de probabilidade de cada estado e da dimensão do espaço probabilístico, onde neste caso é calculada combinação das três categorias de incertezas (intercâmbios, patamares de carga e topologias).

Para o cálculo de probabilidade de cada estado, dada pela **equação (IV-9)**, teremos os parâmetros dessa equação definidos por:

p_{estado} é composto pelo produto da probabilidade das três classes de incertezas (incertezas em intercâmbios, patamares de carga e topologias);

Ψ é o conjunto de incertezas em intercâmbios, patamares de carga e topologias.

Assim sendo, no bloco 91 temos para o cálculo da dimensão do espaço probabilístico o produto das variáveis $TOTINT$ - total de incertezas em intercâmbios, $TOTNPAT$ - total de incertezas em patamares de carga e $TOTTOP$ - total de incertezas em topologias, conforme a **equação (IV-10)** definida no bloco A.1.1, ou seja:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP \quad (IV-10)$$

Exemplo A.1.7: Para se ter uma idéia da dimensão do problema, considere-se as incertezas nas três categorias anteriormente tratadas, ou seja, em intercâmbios, patamares de carga e topologias até N-2. Considere-se o diagrama unifilar da **Figura IV-28**, no qual as probabilidades dos componentes de cenários e o espaço de estados deste exemplo estão mostrados em destaque no detalhe. A seguinte notação foi adotada:

I1 está associado ao cenário de intercâmbio com área 1 exportadora;

I2 está associado ao cenário de intercâmbio com área 2 exportadora;

CP está associado ao patamar de carga pesada;

CM está associado ao patamar de carga média;

LT1 está associado ao circuito 1;

LT2 está associado ao circuito 2.

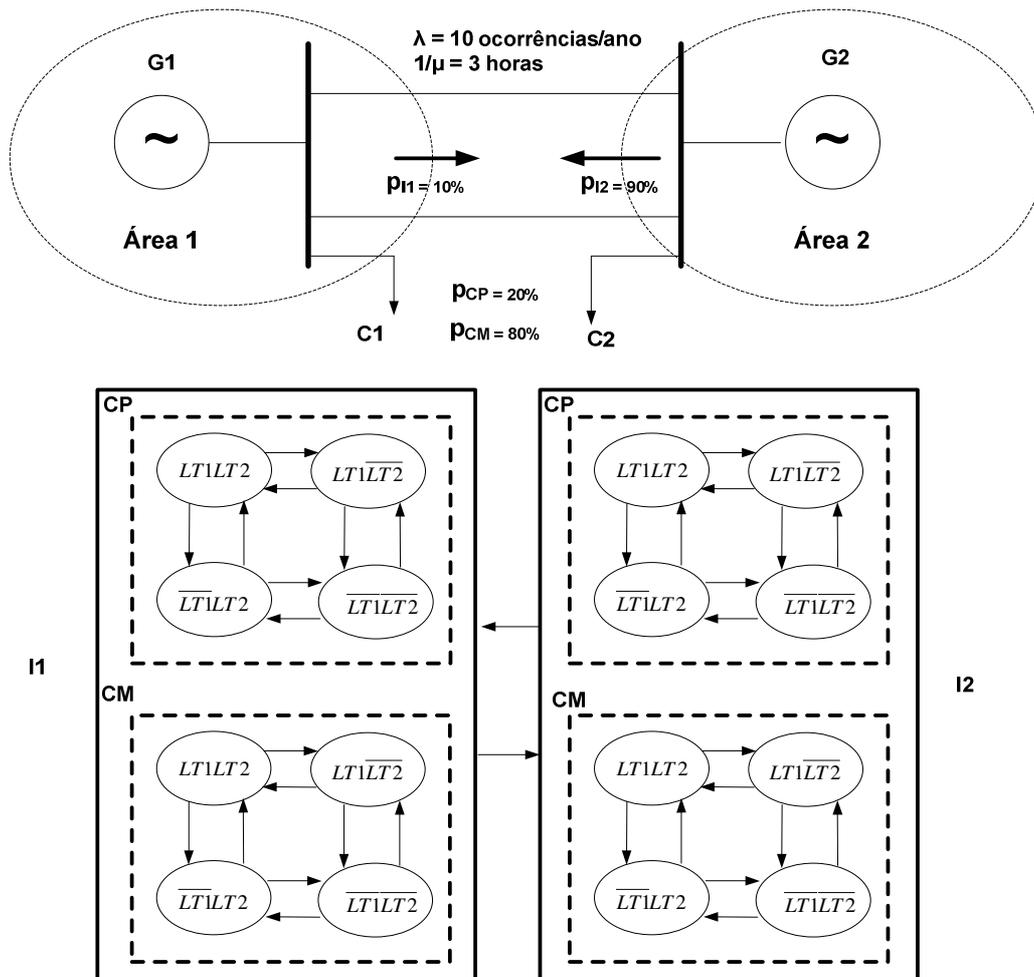


Figura IV-28 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste 2 Barras e o Espaço de Estados Com Incertezas em Intercâmbios, Patamares de Carga e Topologias

Admitindo incertezas em dois cenários de intercâmbios, dois patamares de carga (pesada e média) e topologias até N-2, podemos obter para este caso exemplo a seguinte dimensão do espaço probabilístico de cenários:

$$TOTESP = TOTINT * TOTNPAT * TOTTOP$$

$$TOTESP = 2 * 2 * 4 = 16$$

Onde:

$TOTINT = 2$ é o total de incertezas em cenários de intercâmbios;

$TOTNPAT = 2$ é o total de incertezas em patamares de carga;

$TOTTOP = 4$ é o total de incertezas em topologias.

Neste caso, teremos um total de 16 estados com o seguinte espaço de estados e o cálculo de suas respectivas probabilidades dada pela **equação (IV-9)**:

$$P_{estado1} = P_{I1CPLT\bar{1}LT2} = P_{I1} * P_{CP} * P_{LT\bar{1}LT2} = 0,1 * 0,2 * 0,993192 = 1,98638\%$$

$$P_{estado2} = P_{I1CPL\bar{T}1LT2} = P_{I1} * P_{CP} * P_{\bar{L}T1LT2} = 0,1 * 0,2 * 0,0034013 = 0,0068026\%$$

$$P_{estado3} = P_{I1CPLT\bar{1}\bar{L}T2} = P_{I1} * P_{CP} * P_{LT\bar{1}\bar{L}T2} = 0,1 * 0,2 * 0,0034013 = 0,0068026\%$$

$$P_{estado4} = P_{I1CPL\bar{T}\bar{1}\bar{L}T2} = P_{I1} * P_{CP} * P_{\bar{L}\bar{T}\bar{1}\bar{L}T2} = 0,1 * 0,2 * 0,000011648 = 0,0000233\%$$

$$P_{estado5} = P_{I1CMLT\bar{1}LT2} = P_{I1} * P_{CM} * P_{LT\bar{1}LT2} = 0,1 * 0,8 * 0,993192 = 7,94554\%$$

$$P_{estado6} = P_{I1CML\bar{T}1LT2} = P_{I1} * P_{CM} * P_{\bar{L}T1LT2} = 0,1 * 0,8 * 0,0034013 = 0,027210\%$$

$$P_{estado7} = P_{I1CMLT\bar{1}\bar{L}T2} = P_{I1} * P_{CM} * P_{LT\bar{1}\bar{L}T2} = 0,1 * 0,8 * 0,0034013 = 0,027210\%$$

$$P_{estado8} = P_{I1CML\bar{T}\bar{1}\bar{L}T2} = P_{I1} * P_{CM} * P_{\bar{L}\bar{T}\bar{1}\bar{L}T2} = 0,1 * 0,8 * 0,000011648 = 0,00009318\%$$

$$P_{estado9} = P_{I2CPLT\bar{1}LT2} = P_{I2} * P_{CP} * P_{LT\bar{1}LT2} = 0,9 * 0,2 * 0,993192 = 17,87746\%$$

$$P_{estado10} = P_{I2CPL\bar{T}1LT2} = P_{I2} * P_{CP} * P_{\bar{L}T1LT2} = 0,9 * 0,2 * 0,0034013 = 0,0612334\%$$

$$P_{estado11} = P_{I2CPLT\bar{1}\bar{L}T2} = P_{I2} * P_{CP} * P_{LT\bar{1}\bar{L}T2} = 0,9 * 0,2 * 0,0034013 = 0,0612234\%$$

$$P_{estado12} = P_{I2CPL\bar{T}\bar{1}\bar{L}T2} = P_{I2} * P_{CP} * P_{\bar{L}\bar{T}\bar{1}\bar{L}T2} = 0,9 * 0,2 * 0,000011648 = 0,0002097\%$$

$$P_{estado13} = P_{I2CMLT\bar{1}LT2} = P_{I2} * P_{CM} * P_{LT\bar{1}LT2} = 0,9 * 0,8 * 0,993192 = 71,5098\%$$

$$P_{estado14} = P_{I2CML\bar{T}1LT2} = P_{I2} * P_{CM} * P_{\bar{L}T1LT2} = 0,9 * 0,8 * 0,0034013 = 0,244894\%$$

$$P_{estado15} = P_{I2CMLT\bar{1}\bar{L}T2} = P_{I2} * P_{CM} * P_{LT\bar{1}\bar{L}T2} = 0,9 * 0,8 * 0,0034013 = 0,244894\%$$

$$P_{estado16} = P_{I2CM\overline{LT1LT2}} = P_{I2} * P_{CM} * P_{\overline{LT1LT2}} = 0,9 * 0,8 * 0,000011648 = 0,0008387 \%$$

Onde:

$P_{estado1} = P_{I1CPLT1LT2}$ = probabilidade do estado 1 com incertezas no cenário de intercâmbio 1, patamar de carga pesada e topologia N (*Rede completa*).

$P_{estado2} = P_{I1CP\overline{LT1LT2}}$ = probabilidade do estado 2 com incertezas no cenário de intercâmbio 1, patamar de carga pesada e topologia N-1 (*LT1 indisponível*).

$P_{estado3} = P_{I1CPLT1\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 3 com incertezas no cenário de intercâmbio 1, patamar de carga pesada e topologia N-1 (*LT2 indisponível*).

$P_{estado4} = P_{I1CP\overline{LT1LT2}}$ = probabilidade do estado 4 com incertezas no cenário de intercâmbio 1, patamar de carga pesada e topologia N-2 (*LT1 e LT2 indisponíveis*).

$P_{estado5} = P_{I1CMLT1LT2}$ = probabilidade do estado 5 com incertezas no cenário de intercâmbio 1, patamar de carga média e topologia N (*Rede Completa*).

$P_{estado6} = P_{I1CM\overline{LT1LT2}}$ = probabilidade do estado 6 com incertezas no cenário de intercâmbio 1, patamar de carga média e topologia N-1 (*LT1 indisponível*).

$P_{estado7} = P_{I1CMLT1\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 7 com incertezas no cenário de intercâmbio 1, patamar de carga média e topologia N-1 (*LT2 indisponível*).

$P_{estado8} = P_{I1CM\overline{LT1LT2}}$ = probabilidade do estado 8 com incertezas no cenário de intercâmbio 1, patamar de carga média e topologia N-2 (*LT1 e LT2 indisponíveis*).

$P_{estado9} = P_{I2CPLT1LT2}$ = probabilidade do estado 1 com incertezas no cenário de intercâmbio 2, patamar de carga pesada e topologia N (*Rede completa*).

$P_{estado10} = P_{I2CP\overline{LT1LT2}}$ = probabilidade do estado 2 com incertezas no cenário de intercâmbio 2, patamar de carga pesada e topologia N-1 (*LT1 indisponível*).

$P_{estado11} = P_{I2CPLT1\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 3 com incertezas no cenário de intercâmbio 2, patamar de carga pesada e topologia N-1 (*LT2 indisponível*).

$P_{estado12} = P_{I2CP\overline{LT1}\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 4 com incertezas no cenário de intercâmbio 2, patamar de carga pesada e topologia N-2 (*LT1 e LT2 indisponíveis*).

$P_{estado13} = P_{I2CMLT1\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 5 com incertezas no cenário de intercâmbio 2, patamar de carga média e topologia N (*Rede Completa*).

$P_{estado14} = P_{I2CM\overline{LT1}\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 6 com incertezas no cenário de intercâmbio 2, patamar de carga média e topologia N-1 (*LT1 indisponível*).

$P_{estado15} = P_{I2CMLT1\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 7 com incertezas no cenário de intercâmbio 2, patamar de carga média e topologia N-1 (*LT2 indisponível*).

$P_{estado16} = P_{I2CM\overline{LT1}\overline{LT2}}$ = probabilidade do estado 8 com incertezas no cenário de intercâmbio 2, patamar de carga média e topologia N-2 (*LT1 e LT2 indisponíveis*).

* * *

Adendo ao Capítulo IV: Ruídos

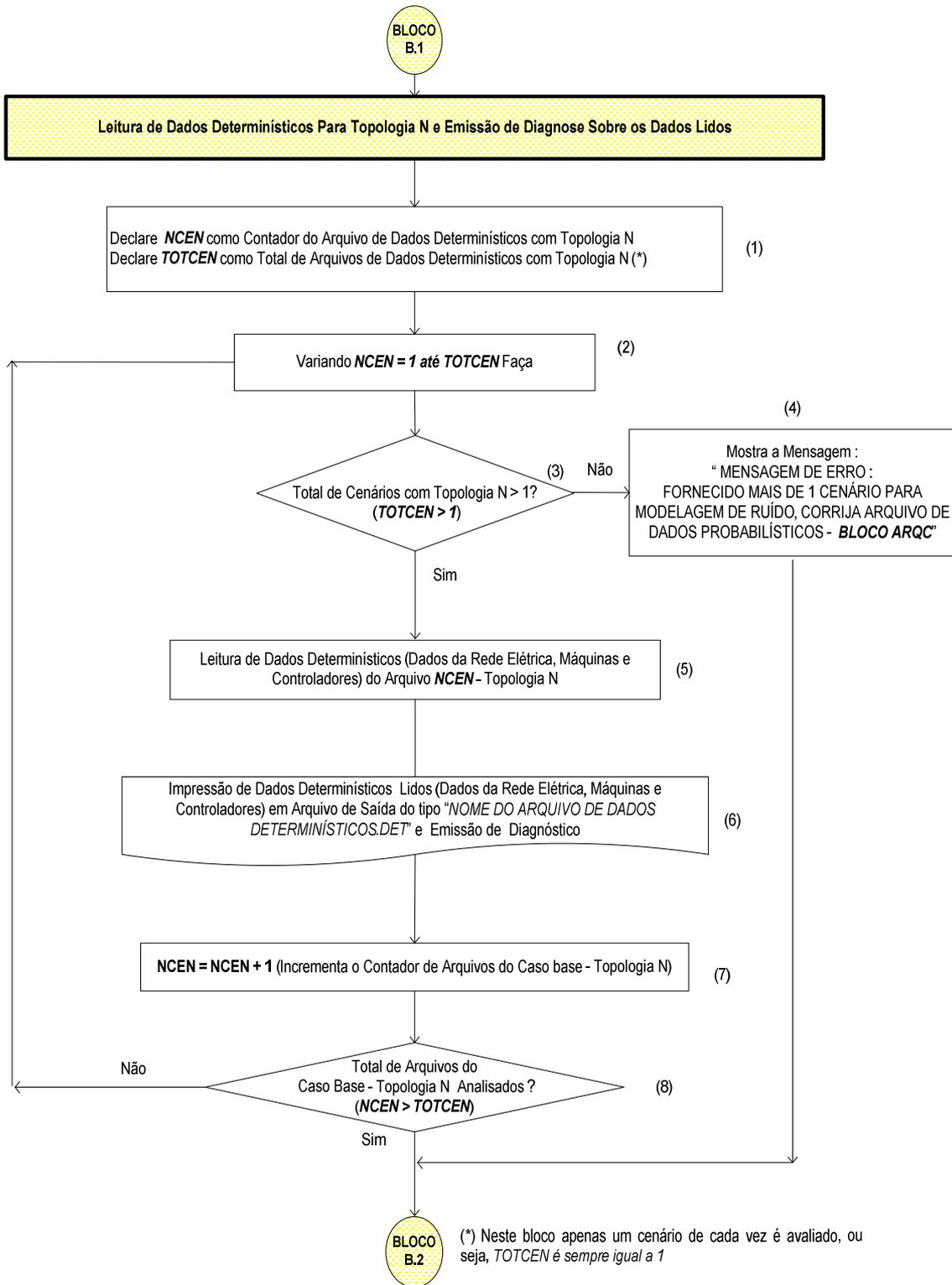


Figura IV-29 – Leitura de Dados Determinísticos de um Cenário

Tomando como referência o **bloco B.1** da **Figura IV-11**, o **bloco 1** da **Figura IV-29** corresponde à declaração de variáveis do procedimento computacional descrito a seguir. As seguintes variáveis são declaradas:

- *NCEN* é o contador de arquivo de cenários com topologia N;
- *TOTCEN* é o total de arquivos de cenários com topologia N.

O **bloco 2** faz variar o contador de cenários - *NCEN* , partindo-se do valor 1 até atingir o valor total de cenários - *TOTCEN* . Para cada cenário selecionado - *NCEN* executam-se os blocos 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Neste procedimento apenas um cenário de cada vez é avaliado, e portanto o *TOTCEN* é sempre igual a um. Logo, a avaliação de ruídos para diferentes cenários faz-se necessário alterar o procedimento computacional proposto. Portanto, se o usuário fornecer mais de um cenário, o programa mostrará uma mensagem de erro conforme descrita no bloco 4 e finaliza a execução do programa.

O **bloco 3** é indicativo da verificação se mais de um cenário foi fornecido pelo usuário. Em caso negativo, mostrará a seguinte mensagem de erro : “*Fornecido Mais de 1 Cenário para Modelagem de Ruído, Corrija Arquivo de Dados Probabilísticos - BLOCO ARQC*”, caso afirmativo executa-se o **bloco 5** para leitura de dados determinísticos (dados da rede elétrica, máquinas e controladores) do cenário *NCEN* fornecido.

O **bloco 6** representa a etapa de armazenamento dos dados determinísticos lidos no bloco 3 e emissão de diagnóstico dos dados lidos em um arquivo de saída do tipo “*Nome do Arquivo de Dados Determinísticos.det*”.

No **bloco 7** efetua-se o incremento do contador de cenários com ruídos - $NCEN = NCEN + 1$.

O **bloco 8** é indicativo da verificação se o total de cenários com ruídos foram esgotados ou se o novo cenário com ruídos deve ser processado. Em caso afirmativo, deve executar a ação do **bloco B.2**, caso contrário executa-se o **bloco 2** para selecionar um novo cenário.

O bloco **B.2** da **Figura IV-11** é auto-explicativo.

* * *

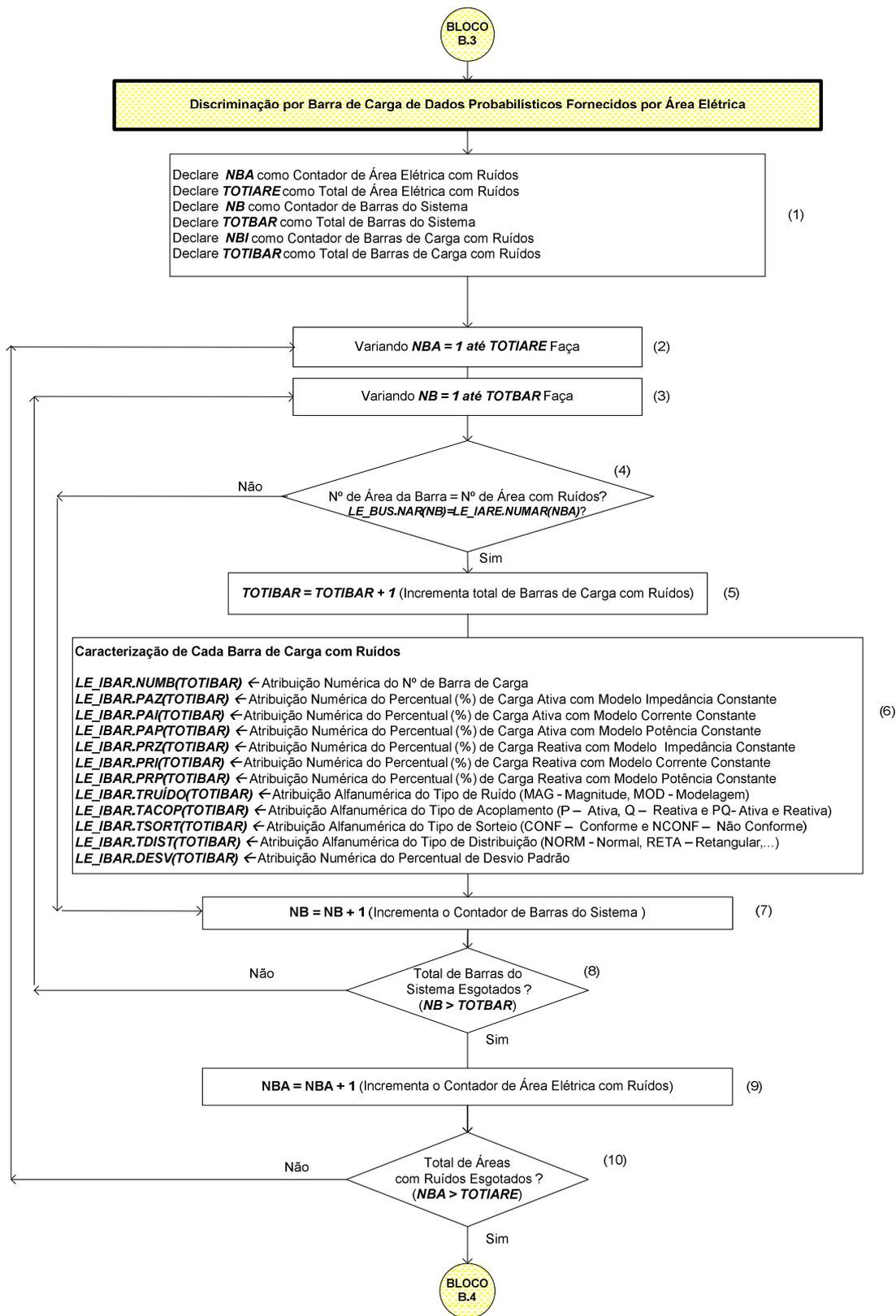


Figura IV-30 – Discriminação por Barras de Dados Probabilísticos Lidos por Área Elétrica

Este **bloco B.3** (ver **Figura IV-11**) é processado quando as incertezas forem fornecidas por área elétrica. O propósito deste bloco é discriminar as incertezas por barra de carga.

O **bloco 1** da **Figura IV-30** corresponde à declaração de variáveis do procedimento computacional:

- *NBA* é o contador de área elétrica com ruídos;
- *TOTIARE* é total de área elétrica com ruídos;
- *NB* é o contador de barras do sistema;
- *TOTBAR* é o total de barras do sistema;
- *NBI* é o contador de barras de carga com ruídos;
- *TOTIBAR* é o total de barras de carga com ruídos.

O **bloco 2** faz variar o contador de área elétrica com ruídos – *NBA*, inicializando-se do valor 1 até atingir o valor total de área elétrica com ruídos – *TOTIARE*. Para cada área elétrica com ruído selecionada – *NBA*, executam-se os blocos 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 até atingir o critério de parada definido no bloco 10 – total de área elétrica com ruídos esgotada ($NBA > TOTIARE$).

O **bloco 3** faz variar o contador de barras do sistema – *NB*, inicializando-se do valor 1 até atingir o valor total de barras do sistema – *TOTBAR*.

O **bloco 4** verifica se o número de área da barra do sistema selecionada – *NB* no bloco anterior é igual ao número de área elétrica com ruídos – *NBA*. Em caso afirmativo, deve executar a ação do **bloco 5** que consiste em incrementar o contador de total de barras de carga com ruídos, caso contrário executa-se o **bloco 7** para incrementar o contador de barras do sistema e selecionar uma nova barra – *NB*.

Em seguida, no **bloco 6** definem-se variáveis para caracterizar e armazenar os dados determinísticos e probabilísticos para cada barra de carga com ruídos. Todas as atribuições são originadas dos dados determinísticos e probabilísticos lidos na etapa inicial do protótipo.

O **bloco 8** é indicativo da verificação se o total de barras do sistema foi esgotado ou se a nova barra do sistema deve ser selecionada. Em caso afirmativo deve executar a ação do **bloco 9** para incrementar o contador de área elétrica com ruídos, caso contrário executa-se o bloco 3 para selecionar nova barra do sistema.

O **bloco 10** é indicativo da verificação se o total de áreas com ruídos foi esgotado ou se a nova área deve ser selecionada. Em caso afirmativo deve executar a ação do bloco B.4, caso contrário executa-se o bloco 2 para selecionar nova área elétrica com ruído.

Portanto, após o processamento deste bloco teremos identificados todas as barras de carga com ruídos e os respectivos dados probabilísticos lidos (ruído na modelagem ou na magnitude da carga, sorteio conforme ou não conforme, ruído na potência ativa P ou potência reativa Q ou PQ, tipologia de distribuição probabilística: normal, retangular, triangular, Weibull, lognormal, Laplace, exponencial e o desvio padrão). Temos também computação do total de barras de carga com ruídos – *TOTIBAR* (vide Seção III.2.2.4).

* * *

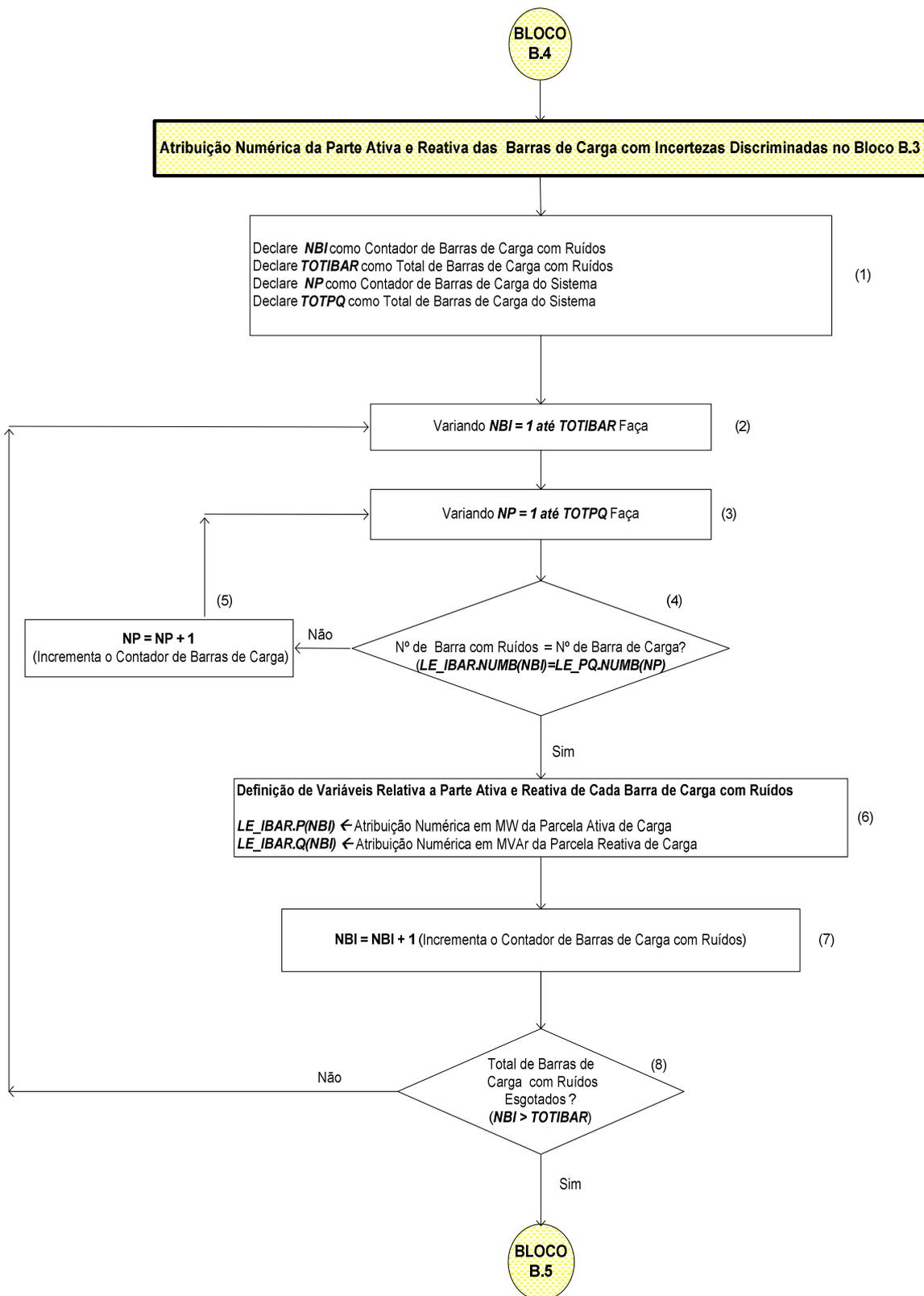


Figura IV-31 – Atribuição Numérica de Ruídos nas Partes Ativa e Reativa de Barras de Carga

Tomando como referência o **bloco B.4** da **Figura IV-11**, o **bloco 1** da **Figura IV-31** corresponde à declaração de variáveis do procedimento computacional descrito a seguir:

- *NBI* é o contador de barras de carga com ruídos;
- *TOTIBAR* é total de barras de carga com ruídos, obtido após término de execução do bloco B.3 anterior;
- *NP* é o contador de barras de carga – PQ do sistema;
- *TOTPQ* é o total de barras de carga – PQ do sistema.

O **bloco 2** faz variar o contador de barras de carga com ruídos – *NBI* , inicializando-se do valor 1 até atingir o valor total de barra de carga com ruídos – *TOTIBAR* .

O **bloco 3** faz variar o contador de barras de carga do sistema – *NP* , inicializando-se do valor 1 até atingir o valor total de barra de carga do sistema – *TOTPQ* . Para cada barra de carga do sistema selecionada – *NP* , executa-se o **bloco 4** para verificar se a barra de carga com ruído – *NBI* é idêntica a barra de carga – *NP* selecionada. Em caso negativo, executa-se o **bloco 5** para selecionar uma nova barra de carga do sistema *NP* . No caso afirmativo irá processar o bloco 6 seguinte.

No **bloco 6** define-se uma variável para carga ativa da barra e outra para carga reativa. Nestas variáveis são armazenadas para cada barra de carga com ruídos, o valor numérico em MW da parcela ativa e em MVAR da parcela reativa lidas dos dados determinísticos.

O **bloco 8** é indicativo da verificação se o total de barras de carga com ruídos foi esgotado ou se a nova barra deve ser selecionada. Em caso afirmativo deve executar a ação do bloco B.5, caso contrário executa-se o bloco 2 para selecionar nova barra de carga com ruído.

Após término de execução deste bloco, as barras de cargas com ruídos estarão identificados através de variáveis *LE_IBAR.P* e *LE_IBAR.Q* , onde são computados respectivamente os valores numéricos de carga ativa em MW/reactiva em MVAR.

* * *

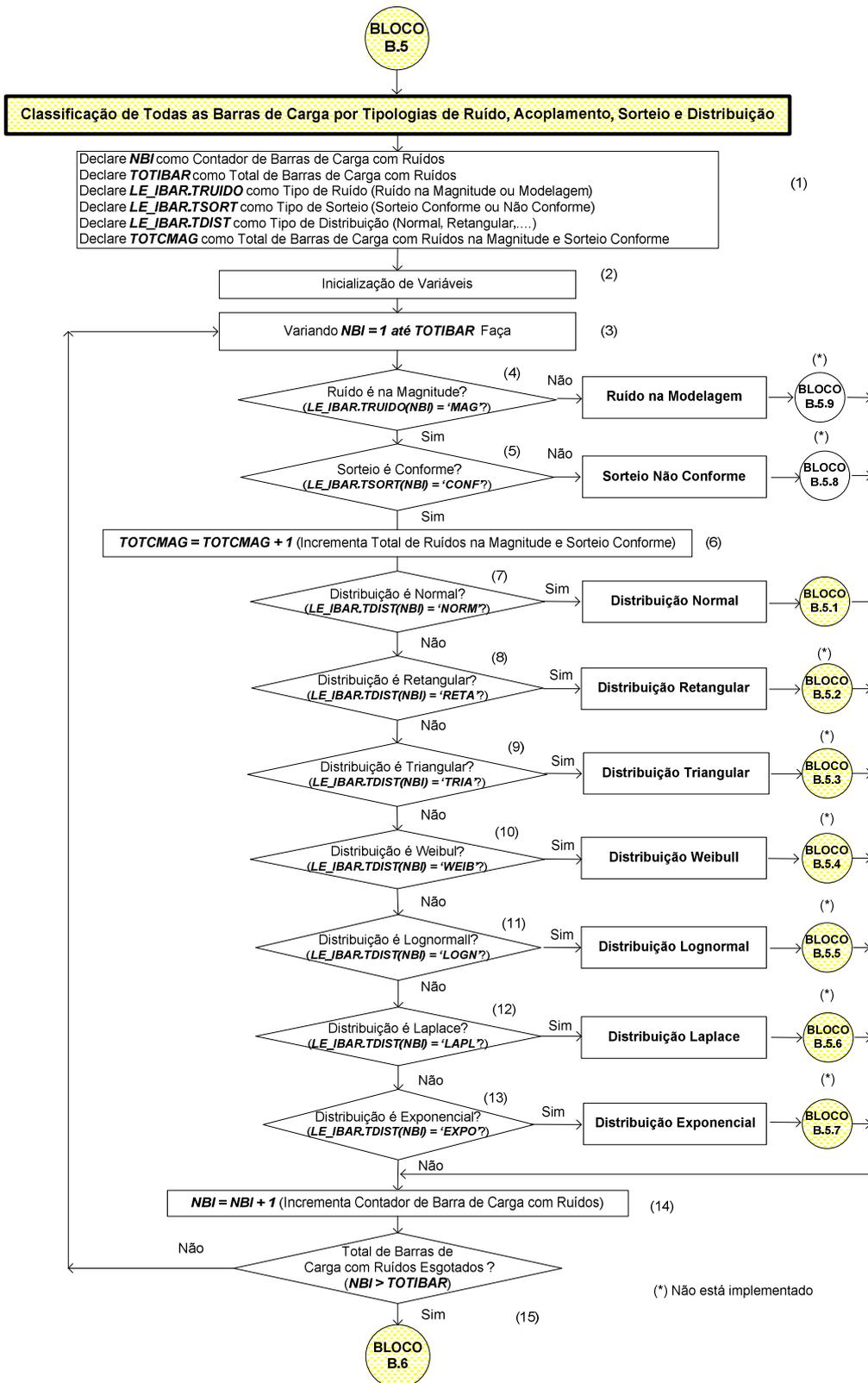


Figura IV-32 – Classificação das Barras por Tipologias de Ruído, Acoplamento, Sorteio e Distribuição Probabilística

O **bloco B.5** (vide Figura IV-11) apresentado na **Figura IV-32** representa a etapa da classificação de todas as barras de carga por tipologias de ruídos (*magnitude ou modelagem da carga*), por tipo de sorteio (*conforme ou não conforme*), pelo tipo de distribuição probabilística (*normal, retangular, triangular, Weibull, lognormal, Laplace, exponencial*) e pelo tipo de acoplamento (*incertezas somente na parte ativa ou somente na parte reativa ou em ambas*).

O **bloco 1** da **Figura IV-32** corresponde à declaração de variáveis deste procedimento computacional:

- *NBI* é o contador de barras de carga com ruídos;
- *TOTIBAR* é total de barras de carga com ruídos;
- *LE_IBAR.TRUIDO* é o tipo de ruído na carga;
- *LE_IBAR.SORTEIO* é o tipo de sorteio;
- *LE_IBAR.TDIST* é o tipo de distribuição probabilística;
- *TOTCMAG* é total de barras de carga com ruídos na magnitude e sorteio conforme;

No **bloco 2** inicializam-se algumas variáveis de interesse durante a execução deste bloco B.5.

Neste **bloco 3** a variável *loop NBI* – contador de barras de carga com ruídos, inicia do valor um até atingir *TOTIBAR* – total de barras de carga com ruídos.

No **bloco 4**, para cada barra de carga com ruído selecionada – *NBI*, verifica se o ruído é na magnitude da carga. Em caso afirmativo, executa o bloco 5 para identificar o tipo de sorteio. Em caso negativo, o ruído é na modelagem da carga e o bloco B.5.9 é executado.

O **bloco 5** é indicativo da verificação se o tipo de sorteio é conforme. Caso afirmativo, deve executar a ação do bloco 6 para incrementar o total de barras de carga com ruídos

na magnitude e sorteio conforme – *TOTCMAG* , caso contrário executa-se o bloco B.5.8 para efetuar o tipo de sorteio não conforme.

Os **bloco 7 a 13** representam a verificação do tipo de distribuição probabilística definido pelo usuário no arquivo de dados probabilísticos. Dependendo do tipo de distribuição considerado, podem ser processados **bloco B.5.1 a B.5.7** como segue:

- (a) Se o tipo de distribuição for *normal*, processa o **bloco B.5.1** e em seguida o **bloco 14** para incrementar o contador de barras de carga com ruídos – *NBI* ;
- (b) Se o tipo de distribuição for *retangular*, processa o bloco B.5.2 e em seguida o bloco 14 para incrementar o contador de barras de carga com ruídos – *NBI* ;
- (c) Se o tipo de distribuição for *triangular*, processa o bloco B.5.3 e em seguida o bloco 14 para incrementar o contador de barras de carga com ruídos – *NBI* ;
- (d) Se o tipo de distribuição for *Weibull*, processa o bloco B.5.4 e em seguida o bloco 14 para incrementar o contador de barras de carga com ruídos – *NBI* ;
- (e) Se o tipo de distribuição for *lognormal*, processa o bloco B.5.5 e em seguida o bloco 14 para incrementar o contador de barras de carga com ruídos – *NBI* ;
- (f) Se o tipo de distribuição for *Laplace*, processa o bloco B.5.6 e em seguida o bloco 14 para incrementar o contador de barras de carga com ruídos – *NBI* ;
- (g) Se o tipo de distribuição for *exponencial*, processa o bloco B.5.7 e em seguida o bloco 14 para incrementar o contador de barras de carga com ruídos – *NBI* .

O **bloco 15** é indicativo da verificação se o total de barras de carga com ruídos foram esgotados ($NBI > TOTIBAR$) ou se a nova barra de carga com ruídos deve ser

processada. Em caso afirmativo, deve executar a ação do bloco B.6, caso contrário executa-se o bloco 3 para selecionar uma nova barra de carga com ruído.

Após processamento dos **blocos B.5.1 a B.5.8** deste **bloco B.5**, as barras de carga com *ruído na magnitude* estarão classificadas em 42 categorias distintas, conforme apresentado no fluxograma da **Figura IV-33**.

Nota: Embora previstos, diversos tipos de modelagem não foram implementados computacionalmente, sendo os mesmos recomendados para consideração em trabalhos futuros.

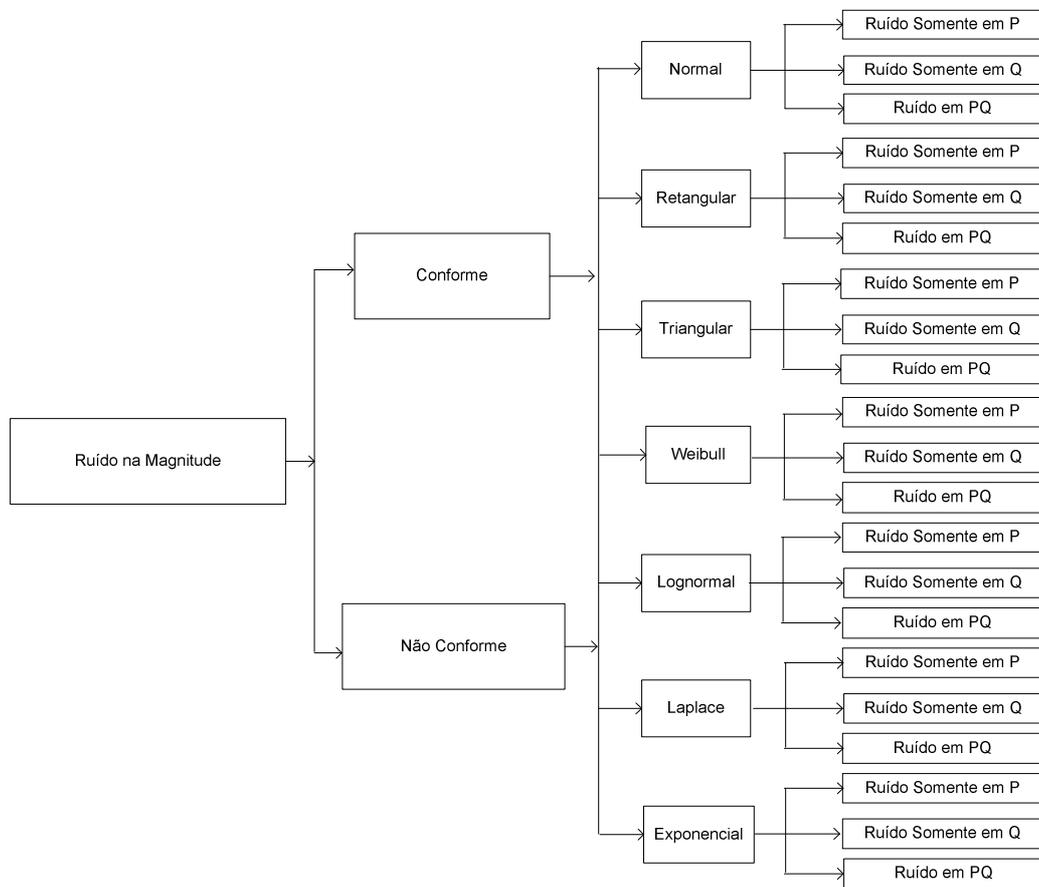


Figura IV-33 – Modelagem de Ruídos na Magnitude da Carga

* * *

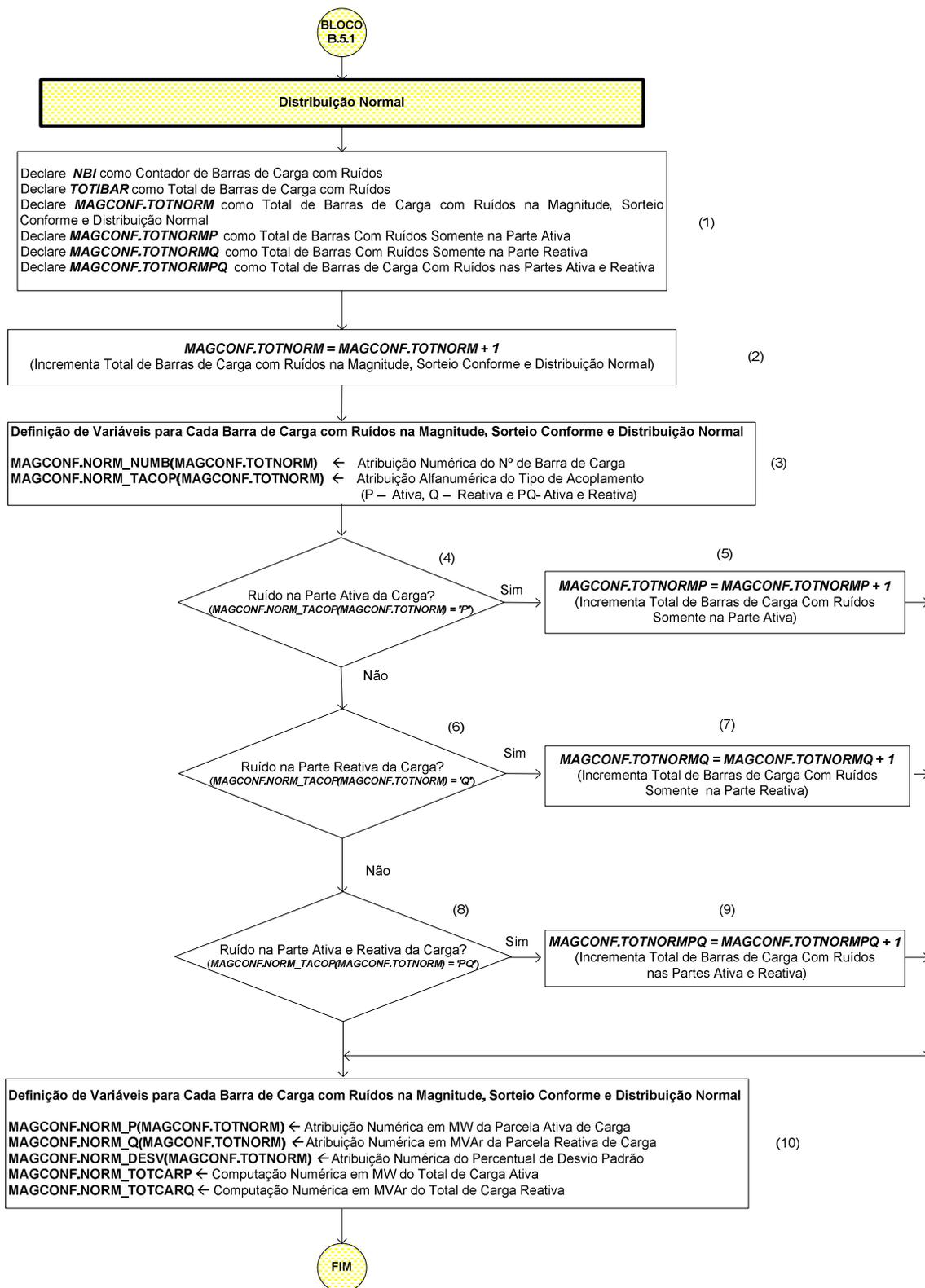


Figura IV-34 – Modelagem de Ruído na Magnitude Com Sorteio Conforme e Tipo de Distribuição Normal

Este **bloco B.5.1** (ver **Figura IV-32**) é processado se a barra de carga com ruído selecionada apresenta um *tipo de sorteio conforme e distribuição probabilística normal*.

O **bloco 1** corresponde à declaração de variáveis utilizadas durante o processo de execução do bloco B.5.1 deste procedimento computacional proposto. Além das variáveis *NBI* e *TOTIBAR* declaradas no bloco B.5 anterior, as seguintes variáveis devem ser acrescentadas:

- *MAGCONF.TOTNORM* é o total de barras de carga com ruídos na magnitude, sorteio conforme e distribuição normal;
- *MAGCONF.TOTNORMP* é o total de barras de carga com ruídos somente na parte ativa;
- *MAGCONF.TOTNORMQ* é o total de barras de carga com ruídos somente na parte reativa;
- *MAGCONF.TOTNORMPQ* é o total de barras de carga com ruídos nas partes ativa e reativa.

No **bloco 2** efetua-se o incremento do contador de total de barras de carga com ruídos na magnitude, sorteio conforme e com distribuição probabilística normal - $MAGCONF.TOTNORM = MAGCONF.TOTNORM + 1$.

No **bloco 3** definem-se as variáveis para número de barra e o tipo de acoplamento. Nestas variáveis são armazenadas o número de barra de carga com ruído e o tipo de acoplamento lidos dos dados probabilísticos.

Os **blocos 4, 6 e 8** permitem verificar os tipos de acoplamento a serem considerados (ruído somente na parte ativa – P ou ruído somente na parte reativa - Q ou ruído nas partes ativa e reativa - PQ) para cada barra de carga com ruído selecionada. Se a barra de carga possui ruído somente em P, executam os **blocos 4 e 5** para identificação da barra com ruído somente na parte ativa, e incrementa o total de barras com ruídos somente na parte ativa. No caso da barra com ruído somente em Q, o programa processa os **blocos 6 e 7** e classifica como sendo ruído somente em Q, e incrementa o número

total de barras com ruídos somente na parte reativa. Por outro lado, se a barra selecionada apresenta ruídos nas partes ativa e reativa, processam-se os **blocos 8 e 9** e classifica-a como barra com ruídos em P e Q, e incrementa o número total de barras com ruídos nas partes ativa e reativa.

Após processamento dos blocos (4 e 5) ou (6 e 7) ou (8 e 9), executa-se o **bloco 10** que corresponde à definição de cinco variáveis para atribuir dados probabilísticos e determinísticos em cada barra de carga com ruído na magnitude, sorteio conforme e distribuição normal, são elas : parcelas ativa em MW e reativa da carga em MVA_r, valor percentual do desvio padrão e valor total de ruído em MW de carga ativa e MVA_r de carga reativa.

* * *

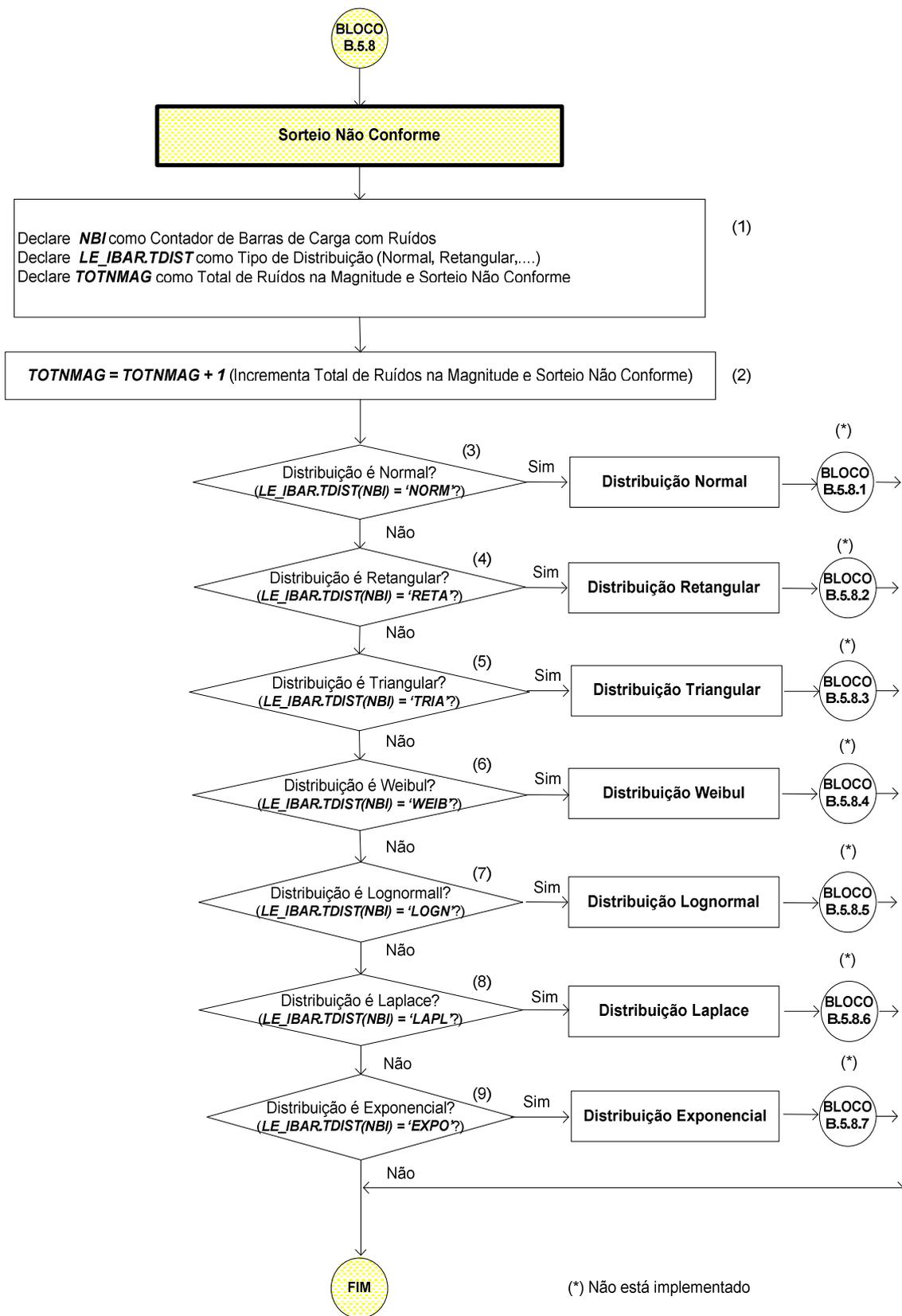


Figura IV-35 – Modelagem de Ruído na Magnitude e Sorteio Não Conforme

O **bloco B.5.8** (ver **Figura IV-32**) apresentado na **Figura IV-35** representa a etapa de sorteio do tipo não conforme.

O **bloco 1** corresponde à declaração de variáveis utilizadas durante a execução do procedimento computacional deste bloco:

- *NBI* é o contador de barras de carga com ruídos;
- *LE_IBAR.TDIST* é o tipo de distribuição probabilística;
- *TOTNMAG* é total de barras de carga com ruídos na magnitude e sorteio não conforme;

No **bloco 2** efetua-se o incremento do contador de total de barras de carga com ruídos na magnitude e sorteio não conforme – $TOTNMAG = TOTNMAG + 1$.

Os **blocos 3 a 9** representam a verificação do tipo de distribuição probabilística definido pelo usuário no arquivo de dados probabilísticos. Dependendo do tipo de distribuição considerado, podem ser processados blocos B.5.8.1 a B.5.8.7 do seguinte modo:

- (a) Se o tipo de distribuição for *normal*, processa o bloco B.5.8.1 e finaliza execução do bloco B.5.8;
- (b) Se o tipo de distribuição for *retangular*, processa o bloco B.5.8.2 e finaliza execução do bloco B.5.8;
- (c) Se o tipo de distribuição for *triangular*, processa o bloco B.5.8.3 e finaliza execução do bloco B.5.8;
- (d) Se o tipo de distribuição for *Weibull*, processa o bloco B.5.8.4 e finaliza execução do bloco B.5.8;
- (e) Se o tipo de distribuição for *lognormal*, processa o bloco B.5.8.5 e finaliza execução do bloco B.5.8;
- (f) Se o tipo de distribuição for *exponencial*, processa o bloco B.5.8.7 e finaliza execução do bloco B.5.8.

- (g) Se o tipo de distribuição for *Laplace*, processa o bloco B.5.8.6 e finaliza execução do bloco B.5.8;

Nota: A implementação computacional da modelagem não conforme de ruídos e da modelagem percentual da composição da carga são sugeridas para trabalhos futuros.

* * *

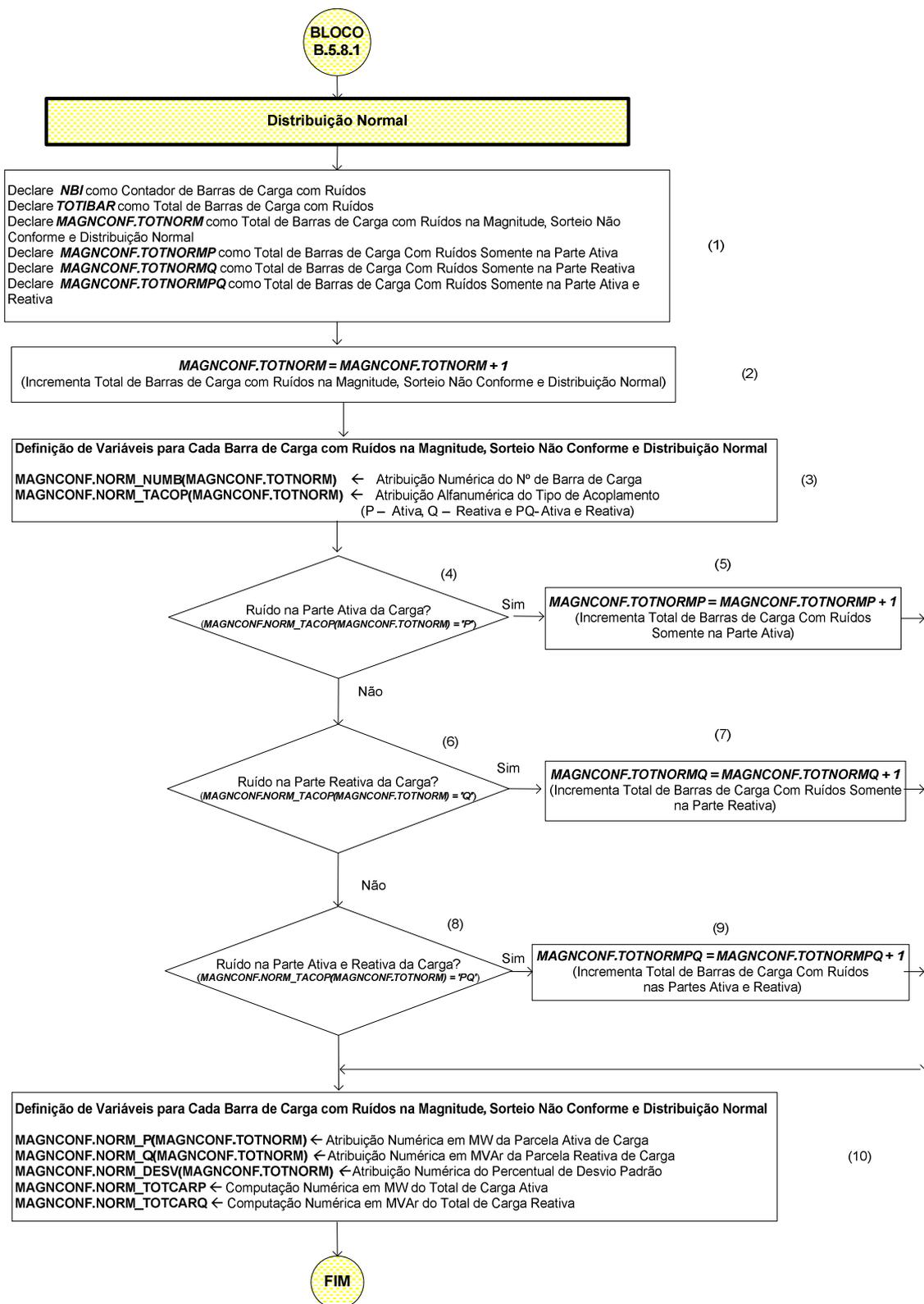


Figura IV-36 – Ruído na Magnitude com Sorteio Não Conforme e Distribuição Normal

Este **bloco B.5.8.1** (vide **Figura IV-35**) é similar ao bloco B.5.1 (vide **Figura IV-34**) descrito anteriormente, com exceção do tipo de sorteio considerado. Neste bloco o tipo de sorteio é não conforme.

Portanto, destaca-se que todo o procedimento conceitual deste bloco é idêntico ao bloco B.5.1 anteriormente descrito. A diferença básica reside apenas no nome da variável *MAGCONF*. Neste bloco B.5.8.1, dado que o sorteio é não conforme, esta variável é substituída pela variável *MAGNCONF*.

* * *

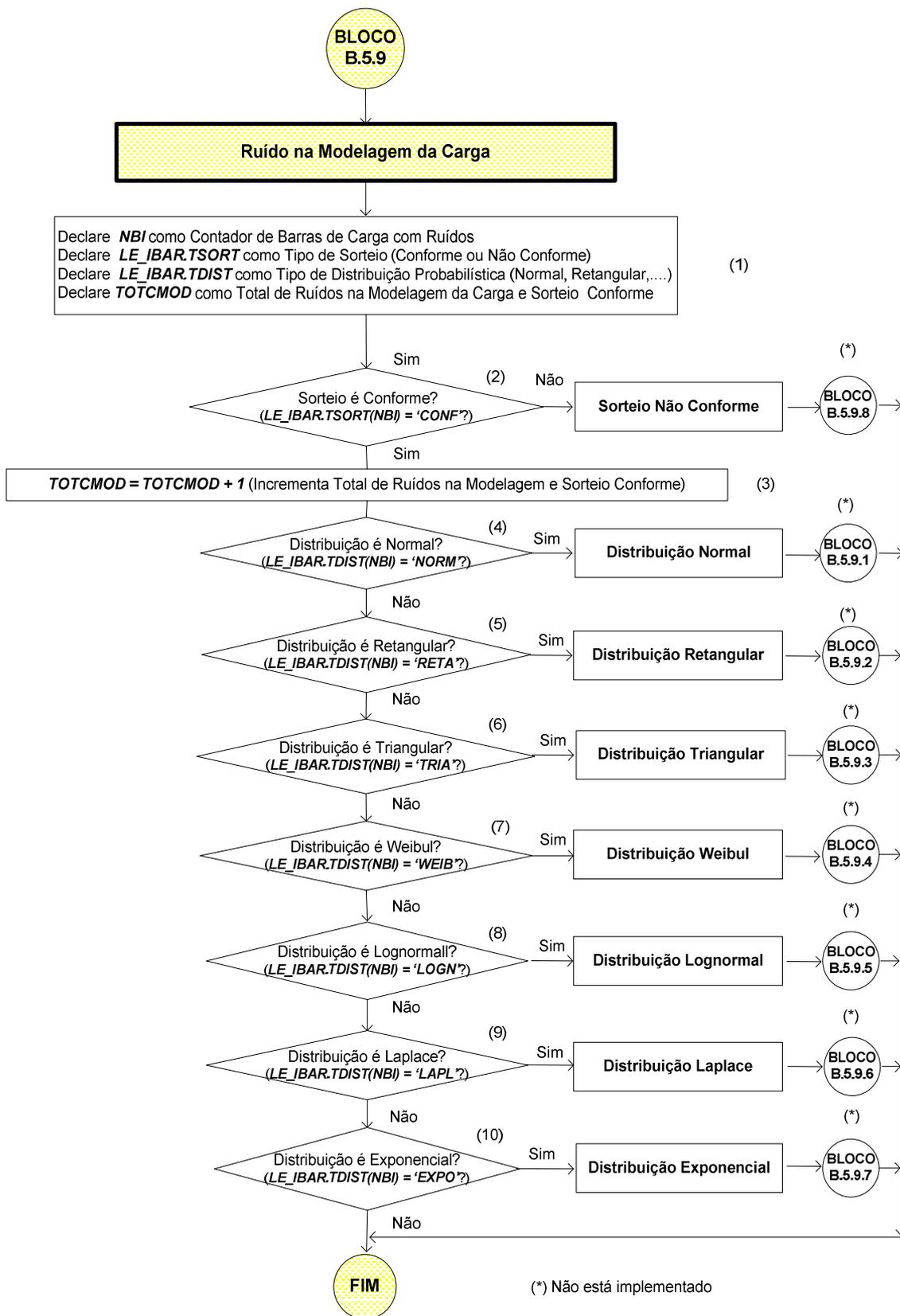


Figura IV-37 – Ruído nos Percentuais de Composição da Carga

O **bloco B.5.9** (vide **Figura IV-32**) apresentado na **Figura IV-37** apresenta a etapa da classificação da barra de carga selecionada com ruído nos percentuais de composição da carga (e.g. parcelas de impedância, corrente e potência constantes).

O **bloco 1** corresponde à declaração de variáveis deste procedimento computacional:

- *NBI* é o contador de barras de carga com ruídos;
- *LE_IBAR.TSORT* é o tipo de sorteio (conforme ou não conforme);
- *LE_IBAR.TDIST* é o tipo de distribuição probabilística (normal, retangular,...);
- *TOTCMOD* é total de barras de carga com ruídos na modelagem de carga e sorteio conforme;

O **bloco 2** é indicativo da verificação se o tipo de sorteio é conforme. Em caso afirmativo, deve executar a ação do **bloco 3** para incrementar o total de barras de carga com ruídos na modelagem e sorteio conforme, caso contrário executa-se o bloco B.5.9.8 para efetuar o sorteio não conforme.

Os **blocos 4 a 10** representam a verificação do tipo de distribuição probabilística definido pelo usuário no arquivo de dados probabilísticos. Dependendo do tipo de distribuição considerado, podem ser processados blocos B.5.9.1 a B.5.9.7 da seguinte forma:

- (a) Se o tipo de distribuição for *normal*, processa o bloco B.5.9.1 e finaliza a execução do bloco B.5.9;
- (b) Se o tipo de distribuição for *retangular*, processa o bloco B.5.9.2 e finaliza a execução do bloco B.5.9;
- (c) Se o tipo de distribuição for *triangular*, processa o bloco B.5.9.3 e finaliza a execução do bloco B.5.9;
- (d) Se o tipo de distribuição for *Weibull*, processa o bloco B.5.9.4 e finaliza a execução do bloco B.5.9;

- (e) Se o tipo de distribuição for *lognormal*, processa o bloco B.5.9.5 e finaliza a execução do bloco B.5.9;
- (f) Se o tipo de distribuição for *Laplace*, processa o bloco B.5.9.6 e finaliza a execução do bloco B.5.9;
- (g) Se o tipo de distribuição for *exponencial*, processa o bloco B.5.9.7 e finaliza a execução do bloco B.5.9.

Após processamento dos **blocos B.5.9.1 a B.5.9.8** deste **bloco B.5.9**, as barras de carga com ruído na modelagem de carga estarão classificadas em 42 categorias distintas, conforme apresentado no fluxograma da **Figura IV-38**.

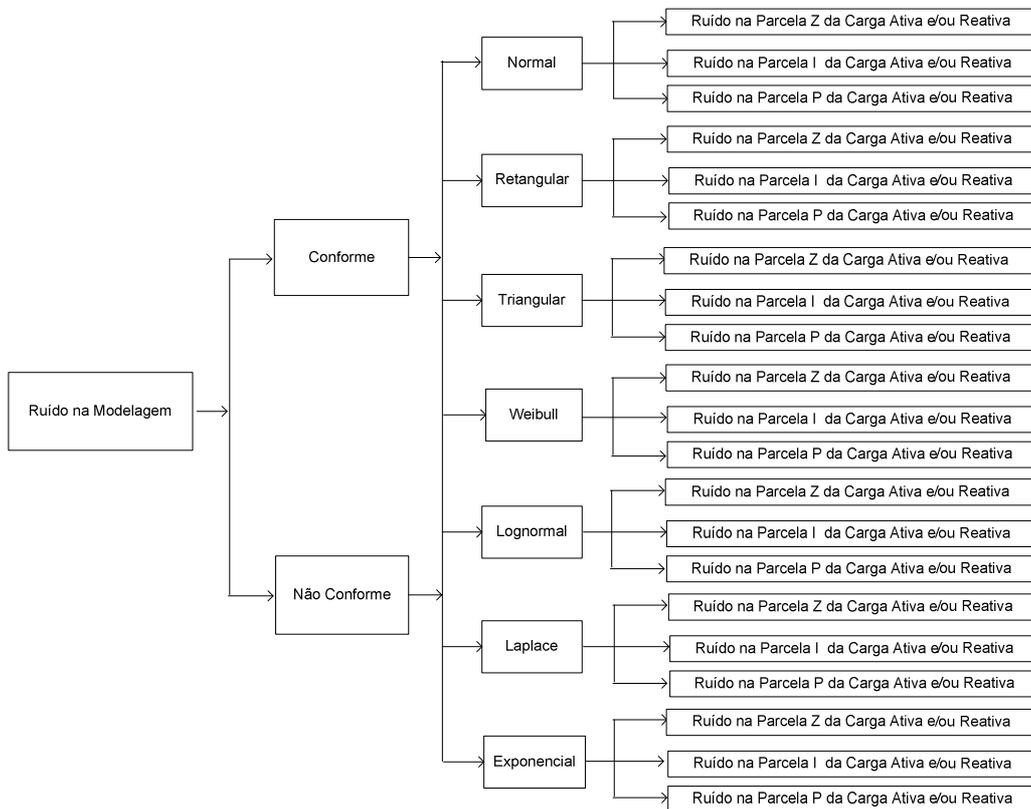


Figura IV-38 – Modelagem de Ruídos nos Percentuais de Composição da Carga

* * *

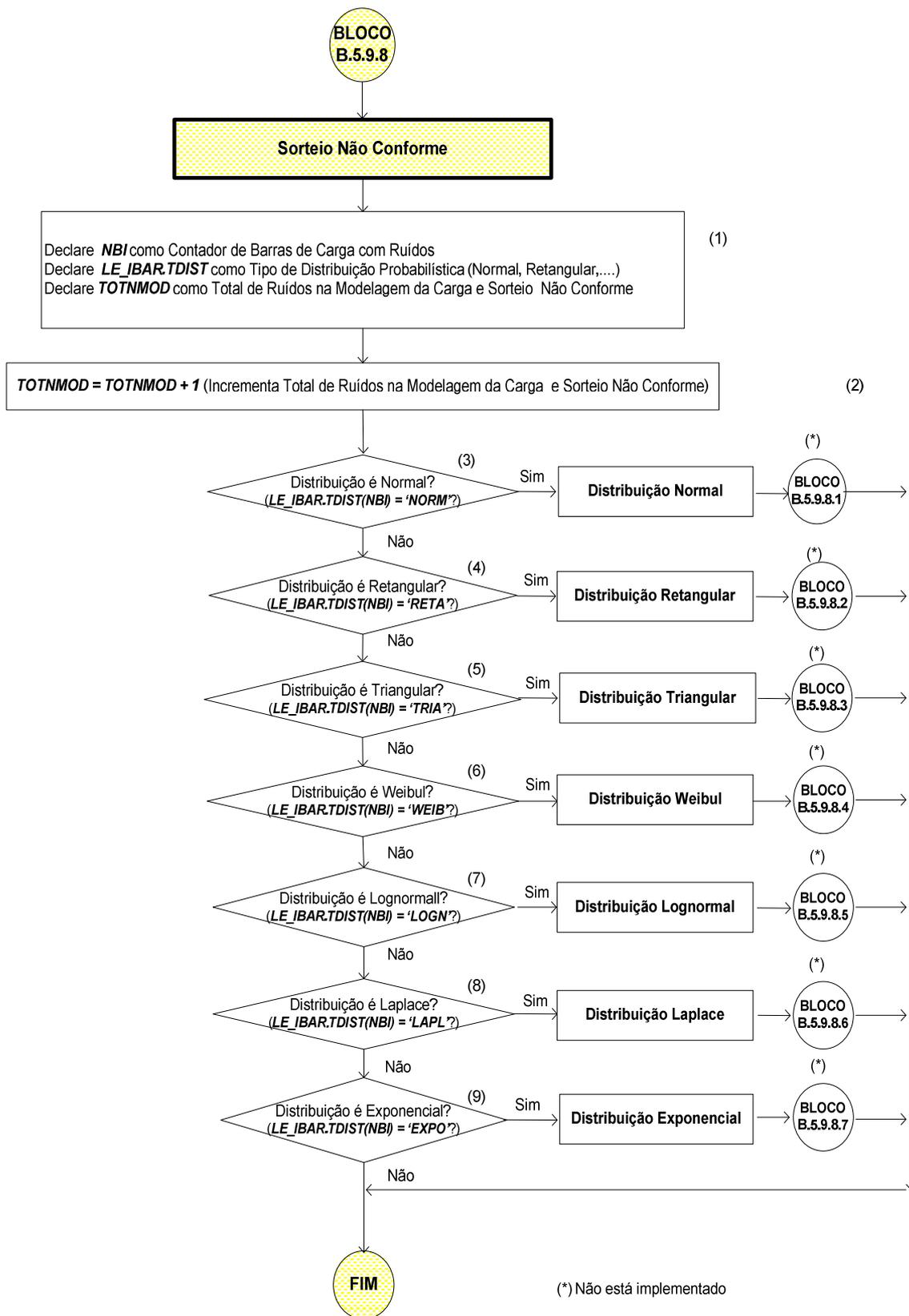


Figura IV-39 – Ruído na Modelagem Percentual da Carga e Sorteio Não Conforme

Este **bloco B.5.9.8** (vide **Figura IV-37**) é similar ao bloco B.5.8 descrito anteriormente (vide **Figura IV-35**), cuja diferença básica apresentada é no tipo de ruído considerado. Neste bloco o tipo de ruído é na modelagem percentual da carga, enquanto que no bloco B.5.8 o tipo de ruído é na magnitude da carga.

Portanto, destaca-se que todo o procedimento conceitual deste bloco é idêntico ao bloco B.5.8 anterior. A diferença está apenas no nome da variável *TOTNMAG*. Neste **bloco B.5.9.8**, dado que o ruído é na modelagem percentual da carga, a variável *TOTNMAG* é substituída pela variável *TOTNMOD*.

* * *

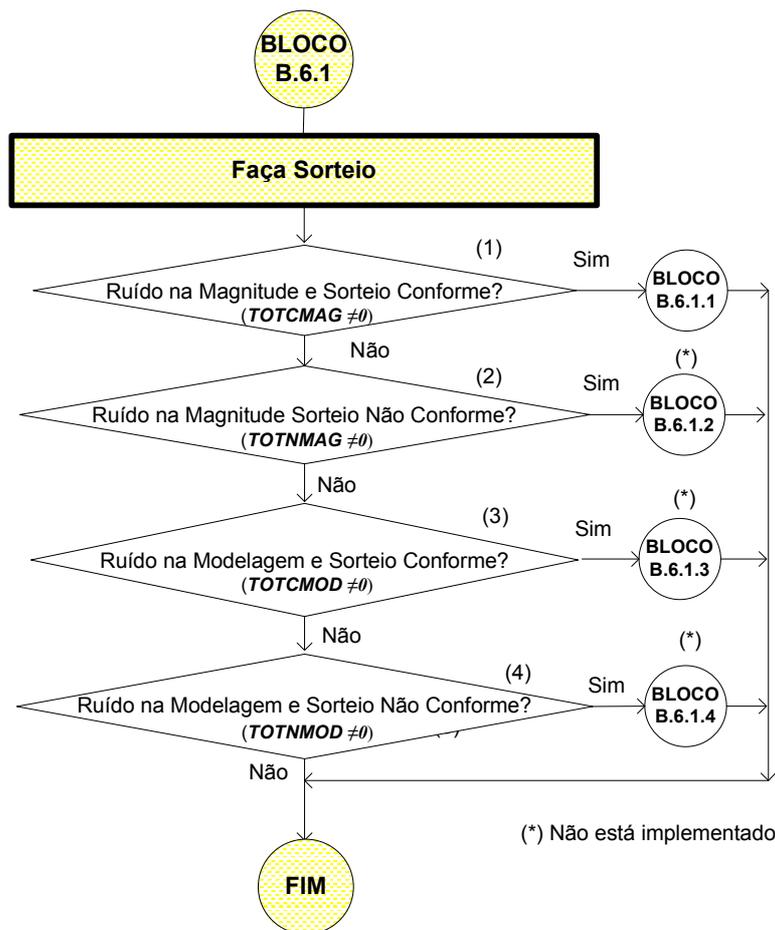


Figura IV-40 – Classificação do Tipo de Ruído e Sorteio

Este **Bloco B.6.1** (vide **Figura IV-12**) representa o bloco de seleção do tipo de sorteio e ruído definido pelo usuário.

Os **bloco 1 a 4** são indicativos da verificação se a tipologia de ruído é na magnitude ou modelagem percentual da carga, além do tipo de sorteio que podem ser dois tipos : conforme ou não conforme. Portanto, pode-se classificar o processo de sorteio em quatro categorias distintas:

- (a) Opção com ruído na magnitude e sorteio conforme, onde o **bloco B.6.1.1** é executado;
- (b) Opção com ruído na magnitude e sorteio não conforme, onde o bloco B.6.1.2 é executado;

- (c) Opção com ruído na modelagem de carga e sorteio conforme, onde o bloco B.6.1.3 é executado;
- (d) Opção com ruído na modelagem de carga e sorteio não conforme, onde o bloco B.6.1.4 é executado;

* * *

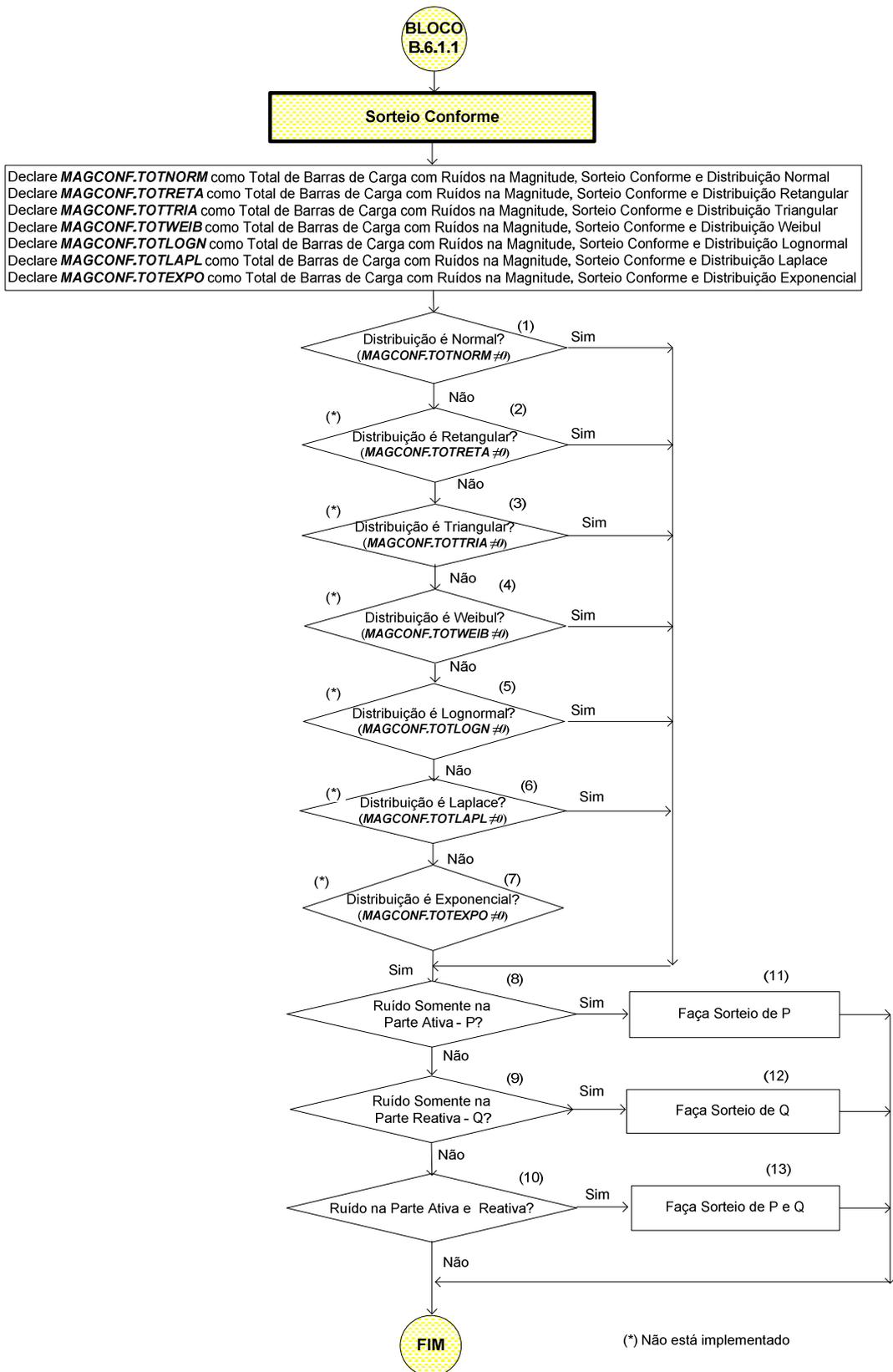


Figura IV-41 – Sorteio Conforme

Tomando como referência o **bloco B.6.1** da **Figura IV-40**, detalha-se o **bloco B.6.1.1**. Os **blocos 1 a 7** selecionam o tipo de distribuição probabilística dentre os possíveis propostos neste trabalho na seguinte seqüência: normal (executa **bloco 1**), retangular (executa **bloco 2**), triangular (executa **bloco 3**), Weibull (executa **bloco 4**), lognormal (executa **bloco 5**), Laplace (executa **bloco 6**) e exponencial (executa **bloco 7**). Após seleção de um desses tipos de distribuição, verifica o tipo de acoplamento considerado que podem ser de três tipos: ruído somente parcela ativa da carga (executa **bloco 8**) ou somente na parcela reativa (executa **bloco 9**) ou em ambas (executa **bloco 10**).

Em seguida processam os **blocos 11, 12 e 13** que representam a etapa de sorteio. De acordo com o tipo de distribuição considerado, efetua-se o sorteio conforme da parcela total de cargas ativa em MW e/ou reativa em MVAr com ruídos.

* * *

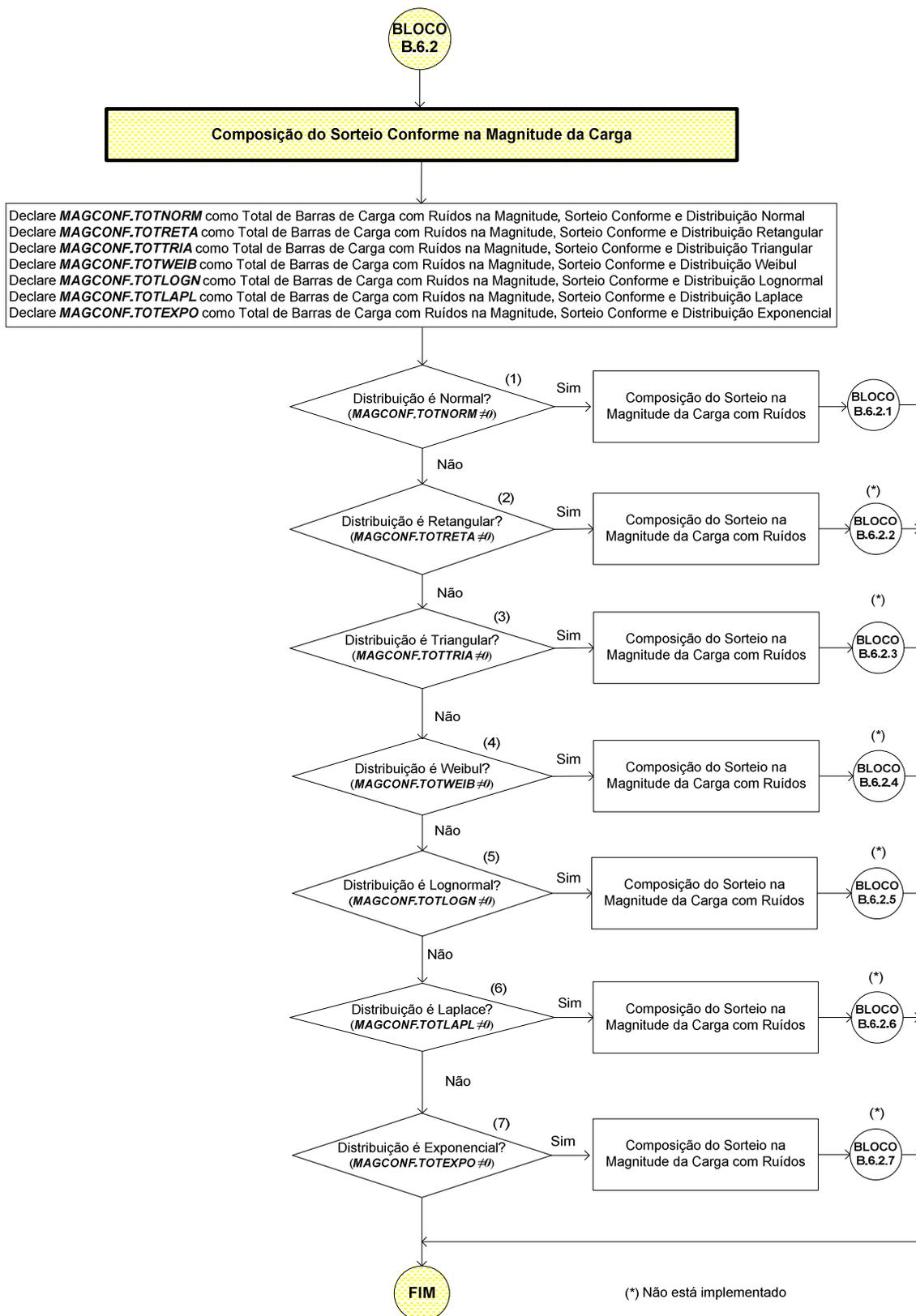


Figura IV-42 – Composição do Sorteio Conforme na Magnitude da Carga

Tomando como referência a **Figura IV-12**, detalha-se o **bloco B.6.2**. Os **blocos 1 a 7** selecionam o tipo de distribuição probabilística dentre os possíveis propostos nesta Tese na seguinte seqüência: normal (executa **bloco 1**), retangular (executa **bloco 2**), triangular (executa **bloco 3**), Weibull (executa **bloco 4**), lognormal (executa **bloco 5**), Laplace (executa **bloco 6**) e exponencial (executa **bloco 7**). Após seleção de um desses tipos de distribuição, efetua a composição do sorteio na magnitude da carga.

Em seguida processam-se os **blocos B.6.2.1 a B.6.2.7** para composição de sorteio na magnitude da carga com ruídos, de acordo com o tipo de distribuição selecionado anteriormente. O detalhamento do **bloco B.6.2.1** está na **Figura IV-43**.

* * *

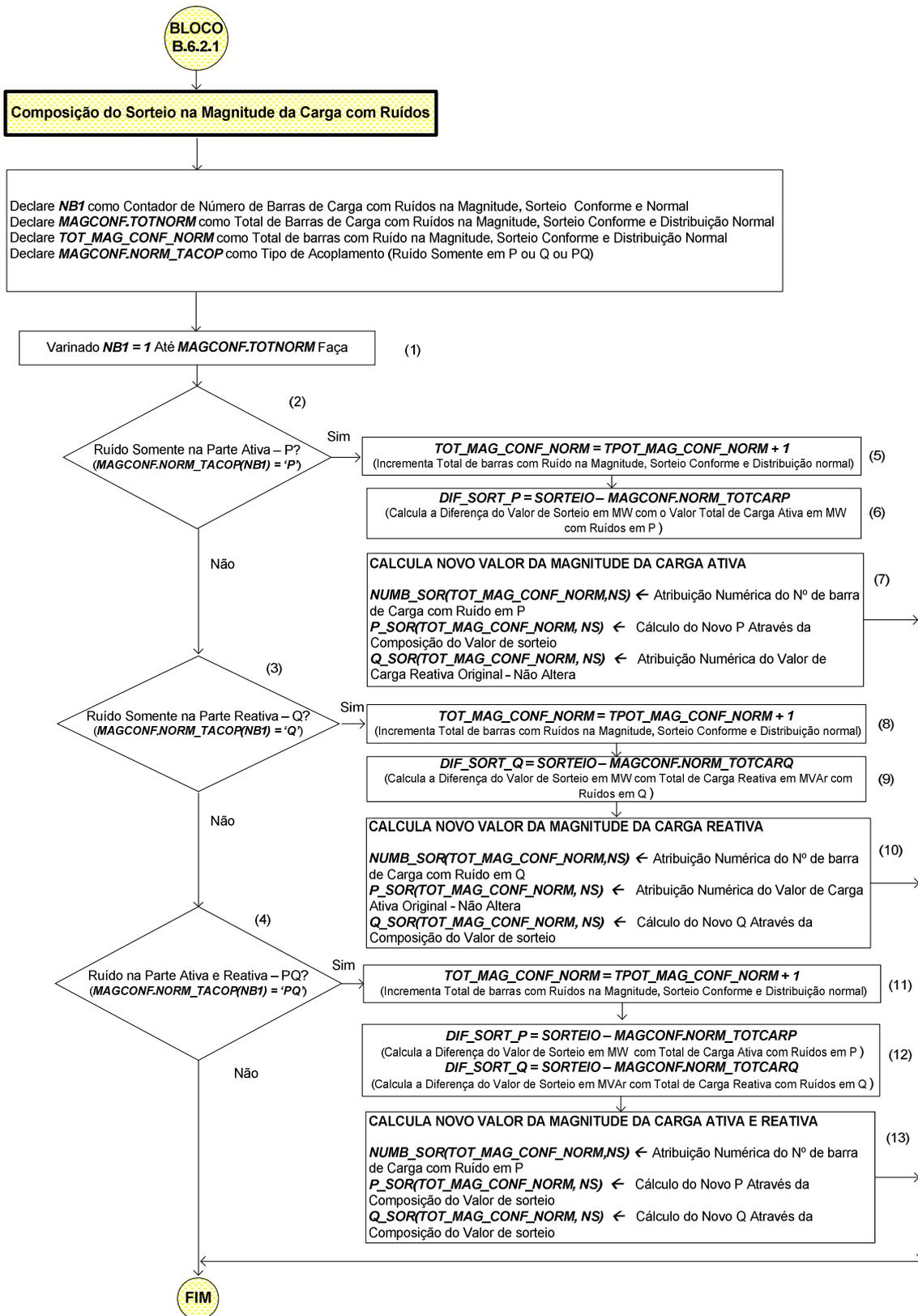


Figura IV-43 – Composição do Sorteio Conforme na Magnitude da Carga

O **bloco B.6.2.1** (vide **Figura IV-42**), mostrado em detalhes na **Figura IV-43** corresponde a etapa de composição do sorteio na magnitude a carga.

No **bloco 1** são declaradas as variáveis utilizadas durante a execução desta subrotina. As seguintes variáveis são definidas:

- *NB1* é contador de número de barras de carga com ruídos na magnitude, sorteio conforme e distribuição normal;
- *MAGCONF.TOTNORM* o total de barras de carga com ruídos na magnitude, sorteio conforme e distribuição normal;
- *TOT_MAG_CONF_NORM* é total de barras com ruídos na magnitude, sorteio conforme e distribuição normal.;
- *MAGCONF.NORM_TACOP* é o tipo de acoplamento (ruído em P ou Q ou ambas).

O **bloco 1** faz variar o contador de número de barras de carga com ruídos na magnitude, sorteio conforme e distribuição normal – *NB1*, partindo-se do valor inicial igual a 1 até atingir *MAGCONF.TOTNORM* – total de barras de carga com ruídos na magnitude, sorteio conforme e distribuição normal.

Em seguida verifica o tipo de acoplamento considerado que podem ser de três tipos: ruído somente parcela ativa da carga (executa **bloco 2**) ou somente na parcela reativa (executa **bloco 3**) ou em ambas (executa **bloco 4**). Se o **bloco 2** for selecionado, executa-se o **bloco 5** para contabilizar o total de barras com ruídos na magnitude, sorteio conforme e distribuição normal.

No passo seguinte executa o **bloco 6** para cálculo da diferença do valor de sorteio em MW, pelo valor total de carga ativa em MW com ruídos. Por último, processa o **bloco 7** para o cálculo do novo valor de magnitude da carga ativa em MW. Portanto, são definidas três variáveis onde são armazenados o número de barra de carga, o novo valor de magnitude da carga ativa e o valor de carga reativa que neste caso com ruído somente na parte ativa se mantém inalterada.

A mesma lógica é considerada na condição de seleção dos **blocos 3 e 4**. A diferença está apenas no tipo de ruído considerado. O **bloco 3** é executado quando o ruído é somente na parcela reativa da carga, enquanto que o **bloco 4** é processado quando os ruídos são considerados nas parcelas ativa e reativa da carga.

Os **blocos B.6.2.2 a B.6.2.7** são similares ao procedimento do **bloco B.6.2.1**, cuja diferença está apenas no tipo de distribuição probabilística.

* * *

Capítulo V

Aplicação e Resultados

V.1 Introdução

Este capítulo apresenta diversos experimentos da metodologia desenvolvida e implementada no programa *APPS (Análise Probabilística de Pequenos Sinais)*, versão 1.0, nas plataformas *MATLAB VERSÃO 7.1* [35] e *PSAT VERSÕES 1.3.4 e 2* [91], [92]. Os sistemas estudados referem-se às configurações dos seguintes sistemas-teste:

- **Sistema #1:** *Sistema-teste de 5 barras;*
- **Sistema #2:** *Sistema New England de 39 Barras;*
- **Sistema #3:** *Sistema Equivalentado Sul/Sudeste de 1762 Barras*

Os dados e as características básicas desses sistemas são apresentados no Anexo A.

O capítulo está estruturado da seguinte maneira: a **Seção V.2** apresenta os critérios adotados para avaliação probabilística da segurança sob pequenas perturbações. Na **Seção V.3** é apresentada uma descrição de diversos experimentos envolvendo cenários. A **Seção V.4** apresenta os resultados dos diversos experimentos com os três sistemas testes, considerando incertezas apenas em cenários (*experimentos C*). A **Seção V.5** explora, com a ajuda do sistema-teste 5 barras, a influência da carga, topologia e dados estocásticos sobre os indicadores, procurando identificar quais as influências mais significativas. Na **Seção V.6** é apresentada uma descrição de diversos experimentos envolvendo ruídos. A **Seção V.7**, explora também com a ajuda dos três sistemas testes, a influência das incertezas somente em ruídos (*experimentos R*). Na **Seção V.8** é apresentada uma descrição de diversos experimentos realizados combinando incertezas

em cenários e ruídos. Na **Seção V.9** é apresentada a análise de segurança considerando combinação das incertezas em cenários e ruídos (*experimentos híbridos H*).

V.2 Critérios Adotados para Avaliação da Segurança Estática

Tendo em vista que a análise de segurança pretendida é apenas de estabilidade a pequenas perturbações, foram considerados, em princípio, apenas dois critérios para a caracterização de modos de falha: (i) *locação de autovalores no plano complexo da direita*; (ii) *amortecimento inferior a 10%*.

Admitiu-se que os critérios de análise de adequação (faixas de tensão e sobrecarga em equipamentos) estão atendidos, ou seja, a faixa normal de operação das tensões e os carregamentos das linhas de transmissão e transformadores estão dentro das faixas estabelecidas. A **Tabela V-1** apresenta os critérios típicos de adequação e de estabilidade a pequenas perturbações.

Tabela V-1 – Critérios Adotados

Critérios de Adequação	
Faixa de Tensão (pu)	0.950 - 1.050
Sobrecarga em Equipamentos (%)	Zero
Critérios de Estabilidade a Pequenos Sinais	
Fator de Amortecimento (%)	> 10
Autovalores Situados no Semiplano da Direita	Zero

V.3 Simulações para Análise Considerando Incertezas Somente em Cenários

Como mencionado, nesta seção apresenta-se uma série de experimentos práticos da aplicação da metodologia proposta no Capítulo III anterior, em sistemas testes-fictícios (Fictício 5 barras e New England 39 barras) e reais (Equivalentado Sul/Sudeste do Sistema Elétrico Brasileiro 1762 Barras). A **Tabela V-2** apresenta um panorama de todos os experimentos realizados apenas com cenários (*experimentos C*).

Tabela V-2 – Experimentos Considerando Incertezas Apenas em Cenários

Experimento _s	Sistema Teste	Modelagem Dinâmica				Incertezas			Medidas Corretivas	Tabelas de Resultados	Figuras de Resultados
		MQ (1)	RT (2)	RV (3)	ES (4)	INT (5)	PATA (6)	TOPO (7)			
C1	5	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	V-8, V-9	V-3, V-6
C2		Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	V-8, V-9	V-4, V-6
C3		Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	V-8, V-9	V-5, V-6
C4		Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	V-8, V-10	V-7, V-10
C5		Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	V-8, V-10	V-8, V-10
C6		Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não	V-8, V-10	V-9, V-10
C7	39	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	V-11, V-12	V-11, V-14
C8		Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	V-11, V-12	V-12, V-14
C9		Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	V-11, V-12	V-13, V-14
C10	1762	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	V-13	V-15
C11		Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	V-13	V-16
C12		Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	V-13	V-17

- (1) MQ – Máquina ou Gerador
- (2) RT – Regulador de Tensão
- (3) RV – Regulador de Velocidade
- (4) ES – Estabilizador de sistema de potência
- (5) INT – Incertezas em Cenários de Intercâmbios
- (6) PATA – Incertezas em Patamares de Carga
- (7) TOPO – Incertezas em Topologias

De acordo com a **Tabela V-2**, são propostas as análises de segurança probabilística a pequenas perturbações considerando incertezas em cenários (Intercâmbios – INT, Patamares de Carga – PATA e Topologias – TOPO) nos três sistemas-testes (Experimentos #C1 a C#6 para o sistema 5 barras, experimentos #C7 a #C9 para o sistema New England e experimentos #C10 a #C12 para o sistema equivalentado sul/sudeste).

Cabe destacar que em todos os experimentos *não se recorreu ao uso de medidas corretivas* para restaurar a estabilidade do sistema ou a fim de melhorar os índices probabilísticos propostos.

O *primeiro sistema teste* é composto de 5 barras (vide **Figuras V-1, V-2 e A-1** do Anexo A). O sistema é composto de duas áreas e será analisado sob duas condições nominais de fluxo de potência, [53].

No *primeiro cenário*, denominado de sistema com intercâmbio máximo da área 1 para área 2, o gerador 1 opera com despacho máximo e o gerador 2 com o despacho mínimo (Vide **Figura V-1**). Dado que o maior montante de carga desse sistema encontra-se na área 1 - 1900 MW, a grande parcela de potência ativa gerada na área 1 é consumida pela carga da própria área, e o intercâmbio entre a área 1 e área 2 será de 500 MW.

O intercâmbio entre as duas áreas é medido na linha entre as barras 3 e 5, no terminal da barra 3 (vide **Figura A-1** do Anexo A).

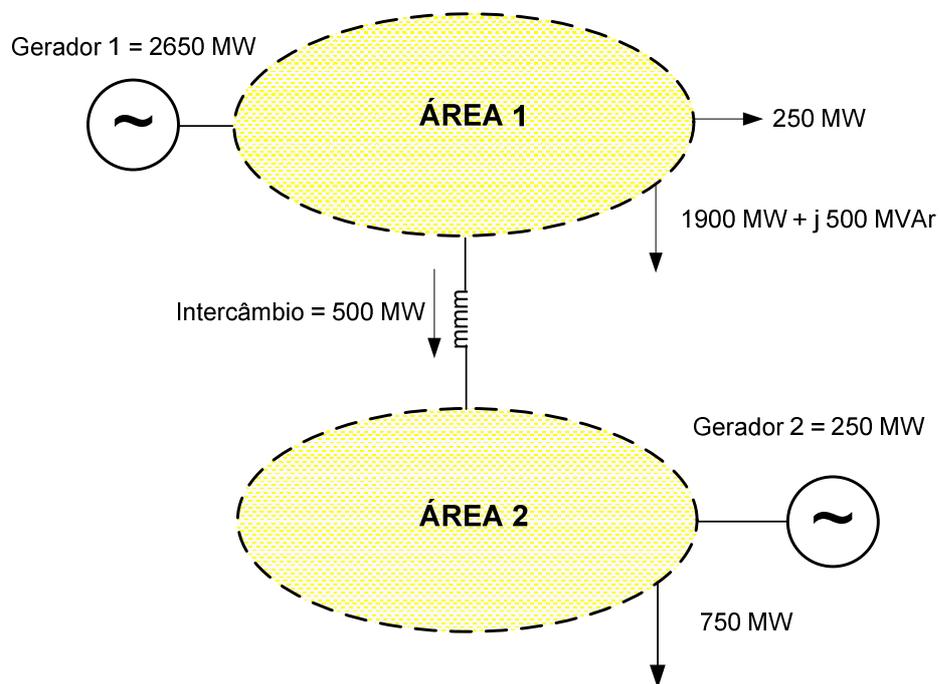


Figura V-1 – Cenário 1 – Área 1 Exportadora

No *segundo cenário*, o intercâmbio é invertido em relação ao primeiro cenário, devido a consideração de despacho elevado na área 2 e reduzido na área 1 (Vide **Figura V-2**). Neste caso, como o despacho é reduzido no gerador 1 da área 1 (250 MW) e a carga da área 1 é de 1900 MW, esta área é importadora de energia e o intercâmbio resultante é de 1900 MW.

Os cenários de intercâmbios com suas respectivas probabilidades de ocorrência estão apresentados na **Tabela V-3**.

Tabela V-3 – Probabilidade dos Cenários de Intercâmbios – Sistema 5 Barras

Cenários	Valores de Intercâmbio (MW)	Probabilidade (%)
Área 1 Exportador Máximo	500 MW	10
Área 2 Exportador Máximo	1900 MW	90

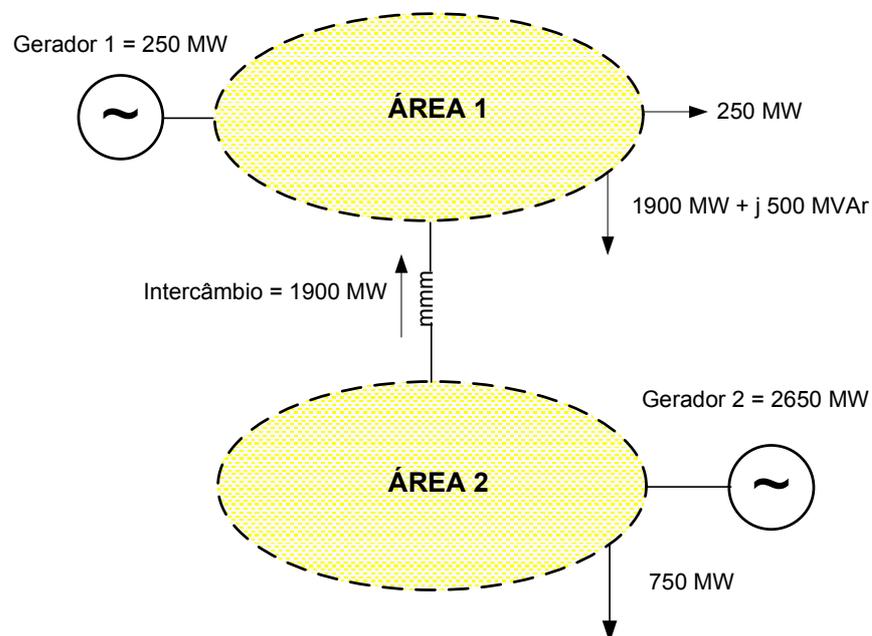


Figura V-2 – Cenário 2 – Área 2 Exportadora

A carga foi modelada em três patamares com incertezas associadas em cada patamar e na **Tabela V-4** apresentam-se as probabilidades para os três patamares de carga selecionados. Essa probabilidade de cada patamar é obtida através da curva de carga que pode ser agregada em patamares representativos de permanências.

Com relação ao fator de potência das cargas, o mesmo foi considerado constante em 0,97 indutivo.

Tabela V-4 – Probabilidade dos Cenários de Patamares de Carga – Sistema 5 barras

Patamares de Carga	Probabilidade (%)	Carga (MW)
Pesada	20	2650
Média	40	1590
Leve	40	795

Alguns experimentos para o sistema-teste 5 barras foram realizados na presença e na ausência dos estabilizadores de sistema de potência (ESP). O regulador de velocidade foi considerado sempre ausente nos experimentos em todos os três sistemas testes.

Os *experimentos #C1* e *#C2* da **Tabela V-2** refletem o problema de segurança estática a pequenas perturbações, considerando respectivamente incertezas apenas nos cenários de intercâmbios (*área 1 exportadora máxima* e *área 2 exportadora máxima*) e nos três patamares de carga (*pesada, média e leve*) para o *cenário 1 com área 1 exportadora máxima*. O *experimento #C3* trata o problema de segurança, considerando combinação das duas categorias de incertezas consideradas nos *experimentos #C1* e *#C2* anteriores.

Repetiu-se os mesmos *experimentos (#C4 a #C6)* com a presença do estabilizador de sistema de potência (ESP) utilizado e projetado em Barbosa [53].

Não foram consideradas incertezas na topologia da rede, tendo em vista que o sistema avaliado é composto apenas de circuitos simples. Dada a simplicidade do sistema, a questão da convexidade não se torna relevante.

O *segundo sistema teste* é composto de 39 barras – New England [104], [105]. O sistema de potência New England é um sistema teste bastante conhecido, consistindo de 9 máquinas síncronas e 39 barras. O diagrama unifilar está apresentado na **Figura A-4** e seus dados podem ser encontrados na **Seção A.2** do **Anexo A**. Nesse sistema teste, as unidades geradoras não são consideradas passíveis de terem estabilizadores. Todas as cargas ativas e reativas foram representadas por modelos de potência constante. O sistema de excitação é representado por excitatriz rotativa (vide **Figura A-2**). O modelo de máquina utilizado é o 5.2, denominação no PSAT para todas as máquinas.

Neste sistema também foi adotada a mesma modelagem estocástica para os patamares de carga do sistema-teste 5 barras (vide **Tabela V-4**). A carga foi também modelada em três patamares e a **Tabela A-5** do **Anexo A** apresenta os montantes de carga considerados em cada patamar.

Embora o sistema seja composto por uma rede de 46 linhas de transmissão e 10 geradores, serão atribuídas incertezas em apenas 3 linhas de transmissão, conforme a **Tabela V-5**. Para esta análise foi considerada uma avaliação de topologias oriundas de contingências simples (N-1) até dupla (N-2), num total de $(1 + 3 + 3 = 7)$ topologias.

Tabela V-5 – Desempenho Estocástico da Topologia – Sistema New England

Topologias	Taxa de Falha (Ocorrências/Ano)	Tempo de Reparo (horas)
Linha 6 – 11	5	24
Linha 21 – 22	7	40
Linha 9 – 39	10	50

Os *experimentos #C7 a #C9* (vide **Tabela V-2**) foram analisados na ausência do regulador de velocidade e do estabilizador de sistema de potência (ESP).

Foram realizados um total de três experimentos considerando incertezas em patamares de carga, topologias da rede e combinação das duas.

O *terceiro e último sistema teste* é um equivalente do Sistema de Potência Sul/Sudeste Brasileiro, Bomfim [59]. Este equivalente compreende 1762 barras, 2515 linhas e transformadores e 54 máquinas síncronas. Todas as máquinas são representadas pelo modelo 5.2 do programa PSAT que considera todos os efeitos subtransitórios. Cabe destacar que nesse sistema teste, os reguladores de tensão não foram considerados nas análises, em função do desempenho inadequado observado na sua utilização dentro do programa PSAT. O diagrama unifilar está apresentado na **Figura A-5** e seus dados podem ser encontrados nas **Tabelas A-10 e A-11** do **Anexo A**. Todas as cargas ativas e reativas foram representadas por modelos de potência constante.

Neste sistema foi adotada a modelagem estocástica para os patamares de carga idêntica ao sistema teste 5 barras (vide **Tabela V-4**).

Embora o sistema seja composto por uma rede de 2515 linhas de transmissão e 54 geradores, serão atribuídas incertezas em apenas 6 linhas de transmissão, conforme a **Tabela V-6** e o diagrama unifilar apresentado na **Figura A-6**. Para esta análise foi considerada uma avaliação de topologias oriundas apenas de contingências simples (N-1).

Tabela V-6 – Desempenho Estocástico da Topologia – Sistema Equivalentado Sul/Sudeste

Topologias	Taxa de Falha (Ocorrências/Ano)	Tempo de Reparo (horas)
Linha 500 kV Adrianópolis – C. Paulista – C1	10	40
Linha 500 kV T. Preto – C.Paulista	10	40
Linha 500 kV Angra – C.Paulista	10	40
Linha 500 kV Adrianópolis – Grajaú	10	40
Linha 500 kV Adrianópolis – S.José	10	40
Linha 500 kV Angra – S.José	10	40

Foram realizados um total de três experimentos considerando incertezas em patamares de carga, topologias da rede e combinação das duas.

V.4 Resultados Obtidos: Incertezas Somente em Cenários

Na **Tabela V-7** mostra-se o espaço probabilístico formado para os *experimentos #C1* a *#C6*. Pode-se notar que a topologia tratada foi sempre a da rede completa (N). Também nota-se que não foram detectados estados inviáveis, garantindo-se naturalmente a convexidade do problema. A última coluna da **Tabela V-7** denota que não foram detectadas violações de adequação.

Tabela V-7 – Espaços Probabilísticos do Sistema 5 Barras

Experimentos #C1 e #C4 – Incertezas Somente em Intercâmbios										
Estado Probabilístico	Intercâmbio	Carga	Valores de Intercâmbio (MW)	Barra Origem	Barra Destino	Circuito	Topologia	Probabilidade (%)	Fluxo de Potência	Violação
1	AREA1EXP	PESADA	500	-	-	-	N	10	Viável	Não Há
2	AREA2EXP	PESADA	1900	-	-	-	N	90	Viável	Não Há
Experimentos #C2 e #C5 – Incertezas Somente em Patamares de Carga										
Estado Probabilístico	Intercâmbio	Carga	Valores de Intercâmbio (MW)	Barra Origem	Barra Destino	Circuito	Topologia	Probabilidade (%)	Fluxo de Potência	Violação
1	AREA1EXP	PESADA	500	-	-	-	N	20	Viável	Não Há
2	AREA1EXP	MEDIA	300	-	-	-	N	40	Viável	Não Há
3	AREA1EXP	LEVE	29	-	-	-	N	40	Viável	Não Há
Experimentos #C3 e #C6 - Incertezas em Intercâmbios e Patamares de Carga										
Estado Probabilístico	Intercâmbio	Carga	Valores de Intercâmbio (MW)	Barra Origem	Barra Destino	Circuito	Topologia	Probabilidade (%)	Fluxo de Potência	Violação
1	AREA1EXP	PESADA	500	-	-	-	N	2	Viável	Não Há
2	AREA1EXP	MÉDIA	300	-	-	-	N	4	Viável	Não Há
3	AREA1EXP	LEVE	29	-	-	-	N	4	Viável	Não Há
4	AREA2EXP	PESADA	1900	-	-	-	N	18	Viável	Não Há
5	AREA2EXP	MÉDIA	1140	-	-	-	N	36	Viável	Não Há
6	AREA2EXP	LEVE	575	-	-	-	N	36	Viável	Não Há

V.4.1 Interpretação dos Resultados: Experimentos #C1, #C2, #C3

A **Tabela V-8** apresenta somente os autovalores para cada estado probabilístico dos *experimentos #C1 a #C3* apresentados na **Tabela V-2**. Nos estados probabilísticos dos três experimentos, o gerador #1 está associado a 5 variáveis de estado dinâmico, o gerador #2 está associado a 3 variáveis de estado dinâmico e os dois reguladores de tensão estão associados, cada um deles, a 4 variáveis de estado dinâmico, totalizando portanto $(5 + 3 + [2 \times 4]) = 16$ variáveis de estado dinâmico.

Na **Tabela V-8** o asterisco indica os autovalores críticos.

Tabela V-8 – Autovalores do Sistema 5 Barras

Experimentos	Estados Probabilísticos	Autovalores		Amortecimento (%)	Frequência (Hz)	Probabilidade (%)
		Real	Imaginário			
#C1	1	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	10
		-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-12.7136	±12.2929	+71.89012	1.95650	
		-17.3158	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-14.0583	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-0.00190	±7.46390	+0.025460	1.18790	
		-8.59120	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-6.05120	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-0.85884	±1.59490	+47.41202	0.25383	
	+0.00071	±0.40607	-0.174850 (*)	0.06463		
	-0.70193	±0.46445	+83.39664	0.07392		
	2	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	90
		-999.999	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-12.5616	±12.2706	+71.53440	1.95290	
		-17.9246	+0.00000	+100.0000	0.00000	
		-17.4065	+0.00000	+100.0000	0.00000	
		-8.94880	±3.97510	+91.38928	0.63265	
		+5.80430	0.000000	-100.0000 (*)	0.00000	
-6.98850		+0.00000	+100.0000	0.00000		
+1.32130		+0.00000	-100.0000	0.00000		
-1.66090	+0.00000	+100.0000	0.00000			
+0.02879	±0.27578	-10.38306	0.04389			
-0.67061	±0.82760	+62.95657	0.13172			
#C2	1	-1000.00	0.000000	+100.00000	0.00000	20
		-1000.00	0.000000	+100.00000	0.00000	
		-12.7136	±12.2929	+71.89012	1.95650	
		-17.3158	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-14.0583	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-0.00190	±7.46390	+0.025460	1.18790	
		-8.59120	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-6.05120	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-0.85884	±1.59490	+47.41202	0.25383	
	+0.00071	±0.40607	-0.174850 (*)	0.06463		
	-0.70193	±0.46445	+83.39664	0.07392		
	2	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	40
		-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-12.67890	±12.3275	+71.69725	1.96200	
		-17.28200	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-13.77940	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-11.60840	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-0.082900	±6.86750	+1.207050	1.09300	
		-5.971300	0.000000	+100.0000	0.00000	
		+0.009720	±0.93386	-1.040780 (*)	0.14863	
	-0.842470	±1.59650	+46.67035	0.25408		
	-0.704990	±0.45456	+84.04445	0.07235		
	3	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	40
		-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-12.5311	±12.4145	+71.04042	1.97580	
		-17.2116	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-15.2344	0.000000	+100.0000	0.00000	
-11.9455		0.000000	+100.0000	0.00000		
-0.18100		±7.12310	+2.540210	1.13370		
-5.94500		0.000000	+100.0000	0.00000		
+0.10101		±1.05280	-9.550560 (*)	0.16755		
-0.87896	±1.39790	+53.22931	0.22248			
-0.66535	±0.43169	+83.88970	0.06871			

Experimentos	Estados Probabilísticos	Autovalores		Amortecimento (%)	Frequência (Hz)	Probabilidade (%)
		Real	Imaginário			
#C3	1	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	2
		-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-12.7136	±12.2929	+71.89012	1.95650	
		-17.3158	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-14.0583	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-0.00190	±7.46390	+0.025460	1.18790	
		-8.59120	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-6.05120	0.000000	+100.0000	0.00000	
		-0.85884	±1.59490	+47.41202	0.25383	
		+0.00071	±0.40607	-0.174850 (*)	0.06463	
	-0.70193	±0.46445	+83.39664	0.07392	4	
	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-12.6789	±12.3275	+71.69725	1.96200		
	-17.2820	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-13.7794	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-11.6084	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-0.08290	±6.86750	+1.207050	1.09300		
	-5.97130	0.000000	+100.0000	0.00000		
	+0.00972	±0.93386	-1.040780 (*)	0.14863		
	-0.84247	±1.59650	+46.67035	0.25408	4	
	-0.70499	±0.45456	+84.04445	0.07235		
	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-12.5311	±12.4145	+71.04042	1.97580		
	-17.2116	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-15.2344	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-11.9455	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-0.18100	±7.12310	+2.540210	1.13370		
	-5.94500	0.000000	+100.0000	0.00000		
	+0.10101	±1.05280	-9.550560	0.16755		
	-0.87896	±1.39790	+53.22931	0.22248	18	
	-0.66535	±0.43169	+83.88970	0.06871		
	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-999.999	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-12.5616	±12.2706	+ 71.5344	1.95290		
	-17.9246	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-17.4065	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-8.94880	±3.97510	+91.38928	0.63265		
	+5.80430	0.000000	-100.0000 (*)	0.00000		
	-6.98850	0.000000	+100.0000	0.00000		
	+1.32130	0.000000	-100.0000	0.00000		
	-1.66090	0.000000	+100.0000	0.00000		
	+0.02879	±0.27578	-10.38306	0.04389		
	-0.67061	±0.82760	+62.95657	0.13172	36	
	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000		
	-12.3456	±12.5915	+70.01001	2.00400		
-17.5994	±0.30688	+99.98480	0.04884			
-14.2428	0.000000	+100.0000	0.00000			
-0.32198	±6.57280	+4.892810	1.04610			
-5.45330	0.000000	+100.0000	0.00000			
-0.85964	±1.42520	+51.64912	0.22683			
+0.03493	±0.76372	-4.568890 (*)	0.12155			
-0.64792	±0.73504	+66.12516	0.11698	36		
-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000			
-1000.00	0.000000	+100.0000	0.00000			
-12.3244	±12.6088	+69.899570	2.00680			
-17.4798	±0.52470	+99.954980	0.08351			
-13.8849	0.000000	+100.0000	0.00000			
-0.35985	±6.67760	+5.3811000	1.06280			
-5.67260	0.000000	+100.0000	0.00000			
+0.10140	±0.85627	-11.759890 (*)	0.13628			
-0.84491	±1.23020	+56.614090	0.19580			
-0.64446	±0.62355	+71.866960	0.09924			

(*) Autovalores Críticos

As **Figuras V-3 a V-5** mostram o mapeamento dos pólos em malha aberta para os três experimentos (#C1, #C2 e #C3) descritos na **Tabela V-2** e as respectivas linhas do lugar geométrico dos fatores de amortecimento constantes, para 5%, 10% e 15%. Estão também destacadas somente os autovalores críticos para cada um dos estados probabilísticos do experimento analisado. Nestas figuras, apenas os pontos mais próximos ao eixo imaginário são mostrados.

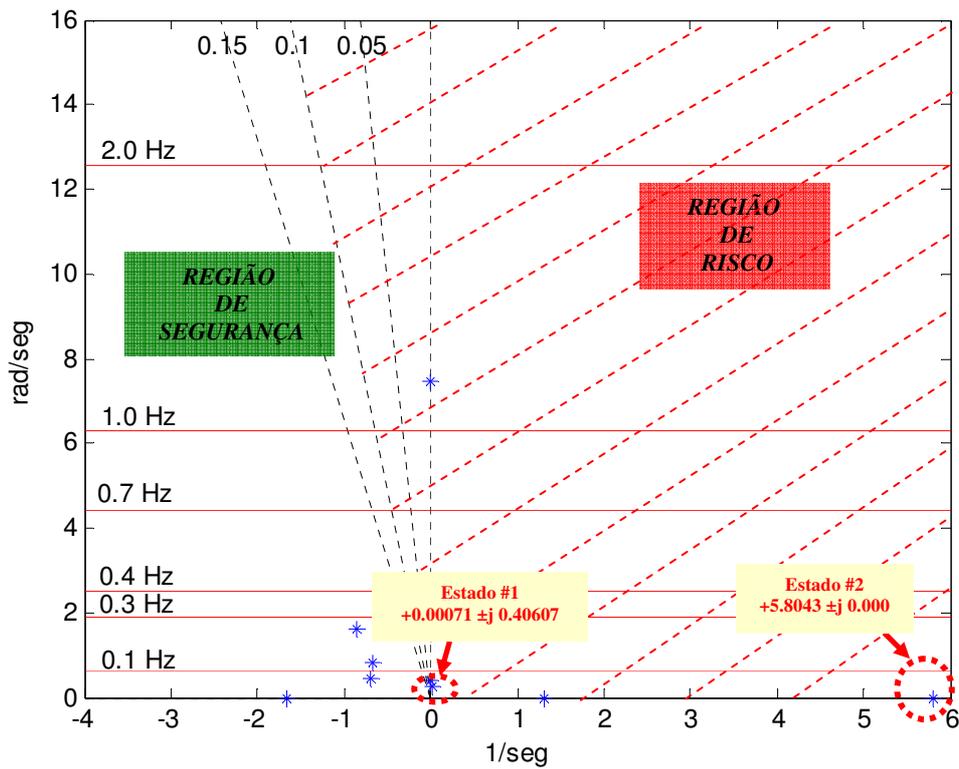


Figura V-3 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C1

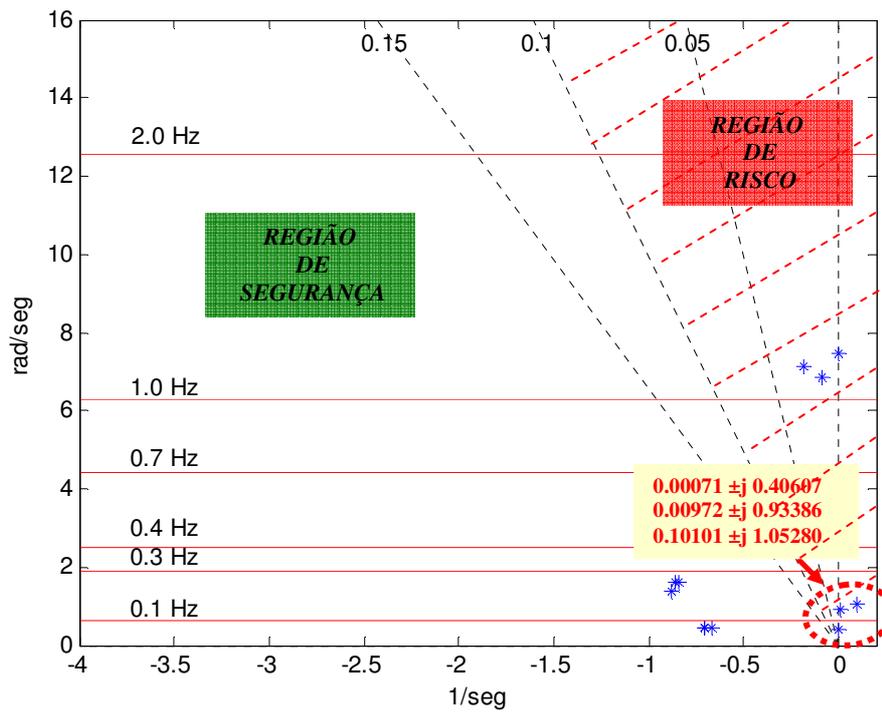


Figura V-4 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C2

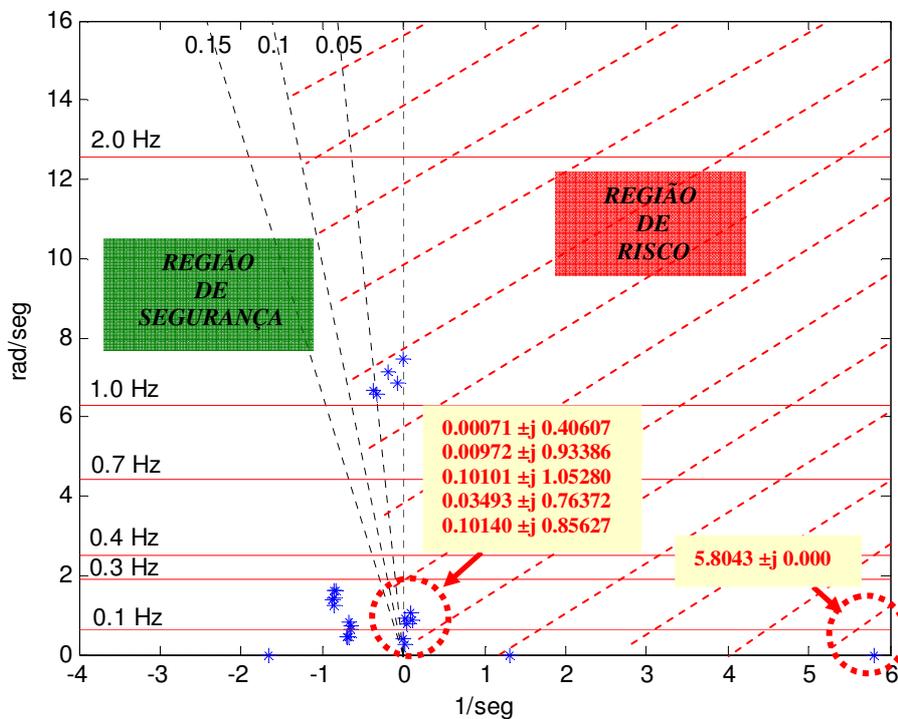


Figura V-5 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C3

A **Tabela V-9** mostra os resultados de indicadores de segurança probabilística obtidos nos três experimentos (#C1, #C2 e #C3) descritos anteriormente.

Tabela V-9 – Indicadores de Segurança Probabilística do Sistema 5 Barras – Sem Estabilizadores

Indicadores de Segurança Estática Probabilística		Experimento #C1	Experimento #C2	Experimento #C3
Simbologia	Nome			
POI	$P_{instabilidade}$	100%	100%	100%
POE	$P_{estabilidade}$	0%	0%	0%
PAM	$P_{amort} < 0\%$	100%	100%	100%
	$0\% < P_{amort} < 5\%$	0%	0%	0%
	$5\% < P_{amort} < 10\%$	0%	0%	0%
	$10\% < P_{amort} < 15\%$	0%	0%	0%
	$15\% < P_{amort} < 20\%$	0%	0%	0%
PFE	$0.1 \text{ Hz} < P_{freq} < 3.0 \text{ Hz}$	100%	100%	100%
PFS	$P_{freq} > 3.0 \text{ Hz}$	0%	0%	0%
EMC	$E(\lambda_{crit})$	5.223941	0.044434	1.098296
EFA	$E(\zeta_{crit})$	-90.017485	-4.271506	-24.305511
MAM	$\bar{\lambda}_{crit}$	2.902505	0.037147	1.008678
MAC	$\bar{\zeta}_{crit}$	-50.087423	-3.588730	-21.182495
MDM	$MD(\lambda_{crit})$	2.902505	0.009720	0.067970
MDA	$MD(\zeta_{crit})$	-50.087423	-1.040780	-7.059724
ESS	$E(Insucesso)$	2	3	6
ESP	$E(Sucesso Parcial)$	0	0	0
EST	$E(Sucesso Total)$	0	0	0
PSS	$P_{Insucesso}$	100%	100%	100%
PSP	$P_{Sucesso Parcial}$	0%	0%	0%
PST	$P_{Sucesso Total}$	0%	0%	0%

Pode-se notar pelos resultados apresentados na **Tabela V-9** que os três experimentos possuem todos os estados com fator de amortecimento negativo, ou seja, pelo menos um autovalor com parte real positiva. Esse resultado indica que o sistema é instável, ou seja,

o sistema não é seguro do ponto de vista de pequenas perturbações, sob as incertezas modeladas.

Observa-se, pelos indicadores apresentados na **Tabela V-9**, que os três experimentos possuem a totalidade de estados instáveis e, portanto, a probabilidade de ocorrência de instabilidade – *POI* é de 100%.

Estes resultados mostram que todos os estados possíveis do espaço probabilístico são de natureza instável e o risco do sistema é de 100%.

O indicador de probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento menor que zero ($PAM < 0$) alcança obviamente um valor de 100% para os três experimentos, ou seja, este indicador apresenta total coerência com o indicador *POI*, como era de se esperar.

O indicador de probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento situado na faixa de 0 a 5% ($0\% < PAM < 5\%$) é de 0% para os três experimentos.

Essa situação é inadequada, pois variações pequenas de carga, levariam o sistema a oscilações mal amortecidas, resultando em flutuações de potência e tensão que degradariam a qualidade de fornecimento de energia.

Foram também calculadas as probabilidades de ocorrência de amortecimento nas faixas de segurança – $PAM > 10\%$, ou seja, superiores ao mínimo especificado (10%) e o valor obtido foi zero nos três experimentos realizados.

Outro indicador determinado foi a probabilidade de ocorrência de frequência na faixa de 0.1 a 3.0 Hz ($0.1 \text{ Hz} < PFE < 3.0 \text{ Hz}$) e o valor encontrado foi de 100% nos três experimentos avaliados. O índice de 100% se deve à presença do modo eletromecânico característico da oscilação do gerador 2 contra a barra 4.

Conforme pode-se constatar, analisando os indicadores baseados em medidas de probabilidades (*POE*, *POI* e *PAM*), o sistema apresenta o mesmo grau segurança nos três experimentos. Porém, o resultado obtido adiante pelo cálculo da expectância da margem do autovalor crítico – *EMC mostra a criticidade relativa de cada experimento*.

Para o indicador EMC foi obtido um valor positivo da ordem de 5.223941 para o experimento #C1, 0.044434 para o experimento #C2 e 1.098296 para o experimento #C3. Isto indica que o sistema não possui margem e está no semi-plano da direita, conforme ilustrado na **Figura V-6**.

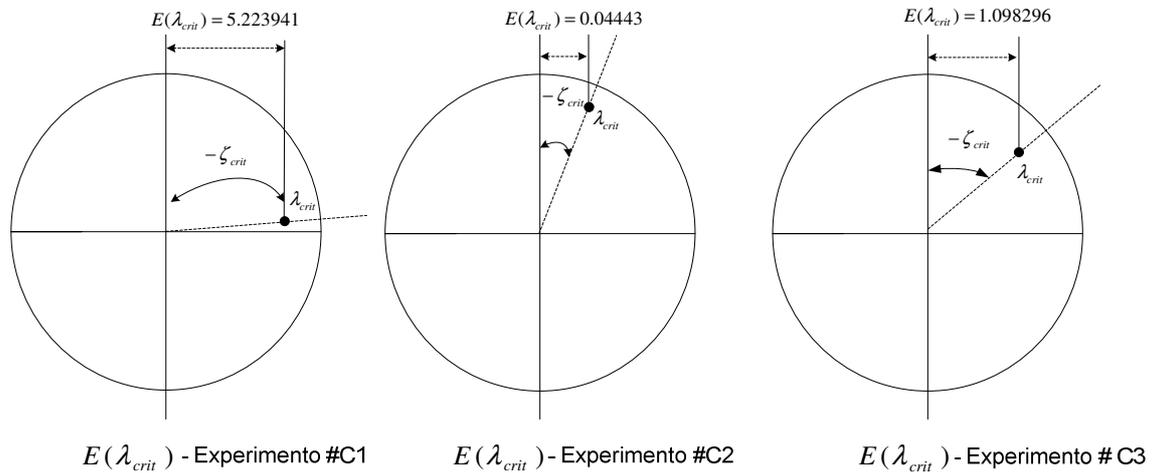


Figura V-6 – Expectância da Margem do Autovalor e Amortecimento Crítico

A mesma conclusão é válida para o indicador EFA , onde foi obtido um amortecimento negativo, da ordem de -90.017485% para *experimento #C1*, -4.27151% para *experimento #C2* e -24.305511% para o *experimento #C3*, ou seja, o amortecimento crítico é negativo nos três experimentos. Esses resultados mostram que o *experimento #C1* é o mais crítico deles, seguido dos *experimentos #C3* e *#C2*.

Na **Tabela V-8** foram apresentados os autovalores encontrados em cada experimento. Pode ser verificado que o *experimento #C1* possui o estado #2 com pólo real positivo e conseqüentemente o amortecimento é negativo (-100%). Este estado possui a maior probabilidade de ocorrência, 90% , portanto foi ele que influenciou na determinação dos indicadores EFA e EMC . O mesmo ocorre com o *experimento #C3*, onde o estado #4 possui também um pólo real positivo e o amortecimento é negativo (-100%), porém a probabilidade neste experimento é de apenas 18% . Como o *experimento #C2* apresentou maior valor para parte real positiva ($+0.10101$) e também o maior amortecimento (-9.550560%), com probabilidade de 40% , conseqüentemente foi o experimento de menor grau de severidade e de maior segurança.

Note-se entretanto que como estes indicadores baseados em medidas centrais (*EFA* e *EMC*) são ponderados pelas probabilidades, conseqüentemente as situações com maiores chance de ocorrer apresentarão maior influência na determinação de índices. Isto mostra que a análise determinística nem sempre mostra o pior caso, devido ao fato de considerar que todos os estados têm a mesma probabilidade de ocorrência, ou seja, unitária.

Mais dois indicadores *MAM* e *MDM*, também relacionados à margem do sistema ao semi-plano da direita, foram obtidos. Estes índices informam a média aritmética e a mediana das distâncias dos autovalores críticos dos estados sobre o semi-plano complexo. Como se sabe, a mediana pode ser mais conveniente como indicador central que a média aritmética, porque não sofre influência de valores extremos. Não apenas a expectância da margem do autovalor crítico – *EMC*, apresentou valor positivo nos três experimentos, como também a média aritmética – *MAM* (2.902505, 0.037147 e 1.008678) e a mediana – *MDM* (2.902505, 0.00972 e 0.067970), indicativos de um sistema com alto risco. Sabe-se porém, que esses dois últimos indicadores não são ponderados pelas probabilidades de ocorrência de cada estado. Assim, *pode-se eventualmente sugerir a exigência de uma mediana negativa como possível critério prático e conservativo de segurança a ser testado e talvez validado*. Os mesmos tipos de indicadores, porém relacionados aos amortecimentos críticos, também foram obtidos. Estes indicadores são *MAC* e *MDA* que determinam a média aritmética e a mediana dos amortecimentos críticos dos estados. Os valores obtidos são positivos, portanto considerados críticos nos três experimentos, sendo que o *experimento #C1* é o mais crítico deles, seguidos de *#C2* e *#C3*.

V.4.2 Interpretação dos Resultados: Experimentos #C4, #C5, #C6

Como o sistema é instável para todos os experimentos, utilizou-se o estabilizador projetado em Barbosa [53] para restaurar a estabilidade do sistema e melhorar os índices probabilísticos relacionados a estabilidade do sistema. Nesse estabilizador, o sinal de entrada considerado é o desvio de velocidade do rotor da máquina e está apresentado na **Figura A-3** do **Anexo A**.

Cabe destacar que o *estado #2* do *experimento #C1* e o *estado #4* do *experimento #C3* são aqueles de maior influência por apresentar pólo real elevado no semi-plano direito, em torno de +5.8043.

As **Figuras V-7 a V-9** mostram o mapeamento dos pólos em malha fechada de todos os estados do espaço probabilístico para os três experimentos descritos na **Tabela V-2** (#C4, #C5 e #C6) e as respectivas linhas do lugar geométrico dos fatores de amortecimento constantes, para 5%, 10% e 15%. Nestas figuras, apenas os pontos mais próximos ao eixo imaginário são mostrados. Estão também destacadas os autovalores críticos para cada um dos estados probabilísticos do experimento analisado.

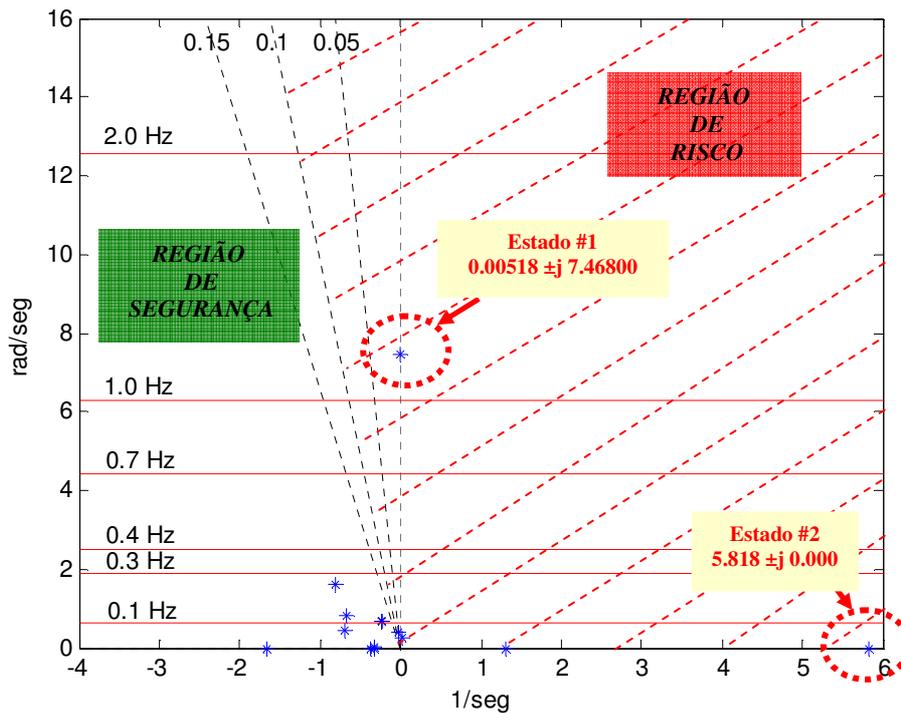


Figura V-7 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C4

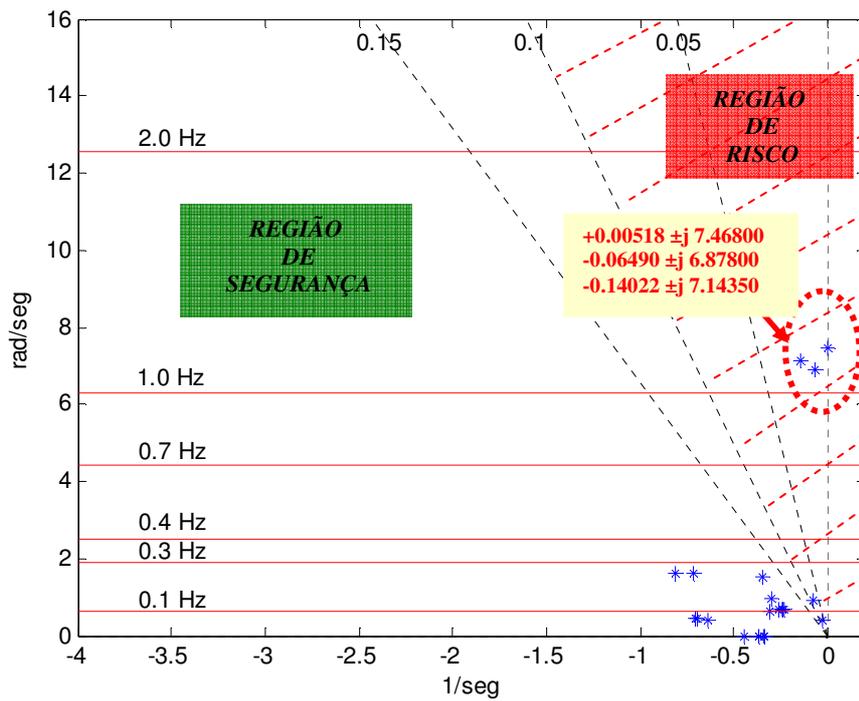


Figura V-8 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C5

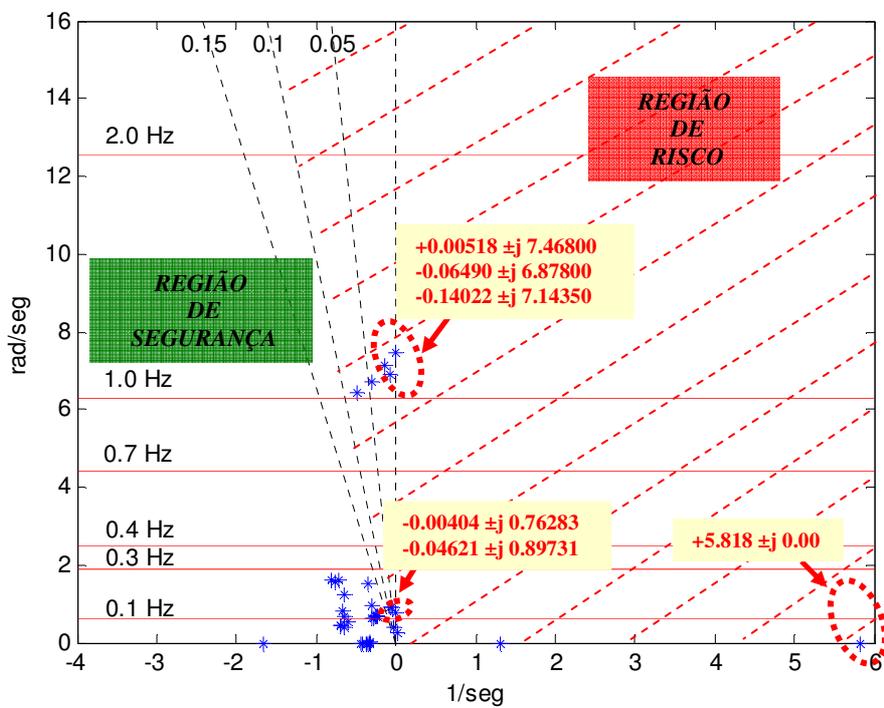


Figura V-9 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C6

A **Tabela V-10** mostra os resultados de indicadores de segurança para os três experimentos (#C4, #C5 e #C6) com a presença de estabilizadores de sistema de potência.

Tabela V-10 – Indicadores de Segurança Probabilística do Sistema 5 Barras – Com Estabilizadores

Indicadores de Segurança Estática Probabilística		Experimento #C4	Experimento #C5	Experimento #C6
Simbologia	Nome			
POI	$P_{instabilidade}$	100%	20%	20%
POE	$P_{estabilidade}$	0%	80%	80%
PAM	$P_{amort} < 0\%$	100%	20%	20%
	$0\% < P_{amort} < 5\%$	0%	80%	80%
	$5\% < P_{amort} < 10\%$	0%	0%	0%
	$10\% < P_{amort} < 15\%$	0%	0%	0%
	$15\% < P_{amort} < 20\%$	0%	0%	0%
PFE	$0.1 \text{ Hz} < P_{freq} < 3.0 \text{ Hz}$	100%	100%	100%
PFS	$P_{freq} > 3.0 \text{ Hz}$	0%	0%	0%
EMC	$E(\lambda_{crit})$	5.236718	-0.081012	1.021049
EFA	$E(\zeta_{crit})$	-90.006936	1.148556	-16.117985
MAM	$\bar{\lambda}_{crit}$	2.911590	-0.066647	0.927968
MAC	$\bar{\zeta}_{crit}$	-50.034681	0.945570	-15.375752
MDM	$MD(\lambda_{crit})$	2.911590	-0.064900	-0.025125
MDA	$MD(\zeta_{crit})$	-50.034681	0.943546	0.736573
ESS	$E(Insucesso)$	2	1	2
ESP	$E(Sucesso Parcial)$	0	2	4
EST	$E(Sucesso Total)$	0	0	0
PSS	$P_{Insucesso}$	100%	33.33%	33.33%
PSP	$P_{Sucesso Parcial}$	0%	66.67%	66.67%
PST	$P_{Sucesso Total}$	0%	0%	0%

Os indicadores obtidos considerando os estabilizadores, mostram que para todos os estados analisados, a taxa de amortecimento mínima especificada 10% ainda não foi alcançada. Especificamente para os *experimentos #C4 e #C6, cenário de intercâmbio com área 2 como exportadora*, que apresentavam um estado com pólo real instável no

sempi plano direito (estado #2 no *experimento #C4* e estado #4 no *experimento #C6*), não se conseguiu obter a estabilização desejada. Para o estado #1 dos *experimentos #C4* e *#C6*, cenário de intercâmbio com área 1 como exportadora, também mostrou-se um pequeno ganho no amortecimento desejado.

Por outro lado, no *experimento #C5*, onde são consideradas as incertezas em patamares de carga, observou-se nas condições de carga média e leve, com a presença de estabilizadores, deslocamento dos autovalores do semiplano direito para o esquerdo, mas a taxa de amortecimento definida no critério ainda não foi alcançada. Cabe destacar que para este experimento o cenário de intercâmbio analisado foi o *cenário #1, área 1 como exportadora*, de menor criticidade.

Os ajustes considerados não foram adequados para todos os estados analisados, logo deveria se recorrer ao uso de ações de controle para restaurar a estabilidade do sistema ou melhorar os índices probabilísticos relacionados ao baixo amortecimento do sistema. Dentre as várias metodologias existentes na literatura, propõe-se a utilização do método descrito em Bomfim [59], que leva em consideração o ajuste coordenado de estabilizadores de potência considerando múltiplos pontos de operação (múltiplos estados, na nomenclatura desse trabalho). No entanto, como este problema não é objeto precípua desta Tese, não se investigou em detalhes um ajuste adequado que pudesse atender simultaneamente todos os estados analisados com os níveis de amortecimentos desejados.

Cabe destacar aqui que esse estabilizador não foi adequado para amortecer todos os estados do espaço probabilístico, tendo em vista que o mesmo foi projetado especificamente para amortecer os modos instáveis identificados no caso avaliado em Barbosa [53].

Na **Tabela V-10** são apresentados os indicadores encontrados. Pode ser verificado que o *experimento #C4* possui a totalidade de estados instáveis e, portanto, a probabilidade de ocorrência de instabilidade - *POI* é de 100% e de estabilidade - *POE* é de 0%.

Pode-se notar que para o *experimento #C4*, quando somente as incertezas em cenários de intercâmbios são consideradas, todos os estados possuem fator de amortecimento negativo, ou seja, existe pelo menos um autovalor com parte real positiva. Esse resultado indica que o sistema é instável e o sistema não é seguro do ponto de vista de pequenas perturbações.

Por outro lado, os *experimentos #C5* e *#C6* analisados, geram estados com fator de amortecimento positivo, ou seja, estados que apresentam autovalores com parte real negativa, excetuando-se o estado #1 do *experimento #C5* e os estados #1 e #4 do *experimento #C6*. Esse resultado indica que o sistema é parcialmente estável. Portanto, o valor obtido para o indicador de probabilidade de ocorrência de instabilidade – *POI* é de 20% e, por conseguinte, a probabilidade de estabilidade – *POE* é de 80%. Estes resultados mostram que a influência preponderante dos estados possíveis do espaço probabilístico é de natureza estável e o risco do sistema é de apenas 20%.

O indicador de probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento menor que zero ($PAM < 0$) alcança um valor de 100% para o *experimento #C4*, 20% para os *experimentos #C5* e *#C6*. Como era de se esperar, este indicador apresenta total coerência com o indicador *POI*.

O indicador de probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento situado na faixa ($0\% < PAM < 5\%$) é de 0% para o *experimento #C4* e de 80% para os *experimentos #C5* e *#C6*. Portanto, o fato de o índice situar-se no patamar de 80% para os dois casos advém da ponderação probabilística.

Essa situação é inadequada, pois variações pequenas de carga, levariam o sistema a oscilações mal amortecidas, resultando em flutuações de potência e tensão que degradariam a qualidade de fornecimento de energia.

Foram também calculadas as probabilidades de ocorrência de amortecimento nas faixas de segurança – $PAM > 10\%$, ou seja, superiores ao mínimo especificado (10%) e o valor obtido foi zero nos três experimentos analisados.

Foi também calculada a expectância da margem do autovalor crítico – EMC , ao semi-plano da direita. De forma similar, foi ainda calculada a expectância da margem do pior amortecimento – EFA .

Para o indicador EMC foi obtido um valor positivo da ordem de 5.236718 para o *experimento #C4*, -0.081012 para o *experimento #C5* e 1.021049 para o *experimento #C6* (Vide **Figura V-10**). Isto indica que nos *experimentos #C4* e *#C6* o sistema não possui margem e está no semi-plano da direita, conforme ilustrado na **Figura V-10**.

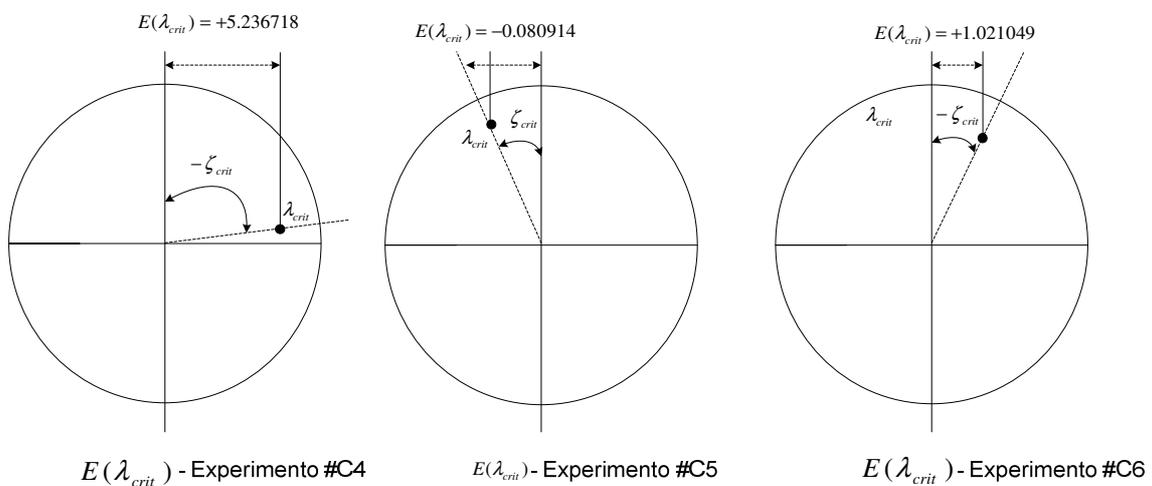


Figura V-10 – Expectância da Margem do Autovalor e Amortecimento Crítico

A mesma conclusão é válida para o indicador EFA , onde os *experimentos #C4* e *#C6* estão com amortecimento negativo e alto, da ordem de -90.006936% e -16.117985, respectivamente. Por outro lado, o *experimento #C5* apresentou amortecimento positivo, porém reduzido, cerca de 1.148556%. Portanto, o fato dos indicadores EMC e EFA se apresentarem mais críticos nos *experimentos #C4* e *#C6* advém da ponderação probabilística.

Nos três *experimentos (#C4, #C5 e #C6)*, o indicador MAM apresentou resultado análogo ao indicador EMC anteriormente calculado, excetuando-se o indicador MDM onde foi obtido um valor negativo no *experimento #C6*, o que indica uma margem pequena ao semiplano da direita.

Os mesmos tipos de indicadores, porém relacionados aos amortecimentos críticos (*MAC* e *MDA*), apresentaram resultados semelhantes aos indicadores anteriormente determinados, ou seja, nos três *experimentos* (#C4, #C5 e #C6), o indicador *MAC* apresentou resultado análogo ao indicador *EFA*, excetuando-se o indicador *MDA*, onde no *experimento* #C6 foi obtido um amortecimento pequeno, porém positivo, indicativo de um sistema com alto risco.

Dado que o critério de estabilidade a pequenas perturbações não foi atendido em todos os estados, pode se recorrer ao uso de ações de controle para restaurar a estabilidade do sistema ou a fim de melhorar os índices probabilísticos relacionados ao baixo amortecimento do sistema. Sendo assim, deve-se prosseguir a uma nova etapa da metodologia para efetuar uma nova análise até que se determine o indicador probabilístico *POI* igual a zero, ou seja, o sistema se torne estável para todos os estados e o índice $PAM \leq \zeta_{\min}$ seja zero, ou seja, todos os modos de oscilação apresentem amortecimentos maiores que 10%, por exemplo. Na condição de inexistência de ações de controle finaliza-se a análise, classifica-se e contabilizam-se os indicadores de estabilidade do sistema a pequenas perturbações.

V.4.3 Interpretação dos Resultados: Experimentos #C7, #C8, C#9

Para o *sistema New England* foi efetuado o mesmo procedimento de análise do sistema-teste 5 barras.

O espaço probabilístico obtido para os três experimentos (#C7, #C8 e #C9) sem a presença dos estabilizadores de sistema de potência é mostrado na **Tabela V-11**.

Tabela V-11 – Espaços Probabilísticos do Sistema New England

Espaço Probabilístico de Cenários – Experimento #C7									
Estado	Intercâmbio	Carga	Barra Origem	Barra Destino	Circuito	Topologia	Probabilidade	Fluxo de Potência	Violação
1	—	PESADA	—	—	—	N	0,2	Viável	Não Há
2	—	MÉDIA	—	—	—	N	0,4	Viável	Não Há
3	—	LEVE	—	—	—	N	0,4	Viável	Não Há
Espaço Probabilístico de Cenários – Experimento #C8									
Estado	Intercâmbio	Carga	Barra Origem	Barra Destino	Circuito	Topologia	Probabilidade	Fluxo de Potência	Violação
1	—	PESADA	—	—	—	N	9.04E-001	Viável	Não Há
2	—	PESADA	6	11	1	N-1	1.24E-002	Viável	Não Há
3	—	PESADA	21	22	1	N-1	2.89E-002	Viável	Não Há
4	—	PESADA	9	39	1	N-1	5.16E-002	Viável	Não Há
5	—	PESADA	6	11	1	N-2	4.00E-004	Viável	Não Há
			21	22	1				
6	—	PESADA	9	39	1	N-2	6.81E-004	Viável	Não Há
			6	11	1				
7	—	PESADA	21	22	1	N-2	1.53E-003	Viável	Não Há
			9	39	1				
Espaço Probabilístico de Cenários – Experimento #C9									
Estado	Intercâmbio	Carga	Barra Origem	Barra Destino	Circuito	Topologia	Probabilidade	Fluxo de Potência	Violação
1	—	PESADA	—	—	—	N	1.81E-01	Viável	Não Há
2	—	PESADA	6	11	1	N-1	2.48E-03	Viável	Não Há
3	—	PESADA	21	22	1	N-1	5.78E-03	Viável	Não Há
4	—	PESADA	9	39	1	N-1	1.03E-02	Viável	Não Há
5	—	PESADA	6	11	1	N-2	8.0E-05	Viável	Não Há
			21	22	1				
6	—	PESADA	9	39	1	N-2	1..36E-04	Viável	Não Há
			6	11	1				
7	—	PESADA	21	22	1	N-2	3.07E-04	Viável	Não Há
			9	39	1				
8	—	MÉDIA	—	—	—	N	3.62E-01	Viável	Não Há
9	—	MÉDIA	6	11	1	N-1	4.96E-03	Viável	Não Há
10	—	MÉDIA	21	22	1	N-1	1.16E-02	Viável	Não Há
11	—	MÉDIA	9	39	1	N-1	2.06E-02	Viável	Não Há
12	—	MÉDIA	6	11	1	N-2	1.60E-04	Viável	Não Há
			21	22	1				
13	—	MÉDIA	6	11	1	N-2	2.72E-04	Viável	Não Há
			9	39	1				
14	—	MÉDIA	21	22	1	N-2	6.13E-04	Viável	Não Há
			9	39	1				
15	—	LEVE	—	—	—	N	3.62E-01	Viável	Não Há
16	—	LEVE	6	11	1	N-1	4.96E-03	Viável	Não Há
17	—	LEVE	21	22	1	N-1	1.16E-02	Viável	Não Há
18	—	LEVE	9	39	1	N-1	2.06E-02	Viável	Não Há
19	—	LEVE	6	11	1	N-2	1.60E-04	Viável	Não Há
			21	22	1				
20	—	LEVE	6	11	1	N-2	2.72E-04	Viável	Não Há
			9	39	1				
21	—	LEVE	21	22	1	N-2	6.13E-04	Viável	Não Há
			9	39	1				

Os resultados de autovalores, amortecimentos e frequências de cada estado do espaço probabilístico são apresentados em forma gráfica nas **Figuras V-11 a V-13**.

Nestas figuras, apenas os pontos mais próximos ao eixo imaginário são mostrados. Estão também destacadas os autovalores que estão fora da região de segurança para cada um dos experimentos realizados, ou seja, não atendem o critério estabelecido para pequenas perturbações na **Seção V.2**.

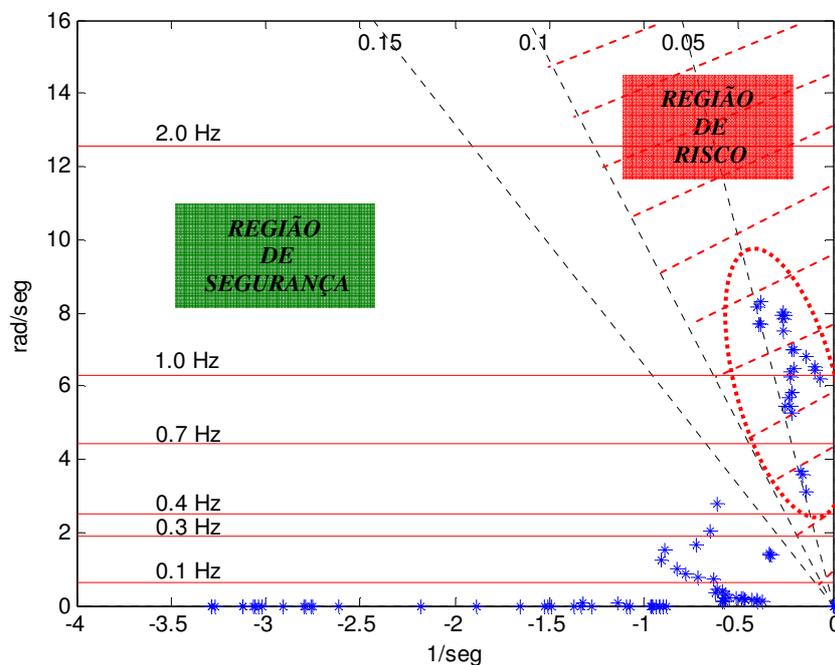


Figura V-11 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C7

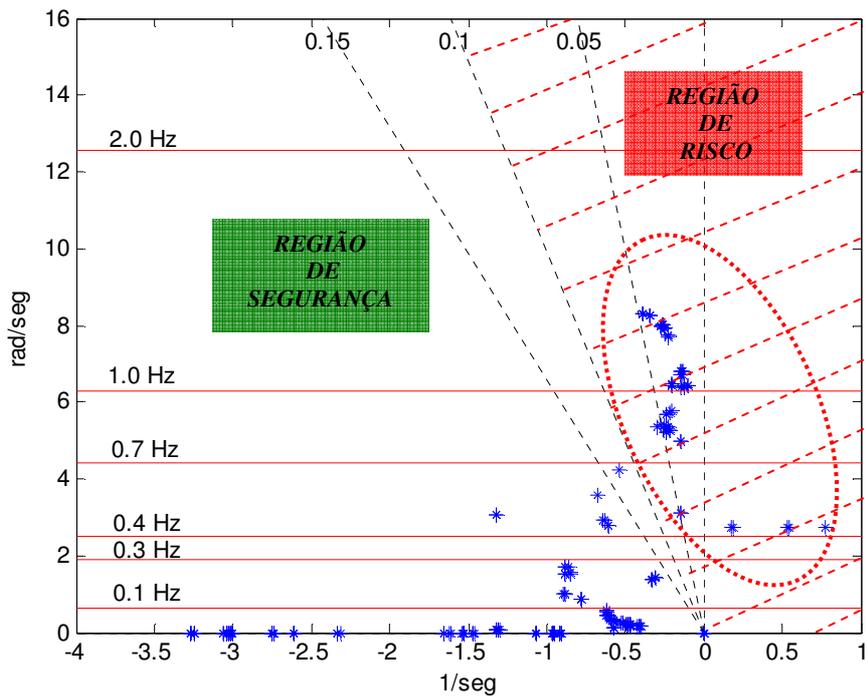


Figura V-12 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C8

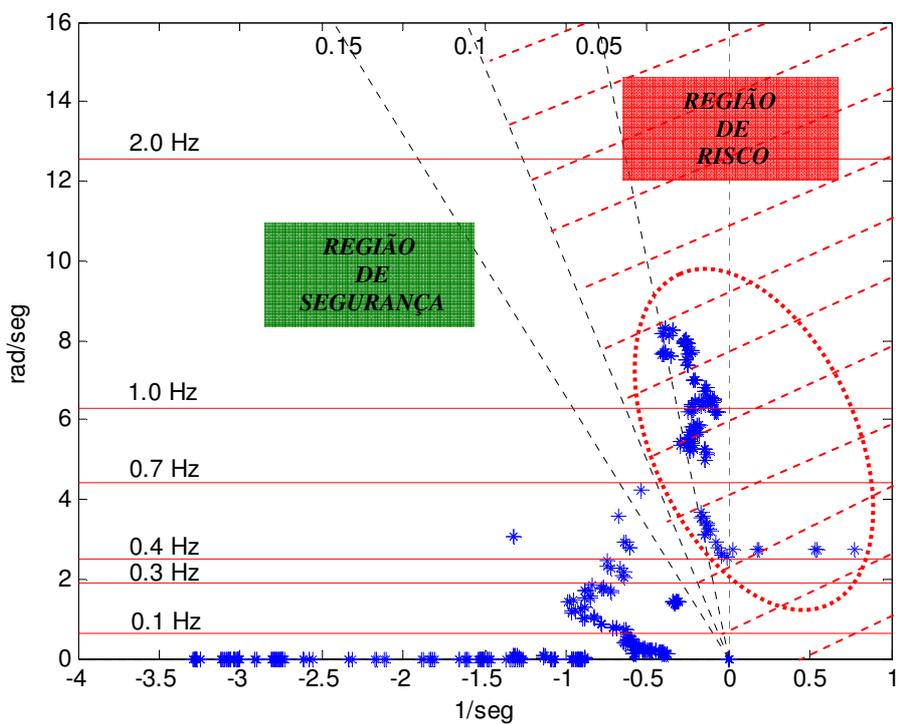


Figura V-13 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C9

Na **Tabela V-12** estão apresentados os indicadores propostos, obtidos para esse sistema.

Tabela V-12 – Indicadores de Segurança Probabilística – Sistema New England

Indicadores de Segurança Estática Probabilística		Experimento #C7	Experimento #C8	Experimento #C9
Simbologia	Nome			
POI	$P_{instabilidade}$	0%	8.314%	1.724%
POE	$P_{estabilidade}$	100%	91.670%	98.260%
PAM	$P_{amort} < 0\%$	0%	8.314%	1.724%
	$0\% < P_{amort} < 5\%$	100%	91.670%	98.260%
	$5\% < P_{amort} < 10\%$	0%	0%	0%
	$10\% < P_{amort} < 15\%$	0%	0%	0%
	$15\% < P_{amort} < 20\%$	0%	0%	0%
PFE	$0.1 \text{ Hz} < P_{freq} < 3.0 \text{ Hz}$	100%	100%	100%
PFS	$P_{freq} > 3.0 \text{ Hz}$	0%	0%	0%
EMC	$E(\lambda_{crit})$	-0.084694	-0.064267	-0.077074
EFA	$E(\zeta_{crit})$	1.326440	0.465121	1.117241
MAM	$\bar{\lambda}_{crit}$	-0.087023	0.288534	0.051835
MAC	$\bar{\zeta}_{crit}$	1.361521	-10.855250	-2.850798
MDM	$MD(\lambda_{crit})$	-0.092570	0.188760	-0.069830
MDA	$MD(\zeta_{crit})$	1.419381	-6.870765	1.235418
ESS	$E(Insucesso)$	0	5	6
ESP	$E(Sucesso Parcial)$	3	2	15
EST	$E(Sucesso Total)$	0	0	0
PSS	$P_{Insucesso}$	0%	71.43%	28.57%
PSP	$P_{Sucesso Parcial}$	100%	28.57%	71.43%
PST	$P_{Sucesso Total}$	0%	0%	0%

Os resultados apresentados na **Tabela V-12** indicam que para esse sistema apenas o *experimento #C7* apresenta todos os estados com fator de amortecimento positivo. Portanto, o sistema é estável do ponto de vista de estabilidade a pequenas perturbações, porém todos os estados apresentam fator de amortecimento inferior ao critério pré-estabelecido (10%), caracterizando portanto um modo de falha de segurança.

O mesmo não ocorre com os *experimentos #C8 e #C9* que apresentam um determinado percentual de estados com fator de amortecimento negativo, caracterizando um risco para o sistema.

Por outro lado, o *experimento #C8* foi avaliado considerando incertezas somente em topologias. O valor obtido para o indicador de probabilidade de ocorrência de instabilidade – *POI* foi de 8.314% e, por conseguinte, a probabilidade de estabilidade – *POE* é de 91.670%. Estes resultados mostram que do ponto de vista estatístico, o risco do sistema é de apenas 8.314%, o que enfatiza a relevância e o significado da análise estocástica. O *experimento #C9* é menos crítico em relação ao *experimento #C8*, com a chance de instabilidade ocorrendo em 28.57% dos estados analisados.

Coerentemente, o indicador de probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento menor que zero ($PAM < 0$) alcançou o valor de 0% para o *experimento #C7*, 8.314% para o *experimento #C8* e 1.724% para o *experimento #C9*, ou seja, apenas o *experimento #7* não possui fator de amortecimento negativo.

Para o indicador de probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento menor que ζ_{\min} e maior que zero ($0 < PAM < 5$), o valor encontrado foi de 100% no *experimento #C7*, de 91.670% no *experimento #C8* e de 98.26% no *experimento #C9*, ou seja, todos os possíveis estados analisados possuem o fator de amortecimento $< \zeta_{\min}$. Esta situação também é inaceitável, pois variações muito pequenas de carga, geração, etc poderiam levar a oscilações levemente amortecidas, podendo resultar em flutuações de potência e tensão que degradariam a qualidade de fornecimento de energia.

Foi também calculada a probabilidade de ocorrência de amortecimento nas faixas de 10% a 15% e 15% a 20%, ou seja, superior ao mínimo especificado (10%) e, como era de se esperar, o valor obtido foi de 0% nos três experimentos avaliados, ou seja, em nenhum dos estados analisados, o sistema possui fator de amortecimento superior ao ζ_{\min} .

Outro indicador determinado foi a probabilidade de ocorrência de frequência na faixa de 0.1 a 3.0 Hz e o valor encontrado foi de 100%, ou seja, todos os estados analisados

possuem os modos de oscilação que aparecem em um espectro de frequência que varia nessa faixa de frequência e podem ser classificados como eletromecânicos.

Para o indicador *EMC* foram obtidos valores médios da ordem de -0.084694 , -0.064267 e -0.077074 , respectivamente nos *experimentos* #C7, #C8 e #C9. Isto indica que o sistema possui uma pequena margem ao semi-plano da direita.

A mesma conclusão é válida para o indicador *EFA*, onde para estes experimentos foram obtidos valores da ordem de 1.326440% , 0.465121% e 1.117241% , respectivamente nos *experimentos* #C7, #C8 e #C9, ou seja, o amortecimento médio é bem reduzido (Vide **Figura V-14**).

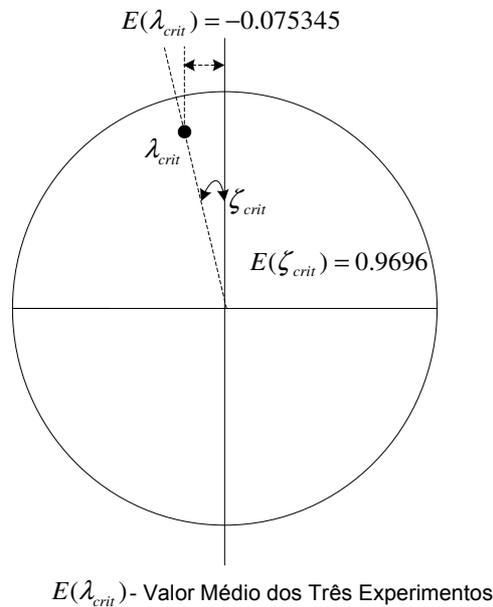


Figura V-14 – Expectância Média da Margem do Autovalor e Amortecimento Crítico

Novamente, um resultado muito interessante foi obtido com os indicadores baseados em medianas, *MDM* e *MDA* para o *experimento* #C8. Notou-se nesse caso que ambos os indicadores (*MDM* e *MDA*) continuam a sinalizar um perigo potencial para o sistema, enquanto os indicadores de expectativa não acusam risco. Por outro lado, os indicadores de média, *MAM* e *MAC* evidenciam alto poder discriminatório.

V.4.4 Interpretação dos Resultados: Experimentos #C10,#C11,#C12

A análise seguinte foi efetuada com o *sistema de maior porte do equivalentado Sul/Sudeste com 1762 barras*, associando-se incertezas em patamares de carga e topologias e por último, uma combinação dessas duas classes de incertezas. Os dados probabilísticos utilizados nestes experimentos estão apresentadas nas **Tabelas V-4 e V-6**. Assim, as seguintes comparações foram feitas:

- Incertezas associadas a patamares de carga (3 simulações, #C10);
- Incertezas associadas a topologias (1+ 6 = 7 simulações, #C11);
- Incertezas associadas a patamares de carga e topologias (3x7=21 simulações, #C12).

Os resultados de autovalores, amortecimentos e frequências de cada estado do espaço probabilístico são apresentados em forma gráfica nas **Figuras V-15 a V-17**. Nestas figuras, apenas os pontos mais próximos ao eixo imaginário são mostrados.

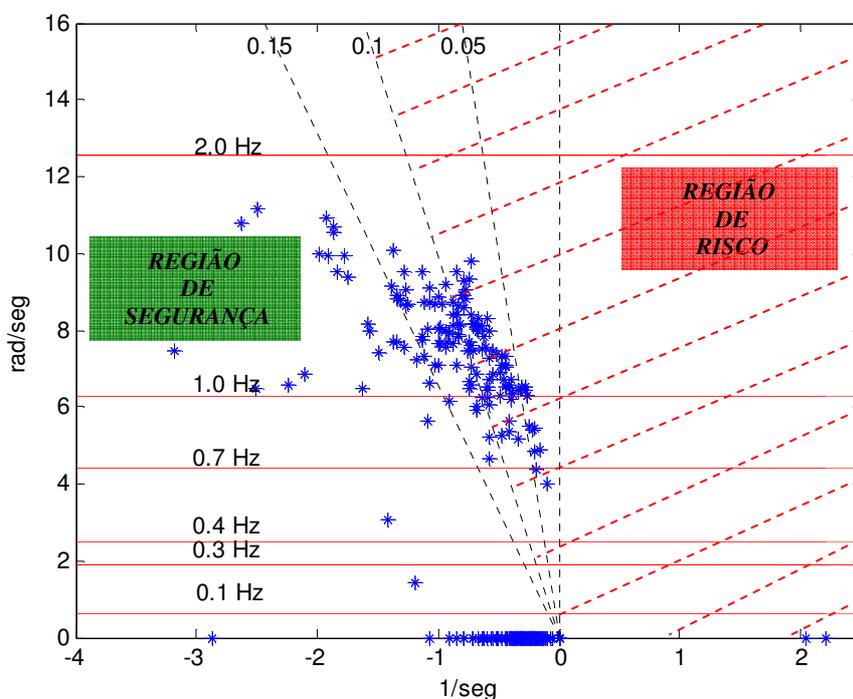


Figura V-15 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C10

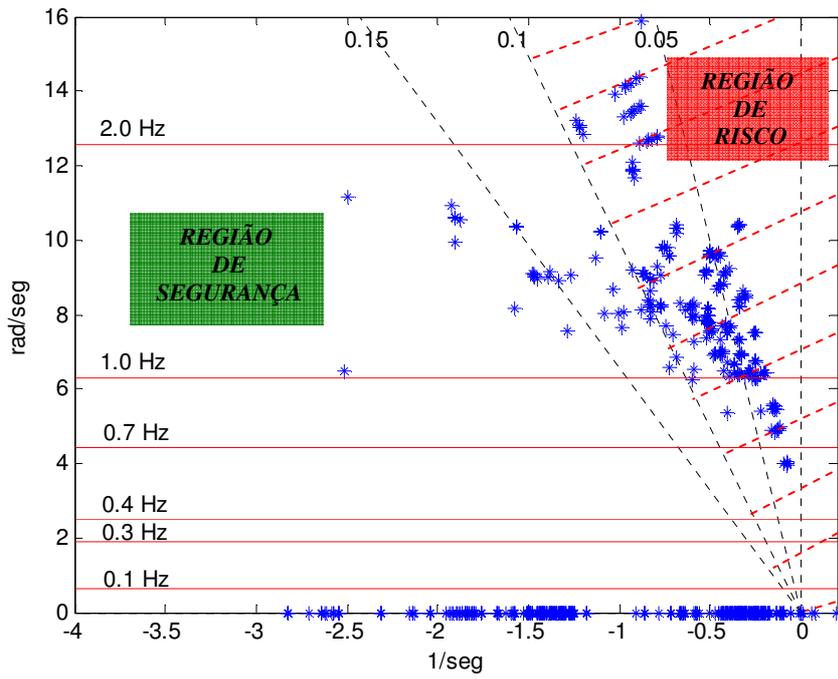


Figura V-16 – Autovalores do Espaço Probabilístico– Experimento #C11

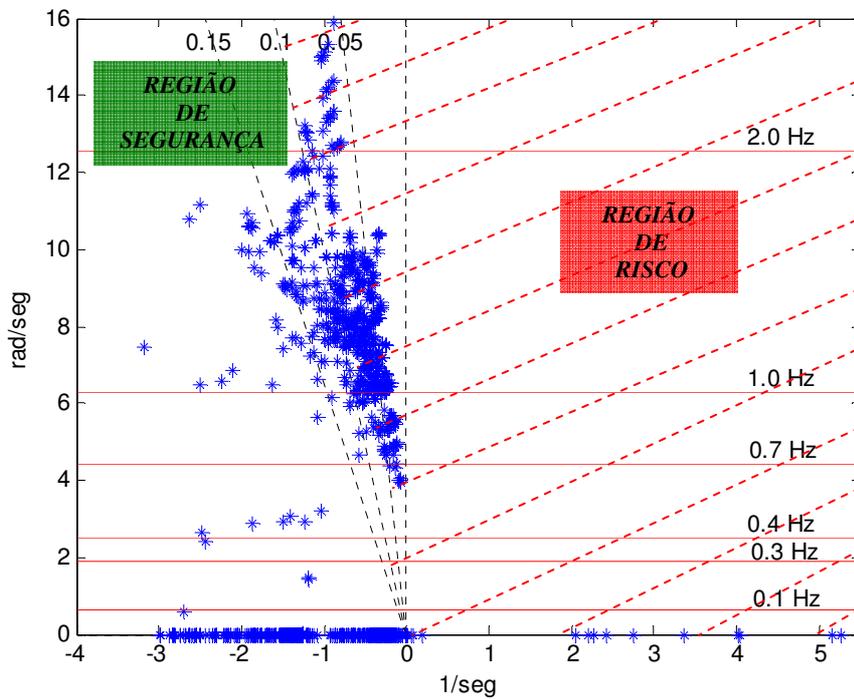


Figura V-17 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Experimento #C12

Os resultados obtidos na análise, dispostos nas **Figuras V-15 a V-17**, permitem tecer alguns comentários. Os resultados apresentados na **Tabela V-13** indicam que para esse sistema os *experimentos #C10 e #C12* são os mais críticos sob o ponto de vista de segurança probabilística a pequenas perturbações.

Tabela V-13 – Indicadores de Segurança Estática Probabilística do Sistema Equivalentado Sul/Sudeste

Indicadores de Segurança Estática Probabilística		Experimento #C10	Experimento #C11	Experimento #C12
Simbologia	Nome			
POI	$P_{instabilidade}$	80%	13.972%	75.171
POE	$P_{estabilidade}$	20%	83.484%	16.697
PAM	$P_{amort} < 0\%$	80%	13.972%	75.171
	$0\% < P_{amort} < 5\%$	20%	83.484%	16.697
	$5\% < P_{amort} < 10\%$	0%	0%	0%
	$10\% < P_{amort} < 15\%$	0%	0%	0%
	$15\% < P_{amort} < 20\%$	0%	0%	0%
PFE	$0.1 \text{ Hz} < P_{freq} < 3.0 \text{ Hz}$	100%	97.454%	91.87%
PFS	$P_{freq} > 3.0 \text{ Hz}$	0%	0%	0%
EMC	$E(\lambda_{crit})$	1.688814	-0.031255	1.703779
EFA	$E(\zeta_{crit})$	-79.510745	-11.969959	-74.770467
MAM	$\bar{\lambda}_{crit}$	1.398357	0.033194	1.610260
MAC	$\bar{\zeta}_{crit}$	-65.851242	-56.257732	-66.371625
MDM	$MD(\lambda_{crit})$	2.048	0.011070	0.196140
MDA	$MD(\zeta_{crit})$	-100.00	-100.00	-100.00
ESS	$E(Insucesso)$	2	4	14 + 4 (*)
ESP	$E(Sucesso Parcial)$	1	3	3
EST	$E(Sucesso Total)$	0	0	0
PSS	$P_{Insucesso}$	66.67%	57.14%	82.35%
PSP	$P_{Sucesso Parcial}$	33.333%	42.86%	17.65%
PST	$P_{Sucesso Total}$	0%	0%	0%

(*) Neste experimento foram detectados 4 estados inviáveis, ou seja, houve perda de convexidade.

Para os *experimentos #C10 e #C12*, o indicador conhecido como probabilidade de ocorrência de instabilidade – *POI* foi de 80% e 75.171% respectivamente, enquanto que o de estabilidade – *POE* foi de 20% e 16.697%. Por outro lado, o *experimento #C11*

apresentou maior robustez dos indicadores *POI* e *POE*, respectivamente da ordem de 13.972% e 83.484%, ou seja, quanto maior o valor do indicador *POE* e menor do *POI*, maior é grau de segurança do sistema frente a pequenas perturbações.

Coerentemente para os *experimentos* #C10 e #C12, o indicador de probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento menor que zero – *PAM* ($PAM < 0$) alcançou o valor de 80% para o *experimento* #C10 e 75.171% para o *experimento* #C12.

Para o indicador de probabilidade de ocorrência de fator de amortecimento menor que 5% e maior que zero ($0 < PAM < 5$), o valor encontrado foi de 20% no *experimento* #C10 e 16.697% no *experimento* #C12.

Cabe destacar que o indicador *PAM* para amortecimentos maiores que 5% foi zero, o que indica que nenhum dos estados dos três experimentos apresenta fator de amortecimento igual ou superior a 5%, caracterizando portanto um modo de falha de segurança. Foi também calculada a probabilidade de ocorrência de amortecimento nas faixas de 10 – 15 e 15 – 20, ou seja, superior ao mínimo especificado (10%) e, como era de se esperar, o valor obtido foi de 0% nos três experimentos avaliados, ou seja, em nenhum dos estados analisados, o sistema possui fator de amortecimento superior ao critério estabelecido.

Para o indicador *EMC* foi obtido um valor médio análogo para os *experimentos* #C10 e #C12, da ordem de 1.688814 e 1.703779 respectivamente. Isto indica que nestes dois experimentos em média o sistema está no semi-plano da direita. Para o *experimento* #C11, de maior grau de segurança, o valor encontrado foi pequeno e da ordem de -0.031255, sinalizando que neste experimento o sistema está no semiplano da esquerda, porém com uma pequena margem média.

A mesma conclusão é válida para o indicador *EFA*, onde foi obtido um valor da ordem de -79.510745% para *experimento* #C10 e -74.770467% para o *experimento* #C12, ou seja, o amortecimento médio é bastante negativo, indicativo da falta de amortecimento. No *experimento* #C11 o indicador *EFA* foi mais favorável com amortecimento médio negativo, porém menos negativo, da ordem de -11.969959%.

Cabe destacar que o valor elevado de amortecimentos médio se deve ao fato desses experimentos apresentarem alguns estados com pólos reais no semiplano da direita, ou seja, amortecimento de -100%.

Mais dois indicadores *MAM* e *MDM*, também relacionados à margem do sistema ao semi-plano da direita foram obtidos nesta análise. Estes índices informam em média a medida central da posição do autovalor crítico dos estados sobre o semi-plano complexo. Ambos os indicadores apresentaram resultados análogos nos três experimentos, com um valor positivo, indicando que em média os autovalores críticos estão semiplano da direita. Comparativamente ao indicador *EMC*, ponderado pela probabilidade, observa-se diferença significativa no indicador *MAM* para o *experimento #C11* e no indicador *MDM* para os *experimentos #C11 e #C12*.

O mesmo ocorreu com o indicador *MAC*, onde o *experimento #C11* apresentou-se mais crítico que o indicador *EFA*. Para o indicador *MDA*, observou valores idênticos e iguais a -100% nos três experimentos. Isso ocorre porque os experimentos possuem pólos reais no semiplano da direita e pela definição da mediana dos autovalores críticos, a mesma é calculada com base na ordem dos valores que formam o conjunto de estados.

Para o sistema estudado os indicadores baseados em expectâncias (*EMC*, *EFA*) apresentaram bom desempenho, sob o ponto de vista de poder discriminatório.

V.4.5 Requisitos Computacionais

Nos experimentos realizados com apenas cenários, o maior tempo de CPU gasto para a análise de segurança probabilística a pequenas perturbações foi para o sistema equivalentado Sul/Sudeste de 1762 barras, considerando uma combinação de incertezas em topologias e patamares de carga. O tempo gasto foi de aproximadamente um minuto, em média, o que corresponde ao cálculo dos autovalores, pelo algoritmo QR, de uma matriz de ordem 265, realizado 21 vezes (3 patamares de carga + 7 topologias). O computador utilizado foi um Pentium 4, de 3.2 MHz e memória RAM de 1024 kbytes.

V.5 Resultados Obtidos: Influência da Carga, Topologias e Dados Estocásticos sobre Indicadores

V.5.1 Influência da Carga

Apresenta-se nesta seção uma breve análise da influência do crescimento da carga sobre os indicadores de segurança probabilística propostos nesta Tese. Tal análise foi feita no sistema-teste de 5 barras, na condição de carga pesada e sem a presença dos estabilizadores de sistema de potência. As incertezas consideradas foram nos dois cenários de intercâmbios (área 1 exportadora máxima e área 2 exportadora máxima). Em seguida, avaliou-se a segurança desse sistema variando a carga total desse sistema-teste de 5 barras de 2650 MW até 2840 MW. As curvas relativas a essa análise podem ser encontradas na **Figura V-18**.

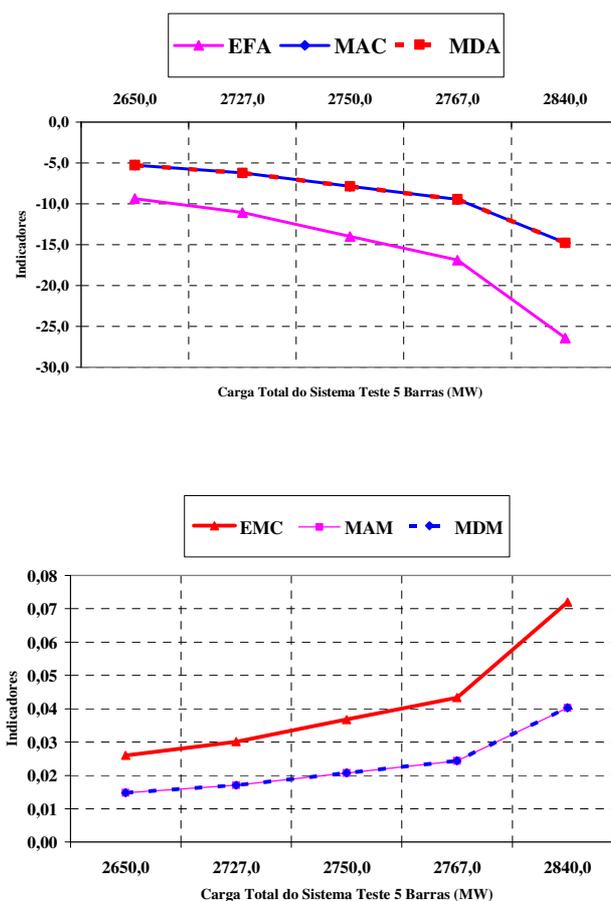


Figura V-18 – Análise de Sensibilidade – Cenário 1 Exportador Máximo: Variação da Carga Total

Conforme pode-se constatar, o comportamento dos indicadores não é diferente do que poder-se-ia esperar com tal variação, ou seja, o *aumento da carga leva a uma degradação dos indicadores baseados em medidas centrais (EFA, MAC, MDA, EMC, MAM e MDM)* propostos. Por outro lado, os indicadores baseados em medidas de probabilidades (*POI, POE, PAM, PFE e PFS*) *não sofreram nenhuma alteração para estes experimentos, dado que estes indicadores não medem o grau de robustez do sistema.*

V.5.2 Influência dos Dados Estocásticos

Em seguida, para o caso anterior com carga total de 2650 MW, procedeu-se à análise enfocando a variação de dados probabilísticos de cenários de intercâmbios entre áreas. As seguintes variações nas probabilidades foram feitas:

- Probabilidade do *cenário 1* variou de 10% para 95%;
- Probabilidade do *cenário 2* variou de 90% para 5%.

O *Caso 1* apresentado na **Tabela V-14** refere-se ao caso no qual as probabilidades dos cenários #1 e #2 foram de 10% e 90% e o *Caso 2* é o caso considerando a variação nos dados probabilísticos para 95% e 5%, respectivamente para os cenários #1 e #2.

Tabela V-14 – Análise de Sensibilidade: Variação de Dados Probabilísticos

Indicadores de Segurança Estática Probabilística		CASO 1	CASO 2
Simbologia	Nome		
POI	$P_{instabilidade}$	100%	100%
POE	$P_{estabilidade}$	0%	0%
PAM	$P_{amort} < 0\%$	100%	100%
	$0\% < P_{amort} < 5\%$	0%	0%
	$5\% < P_{amort} < 10\%$	0%	0%
	$10\% < P_{amort} < 15\%$	0%	0%
	$15\% < P_{amort} < 20\%$	0%	0%
PFE	$0.1 \text{ Hz} < P_{freq} < 3.0 \text{ Hz}$	100%	100%
PFS	$P_{freq} > 3.0 \text{ Hz}$	0%	0%

Indicadores de Segurança Estática Probabilística		CASO 1	CASO 2
Simbologia	Nome		
EMC	$E(\lambda_{crit})$	0.02598	0.00211
EFA	$E(\zeta_{crit})$	-9.36223	-0.68526
MAM	$\bar{\lambda}_{crit}$	0.01475	0.01475
MAC	$\bar{\zeta}_{crit}$	-5.27895	-5.27895
MDM	$MD(\lambda_{crit})$	0.01475	0.01475
MDA	$MD(\zeta_{crit})$	-5.27895	-5.27895
ESS	$E(Insucesso)$	2	2
ESP	$E(Sucesso Parcial)$	0	0
EST	$E(Sucesso Total)$	0	0
PSS	$P_{Insucesso}$	100%	100%
PSP	$P_{Sucesso Parcial}$	0%	0%
PST	$P_{Sucesso Total}$	0%	0%

Como era de se esperar, o resultado obtido mostra o impacto da variação estatística sobre os indicadores de expectância. Por outro lado, foi evidenciada a imunidade dos indicadores baseados em médias aritméticas e medianas. *Esse resultado ilustra novamente a utilidade dos indicadores EMC e EFA.*

V.5.3 Influência da Topologia

Prosseguindo-se com a análise passou-se a avaliar a influência da variação da topologia nos indicadores propostos, mostrada na **Tabela V-15**.

Com base no sistema-teste de 5 barras, substituiu-se o ramo original entre as barras 3 e 5, de impedância $Z = j 1.5$ pu, por dois ramos em paralelo, porém cada um deles com um valor de impedância $Z = j 3.0$ pu. O mesmo valor de incerteza do ramo original foi atribuído apenas a um dos ramos em paralelo, mantendo-se assim o mesmo espaço probabilístico original. Desta forma pretende-se mostrar o efeito de um reforço topológico sobre os indicadores propostos.

De acordo com a **Tabela V-15** fica evidente a utilidade dos indicadores propostos para a situação de reforço topológico investigado, dado que houve sensível melhoria na segurança do sistema no caso com duplicação.

Tabela V-15 – Análise de Sensibilidade – Incertezas em Cenários de Intercâmbios: Topologias Distintas

Indicadores de Segurança Estática Probabilística		Topologias Distintas	
Simbologia	Nome	Sem Duplicação	Com Duplicação
POI	$P_{instabilidade}$	100%	100%
POE	$P_{estabilidade}$	0%	0%
PAM	$P_{amort} < 0\%$	100%	100%
	$0\% < P_{amort} < 5\%$	0%	0%
	$5\% < P_{amort} < 10\%$	0%	0%
	$10\% < P_{amort} < 15\%$	0%	0%
	$15\% < P_{amort} < 20\%$	0%	0%
PFE	$0.1 \text{ Hz} < P_{freq} < 3.0 \text{ Hz}$	100%	100%
PFS	$P_{freq} > 3.0 \text{ Hz}$	0%	0%
EMC	$E(\lambda_{crit})$	0.02598	0.009453
EFA	$E(\zeta_{crit})$	-9.36223	-2.776636
MAM	$\bar{\lambda}_{crit}$	0.01475	0.006025
MAC	$\bar{\zeta}_{crit}$	-5.27895	-1.622802
MDM	$MD(\lambda_{crit})$	0.01475	0.006025
MDA	$MD(\zeta_{crit})$	-5.27895	-1.622802
ESS	$E(Insucesso)$	2	2
ESP	$E(Sucesso Parcial)$	0	0
EST	$E(Sucesso Total)$	0	0
PSS	$P_{Insucesso}$	100%	100%
PSP	$P_{Sucesso Parcial}$	0%	0%
PST	$P_{Sucesso Total}$	0%	0%

V.6 Simulações para Análise Considerando Incertezas Somente em Ruídos

A aplicação da metodologia proposta foi realizada supondo-se (vide **Seção III.2.2.4**):

- *Variação de ruídos nas cargas ou áreas do sistema;*
- *Variação da tipologia de ruído: somente na magnitude da carga;*
- *Todas as cargas com ruídos na magnitude da carga foram modeladas com potência constante;*
- *Variação no tipo de acoplamento: somente nas partes ativa e reativa da carga;*
- *Variação no desvio padrão.*

O tipo de sorteio considerado foi sempre conforme e o tipo de distribuição normal.

Utilizando-se os mesmos sistemas testes de 5 barras, New England e equivalentado sul/sudeste, definidos no **Anexo A**, são propostos os experimentos da **Tabela V-16** considerando incertezas apenas em ruídos. O sistema-teste de 5 barras foi analisado na condição de carga média e com a presença do estabilizador de sistema de potência, enquanto que o sistema New England de 39 barras foi avaliado na condição de carga pesada e consideraram-se presentes apenas os reguladores de tensão das máquinas. Por outro lado, no equivalentado Sul/Sudeste foram representados apenas os modelos de máquinas, sem atuação de nenhum dos controladores de sistema de potência (regulador de tensão e estabilizadores), tendo em vista que os modelos representados nos programas PSAT degradavam ainda mais o desempenho desse sistema. Para solucionar esse problema seria necessária investigação mais profunda, que não é um problema trivial e não é objeto dessa Tese.

Tabela V-16 – Experimentos Considerando Incertezas Somente em Ruídos

Experimentos	Sistema Teste	Modelagem Dinâmica				Modelagem de Incertezas								Tabelas	Figuras
		MQ (1)	RT (2)	RV (3)	ES (4)	Localização do Ruído	Tipo de Ruído (5)	Tipo de Acoplamento (6)	Tipo de Sorteio (7)	Tipo de Distribuição (8)	Magnitude do Ruído (%) (9)	Nº de Lotes	Nº de Sorteios		
R1	5	Sim	Sim	Não	Sim	Barra 5	MAG	PQ	CONF	NORM	10	1	1000	V-17	V-19
R2	5	Sim	Sim	Não	Sim	Barra 5	MAG	PQ	CONF	NORM	10	1	10000	V-19	V-20
R3	39	Sim	Sim	Não	Não	Barra 8	MAG	PQ	CONF	NORM	3	1	100	-	V-21
R4	39	Sim	Sim	Não	Não	Todas as Barras	MAG	PQ	CONF	NORM	10	1	1000	-	V-22
R5	39	Sim	Sim	Não	Não	Todas as Barras	MAG	PQ	CONF	NORM	30	1	1000	-	V-23
R6	1762	Sim	Não	Não	Não	Área São Paulo	MAG	PQ	CONF	NORM	10	1	1000	-	V-24

- (1) Máquina
- (2) Regulador de Tensão
- (3) Regulador de Velocidade
- (4) Estabilizador de sistema de potência
- (5) Tipo de Ruído: MAG = Magnitude da Carga e MOD = Modelagem da Carga (Vide Seção III.2.2.4)
- (6) Tipo de Acoplamento: P = Ruído Somente na Parte Ativa da Carga, Q = Ruído Somente na Parte Reativa da Carga e PQ = Parte Ativa e Reativa
- (7) Tipo de Sorteio: CONF = Sorteio Conforme e NCONF = Sorteio Não Conforme
- (8) Tipo de Distribuição: NORM = Normal, EXPO = Exponencial, RETA = Retangular, TRIA = Triangular, WEIB = Weibull, LOGN = Lognormal e LAPL = Laplace
- (9) Refere-se ao desvio padrão em valores percentuais

V.7 Resultados Obtidos: Incertezas Somente em Ruídos

Conforme foi discutido no **passo O** da **seção III.4** e no segundo adendo do **Capítulo IV**, neste tipo de análise é utilizado o método de simulação Monte Carlo para construir uma amostra de ruídos nas cargas e obter as estimativas de indicadores probabilísticos. Esses ruídos são obtidos a partir de um gerador de números aleatórios com distribuições de probabilidade que descrevem de forma adequada as incertezas nas cargas.

A metodologia proposta para a análise de ruídos estima os indicadores a partir das características relacionadas à parte real dos autovalores e amortecimentos armazenados em cada sorteio. A informação armazenada é utilizada para gerar histogramas dessas variáveis de interesse: parte real dos autovalores e amortecimentos. Ao final de todas as simulações, obtêm-se os histogramas finais da grandeza desejada, permitindo avaliar se a mesma se encontra dentro dos critérios exigidos. A precisão dos resultados é controlada via coeficientes de variação (vide **equação IV-4**).

A seguir apresentam-se os histogramas das variáveis de interesse gerados pelo protótipo computacional proposto:

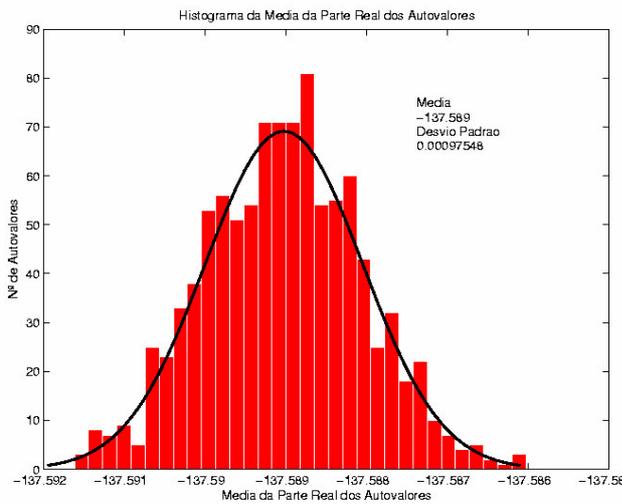
- *Histograma da média da parte real dos autovalores:* são amostras da média da parte real dos autovalores de todos os estados.
- *Histograma da parte real dos autovalores:* são amostras da parte real dos autovalores de todos os estados.
- *Histograma da parte real dos autovalores críticos:* são amostras da parte real dos autovalores críticos de todos os estados.
- *Histograma da média dos amortecimentos:* são amostras da média dos amortecimentos de todos os estados.
- *Histograma dos amortecimentos:* são amostras dos amortecimentos de todos os estados.
- *Histograma dos amortecimentos críticos :* são amostras dos amortecimentos críticos de todos os estados.

V.7.1 Interpretação dos Resultados: Experimentos #R1 e #R2

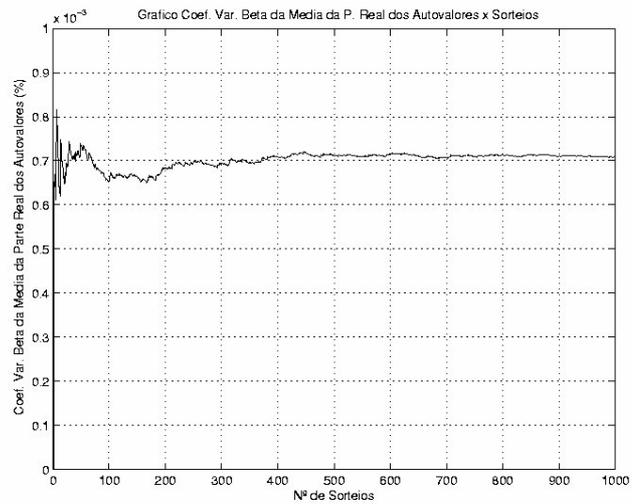
O *experimento #R1* da **Tabela V-16** foi aplicado ao sistema-teste 5 barras supondo-se ruído na magnitude das cargas ativa e reativa apenas na barra 5, considerando apenas um lote com 1000 sorteios do tipo conforme e com uma magnitude de ruído de 10%.

As distribuições de probabilidade associadas com a média da parte real dos autovalores, parte real dos autovalores e parte real somente dos autovalores críticos estão apresentadas respectivamente nas **Figuras V-19.a, V-19.c e V-19.e**. As mesmas

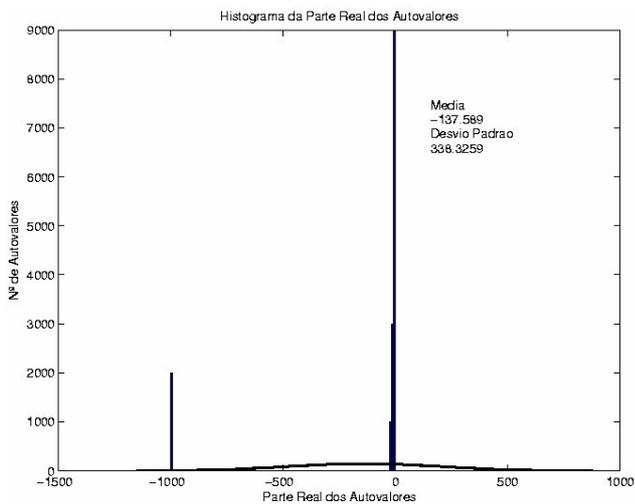
distribuições de probabilidade para os amortecimentos foram também obtidas e estão apresentadas nas **Figuras V-19.g, V-19.i e V-19.k**. Nas **Figuras V-19.b, V-19.d, V-19.f, V-19.h, V-19.j e V-19.l** estão registrados os valores do coeficiente de variação β obtidos para cada uma das variáveis dos histogramas associados com cada sorteio. Cabe destacar que neste experimento o critério de parada utilizado foi o número de sorteios de um único lote.



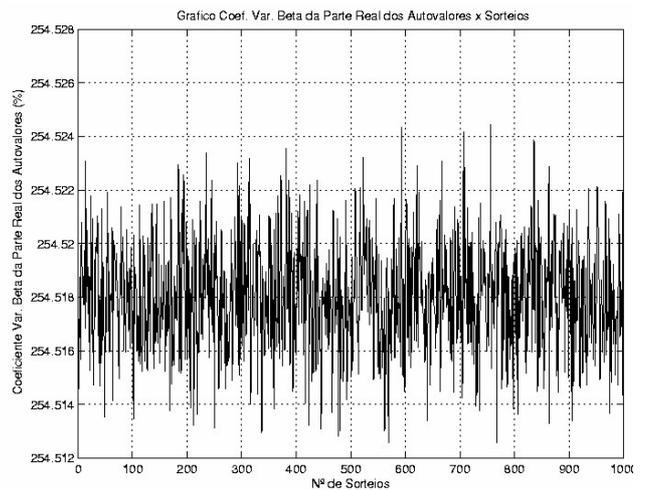
(a)



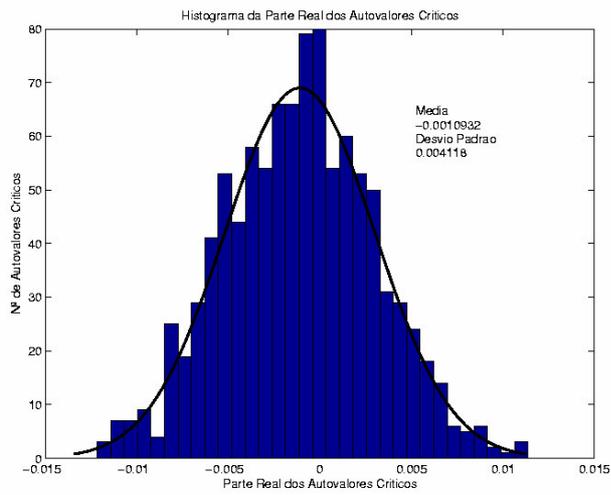
(b)



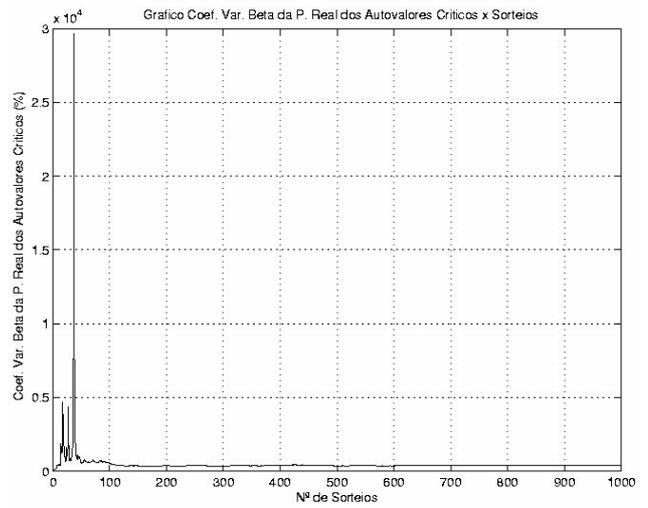
(c)



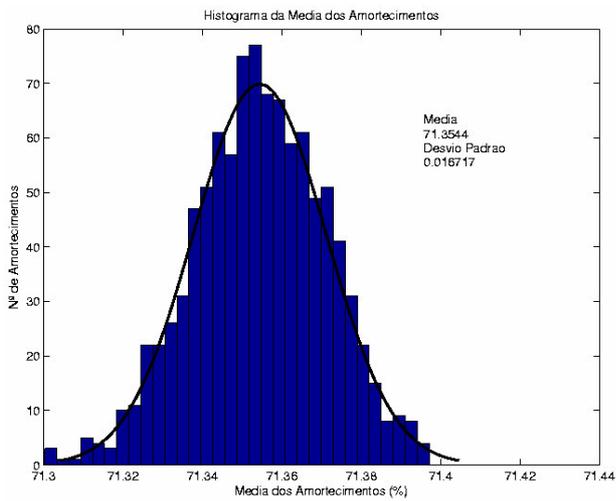
(d)



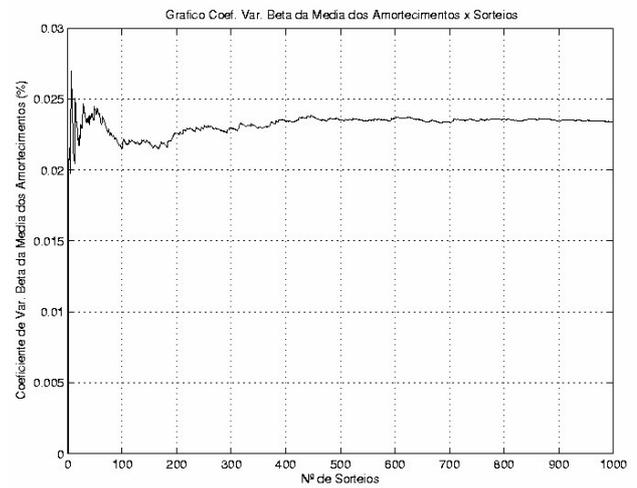
(e)



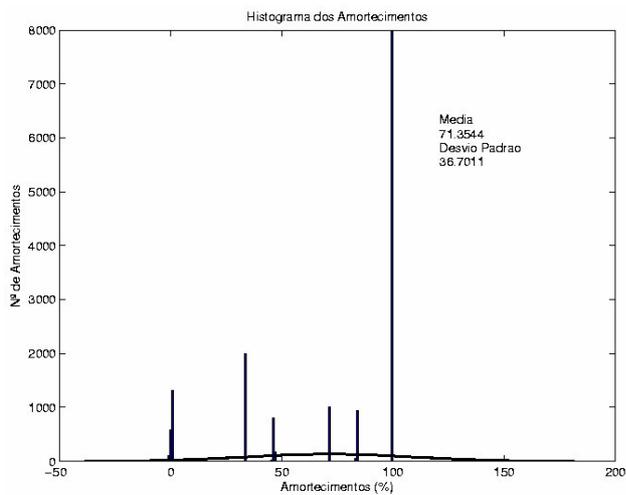
(f)



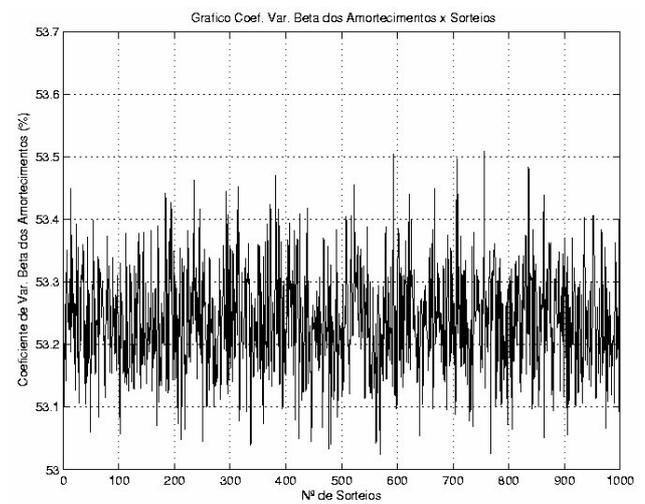
(g)



(h)



(i)



(j)

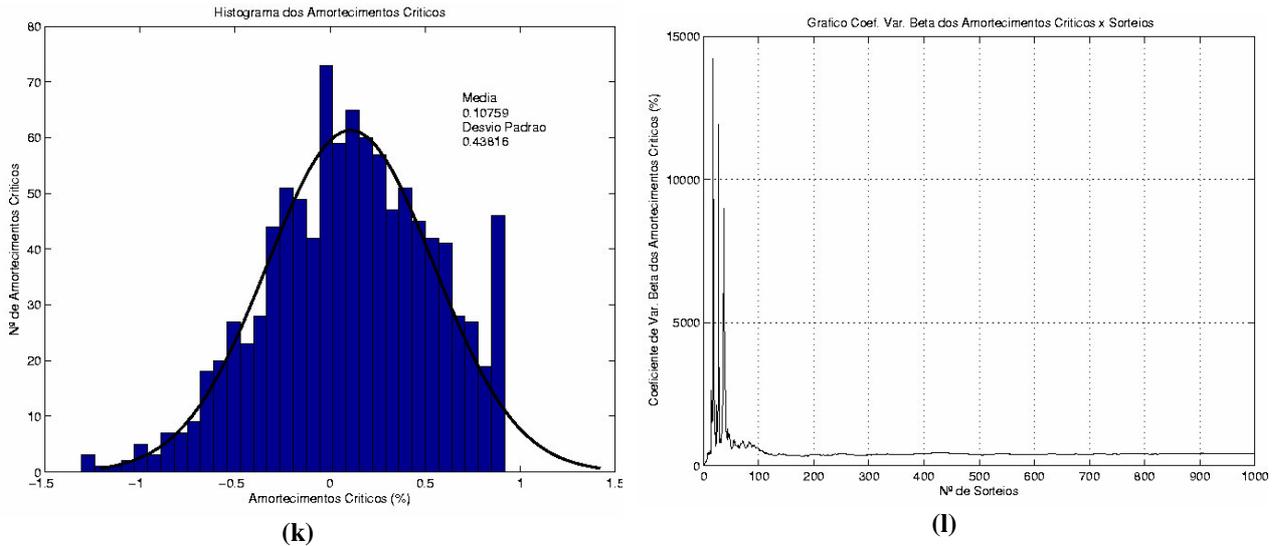


Figura V-19 – Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R1

A Figura V-19.a mostra o histograma da média da parte real dos autovalores. Pela figura pode ser observado que não houve variação significativa desta variável. De acordo com este histograma, a média dos autovalores situa-se na faixa de $[-137.592, -137.586]$, o valor médio é de -137.589 e o desvio padrão da ordem de 0.00097548% . O valor de desvio padrão bem pequeno define dispersão muito pequena de valores em relação ao seu valor médio.

Ainda de acordo com o histograma, o menor valor da média de autovalores é de -137.592 e o maior valor é de -137.586 , indicativo de um sistema aparentemente sem risco. Isto ocorre porque como existem pólos reais com valores elevados da ordem de -1000 , quando se computa a média com os outros pólos críticos de menor valor, a mesma fica influenciada pelo valor extremo -1000 , muito distanciado em relação aos demais valores. Portanto, apesar de existirem pólos com parte real positiva, não é esperada uma média positiva para parte real dos autovalores, ou seja, pela análise exclusiva deste histograma, o sistema seria totalmente estável e o risco seria zero. Esta é uma conclusão totalmente contrária aos resultados obtidos pela análise do histograma da parte real dos autovalores críticos apresentada adiante.

Agora, se computarmos o histograma da parte real de todos os autovalores em cada sorteio realizado, observa-se pela Figura V-19.c, que a parte real dos autovalores situa-

se no intervalo bastante grande $[-1000, 0]$, com uma concentração de valores na proximidade de zero. Logo, foi obtido um desvio padrão de grande monta, da ordem de 338.3259%, indicando uma dispersão muito grande de valores em relação ao seu valor médio. O resultado deste indicador baseado no histograma também apresenta resultado contraditório ao apresentado em seguida pela análise do histograma da parte real dos autovalores críticos.

Por outro lado, para o histograma da Figura V-19.e onde somente a parte real dos autovalores críticos foi computada, observaram-se resultados bastante interessantes e coerentes com os valores esperados. Neste caso é possível verificar se a parte real do autovalor crítico de todas as amostras se encontra dentro dos valores esperados ou se situa no semiplano da direita. O valor médio encontrado para este experimento foi de 0.0010923 e desvio padrão de 0.004118%, conforme apresentado na Figura V-19.e. O coeficiente de variação mostrado na Figura V-19.f mostrou boa estabilização para o número de sorteios do experimento.

Estes resultados também mostram que apesar da incerteza da carga ser de grande monta, 10%, as variações no valor médio da parte real dos autovalores críticos são pequenas neste experimento.

Assim, a partir do histograma da variável da parte real dos autovalores críticos é possível ter-se uma idéia bastante clara da estabilidade do sistema. O mesmo não ocorreu com os resultados dos dois indicadores anteriormente obtidos, apresentando valores bem negativos, indicativo de um sistema aparentemente sem risco de instabilidade a pequenas perturbações. *Portanto, os indicadores obtidos a partir dos histogramas da média e da parte real dos autovalores sugerem uma baixa utilidade prática.* Por outro lado, os coeficientes de variação obtidos para a monitoração dos autovalores críticos relacionadas à parte real dos autovalores não se mostraram eficazes por apresentarem valores percentuais bastante elevados neste experimento com apenas 1000 sorteios.

Os histogramas semelhantes obtidos anteriormente para a variável da parte real dos autovalores, são agora determinados para os amortecimentos. A Figura V-19.g mostra o

histograma associada à variável média dos amortecimentos realizada em cada sorteio. O valor médio obtido foi de 71.3544%, representando um sistema com valor médio de amortecimento elevado, bem superior ao critério estabelecido e com desvio padrão de 0.016717%, ou seja, um sistema aparentemente sem risco e de elevado amortecimento. Como veremos mais adiante, isso não ocorre ao analisarmos os histogramas dos amortecimentos críticos. Este resultado também é semelhante ao obtido para a média da parte real dos autovalores e não apresenta utilidade prática. O mesmo resultado é obtido para o histograma dos amortecimentos apresentado na Figura V-19.i, cujo valor médio é de 71.3544% e desvio padrão grande, da ordem de 36.7011%. Este resultado também não mostrou nenhuma utilidade.

Por outro lado, o histograma associada a amortecimentos críticos (vide Figura V-19.k) apresentou desempenho satisfatório relacionado à margem de amortecimentos do sistema. Pode-se observar que existem variações significativas em torno dos valores médios associados com o amortecimento crítico. Este histograma pode ser usado para estimar o risco de violação do critério de amortecimento estabelecido.

Por exemplo, neste experimento existe risco do amortecimento ser menor que zero (negativo), indicativo de instabilidade. Com relação a amortecimentos superiores ao critério estabelecido de 10% o risco é aparentemente zero, porque pelo histograma obtido o valor máximo de amortecimento crítico situa-se na ordem de 0.9%, ou seja, sistema com baixo amortecimento.

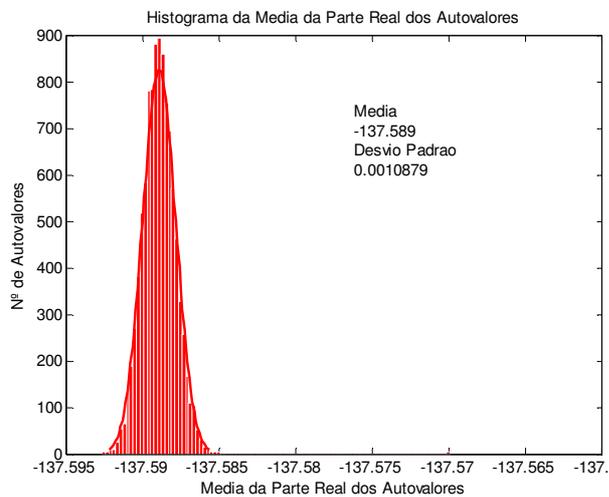
Especificamente para o histograma dos amortecimentos críticos determinou-se uma estimativa da probabilidade associada com os intervalos da média dos amortecimentos nas seguintes faixas [0 – 5%], [5 – 10%], [10 – 15%], [15 – 20%], [valores maiores que 20%] e [menores que zero]. Para esta avaliação determinou-se também os valores máximos e mínimos. *Com isso, é possível estimar o risco de violar o critério de amortecimento especificado para o sistema.* Estes resultados estão apresentados na **Tabela V-18**.

Tabela V-17 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos – Experimento #R1

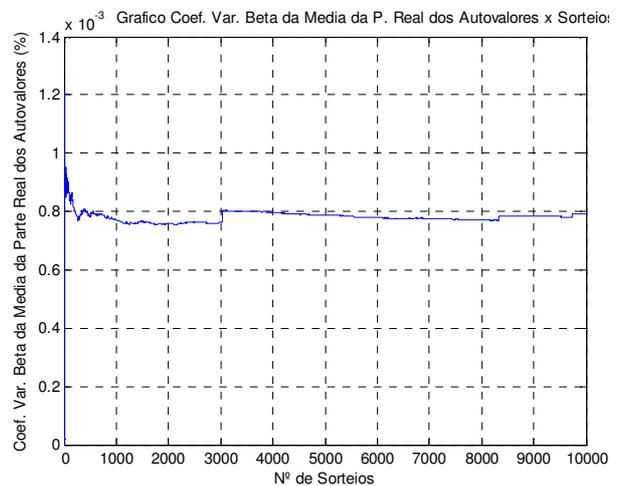
Faixas de Amortecimentos (%)		Probabilidade Estimada (%)	Amortecimento Crítico (%)	
Mínimo	Máximo		Valor Máximo	Valor Mínimo
< 0		40.60	0.91848	-1.30744
0	5	59.40		
5	10	0.0		
10	15	0.0		
15	20	0.0		
> 20		0.0		

As análises seguintes referem-se ao *experimento #R2* onde avaliou-se para o mesmo sistema-teste 5 barras do *experimento #R1*, a influência do número de sorteios sobre os indicadores. Portanto, manteve-se a mesma modelagem das incertezas e dinâmica das máquinas e seus controladores.

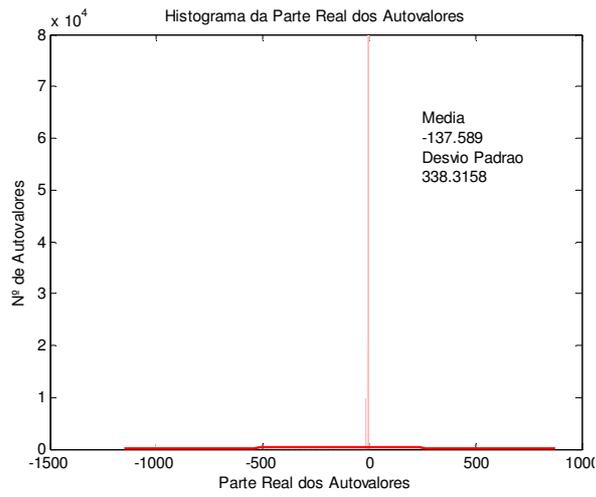
Assim, a **Figura V-20** apresenta os resultados da análise considerando a variação do número de sorteios para 10000.



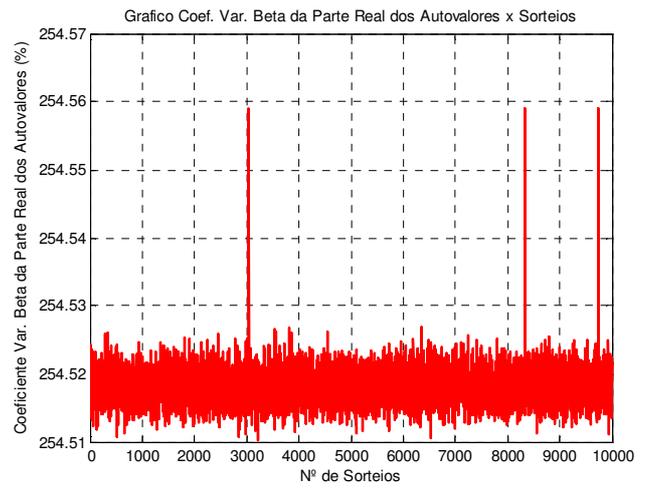
(a)



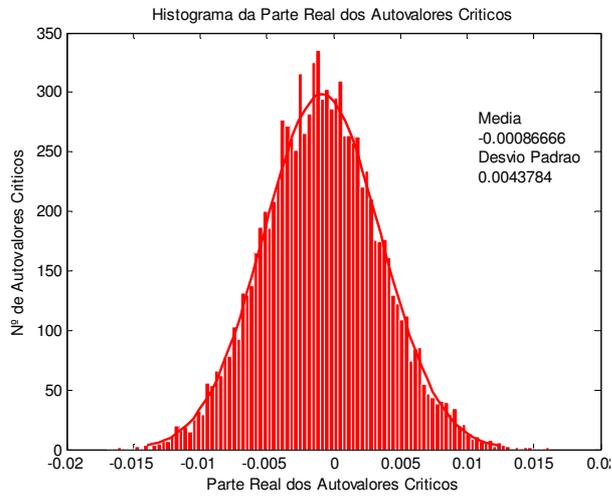
(b)



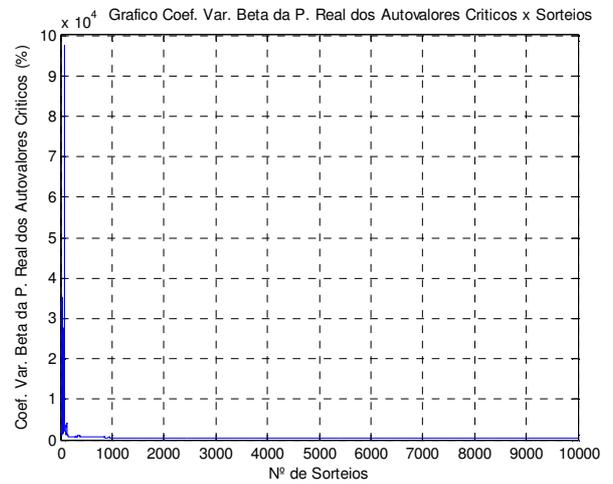
(c)



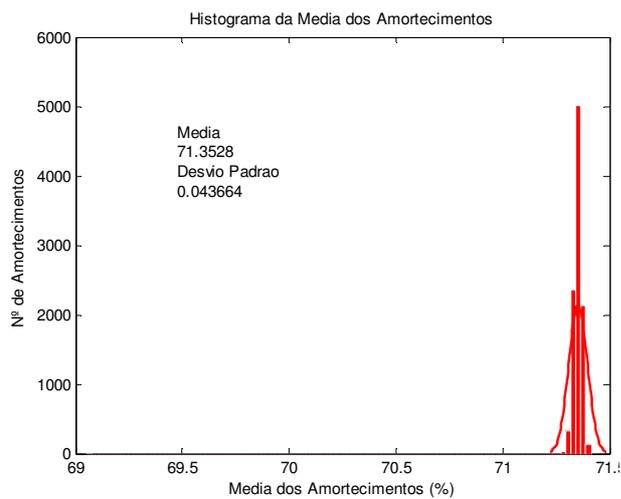
(d)



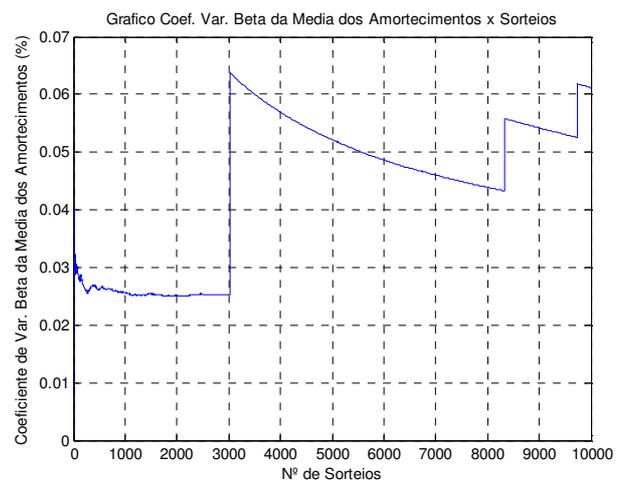
(e)



(f)



(g)



(h)

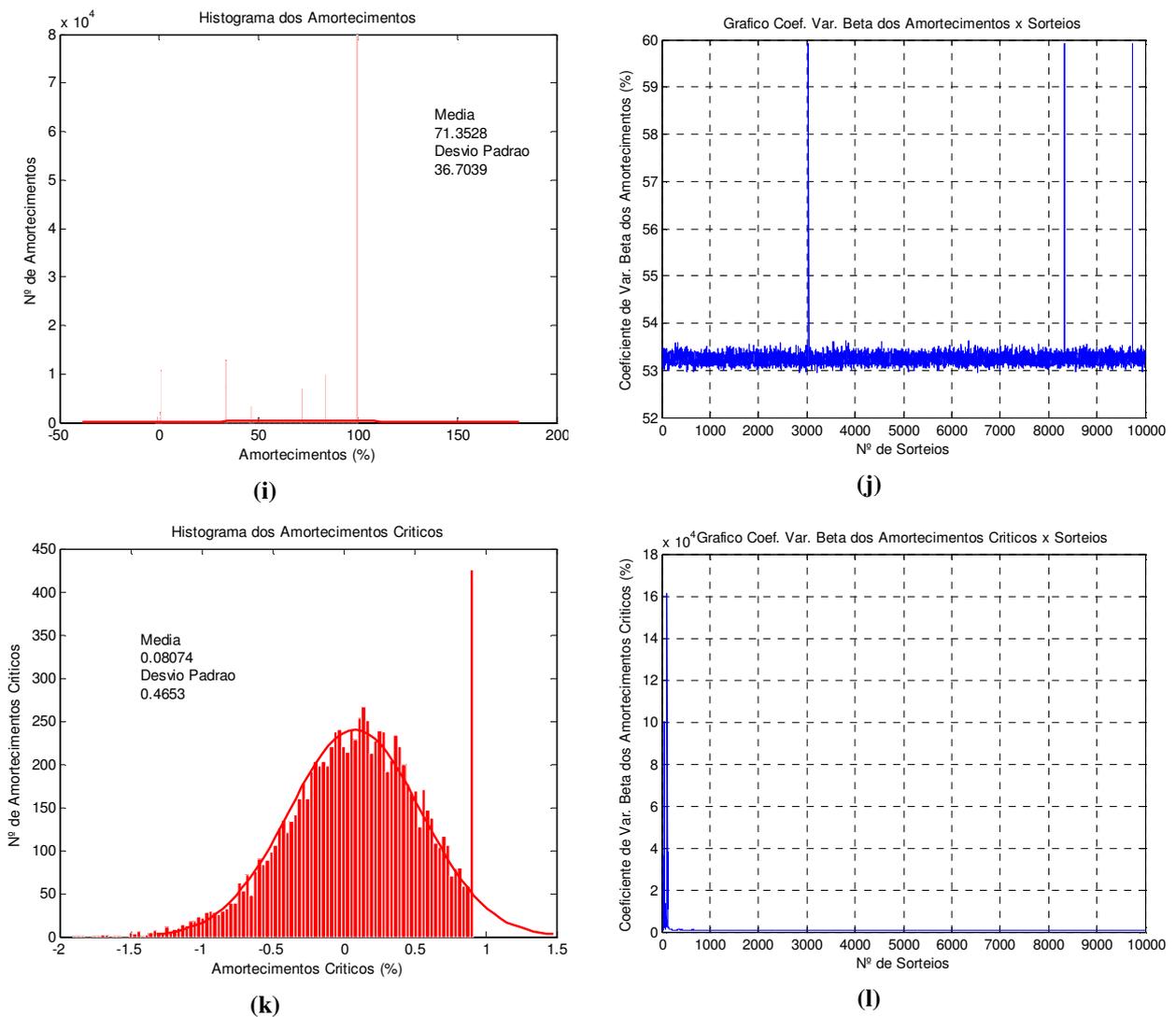


Figura V-20 – Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R2

Esta investigação apresenta resultados bastante interessantes. Conforme esperado, o valor médio de todas as variáveis aleatórias determinadas comporta-se do mesmo modo quando da variação do número de sorteios. A **Tabela V-18** mostra os valores de desvio padrão obtidos com 1000 e 10000 sorteios e a variação percentual encontrada.

Tabela V-18 – Variação do Desvio Padrão x Número de Sorteios das Variáveis Aleatórias

Número de Sorteios	Desvio Padrão (%)					
	<i>Média da Parte Real dos Autovalores</i>	<i>Parte Real dos Autovalores</i>	<i>Parte Real dos Autovalores Críticos</i>	<i>Média dos Amortecimentos</i>	<i>Amortecimentos</i>	<i>Amortecimentos Críticos</i>
1000	0.00097548	338.3259	0.004118	0.0016717	36.7011	0.43816
10000	0.0010879	338.3158	0.0043784	0.043664	36.7039	0.4653
Variação (%)	11.52	-0.0029853	6.32	161.2	0.0076292	6.19

Pode-se então constatar que o aumento do número de sorteios exerce um efeito considerável sobre os indicadores, devendo-se ainda notar que o indicador associado com a média dos amortecimentos é o mais sensível que os demais (variação de 161.2%), seguido da média da parte real dos autovalores (variação de 11.52%). Cabe destacar que a média dos amortecimentos apresentou variação de grande monta, porque na condição com 10000 sorteios, ainda não ocorreu estabilização do coeficiente de variação β (vide **Figura V-20.h**), enquanto que na condição com 1000 sorteios verificou-se uma falsa estabilização no valor da ordem de 0.023%, conforme pode ser observada na **Figura V-19.h**.

O segundo indicador mais sensível está relacionado à variável aleatória parte real dos autovalores e amortecimentos críticos, cujas variações foram respectivamente da ordem de 6.19 e 6.32%. Os indicadores menos sensíveis foram a parte real dos autovalores e amortecimentos, apresentando respectivamente as variações de -0.0029853% e 0.0076292%.

O aumento do número de sorteios provocou, praticamente para todos os indicadores, uma degradação do desvio padrão. Essa deterioração refletiu-se também nos coeficientes de variação. Por exemplo, para os indicadores *parte real dos autovalores críticos* e *amortecimentos críticos*, os coeficientes de variação com apenas 1000 sorteios foram de 377.7% e 407.2% respectivamente. Com aplicação de 10000 sorteios os valores dos coeficientes de variação degradaram-se para 505.2% e 576.3% respectivamente. Esses resultados sugerem a necessidade de investigar o efeito do aumento do número de sorteios e a dependência sistêmica desses resultados.

Comparativamente ao *experimento #R1*, podemos observar que neste experimento existe uma pequena diferença sobre os indicadores obtidos, dada pela variação percentual apresentada na **Tabela V-19**.

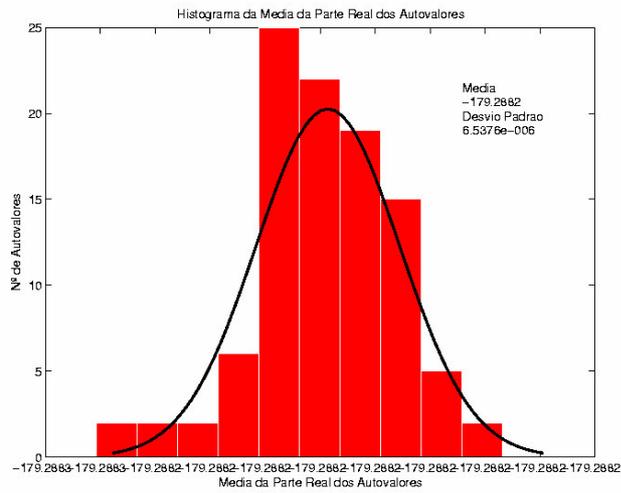
Tabela V-19 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos Experimento #R2

Faixas de Amortecimentos (%)		Probabilidade Estimada (%)
Mínimo	Máximo	
< 0		41.7
0	5	58.3
5	10	0.0
10	15	0.0
15	20	0.0
> 20		0.0

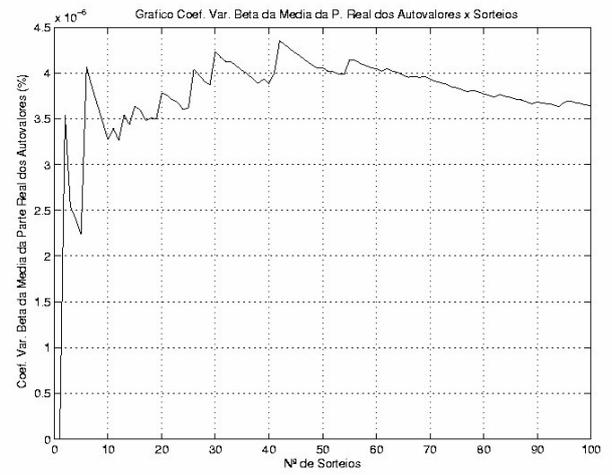
V.7.2 Interpretação dos Resultados: Experimento #R3

Em seguida procedeu-se à análise enfocando o sistema New England. Na primeira análise considerou-se ruído apenas na barra 8 deste sistema, modelado por uma distribuição normal e modelagem de carga com potência constante.

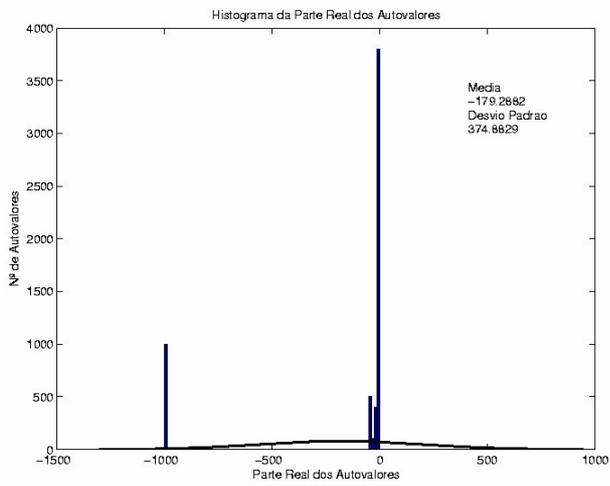
A carga representada na barra 8 foi modelada com ruído na magnitude da carga ativa e reativa, cujos valores numéricos são somados ou subtraídos em relação a uma determinada grandeza de um cenário, tomado como referência. Neste *experimento #R4* da **Tabela V-16**, o sistema é analisado através de simulação numérica com distribuição probabilística Gaussiana com desvio padrão igual a 3% e tipo de sorteio conforme com um lote de 100 de sorteios. Nesta análise será tomado como referência o cenário na condição de carga média.



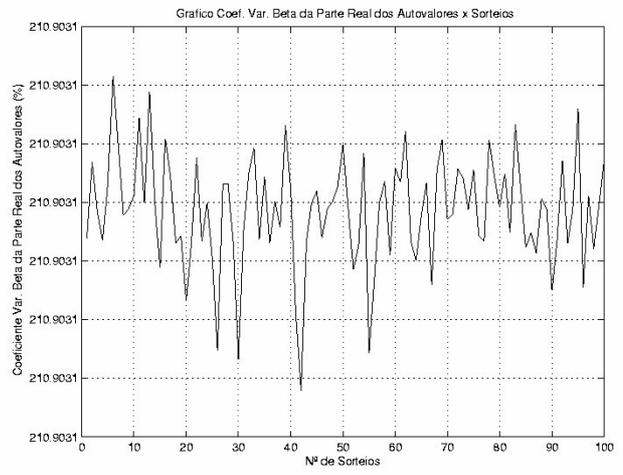
(a)



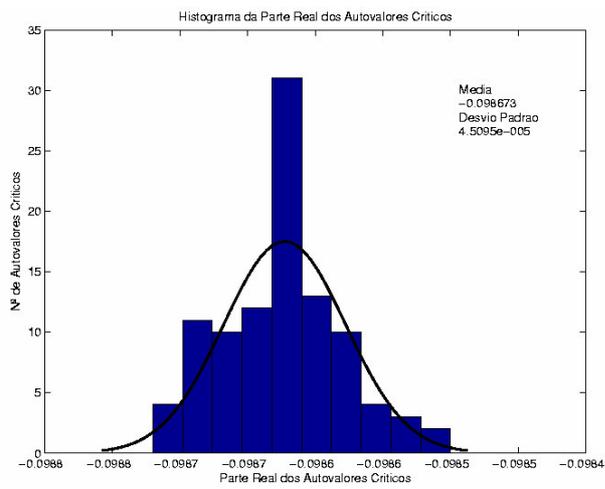
(b)



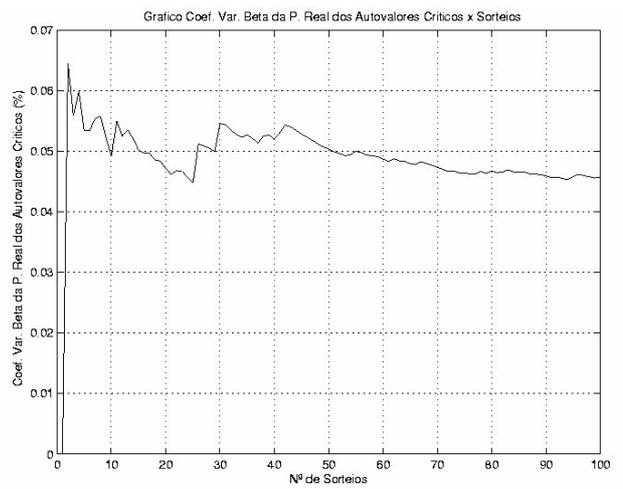
(c)



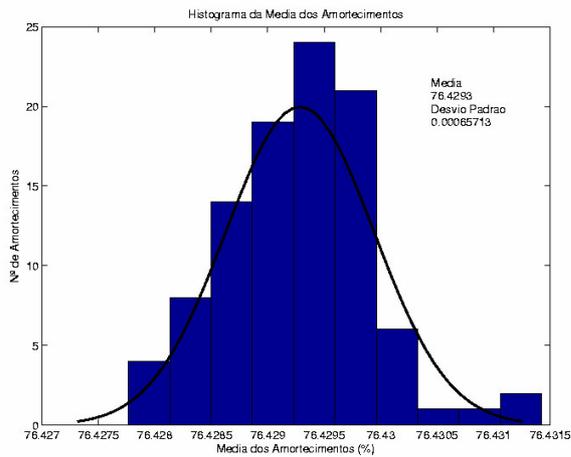
(d)



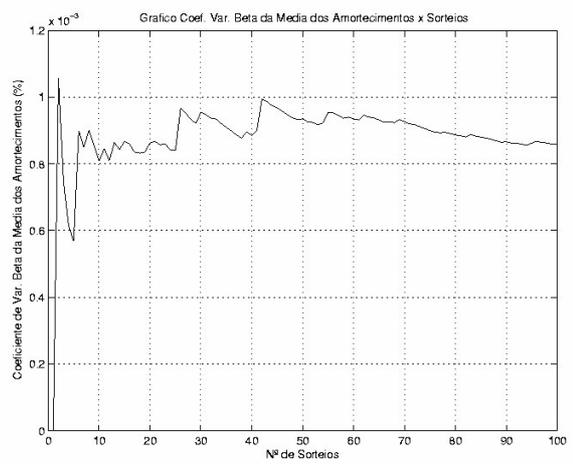
(e)



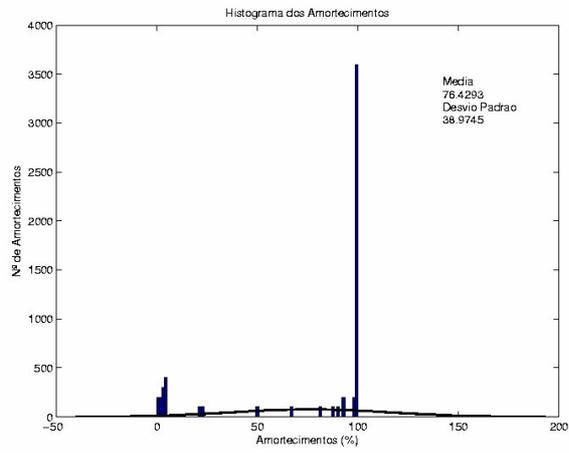
(f)



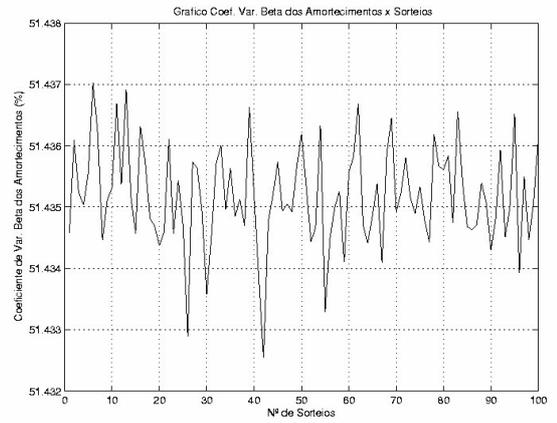
(g)



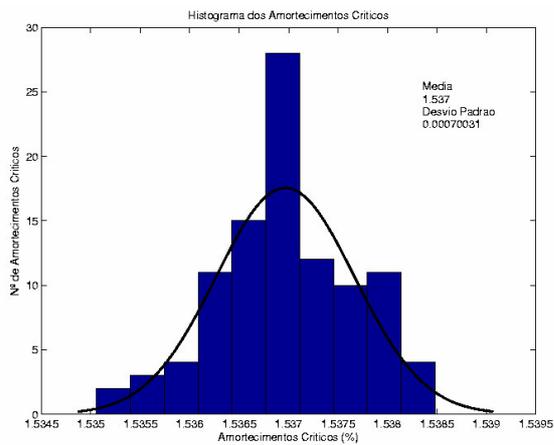
(h)



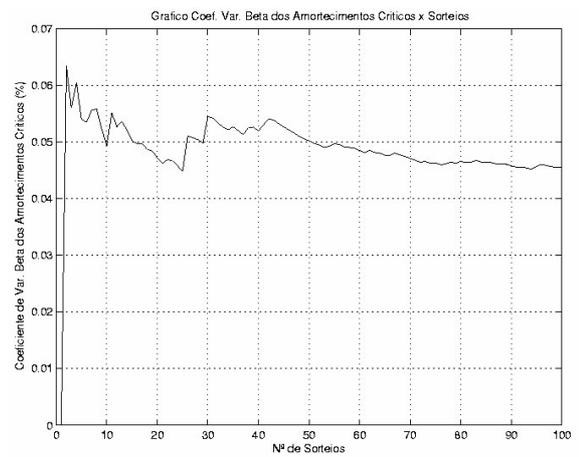
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura V-21 – Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R3

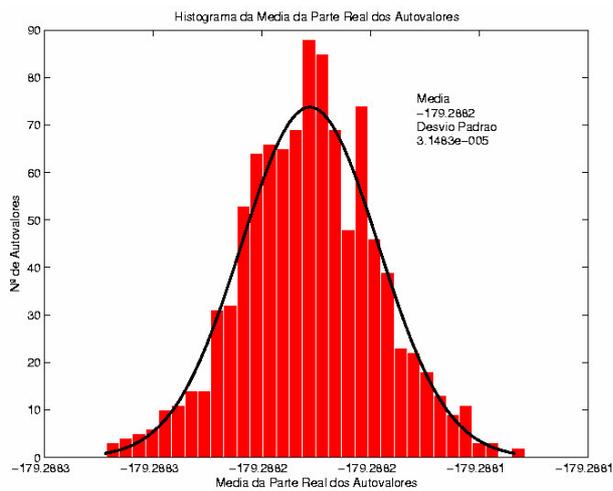
A Figura V-21.e mostra o histograma da parte real dos autovalores críticos. O valor médio obtido para o índice foi de -0.098573, o valor mínimo foi em torno de -0.0988, o valor máximo foi em torno de -0.0985 e o desvio padrão é 0.000045095%.

Os indicadores estimados com base no histograma associados à variável amortecimento crítico permitem avaliar o risco do sistema para amortecimentos inferiores ao critério estabelecido. Este histograma está apresentado Figura V-21.k. Neste experimento, estima-se um valor médio de amortecimento de 1.537% e desvio padrão bem pequeno, da ordem de 0.00070031%, indicativo de um sistema de baixo amortecimento, bem inferior ao critério estabelecido.

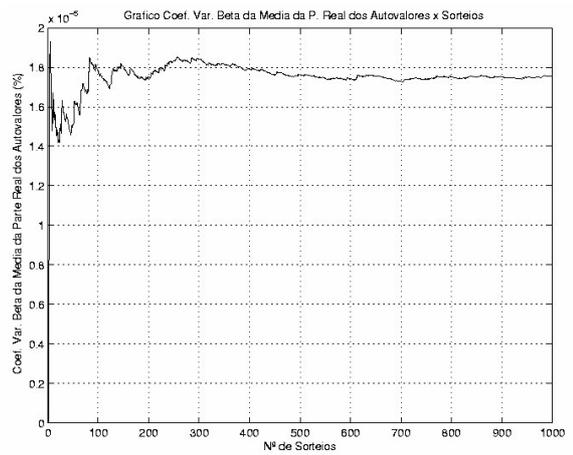
Conforme os resultados apresentados nas Figuras V-21.b, V-21.d, V-21.f, V-21.h, V-21.j e V-21.l, diferentemente do sistema-teste 5 barras, apenas os coeficientes de variação β da variável aleatória parte real dos autovalores e amortecimentos não apresentaram boa precisão, pois para os mesmos se observaram valores bastante elevados sem expectativa de redução. Nestes experimentos, para os coeficientes de variação β das variáveis aleatórias associadas com a média da parte real dos autovalores, parte real dos autovalores críticos, média dos amortecimentos e amortecimentos críticos, verificaram-se valores satisfatórios com uma convergência rápida em apenas 100 sorteios, estabilizando em valores inferiores a 0.04%.

V.7.3 Interpretação dos Resultados: Experimentos #R4 e R#5

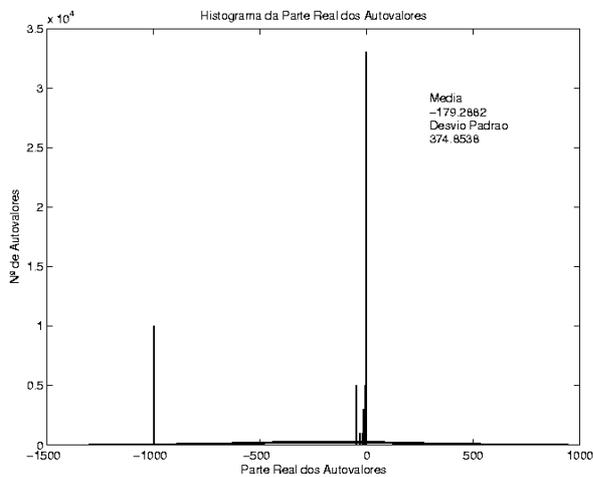
Nas Figuras V-22 e V-23 estão apresentados os histogramas das variáveis aleatórias associadas com a parte real dos autovalores e amortecimentos referentes respectivamente aos *experimentos #R4 e #R5*. Comparativamente ao *experimento #R3*, nestes experimentos aumentou-se respectivamente a magnitude do ruído para 10% e 30% e o número de sorteios de 100 para 1000.



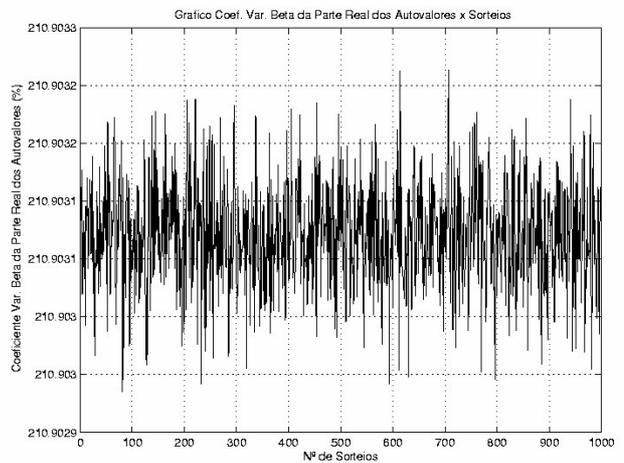
(a)



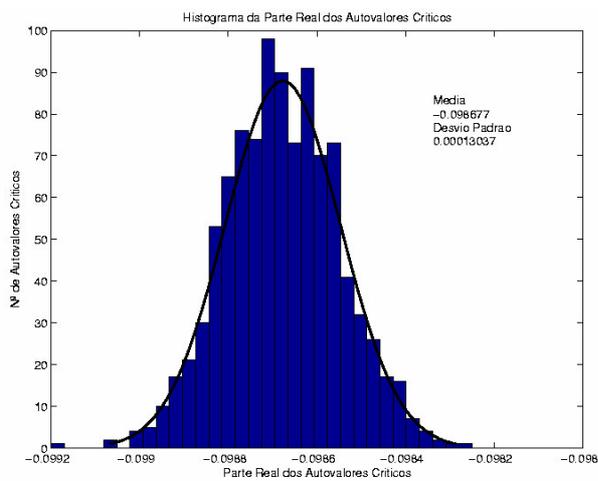
(b)



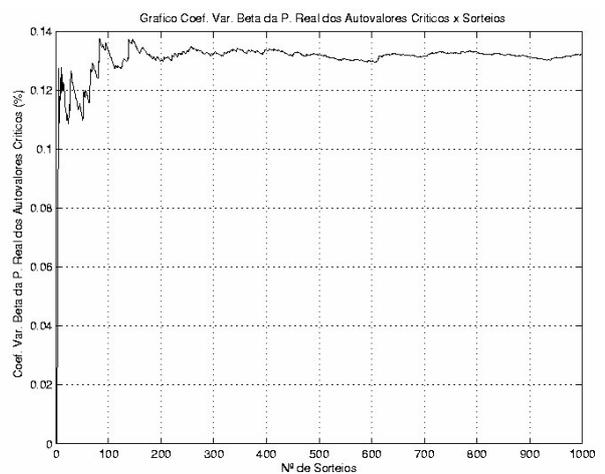
(c)



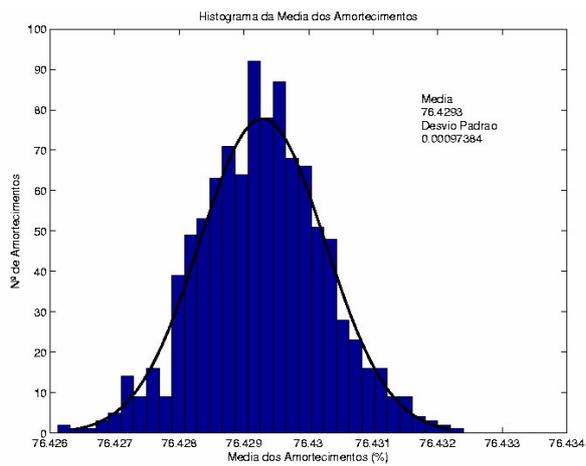
(d)



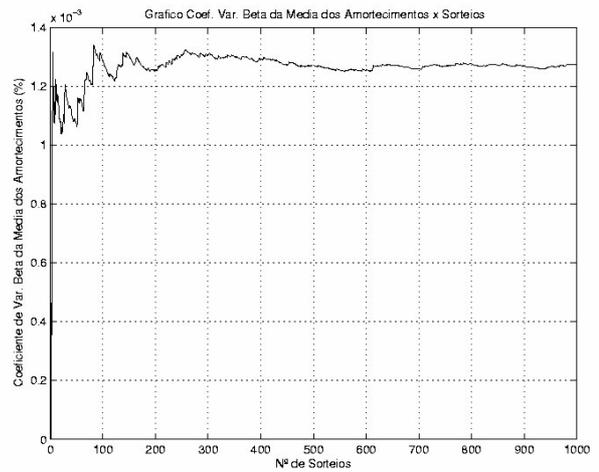
(e)



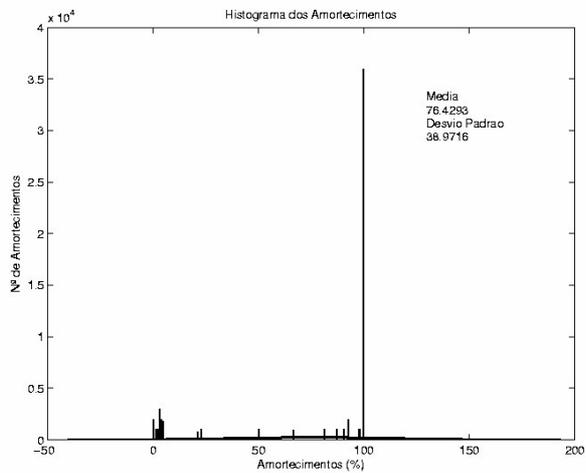
(f)



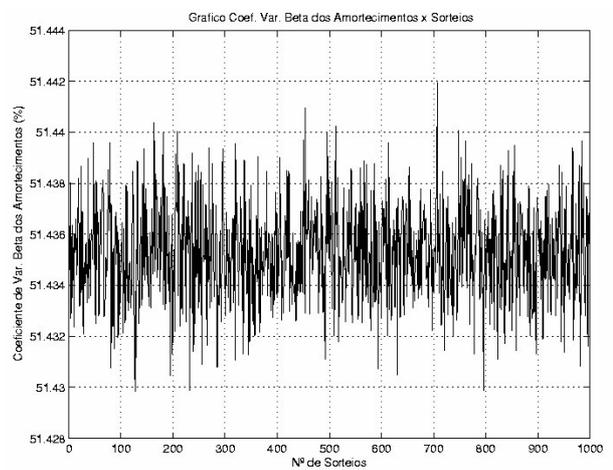
(g)



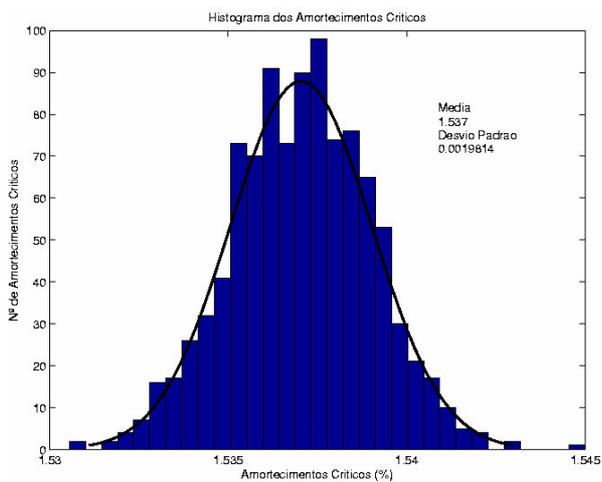
(h)



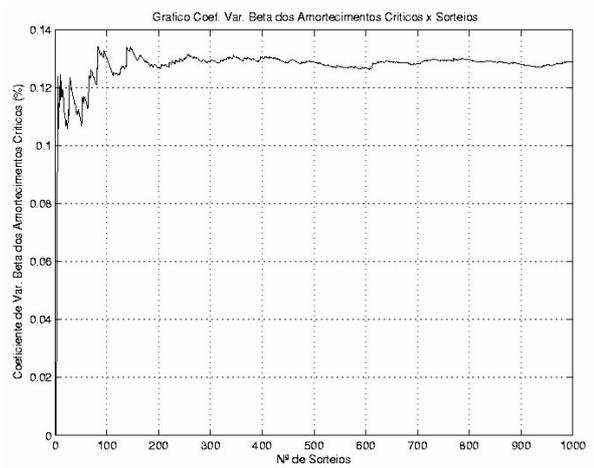
(i)



(j)

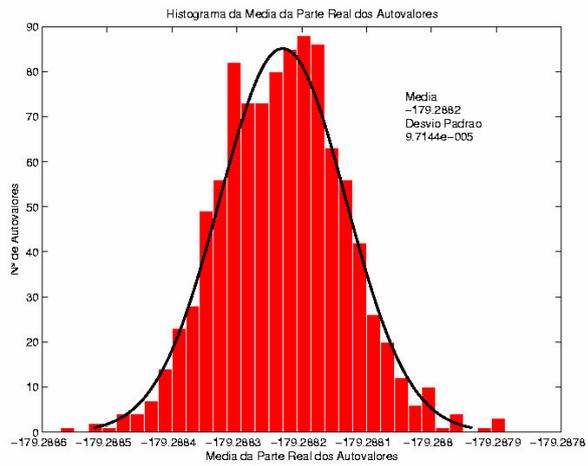


(k)

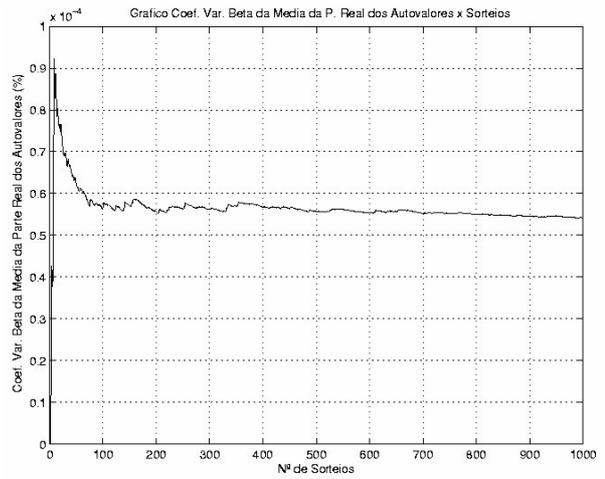


(l)

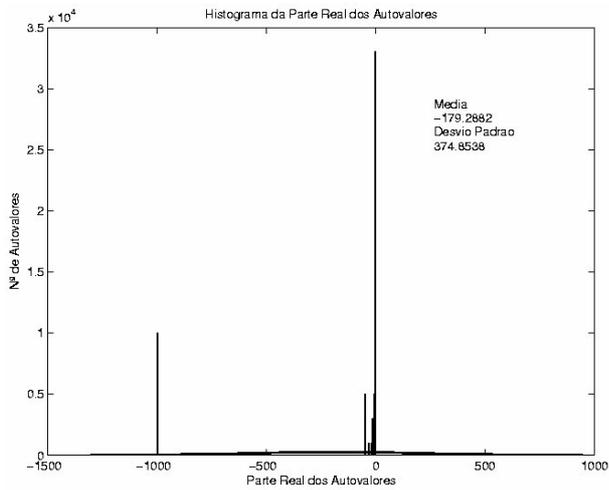
Figura V-22 – Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R4



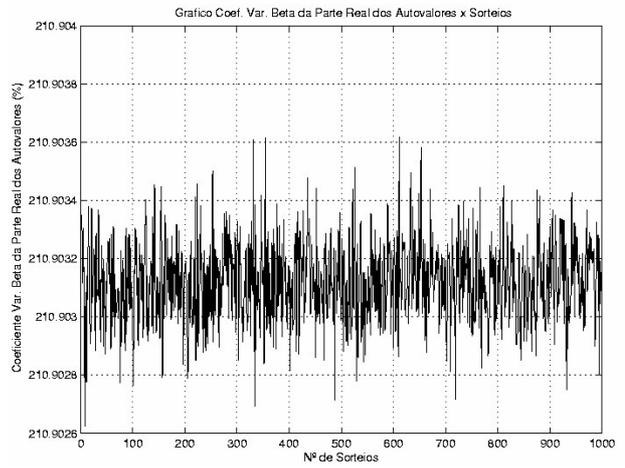
(a)



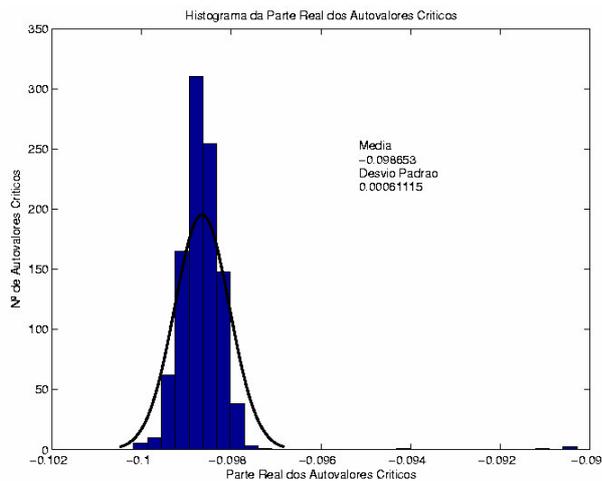
(b)



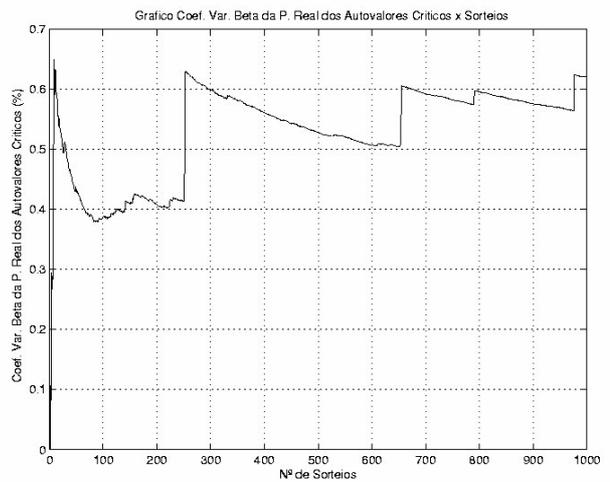
(c)



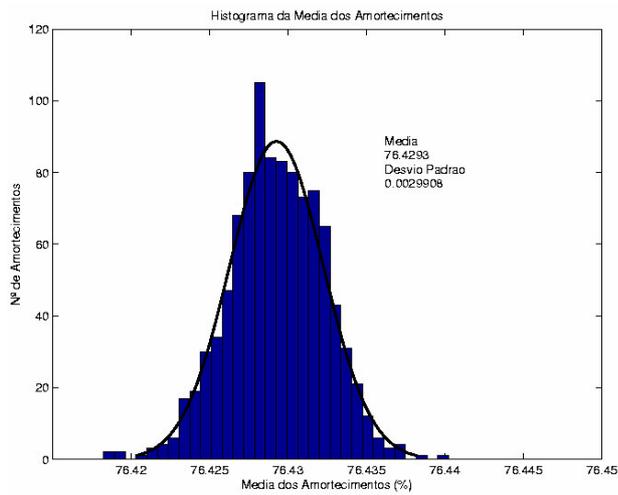
(d)



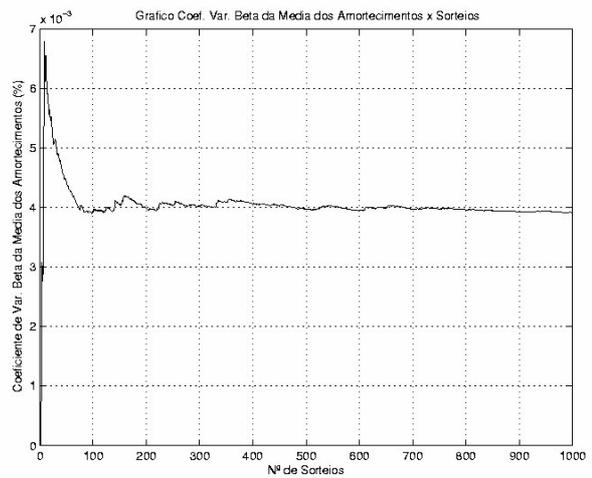
(e)



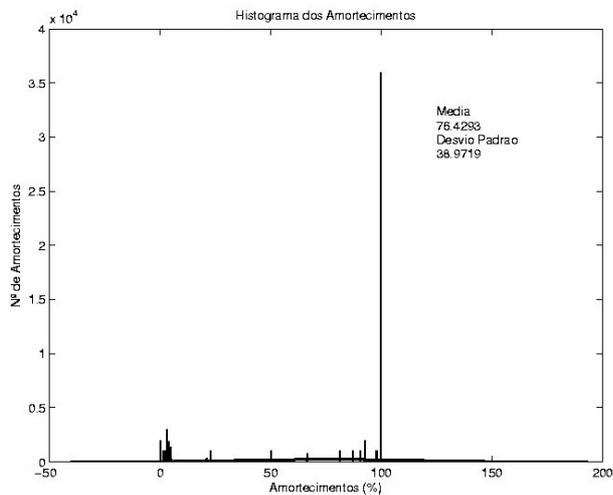
(f)



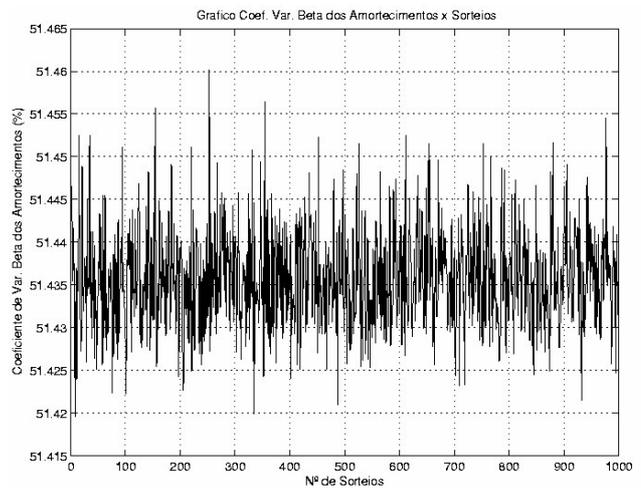
(g)



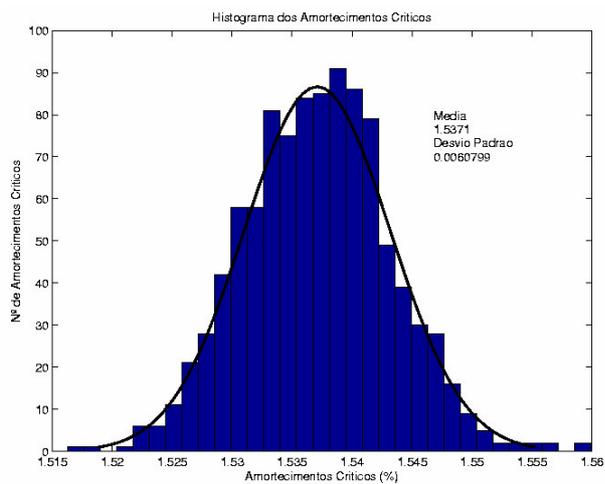
(h)



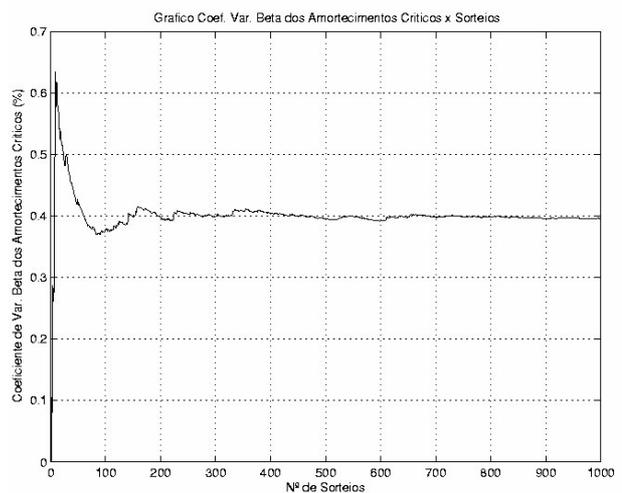
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura V-23 – Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R5

A partir das **Figuras V-22 e V-23** pode-se observar que os resultados alcançados são similares ao *experimento #R3* anterior e conseqüentemente as conclusões também. Porém cabe destacar que nestes experimentos, onde se aumentou as incertezas nas cargas (cerca de 10% para *experimento #R4* e 30% para *experimento #R5*), pela análise do histograma da parte real dos autovalores e dos amortecimentos críticos (vide **Figuras V-22.e, V-22.k, V-23.e e V-23.k**) pode-se observar que houve considerável variação no valor médio da parte real dos autovalores e dos amortecimentos críticos e também no desvio padrão dessas variáveis aleatórias, caracterizando portanto indício de degradação na segurança do sistema sob estabilidade a pequenas perturbações.

Nestes experimentos, para os coeficientes de variação β das variáveis aleatórias relacionadas à média da parte real dos autovalores, parte real dos autovalores críticos, média dos amortecimentos e amortecimentos críticos, verificaram-se valores satisfatórios, porém com uma convergência em cerca de 800 sorteios, estabilizando-se em valores inferiores a 0.4%. O mesmo não ocorre com o coeficiente de variação β da variável aleatória associada com a parte real dos autovalores críticos do *experimento #R5* (vide Figura V-23.f), onde com 1000 sorteios ainda não se observou uma estabilização, variando o mesmo no intervalo de 0.5 a 0.6%.

V.7.4 Interpretação dos Resultados: Experimento #R6

Neste experimento considerou-se uma magnitude do ruído da ordem de 10% apenas na área de São Paulo (Empresas: ELETROPAULO, CESP e CPFL). Devido ao esforço computacional necessário para este tipo de análise, neste sistema de grande porte, considerou-se apenas 1 lote de 100 sorteios para demonstração da metodologia proposta.

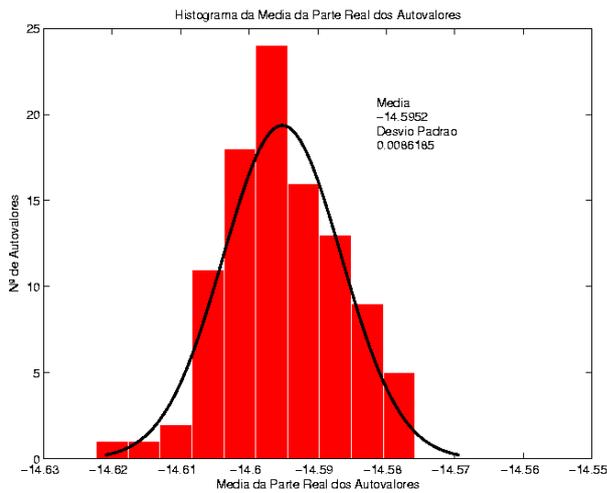
Nas **Figuras V-24.a a V-24.i** estão apresentados os histogramas das variáveis aleatórias associadas com a parte real dos autovalores e amortecimentos referente ao *experimento #R6*, assim como os correspondentes coeficientes de variação β .

É importante observar que no exemplo apresentado nesta seção, a representação de ruídos na magnitude da carga vem por deteriorar os índices de segurança probabilística

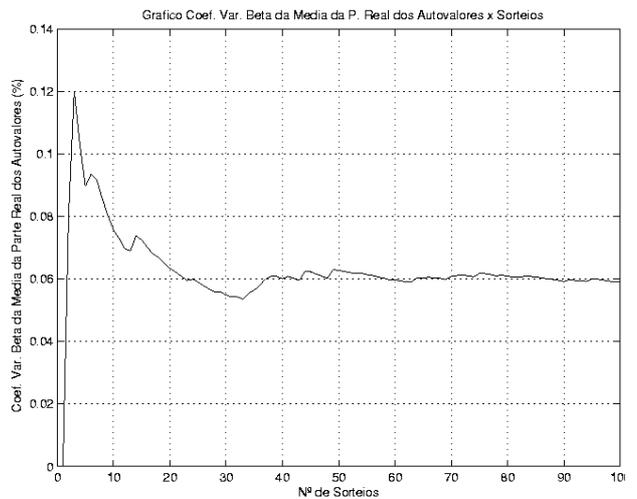
sob pequenas perturbações. Neste exemplo o risco de instabilidade a pequenas perturbações seria zero, porém com faixas de amortecimentos críticos bastante reduzidos, no intervalo [2.442%, 2.552%]. Essa deterioração seria mais evidente se tivéssemos representados incertezas em todas as áreas do sistema.

Observou-se também que o coeficiente de variação β de praticamente todas as variáveis aleatórias relacionadas com a parte real dos autovalores e amortecimentos apresentaram boa precisão, com convergência rápida em apenas 100 sorteios e estabilizando em valores inferiores a 1.5%.

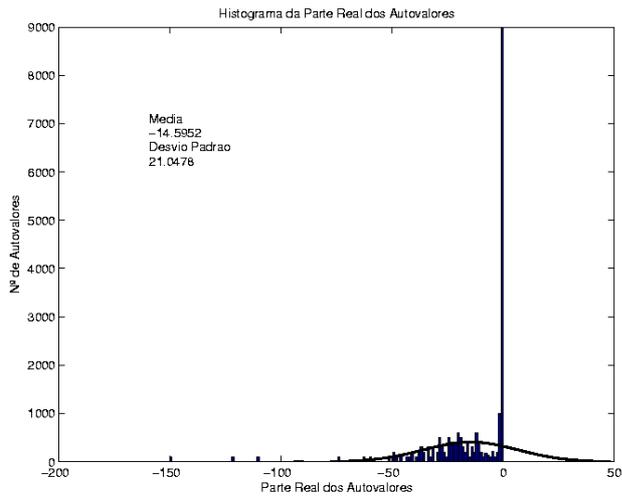
Do mesmo modo que nos experimentos anteriores, os coeficientes de variação β da parte real dos autovalores e amortecimentos (vide Figura V-24.d e V-24.j) apresentaram uma variação grande e sem tendência para convergência.



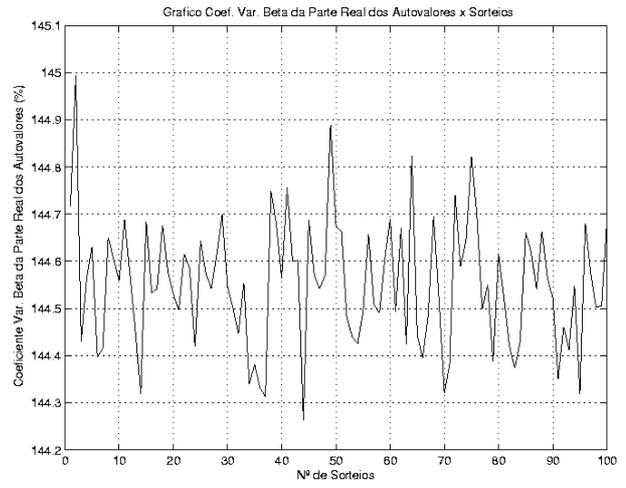
(a)



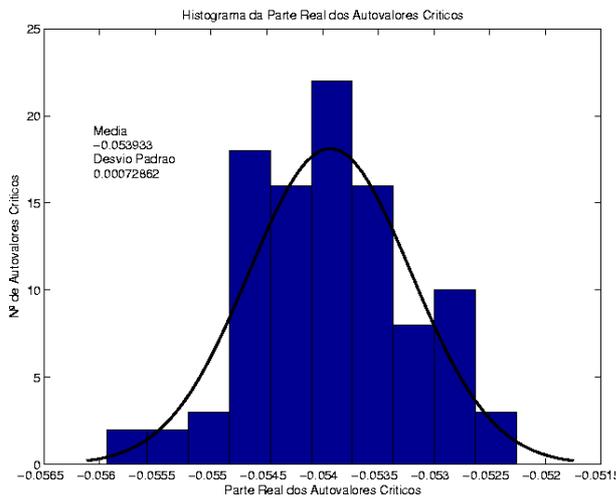
(b)



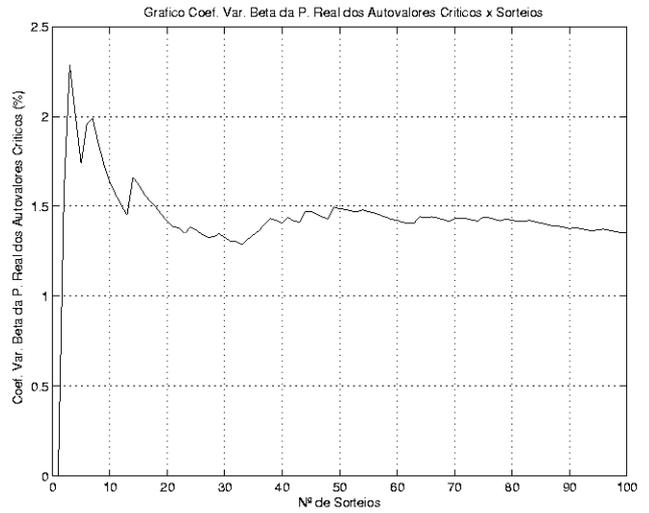
(c)



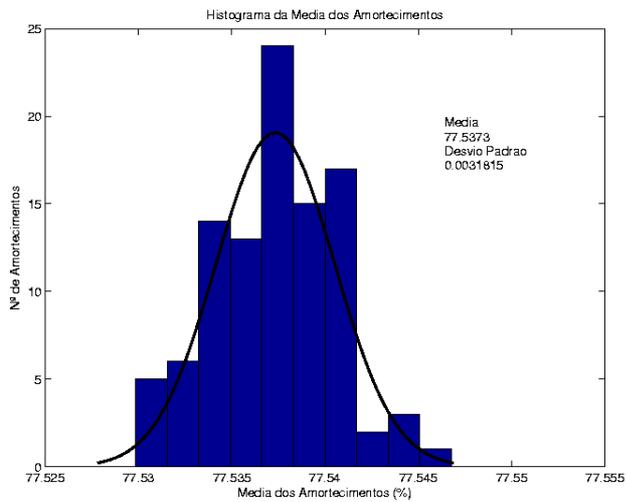
(d)



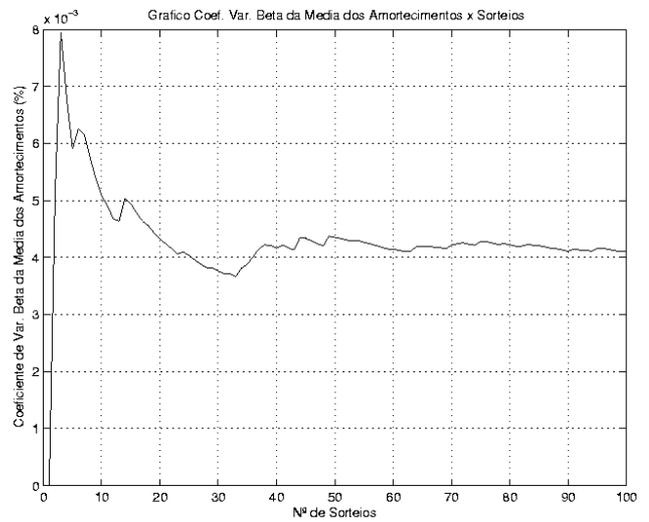
(e)



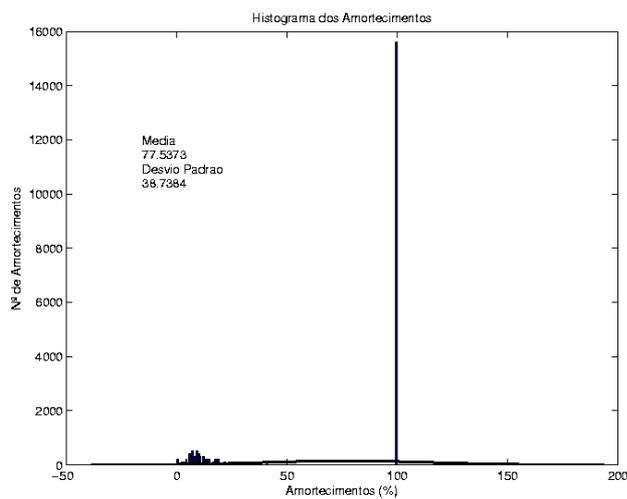
(f)



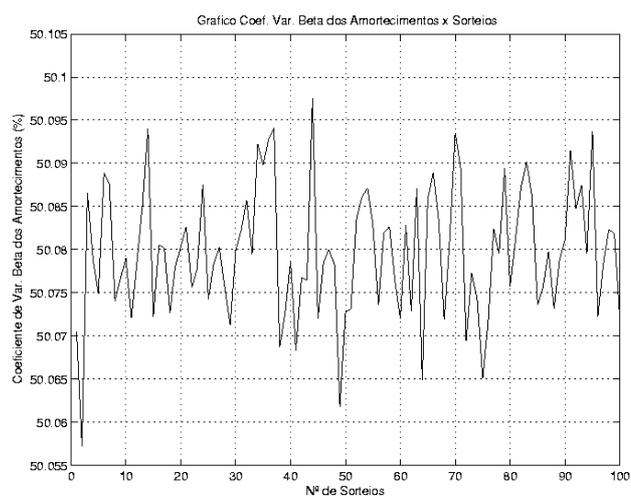
(g)



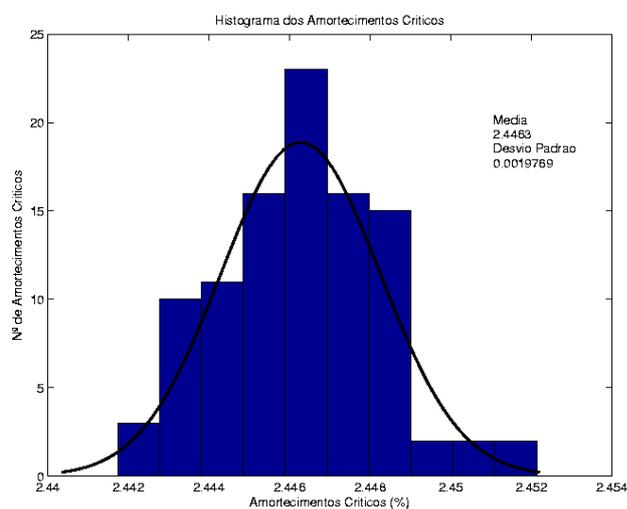
(h)



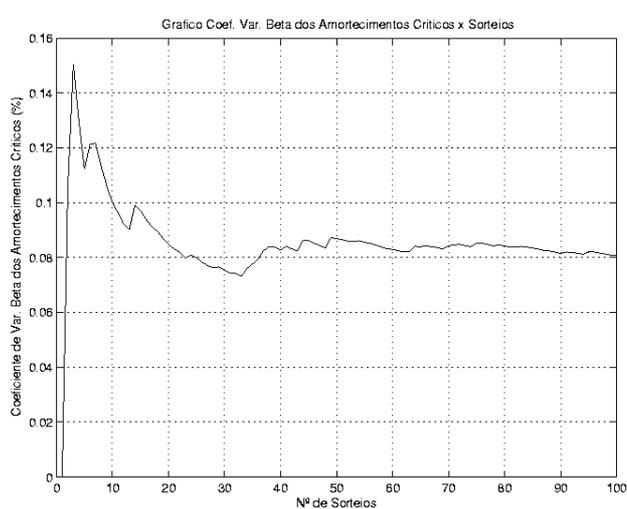
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura V-24 – Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Experimento #R6

V.7.5 Requisitos Computacionais

A simulação do programa APPS considerando incertezas apenas em ruídos foi realizada utilizando um computador Pentium 4, de 3.2 MHz, 1024 kbytes de memória RAM. O maior tempo de CPU dispendido foi no *experimento #R2*, onde executou-se 10000 sorteios em 5 horas de processamento.

V.8 Simulações para Análise Considerando Incertezas em Cenários e Ruídos

Na **Tabela V-20** são propostos os experimentos considerando incertezas em cenários e ruídos.

Tabela V-20 – Experimentos Considerando Incertezas em Cenários e Ruídos

Experimentos	Sistemas Teste	Modelagem de Incertezas em Cenários			Modelagem de Incertezas em Ruídos								Tabelas	Figuras
		INTE (1)	PATA (2)	TOPO (3)	Localização do Ruído	Tipo de Ruído (5)	Tipo de Acoplamento (6)	Tipo de Sorteio (7)	Tipo de Distribuição (8)	Magnitude do Ruído (%) (9)	Nº de Lotes	Nº de Sorteios		
H1	5 barras	Não	Sim	Não	Barra 5	MAG	PQ	CONF	NORM	10	1	1000	V-22 V-23 V-24	V-25 V-26 V-27 V-28
H2	New England	Não	Sim	Sim	Todas as Barras	MAG	PQ	CONF	NORM	10	1	1000	V-25	V-29

- (1) INT – Incertezas em Cenários de Intercâmbios
- (2) PATA – Incertezas em Patamares de Carga
- (3) TOPO – Incertezas em Topologias
- (4) Tipo de Ruído: MAG = Magnitude da Carga e MOD = Modelagem da Carga
- (5) Tipo de Acoplamento: P = Ruído Somente na Parte Ativa da Carga, Q = Ruído Somente na Parte Reativa da Carga e PQ = Parte Ativa e Reativa
- (6) Tipo de Sorteio: CONF = Sorteio Conforme e NCONF = Sorteio Não Conforme
- (7) Tipo de Distribuição: NORM = Normal, EXPO = Exponencial, RETA = Retangular, TRIA = Triangular, WEIB = Weibull, LOGN = Lognormal e LAPL = Laplace

V.9 Resultados Obtidos: Incertezas em Cenários e Ruídos

Nesta seção apresenta-se uma aplicação da metodologia proposta considerando a combinação das duas classes de incertezas, *experimentos tipo H*, analisadas separadamente nas seções anteriores. Tal análise foi feita com base nos dois sistemas testes, fictício 5 barras e New England 39 barras, caracterizados como sistemas estáveis, porém com baixo amortecimento. Assim, os pontos de operação selecionados foram:

- Sistema fictício 5 barras em carga média e leve, cujas probabilidades estão apresentadas na **Tabela V-21**.

Tabela V-21 – Probabilidade dos Cenários de Patamares de Carga – Sistema 5 barras

Patamares de Carga	Probabilidade (%)	Carga (MW)
Média	90	1895
Leve	10	795

- Sistema New England 39 barras em cargas pesada, média e leve, cujas probabilidades são as mesmas utilizadas na **Seção V.3** (vide **Tabela V-4**).

Supondo-se a modelagem estocástica nos patamares de carga (média e leve), aplicaram-se ruídos considerando-se:

- *Ruído somente na magnitude da carga;*
- *Todas as cargas com potência constante;*
- *Ruído nas partes ativa e reativa da carga;*
- *Desvio padrão de 10%.*

O tipo de sorteio considerado foi sempre conforme e o tipo de distribuição normal.

Os histogramas híbridos foram obtidos pela combinação dos histogramas de ruídos ponderados pelas probabilidades de cada cenário tratado.

V.9.1 Interpretação dos Resultados: Experimento #H1

Este experimento comparativo foi efetuado primeiramente com a aplicação das incertezas somente em cenários, não representando estocasticamente a magnitude da carga e depois, considerou-se somente ruídos na magnitude da carga e não modelando incertezas em cenários.

A primeira análise realizada foi considerando incertezas somente em cenários, representando estocasticamente os dois patamares de carga (média e leve). Nessa situação, o sistema pode ser avaliado como mostra o mapeamento dos pólos na Figura V-25 e os resultados dos indicadores apresentados na **Tabela V-22**, ou seja, o risco de instabilidade a pequenas perturbações seria zero, porém com uma pequena margem ao

sempi plano da direita constatado pelos indicadores *EMC*, *MAM* e *MDM*. Observa-se também, 100% de probabilidade das faixas de amortecimentos se situarem entre 0 e 5%, ou seja, caracterizado como um sistema de baixo amortecimento.

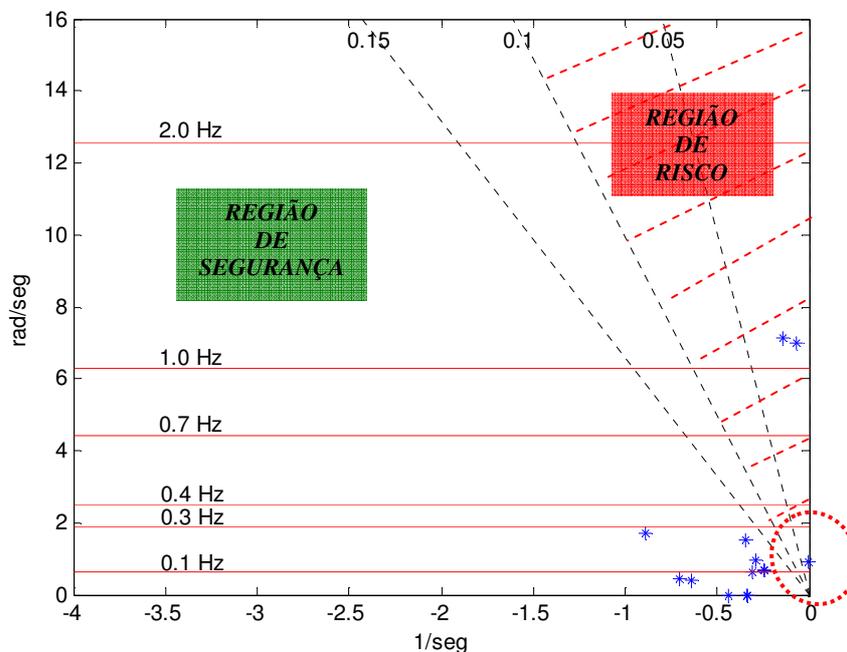


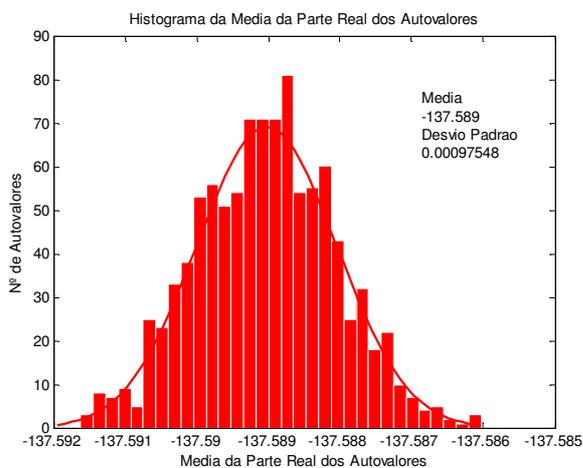
Figura V-25 – Autovalores do Espaço Probabilístico – Sistema-Teste 5 Barras

Tabela V-22 – Indicadores – Teste 5 Barras – Com Estabilizadores – Incertezas Somente em Cenários

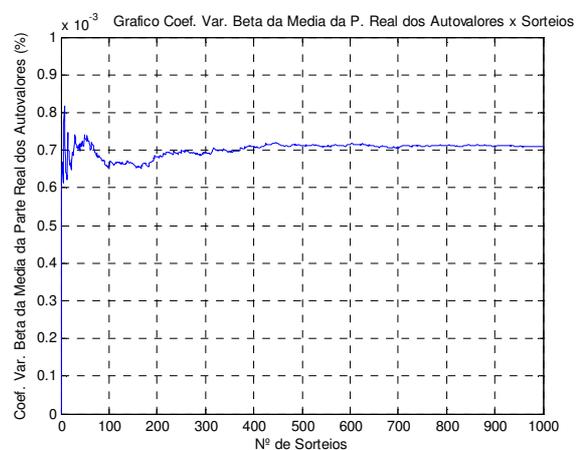
Indicadores de Segurança Estática Probabilística		Somente Cenários
Simbologia	Nome	
POI	$P_{instabilidade}$	0%
POE	$P_{estabilidade}$	100%
PAM	$p_{amort} < 0\%$	0%
	$0\% < p_{amort} < 5\%$	100%
	$5\% < p_{amort} < 10\%$	0%
	$10\% < p_{amort} < 15\%$	0%
	$15\% < p_{amort} < 20\%$	0%
PFE	$0.0 \text{ Hz} < p_{freq} < 3.0 \text{ Hz}$	100%
PFS	$p_{freq} > 3.0 \text{ Hz}$	0%

Indicadores de Segurança Estática Probabilística		Experimento #H1
Simbologia	Nome	
EMC	$E(\lambda_{crit})$	-0.014877
EFA	$E(\zeta_{crit})$	0.289547
MAM	$\bar{\lambda}_{crit}$	-0.070585
MAC	$\bar{\zeta}_{crit}$	1.033093
MDM	$MD(\lambda_{crit})$	-0.070585
MDA	$MD(\zeta_{crit})$	1.033093
ESS	$E(Insucesso)$	0
ESP	$E(Sucesso Parcial)$	2
EST	$E(Sucesso Total)$	0
PSS	$P_{Insucesso}$	0%
PSP	$P_{Sucesso Parcial}$	100%
PST	$P_{Sucesso Total}$	0%

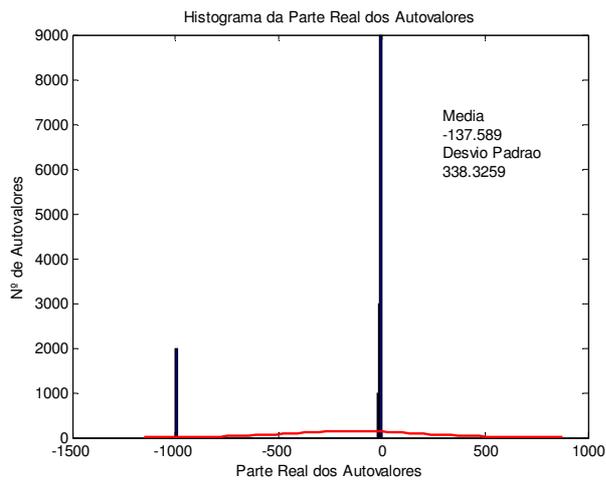
Na segunda análise, aplicou-se nos patamares de carga média e leve, um ruído de 10% na magnitude de carga da barra 5. Empregando-se a metodologia proposta com consideração de ruídos apenas na barra 5 e com 1000 sorteios, os histogramas relacionadas com a parte real dos autovalores e amortecimentos, e os correspondentes coeficientes de variação β foram calculados para os dois patamares de cargas (média e leve). As **Figuras 26.a a V-26.I** mostram os histogramas obtidos na condição de carga média e as **Figuras 27.a a V-27-I** na condição de carga leve.



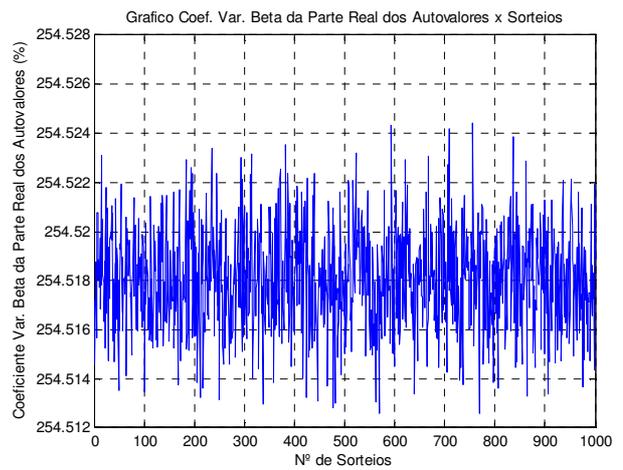
(a)



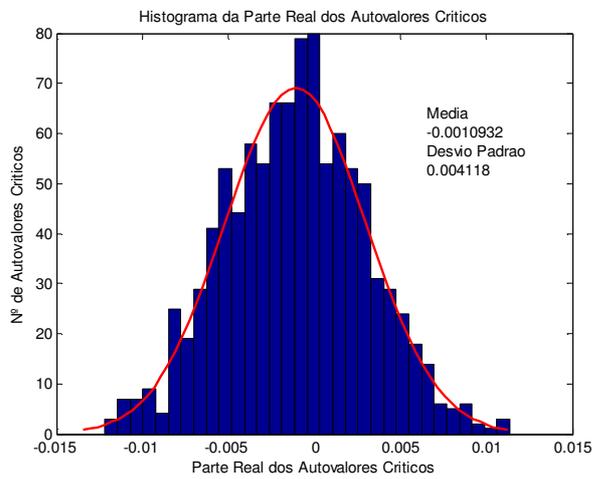
(b)



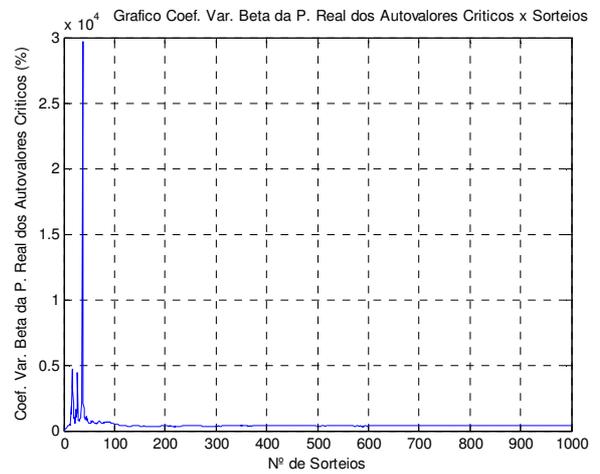
(c)



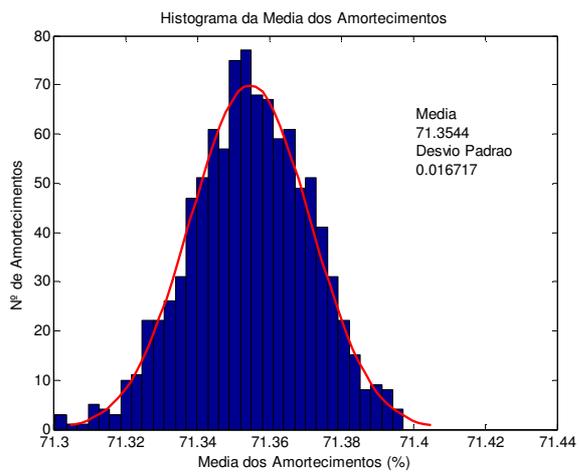
(d)



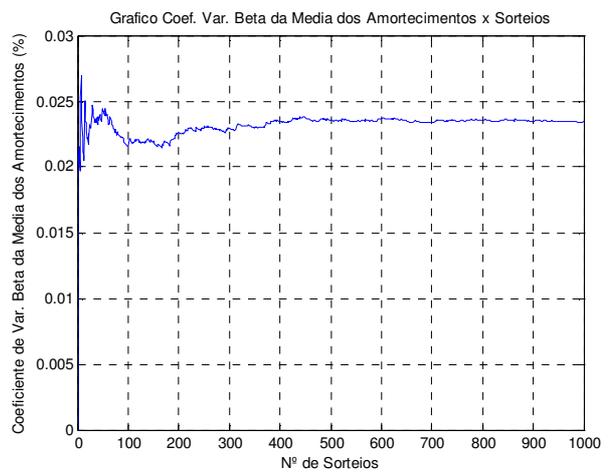
(e)



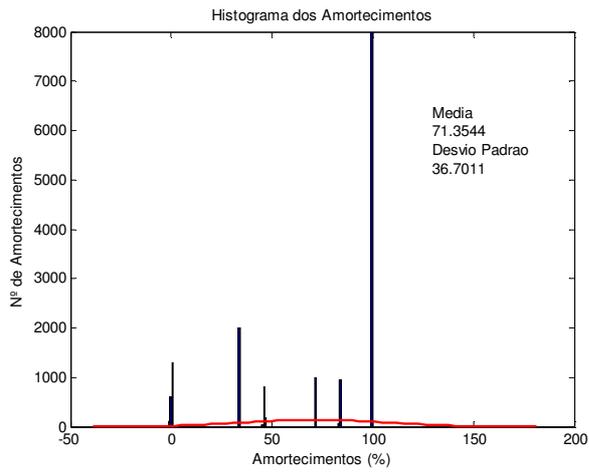
(f)



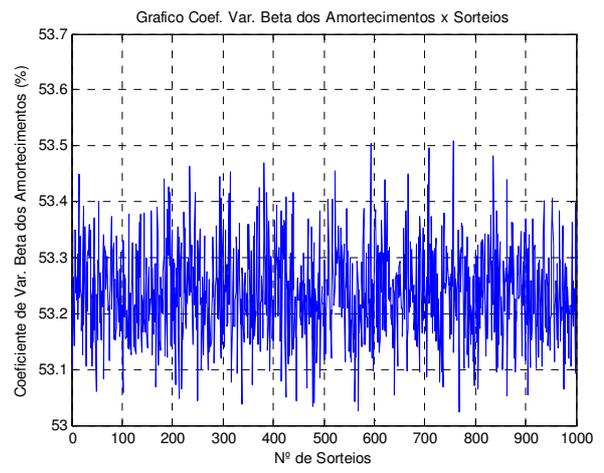
(g)



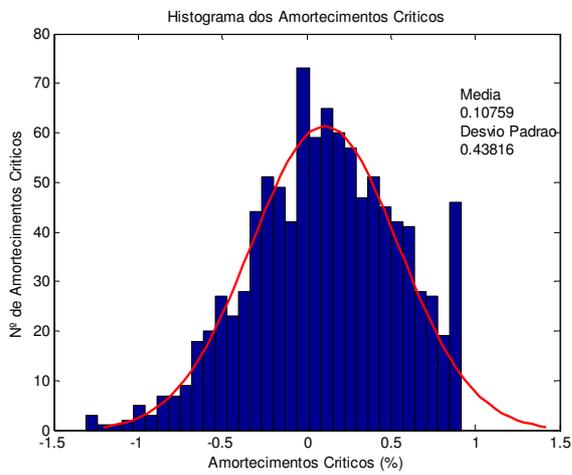
(h)



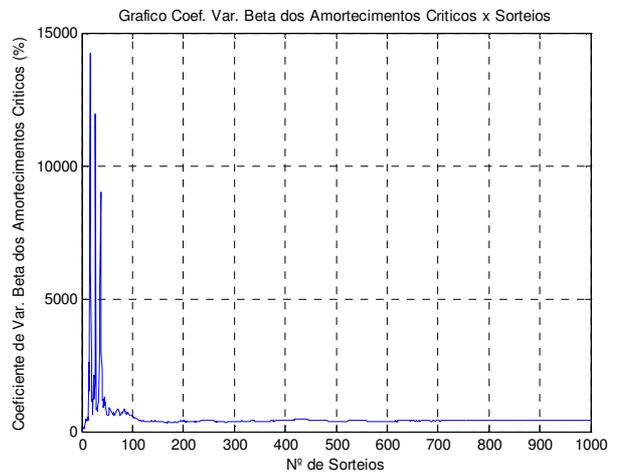
(i)



(j)

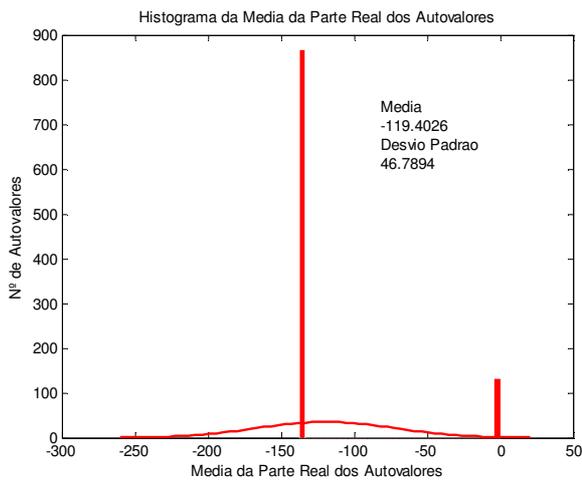


(k)

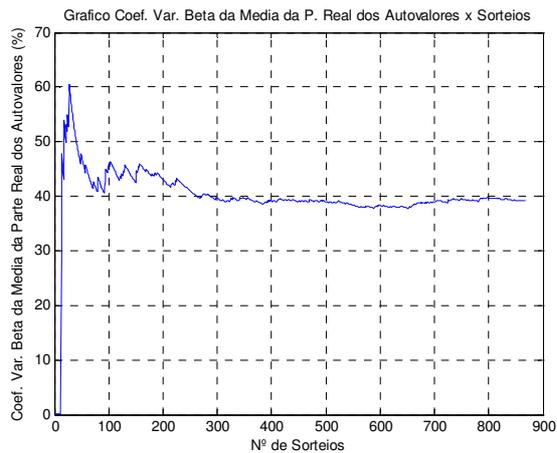


(l)

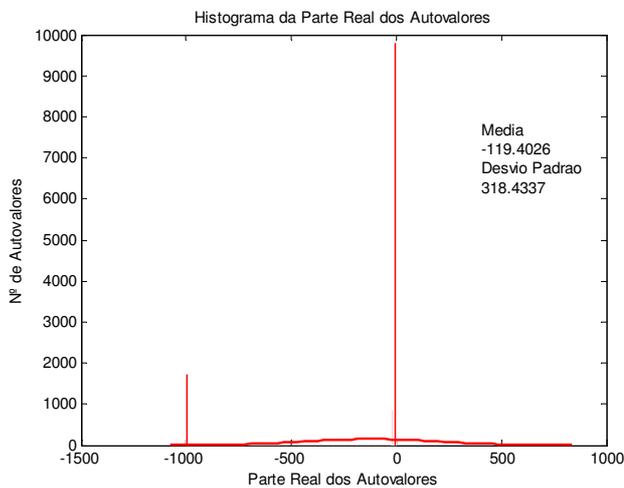
Figura V-26 – Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Carga Média – Incertezas Somente em Ruídos



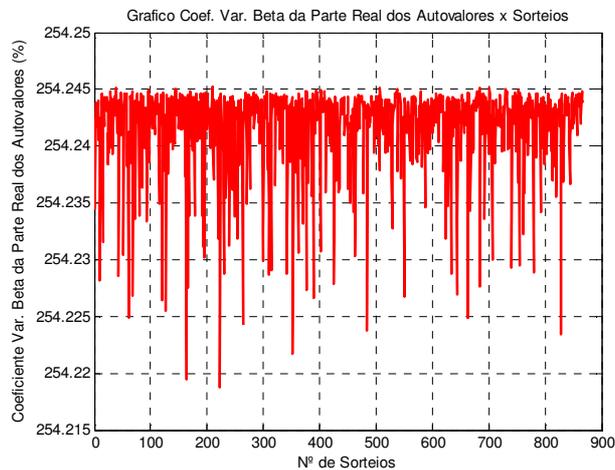
(a)



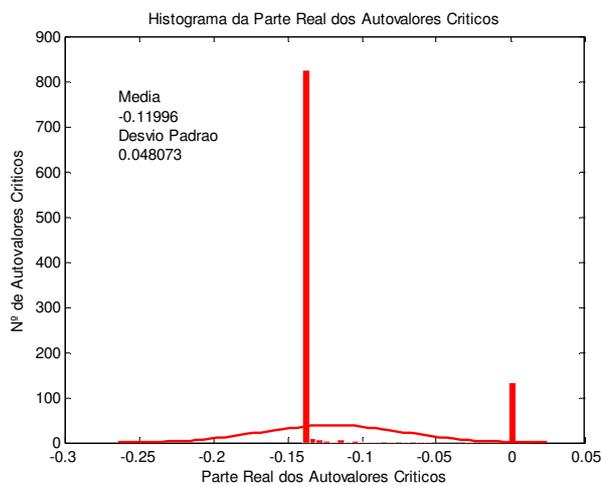
(b)



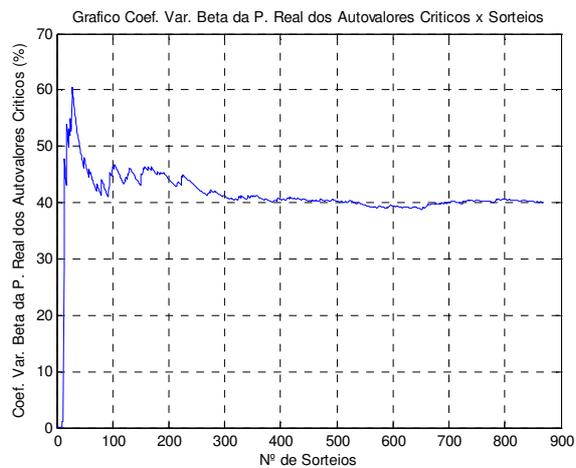
(c)



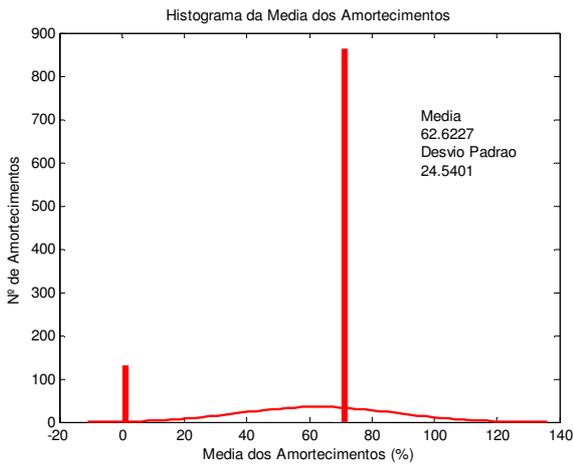
(d)



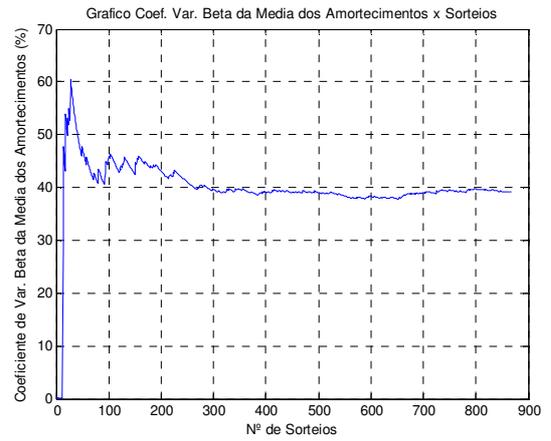
(e)



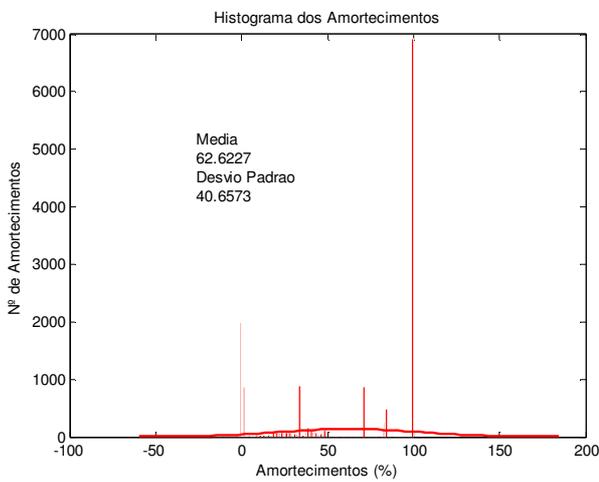
(f)



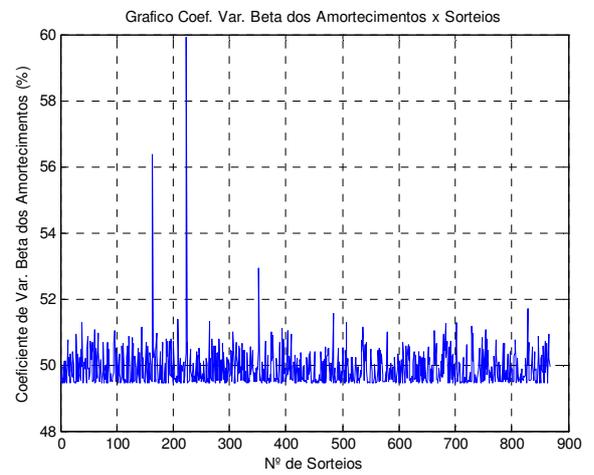
(g)



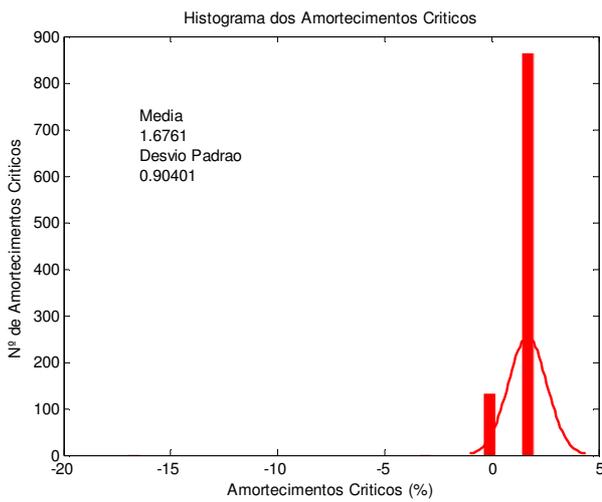
(h)



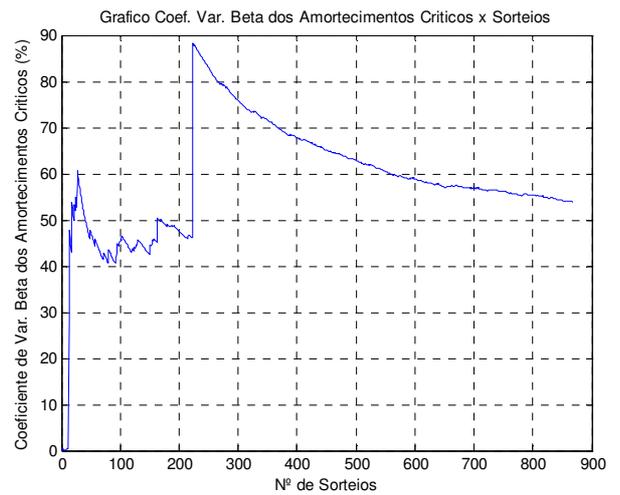
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura V-27 – Histogramas e Coeficientes de Variação β da Parte Real dos Autovalores e Amortecimentos – Carga Leve – Incertezas Somente em Ruídos

A comparação entre os histogramas dos casos de cargas média e leve da variável aleatória parte real dos autovalores críticos, *mostra que em carga média o sistema fica exposto a problemas de instabilidade a pequenas perturbações com probabilidade de ocorrer autovalores no semiplano da direita.*

Comparando-se ainda os dois casos, observa-se que no caso de carga média existe uma pequena margem de estabilidade, e a média dos autovalores críticos situa-se na faixa $[-0.01, 0.01]$, cujo valor médio é da ordem de -0.0010932 e o desvio padrão de 0.004118% . Em carga leve a condição é bem menos severa, apresentando-se a média no intervalo de $[-0.25, 0]$, cujo valor médio é 100 vezes maior que o caso de carga média (valor médio da ordem de -0.11996 e o desvio padrão da ordem de 0.048077%).

Nestes experimentos, os 1000 sorteios realizados não foram suficientes para uma boa convergência do indicador relacionado com a parte real dos autovalores críticos, conforme pode ser observado na Figura V-26.f e V-27.f. O mesmo problema é identificado com os amortecimentos críticos, onde notou-se um coeficiente variação da ordem de 1000% em carga média e 50% em carga leve.

Na **Tabela V-23** constata-se que o caso de carga média é mais crítico do que o cenários de carga leve.

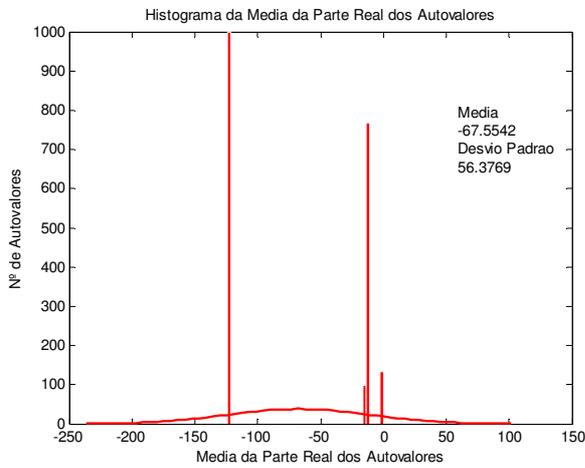
Tabela V-23 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos – Somente Ruídos

Faixas de Amortecimentos (%)		Probabilidade Estimada (%)	
Mínimo	Máximo	Carga Leve (*)	Carga Média
< 0		0.20	40.60
0	5	86.50	59.40
5	10	0.00	0.00
10	15	0.00	0.00
15	20	0.00	0.00
> 20		0.00	0.00

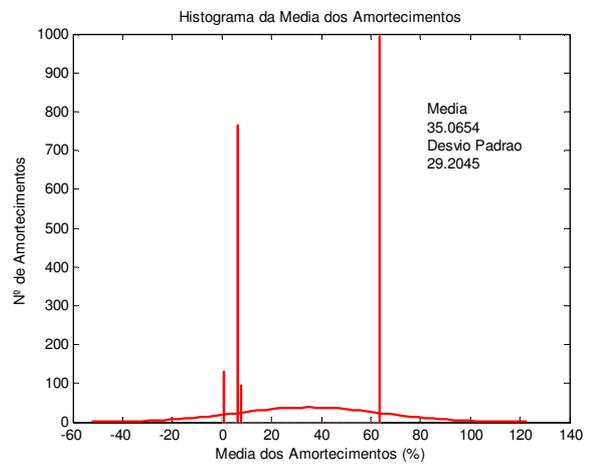
(*) No caso de carga leve 133 casos, num total de 1000, revelaram-se inviáveis, sendo retirados da estatística.

Na terceira análise foram consideradas incertezas em cenários e ruídos. Cabe destacar que estes experimentos são identificados como tipo H.

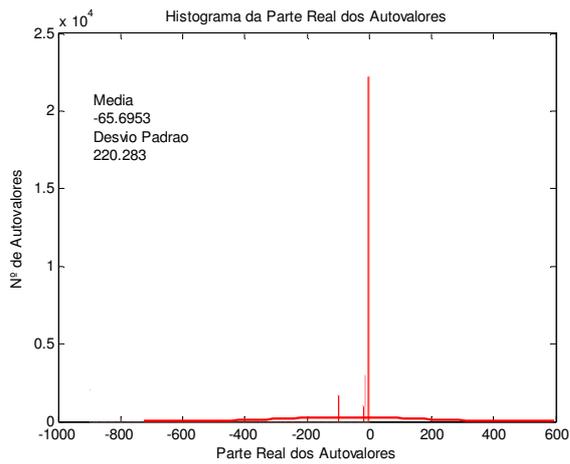
Os histogramas híbridos associados com a média da parte real dos autovalores, parte real dos autovalores e parte real somente dos autovalores críticos estão apresentadas respectivamente nas **Figuras V-28.a a V-28.c**. As mesmas distribuições de probabilidade para os amortecimentos foram também obtidas e estão apresentadas nas **Figuras V-28.d a V-28.f**.



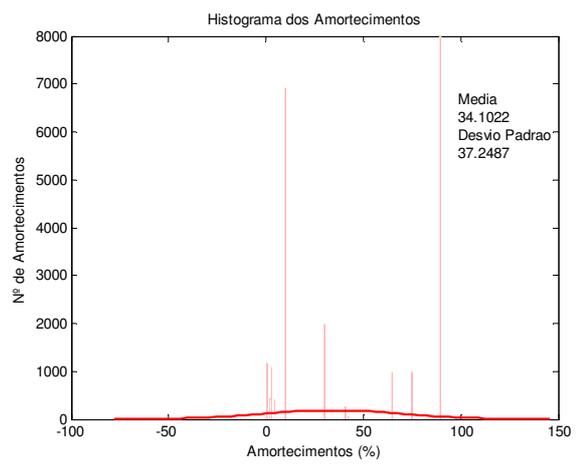
(a)



(b)



(c)



(d)

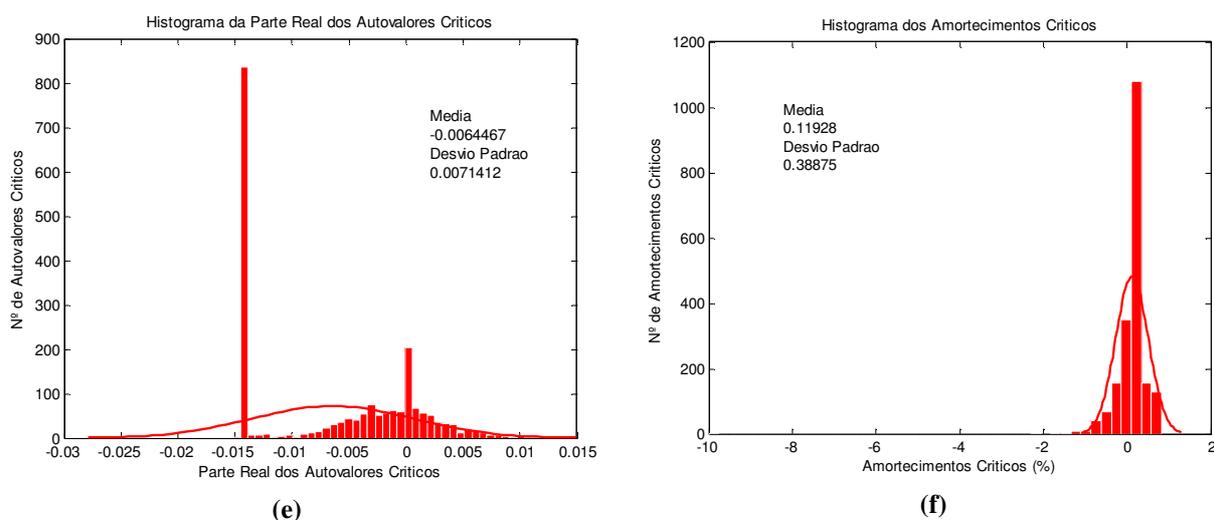


Figura V-28 – Incertezas em Cenários e Ruídos – Experimento #H1

As **Figuras V-28.e** e **V-28.f** ilustram os histogramas híbridos relacionados com a parte real dos autovalores críticos e amortecimentos críticos, cuja média situa-se na faixa $[-0.015, 0.015]$. O valor médio é da ordem de -0.0064467 e o desvio padrão de 0.0071412% . Observa-se que os resultados obtidos se aproximam bastante do caso de carga média com consideração de incertezas apenas em ruídos anteriormente analisado (vide Figura V-26). Isto ocorre pelo fato do cenário de carga média possuir maior probabilidade de ocorrência, da ordem de 90% , e o de carga leve é de apenas 10% .

A **Tabela V-24** consolida a comparação entre os cenários de carga leve e média com a presença de ruídos. Pode-se verificar que o experimento híbrido situa-se em um nível de criticidade intermediário entre os cenários de carga média e leve.

Tabela V-24 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos – Experimento #H1

Faixas de Amortecimentos (%)		Probabilidade Estimada (%)		
Mínimo	Máximo	Carga Leve (*) (p = 10%)	Carga Média (p = 90%)	#H1(*)
< 0		0.20	40.60	20.65
0	5	86.50	59.40	72.70
5	10	0.00	0.00	0.00
10	15	0.00	0.00	0.00
15	20	0.00	0.00	0.00
> 20		0.00	0.00	0.00

(*) No caso de carga leve, 133 casos, num total de 1000, revelaram-se inviáveis, sendo retirados da estatística. No caso híbrido tem-se um total de $1000 + 1000 = 2000$ sorteios, dos quais 133 casos permanecem sendo retirados da estatística.

V.9.2 Interpretação dos Resultados: Experimento #H2

Conforme apresentado na **Tabela V-20**, este experimento baseia-se no sistema New England 39 barras. As incertezas são exatamente as mesmas do *experimento #H1*.

É interessante observar que também no caso do *experimento #H2*, a representação de incertezas em cenários mais ruidos deteriorou os indicadores de segurança a pequenas perturbações, conforme os resultados apresentados nas **Figuras V-29.a e V-29.b**.

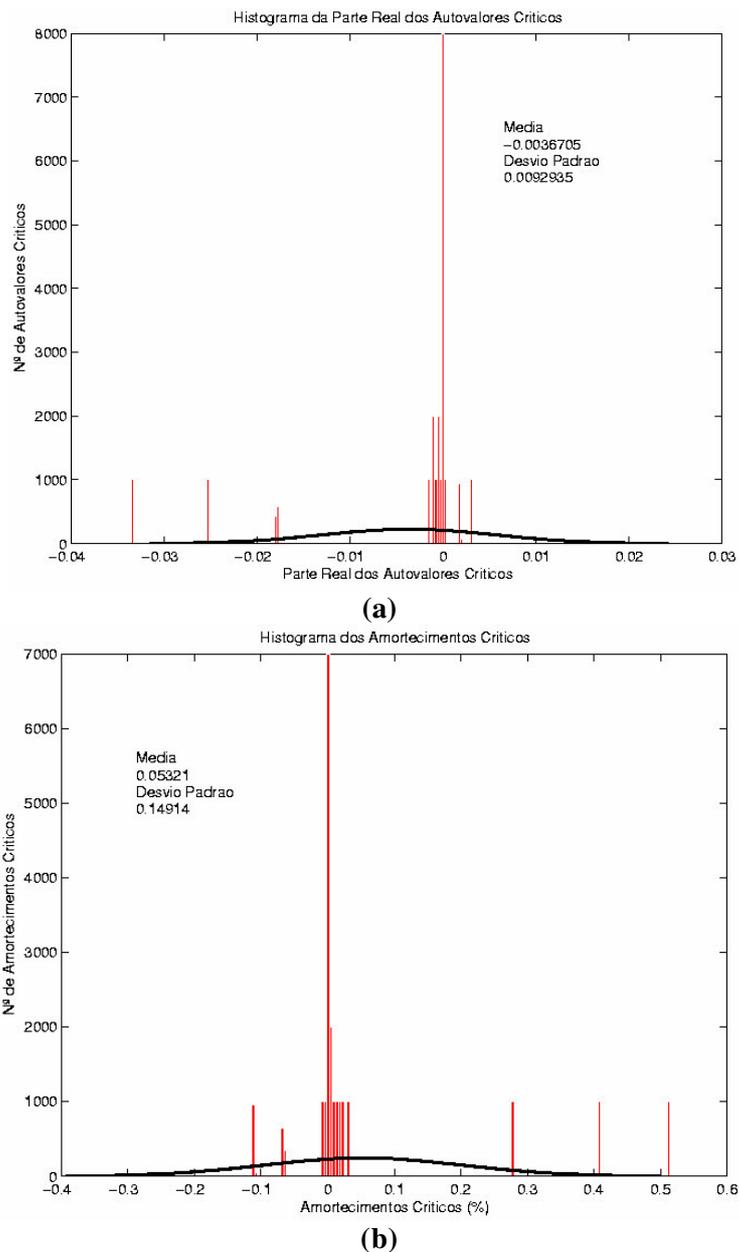


Figura V-29 – Incertezas em Cenários e Ruídos – Experimento #H2

Determinou-se a estimativa da probabilidade associada com os intervalos da média dos amortecimentos críticos nas seguintes faixas [0 – 5%], [5 – 10%], [10 – 15%], [15 – 20%], [valores maiores que 20%] e [menores que zero], permitindo assim estimar o risco de violar o critério de amortecimento especificado para o sistema. Estes resultados estão apresentados na **Tabela V-25**. Neste *experimento #H2*, o risco de instabilidade ou de amortecimento negativo foi de 28.58% e de estabilidade ou amortecimento na faixa de 0 a 5% foi de 71.42%.

A **Tabela V-25** demonstra a relevância da combinação de incertezas em cenários e ruídos. Isto fica evidente porque a consideração única de ruídos (*experimento #R4*) sugere um sistema sem riscos, enquanto a combinação de ruídos e cenários (*experimento #H2*) revela um nível estimado de risco em torno de 28.6%. Por outro lado, a consideração única de cenários (vide *experimento #C9* da **Tabela V-12**), aponta um nível reduzido de risco.

Tabela V-25 – Estimativas de Probabilidades do Indicador Amortecimentos Críticos – Experimento #H2

Faixas de Amortecimentos (%)		Probabilidade Estimada (%)	
Mínimo	Máximo	#R4	#H2
< 0		0.00	28.58
0	5	100.00	71.42
5	10	0.00	0.00
10	15	0.00	0.00
15	20	0.00	0.00
> 20		0.00	0.00

V.9.3 Requisitos Computacionais

A simulação do programa APPS considerando incertezas em cenários e ruídos foi efetivada utilizando um computador Pentium 4, de 3.2 MHz, 1024 kbytes de memória RAM. O maior tempo de CPU dispendido foi no *experimento #H2*, onde foram executados 21000 processamentos (21 cenários com incertezas x 1000 sorteios). Neste caso o tempo total dispendido foi de aproximadamente 33 horas, ou seja, 0.0943 minutos em média por simulação.

V.10 Sumário

Diversos exemplos da aplicação da metodologia proposta foram apresentados neste capítulo considerando *incertezas somente em cenários, somente em ruídos e uma combinação dessas duas classes de incertezas*.

Na primeira parte consideraram-se *incertezas apenas em cenários* (intercâmbios entre áreas, patamares de carga, topologias e uma combinação de duas ou três dessas classes) e mostraram-se diversos exemplos de cálculos de indicadores de segurança probabilística proposta para os sistemas-teste de 5 barras, New England e 1762 barras do Sul/Sudeste equivalentado, inclusive realizando algumas comparações considerando ou não a presença de estabilizadores. Pode-se constatar a relevância da modelagem de cenários sobre os indicadores de segurança probabilística a pequenas perturbações. O tempo de CPU gasto para análise de segurança probabilística a pequenas perturbações do sistema de 1762 barras foi de aproximadamente, um minuto, em média, o que corresponde ao cálculo dos autovalores, pelo algoritmo QR, de uma matriz de ordem 265, realizando 7 vezes (7 topologias). O computador utilizado foi um Pentium 4, de 3.2 MHz, memória RAM de 1024 kbytes. Também foi realizado um breve estudo da influência da carga, topologias e dados estocásticos sobre os indicadores propostos, obtendo-se resultados satisfatórios.

A segunda aplicação da metodologia foi considerando *incertezas somente em ruídos*, quando pode-se constatar que a modelagem de incertezas nas cargas causa variações na parte real dos autovalores e amortecimentos em torno do seu valor médio. Essas variações foram observadas através dos histogramas determinados pelo protótipo computacional proposto, podendo-se obter índices estatísticos tais como: média, mínimo, máximo e desvio padrão, além de uma estimativa do risco do sistema sob pequenas perturbações.

Finalmente, a combinação de *incertezas do tipo cenários e ruídos* consolidou a investigação encetada, demonstrando a utilidade prática dos novos indicadores propostos nesta Tese, mormente aqueles baseados nos autovalores e amortecimentos críticos.

* * *

Capítulo VI

Conclusões

VI.1 Retrospectiva

Esta Tese abordou o problema relacionado à análise de segurança a pequenas perturbações considerando incertezas. O problema foi tratado através do desenvolvimento de *um novo procedimento computacional que subsidia a avaliação dinâmica linearizada da estabilidade do sistema de potência sob a influência de pequenas perturbações, através de um conjunto de novos indicadores de segurança dinâmica que levam em conta a presença de incertezas.*

As principais dificuldades encontradas durante o desenvolvimento desta Tese encontraram-se associadas à viabilização da compatibilidade operacional do aplicativo PSAT com o arcabouço conceitual proposto para o tratamento de incertezas.

O cálculo automático dos indicadores probabilísticos de estabilidade a pequenas perturbações é importante, tanto para planejamento quanto para operação de sistemas. O protótipo desenvolvido poderá ser de grande utilidade dado que possibilitará uma análise mais detalhada de variações de carga, cenários de intercâmbios e patamares de carga, não prevista nos estudos determinísticos.

Os resultados obtidos poderão subsidiar ajustes bem robustos dos controladores do sistema, propiciando maior segurança frente a pequenas perturbações.

VI.2 Principais Contribuições

As principais contribuições originais desta Tese foram indicadas nos sumários de cada capítulo. As principais publicações geradas ao longo do desenvolvimento da mesma,

também foram relacionadas na **Seção I.4**. Não obstante, considera-se que os tópicos merecedores de destaque especial são os seguintes:

- (i) *Foi realizado um minucioso levantamento do estado-da-arte do tema (vide Capítulo II);*
- (ii) *Foi proposta uma nova estrutura conceitual para tratamento de incertezas (vide Seção III.2 e Figura IV-1);*
- (iii) *Foi elaborado um novo arcabouço conceitual generalizado para a análise de confiabilidade probabilística, sob o prisma da segurança, passível de adaptação ao problema de análise de pequenas perturbações ou ao problema de estabilidade transitória clássica, sob grandes distúrbios (vide Seção III.4);*
- (iv) *Foi concebido um significativo conjunto de novos indicadores probabilísticos, úteis para a análise de sistemas de potência sob pequenas perturbações (vide Seção III.6);*
- (v) *Foi desenvolvido (vide Capítulo IV) e aplicado (vide Capítulo V) um novo protótipo computacional (APPS vide Anexos B e E) para a obtenção de resultados práticos e realistas.*

VI.3 Sugestões para Futuros Trabalhos

Por motivos de limitações diversas, vários tópicos não foram computacionalmente implementados/testados. Os itens não tratados são candidatos naturais para continuação das pesquisas. Entre estas cabe citar:

- (i) *Implementação de medidas corretivas diversas, conforme sugerido pela **Tabela III-4**. Em particular, sugere-se fortemente investigar a adaptação e extensão dos resultados obtidos em Bomfim [59], baseados em ajustes de reguladores via algoritmos genéticos ou outras técnicas de computação evolutiva (vide Seção III.6.2.7, índice EMA);*

- (ii) *Investigação do efeito de degradação da convexidade dos espaços probabilísticos (vide Equação (III-5));*
- (iii) *Habilitação dos tópicos associados à modelagem de ruídos que foram especificados, porém não desenvolvidos nesta Tese;*
- (iv) *Investigação sobre o tratamento de cenários, via Monte Carlo;*
- (v) *Nesta Tese, o cálculo de autovalores do sistema foi feito através do conhecido método QR existente no programa PSAT. O método QR determina todos os autovalores do sistema estudado. Entretanto, em sistemas de grande porte, o cálculo de todos os autovalores pode tornar-se inviável, sendo necessária a utilização de técnicas que viabilizem uma redução no esforço computacional.*
- (vi) *Implementação da opção de modelagem de incertezas do tipo ruído para cenários de intercâmbios e parâmetros de geradores e controladores;*
- (vii) *Extensão do cálculo convencional de fatores de participação de máquinas visando incorporar o efeito de incertezas.*

*“Joy unto you, O men of Myalba. A pilgrim
hath returned back from the other shore. A
new Arhan is born.
Peace to all Beings”.*
(Āryasanga)

* * *

Referências Bibliográficas

- [1] H. Cramér, “Mathematical Methods of Statistics”, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1954.
- [2] M.G. Kendall and A. Stuart, “The Advanced Theory of Statistics”, Vol. 1, Second Edition, Hafner Publishing Company, New York, 1963.
- [3] J.E. Van Ness, J.M. Boyle e F.P. Imad, “Sensitivities of Large, Multiple-Loop Control Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 10, pp. 308-315, July, 1965.
- [4] A.D. Patton, Short-term Reliability Calculation, IEEE Trans. On PAS, Vol. 89, pp. 509-514, April, 1970.
- [5] M. Abramowitz, I.A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions, Dover Pub., 9th Printing, New York, Nov 1970, pp. 934.
- [6] H. Kobayashi, R. Yokoyama and S. Ninagawa, “Dynamic Stability Limit under Random Disturbances”, Transactions of IEEE of Japan, Vol. 93-B, No. 9, pp. 407-411, September, 1973.
- [7] P. Kundur and P.L. Dandeno, “Practical Application of Eigenvalue Techniques in the Analysis of Power System Dynamic Stability Problems”, Paper No. 3.2/7, Proceedings of the V PSCC, Cambridge, England, September, 1975.
- [8] H.M. Zein El-Din and R.T.H. Alden, “Second Order Eigenvalue Sensitivities Applied to Power System Dynamics”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 6, pp. 1928-1936, November/December, 1977.
- [9] A. Jennings, “Matrix Computations for Engineers and Scientists”, John Wiley & Sons, New York, 1977.

- [10] R.C. Burchett and G.T. Heydt, "Probabilistic Methods for Power System Dynamic Stability Studies", IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, pp. 695-702, May/June, 1978.
- [11] R.C. Burchett, G.T. Heydt, "A Generalized Method for Stochastic Analysis of the Dynamic Stability of Electric Power Systems", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Paper A78528-2, Los Angeles, CA, July 16-21, 1978.
- [12] J. Endrényi, "Reliability Modeling in Electric Power Systems", John Wiley & Sons, 1978.
- [13] K. Loparo and Blankenship, "A Probabilistic Mechanism for Dynamic Instabilities in Electric Power Systems", IEEE PES Winter Meeting, No. A79053-0, 1979.
- [14] R. Billinton, P.R.S. Kuruganty, "A Probabilistic Index for Transient Stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 1, pp. 195-206, January/February, 1980.
- [15] M. Brucoli, F. Torelli and M. Trovato, "Probabilistic Approach for Power System Dynamic Stability Studies", IEE Proceedings - Generation Transmission Distribution, Vol. 128, Pt. C, No. 5, pp. 295-301, September, 1981.
- [16] K.J. Timko, A. Bose, P.M. Anderson, "Monte Carlo Simulation of Power System Stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 10, pp. 3453-3459, October, 1983.
- [17] 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, August, 1983.
- [18] F.F. Wu, Y. Tsai, "Probabilistic Dynamic Security Assessment of Power Systems: Part I – Basic Model", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-30, No. 3, pp. 148-159, March, 1983.

- [19] Subgrupo de Confiabilidade (SGC), II Seminário de Confiabilidade - II SECON - Base de Dados para Estudos de Confiabilidade em Planejamento e Operação, LIGHT, Rio de Janeiro, 25-26, Abril, 1984.
- [20] Subgrupo de Confiabilidade (SGC), M.Th. Schilling (Editor), "Confiabilidade de Sistemas Elétricos: Índices e Critérios", Eletrobrás, Rio de Janeiro, Dezembro, 1983.
- [21] M.Th. Schilling, (Editor) et alii, "Confiabilidade de Sistemas Eletroenergéticos: Bibliografia Disponível no Brasil (1969-1985)", Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Eng. Elétrica, Vol.2, No. 2, pp. 23-52, Dezembro, 1985.
- [22] G.T. Heydt, "Computer Analysis Methods for Power Systems", Mcmillan Publishing Company, New York, 1986.
- [23] H. Mori, S. Tuzuki, "New Advances of Power System Probabilistic Dynamic Stability Using The Bilinear Transform of the System Matrix", IEEE Montech, October 1-3, 1986.
- [24] S.M. Shahidehpour and J. Qiu, "Effect of Random Perturbations on the Dynamic Behavior of Power Systems", Electric Power Systems Research, pp. 117-127, November, 1986
- [25] 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, February, 1988.
- [26] F.F.A. Malek, K.A. Loparo, "A Probabilistic Approach to Dynamic Power System Security", 2o. PMAPS – Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Oackland, USA, September, 1988.
- [27] G.E. Klir, T.A. Folger, "Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.

- [28] J. Qiu, S.M. Shahidehpour, Z. Schuss, "Effect of Small Random Perturbations on Power Systems Dynamics and its Reliability Evaluation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 1, February, 1989.
- [29] E.V. Larsen, D.H. Baker, "Experience with Small Signal Analysis of Power Systems", in "Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance", IEEE Tutorial, 90TH0292-3-PWR, pp. 67-76, July, 1989.
- [30] 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 PWRS, Vol. PWRS-5, n.1, pp. 1-11, February, 1990.
- [31] A.C.G.Melo, "Avaliação de Índices de Frequência e Duração no Cálculo de Confiabilidade Composta de Sistemas de Geração e Transmissão de Grande Porte", Tese D.Sc., PUC/RJ, Rio de Janeiro, 1990.
- [32] G.J. Anders, "Probability Concepts in Electric Power Systems", John Wiley & Sons, 1990.
- [33] C.O. Nwankpa and S.M. Shahidehpour, "A Stochastic Model for Small Disturbance Stability Analysis of Electric Power Systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, pp. 139-147, June, 1991.
- [34] C.O. Nwankpa, S.M. Shahidehpour, Z. Schuss, "A Stochastic Approach to Small Disturbance Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 1519-1528, November, 1992.
- [35] The Mathworks Inc., MATLAB®: User's Guide, Prentice-Hall, 1995.
- [36] Y. Cao, S. Cheng, D. Chen, H. Hu, "A Probabilistic Criterion for Power System Dynamic Stability", International Power Engineering Conference, Singapore, pp. 290-296, March 18-19, 1993.
- [37] R. Billinton and R.N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", 2nd edition, Plenum Press, London, 1994.

- [38] G. Rogers & J.H. Chow, "Hands-on Teaching of Power System Dynamics", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 8, No. 1, pp. 12-16, January, 1995.
- [39] M.Th. Schilling, J.C.O. Mello, P. Gomes, "Introdução da Confiabilidade Composta no Planejamento da Operação Elétrica", Controle & Automação, SBA, Vol.6, No. 1, pp.38-47, Janeiro/Fevereiro, 1995.
- [40] G. Angelidis, A. Semlyen, "Efficient Calculation of Critical Eigenvalue Clusters in the Small Signal Stability Analysis of Large Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No.1, pp. 427-432, February, 1995.
- [41] 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 and Energy Systems, Vol. 17, No. 6, pp. 381-390, 1995.
- [42] M.Th. Schilling, P. Gomes, "An Approach to Bulk Power System Performance Assessment", Electric Power Systems Research, Vol. 32, No. 2, pp. 145-151, 1995.
- [43] C. Kai-Yuan, "Introduction to Fuzzy Reliability", Kluwer Academic Pub, Boston, 1996.
- [44] N. Martins, "The Dominant Pole Spectrum Eigensolver", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February, 1997.
- [45] 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, pp. 1210-1218, August, 1997.
- [46] 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.

- [47] CIGRÉ TF 38.03.12 (R.J. Marceau and J. Endrenyi, Chairmen), “Power System Security Assessment: A Position Paper”, *ELECTRA*, No. 175, pp. 48-78, December, 1997.
- [48] C.L.T. Borges, “Avaliação da Confiabilidade Composta de Sistemas de Potência em Ambientes Computacionais Paralelos e Distribuídos”, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Dezembro, 1998.
- [49] W. Mielczarski (Ed.), “Fuzzy Logic Techniques in Power Systems”, Physica-Verlag Heilderberg, 1998.
- [50] M.E. El-Hawary (Ed.), “Electric Power Applications of Fuzzy Systems”, IEEE Press, Piscataway, 1998
- [51] M.Th. Schilling, A.M. Rei, J.C.O. Mello, “Projeto SEGPROB - Segurança Probabilística”, Termo de Referência, ELETROBRÁS/CEPEL, Rio de Janeiro, 1998.
- [52] K.W. Wang, C.T. Tse, K.M. Tsang, “Algorithm For Power System Dynamic Stability Studies Taking Account of the Variation of Load Power”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 46, pp. 221-227, 1998.
- [53] A.A. Barbosa, “Utilização de Ferramentas Lineares na Análise e Controle do Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Grande Porte”, Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Março, 1999
- [54] J.D. McCalley, V. Vittal, N. Abi-Samra, “An Overview of Risk Based Security Assessment”, in *Proceedings IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 1, Edmonton, Alberta, Canada, 18-22 July, 1999.
- [55] J.D. McCalley, V. Vittal, H. Wan, Y. Dai, N. Abi-Samra, “Voltage Risk Assessment”, in *Proceedings IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 1, Edmonton, Alberta, Canada, 18-22 July, 1999.
- [56] H. Wan, J.D. McCalley, V. Vittal, “Increasing Thermal Rating by Risk Analysis”, *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.14, No. 3, pp. 815-828, August, 1999.

- [57] K.W. Wang, C.Y. Chung, C.T. Tse, K.M. Tsang, "Improved Probabilistic Method for Power System Dynamic Stability Studies", IEE Proceedings - Generation Transmission Distribution, Vol. 147, No. 1, pp. 37-43, January, 2000.
- [58] R. Allan, R. Billinton, "Probabilistic Assessment of Power Systems", Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 2, pp. 140-162, February, 2000.
- [59] A. L. B. Bomfim, "Ajuste Coordenado de Estabilizadores de Sistema de Potência Usando Algoritmos Genéticos", Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Março, 2000.
- [60] C.T. Tse; K.W. Wang, C.Y. Chung; K.M. Tsang, "Parameter Optimization of Robust Power System Stabilizers by Probabilistic Approach", IEE Proceedings - Generation Transmission Distribution, Vol. 147, No. 2, pp. 69-75, March, 2000.
- [61] K. Uhlen, O.B. GjØæter, N. Martins, P.E.M. Quintão, "Application of Small Signal Stability Analysis to the Nordel Power System", VII SEPOPE, Curitiba, Maio, 2000.
- [62] J.W.M. Cheng, D.T. McGillis, F.D. Galiana, "Power System Reliability in a Deregulated Environment", in Proceedings IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 2, Halifax, Nova Scotia, 7-10 May, 2000.
- [63] J.M.F. Ferreira, "Avaliação da Confiabilidade Composta Considerando Aspectos Dinâmicos", Tese M.Sc., UFSC, Florianópolis, Maio 2000.
- [64] E. De Tuglie, M. Dicorato, M. La Scala, P. Scarpellini, "A Probabilistic Approach for Dynamic Available Transfer Capability Evaluation", in Proceedings CIGRÉ, Paris, 27 August-2 September, 2000.
- [65] K. Uhlen, G.H. Kjolle, G.G. LoVas, O. Breidablik, "A Probabilistic Security Criterion for Determination of Power Transfer Limits in a Deregulated Environment", in Proceedings CIGRÉ, Paris, 27 August – 2 September, 2000.

- [66] ONS, “Desempenho Probabilístico de Linhas de Transmissão no Brasil”, ONS/DAT/GAT, Rio de Janeiro, Outubro,2000.
- [67] G. Rogers, “Power System Oscillations”, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, 2000.
- [68] I.A. Hiskens M.A. Pai, T.B. Nguyen, “Bounding Uncertainty in Power System Dynamic Simulations”, IEEE PES Winter, Singapore, 2000.
- [69] C.T. Tse, K.W. Wang, C.Y. Chung and K.M. Tsang, “Robust PSS Design by Probabilistic Eigenvalue Sensitivity Analysis”, pp. 47-54, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 59, August, 2001.
- [70] W. Fu, J.D. McCalley, “Risk Based Optimal Power Flow”, in Proceedings IEEE Porto Power Tech Proceedings, Vol. 3, Porto, Portugal, 10-13 September, 2001
- [71] K.W. Wang, C.Y. Chung, C.T. Tse, K.M. Tsang, "Probabilistic Eigenvalue Sensitivity Indices for Robust PSS Site Selection", IEE Proceedings - Generation Transmission Distribution, Vol. 148, No. 6, pp. 603-609, November, 2001.
- [72] J. Endrényi, W.H. Wellssow, “Power System Reliability in Terms of the System’s Operating States”, IEEE Porto Power Technology Conference 10th - 13th September, Porto, Portugal, 2001.
- [73] J.M.F. Ferreira, “Avaliação da Confiabilidade Composta Considerando a Análise da Estabilidade Transitória”, Proposta D.Sc., UFSC, Abril, 2002.
- [74] V.A. Maslennikov, S.M. Ustinov; J.V. Milanovic, "Method for Considering Uncertainties for Robust Tuning of PSS and Evaluation of Stability Limits", IEE Proceedings - Generation Transmission Distribution, Vol. 149, No. 3, pp. 295-299, May, 2002.
- [75] C.Y. Chung, K.W. Wang, C.T. Tse, R. Niu, “Power-System Stabilizer (PSS) Design by Probabilistic Sensitivity Indexes (PSIs)”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 688-693, August, 2002.

- [76] M. Ni, J.D. McCalley, V. Vittal, T. Tayyib, "Online Risk-Based Security Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 258-265, February, 2003.
- [77] A. Berizzi, C. Bovo, E. Fumagalli, E.A. Grimaldi, "Security Assessment in Operation: a Comparative Study of Probabilistic Approaches", IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna Italy, June 23th-26th, 2003.
- [78] C.Y. Chung, K.W. Wang, C.T. Tse, X.Y. Bian, A.K. David, "Probabilistic Eigenvalue Sensitivity Analysis and PSS Design in Multimachine Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 4, pp. 1439-1444, November, 2003.
- [79] J. McCalley, S. Asgarpour, L. Bertling, R. Billinton, H. Chao, J. Chen, J. Endrenyi, R. Fletcher, A. Ford, C. Grigg, G. Hamoud, D. Logan, A.P. Meliopoulos, M. Ni, N. Rau, L. Salvaderi, M. Schilling, Y. Schlumberger, A. Schneider, C. Singh, "Probabilistic Security Assessment for Power System Operations", Prepared by the Task Force on Probabilistic Aspects of Reliability Criteria of the IEEE PES Reliability, Risk, and Probability Applications Subcommittee, PESGM 2004-000 862, Denver, USA, June 06-10, 2004.
- [80] J.K. Hockenberry, B.C. Lesieutre, "Evaluation of Uncertainty in Dynamic Simulations of Power System Models: The Probabilistic Collocation Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 1483-1491, August, 2004.
- [81] 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, August, 2004.
- [82] A.Y. Takahata, G.A. Medeiros, L.P. Calôba, G.N. Taranto, M.Th. Schilling, "Avaliação Prática de Estabilidade Transitória no Sistema Brasileiro Utilizando Redes Neurais", CBA 2004, Gramado, Rio Grande do Sul, Setembro, 2004.

- [83] S. Henry, J. Pompée, M. Bulot, K. Bell, “Applications of Statistical Assessment of Power System Security Under Uncertainty”, 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa September 12-16, 2004.
- [84] K. Morison, L. Wang and P. Kundur, “Power System Security Assessment”, IEEE Power & Energy Magazine, pp. 30-39, September/October, 2004.
- [85] Z.Y. Dong, C.K. Pang and P. Zhang, “Power System Sensitivity Analysis For Probabilistic Small Signal Stability Assessment in a Deregulated Environment”, Int. Journal of Control, Automation and Systems, accepted December 2004.
- [86] S. Henry, J. Pompee, L. Devatine, M. Bulot, “New Trends for the Assessment of Power System Security under Uncertainty”, CIGRE, 2004.
- [87] J. Zhang, I. Dobson, F.L. Alvarado, “Quantifying Transmission Reliability Margin”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 26, No. 9, pp. 697-702, 2004.
- [88] M.A. Pai, D.P. Sengupta, K.R. Padiyar, “Small Signal Analysis of Power Systems”, Alpha Science Int Ltd., Harrow, UK, 2004.
- [89] Z. Xu, Z.Y. Dong, P. Zhang, “Probabilistic Small Signal Analysis Using Monte Carlo Simulation”, IEEE PES General Meeting, San Francisco, June, 2005.
- [90] C.K. Pang, Z.Y. Dong, P. Zhang and X. Yin, “Probabilistic Analysis of Power System Small Signal Stability Region”, in Proc. 5 th. IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA 2005), pp. 503-509, Budapest, June 27-29, 2005.
- [91] F. Milano, “Power System Analysis Toolbox – Documentation for PSAT Versions 1.3.4 e 2”, July 14, 2005, <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~fmilano>.
- [92] F. Milano, An Open Source Power System Analysis Toolbox, IEEE Trans. On PWRs, Vol. 20, No. 3, pp. 1199-1206, August 2005.

- [93] J.L.A. Jardim, A.Y. Takahata, G.N. Taranto, M.Th. Schilling, “Fluxo de Potência Robusto: Formulação Dinâmica Sintética”, XVIII SNPTEE, Grupo IV, Paraná, Curitiba, Outubro, 2005.
- [94] W. Li, “Risk Assessment of Power Systems, Models, Methods, and Applications”, John Wiley & Sons, IEEE Press, 2005.
- [95] H. Kim, C. Singh, “Power System Probabilistic Security Assessment using Bayes Classifier”, Electric Power Systems Research, pp. 157-165, 2005.
- [96] A.Y.Takahata, G.N.Taranto, M.Th. Schilling, “Análise Dinâmica de Sistemas de Potência a Pequenas Perturbações Considerando Incertezas”, X SEPOPE, Florianópolis, 21-25, Maio, 2006.
- [97] M.Th. Schilling, J.C. Stacchini de Souza, M.B. Do Couto Filho, A.Y. Takahata, M. Groetaers dos Santos, G.N. Taranto, “Confiabilidade Estendida de Sistemas de Potência: Segurança Probabilística”, X SEPOPE, Florianópolis, Maio, 2006.
- [98] A.M. Rei, M.Th. Schilling, A.C.G. Melo, "Monte Carlo Simulation and Contingency Enumeration in Bulk Power Systems Reliability Assessment", IX PMAPS, Stockholm, 11-15, June, 2006.
- [99] Z. Xu, M. Ali, Z.Y. Dong, X. Li, “A Novel Grid Computing Approach For Probabilistic Small Signal Analysis”, IEEE PES General Meeting, Montreal, June, 2006.
- [100] T.M. Lessa de Assis, “Cálculo da Capacidade de Transmissão em Sistemas de Potência Através de Ferramentas Integradas de Análise”, Tese D.SC., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Janeiro, 2007.
- [101] M.Th. Schilling, M.B. Do Couto Filho, J.C. Stacchini de 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 Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE, Foz do Iguaçu, Maio, 2007.
- [102] J.L.A. Jardim, Comunicação Pessoal 2007

- [103]R.B. Castellanos, A.R. Messina, H.U. Sarmiento, “A μ -analysis Approach to Power System Stability Robustness Evaluation”, Electric Power System Research, vol. 78, No. 2, pp.192-201, 2008.
- [104]M.A. Pai, “Energy Function Analysis for Power System Stability”, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1989, Appendix A, pp. 223-227.
- [105]T. Athay, R. Podmore, R. Virmani, “A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability”, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-98, No. 2, pp. 573-584, March/April 1979.
- [106]F.C. Schweppe, “Uncertain Dynamic Systems”, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1973, p. 520.

* * *

Anexo A

Dados Elétricos dos Sistemas de Potência

Analisados

A.1 Sistema-Teste 5 Barras [53]

O sistema exemplo de 5 barras retirado de Barbosa, [53], foi criado para apresentar oscilação eletromecânica de 0,17 Hz, frequência aproximadamente igual àquela do modo de oscilação associado à Interligação Norte-Sul.

Este sistema de potência tem dois geradores síncronos de pólos salientes e existem cinco barras (duas delas de geração), como mostrado na **Figura A-1**. A frequência do sistema é de 60Hz.

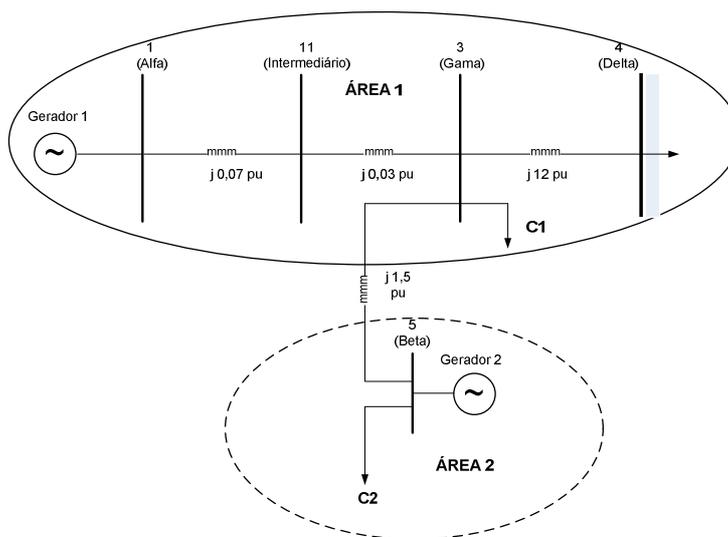


Figura A-1 – Sistema Teste 5 Barras

Existem cargas nas barras 3 e 5 desse sistema. Na condição de carga pesada os valores são de 1900 MW e 750 MW, respectivamente nas barras 3 e 5. A partir desse ponto de operação foram determinados os patamares de carga média, cujos valores de carga equivalem a 60% da carga pesada (1140 MW e 450 MW) e leve que correspondem a 30% de carga pesada (570 MW e 225 MW).

Esse cenário foi chamado de *área 1 exportadora*, onde o *gerador #1* gera o máximo e o *gerador #2* gera o mínimo. Com base neste cenário gerou-se o segundo cenário chamado de *área 2 exportadora*. Neste cenário, o *gerador #1* gera mínimo e o *gerador #2* máximo.

As duas máquinas (geradores 1 e 2) alimentam essas duas cargas e o gerador 1 controla a tensão da barra 11.

A **Tabela A-1** apresenta os dois cenários de intercâmbios, os despachos de geração e os montantes de carga previstos em cada patamar de carga.

Tabela A-1 – Dados do Sistema Teste 5 Barras

Cenário de Intercâmbio	Área 1 Exportadora		
Patamar de Carga	Pesada	Média	Leve
Barra 4	250 MW – j 168 MVar	150 MW – j 36 MVar	259 MW – j 182 MVar
Gerador 1	2650 MW	1590 MW	800 MW
Gerador 2	250 MW	150 MW	254 MW
Cenário de Intercâmbio	Área 2 Exportadora		
Patamar de Carga	Pesada	Média	Leve
Barra 4	250 MW – j 193 MVar	150 MW – j 38 MVar	266 MW – j 216 MVar
Gerador 1	250 MW	150 MW	260 MW
Gerador 2	2650 MW	1590 MW	800 MW

Nenhum dos geradores tem regulador de velocidade, mas cada um deles possui um regulador de tensão cujas características dinâmicas são mostradas através do diagrama de blocos mostrado na **Figura A-2**. Esse modelo corresponde ao modelo tipo II definido no programa *PSAT*.

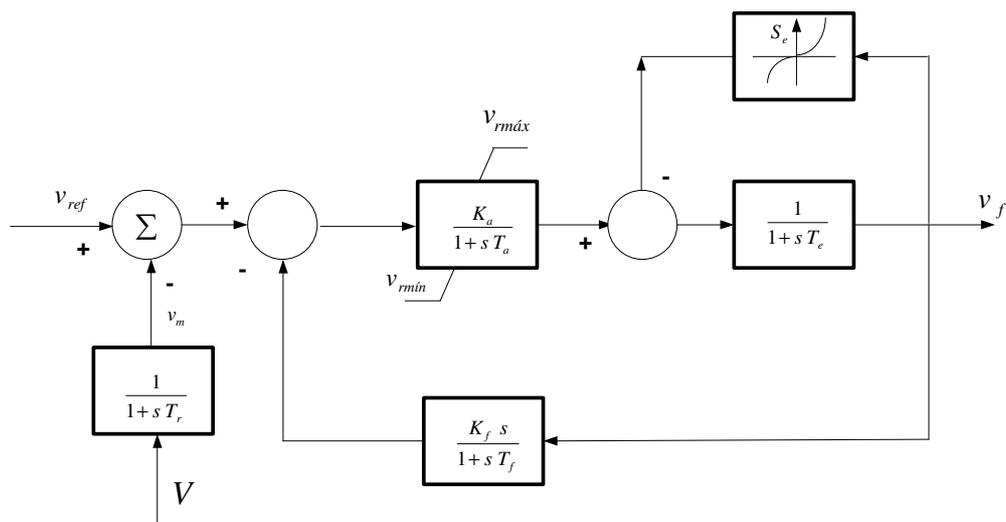


Figura A-2 – Modelo do Regulador de Tensão

Como pode ser visto na **Figura A-2**, o regulador de tensão é um controlador de segunda ordem. A seguir, são mostrados os parâmetros dinâmicos de cada gerador do sistema na **Tabela A-2** e os parâmetros do regulador de tensão na **Tabela A-3**.

Tabela A-2 – Parâmetros Dinâmicos dos Geradores Síncronos do Sistema

Gerador	Barra	X_1 [%]	X_d [%]	X_d' [%]	X_d'' [%]	X_q [%]	X_q' [%]	X_q'' [%]	T_{do}' [s]	T_{do}'' [s]	T'_{qo} [s]	T''_{qo} [s]	H [kWs/KVA]	S [MVA]
G1	1	0.00	23.750	9.5000	7.00	17.750	0.00	0.00	4.700	0.06	0.00	0.11	54	3120
G2	5	0.00	95.0	38.00	0.00	71.00	0.00	0.00	4.700	0.00	0.00	0.11	9.00	300

Onde:

G₁ refere-se ao gerador síncrono 1;

G₂ refere-se ao gerador síncrono 2;

Barra é o número da barra à qual está associada a máquina correspondente;

X₁% é a reatância de dispersão, fornecido em percentagem;

X_d% é a reatância no eixo direto, fornecido em percentagem;

X'_d% é a reatância transitória no eixo direto, fornecido em percentagem;

$X''_d\%$ é a reatância sub-transitória no eixo direto, fornecido em percentagem;

$X_q\%$ é a reatância no eixo em quadratura, fornecido em percentagem;

$X'_q\%$ é a reatância transitória no eixo em quadratura, fornecido em percentagem;

$X''_q\%$ é a reatância sub-transitória no eixo em quadratura, fornecido em percentagem;

T'_{do} é a constante de tempo transitório de eixo direto, em segundos;

T''_{do} é a constante de tempo sub-transitório de eixo direto, em segundos;

T'_{qo} é a constante de tempo transitório de eixo em quadratura, em segundos;

T''_{qo} é a constante de tempo sub-transitório de eixo em quadratura, em segundos;

H é a constante de inércia da máquina, em kWs/kVA, cujo valor deve ser o dobro do valor apresentado no programa Pacdyn;

MVA é a potência aparente nominal da máquina, em MVA, usada como base.

Tabela A-3 – Parâmetros do Regulador de Tensão

Gerador	Barra	$V_{r\min}$	$V_{r\max}$	K_a	T_a	K_f	T_f	T_e	T_r	A_e	B_e
G1	1	-10.9	10.30	40.0	0.050	0.06	0.5000	0.410	0.001	0.0000	0.000
G2	2	-10.9	10.30	6.20	0.050	0.06	0.5000	0.410	0.001	0.0000	0.000

Na **Figura A-3** pode ser visto o diagrama de blocos referentes ao estabilizador utilizado no sistema teste 5 barras, correspondente ao modelo tipo III existente no programa PSAT. Na **Tabela A-4** são apresentados os parâmetros desse estabilizador.

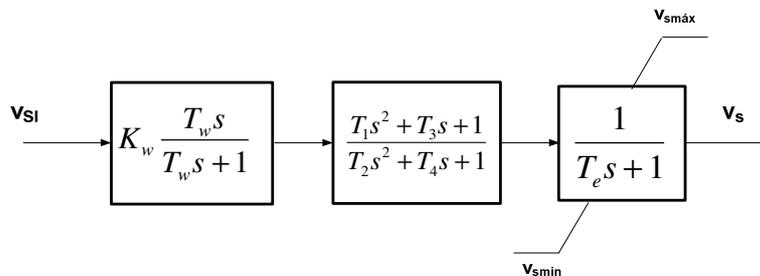


Figura A-3 – Modelo do Estabilizador de Sistema de Potência

Tabela A-4 – Parâmetros do Estabilizador de Sistema de Potência

Gerador	Barra	$v_{sm\acute{a}x}$	$v_{sm\acute{m}n}$	K_w	T_w	T_1	T_2	K_f	T_3
G1	1	10.3	-10.9	50.0	3.0000	0.76	0.94	1.74	1.94
G2	2	10.3	-10.9	0.1	3.0000	0.76	0.94	1.74	1.94

A.2 Sistema New England de 39 barras [104],[105]

A condição de carga média para o sistema New England refere-se ao caso base considerado em Bomfim [59], onde a carga total é igual a $6450 + j 1409$ [MVA]. Partindo-se desse caso de carga média determinaram-se mais dois patamares de carga denominada de pesada e leve. No caso de carga pesada procedeu-se um aumento de carga de 20% em todas as barras de carga, mantendo-se o mesmo fator de potência original, enquanto que no caso de carga leve reduziu-se a carga em 30%.

Na **Tabela A-5** apresenta-se os montantes de carga total nos três patamares de carga.

Tabela A-5 – Patamares de Carga – Sistema New England

Patamares de Carga	Carga Total (MW + j MVar)
Pesada	7380.12 + j 1690.68
Média	6150.1+j1408.9
Leve	5305.07 + j 986.33

A **Tabela A-6** apresenta a distribuição da carga média entre as diversas barras desse sistema, bem como as tensões e os despachos de geração.

Tabela A-6 – Distribuição de Carga e Geração por Barras – Sistema New England

Número da Barra	Nome da Barra	Tensão (pu)	Geração (MW)	Geração Reativa (MVar)		Carga	
				Mínimo	Máximo	Ativa (MW)	Reativa (MVar)
1	BUS-1	1.048	0	0	0	0	0
2	BUS-2	1.051	0	0	0	0	0
3	BUS-3	1.034	0	0	0	322	2.4
4	BUS-4	1.012	0	0	0	500	184
5	BUS-5	1.017	0	0	0	0	0
6	BUS-6	1.017	0	0	0	0	0
7	BUS-7	1.007	0	0	0	233.8	84
8	BUS-8	1.006	0	0	0	522	176
9	BUS-9	1.032	0	0	0	0	0
10	BUS-10	1.024	0	0	0	0	0
11	BUS-11	1.020	0	0	0	0	0
12	BUS-12	1.007	0	0	0	8.5	88
13	BUS-13	1.021	0	0	0	0	0
14	BUS-14	1.018	0	0	0	0	0
15	BUS-15	1.019	0	0	0	320	153
16	BUS-16	1.035	0	0	0	329	32.3
17	BUS-17	1.037	0	0	0	0	0
18	BUS-18	1.034	0	0	0	158	30
19	BUS-19	1.051	0	0	0	0	0
20	BUS-20	0.991	0	0	0	680	103
21	BUS-21	1.034	0	0	0	274	115
22	BUS-22	1.051	0	0	0	0	0
23	BUS-23	1.046	0	0	0	247.5	84.6
24	BUS-24	1.040	0	0	0	308.6	-92.2
25	BUS-25	1.059	0	0	0	224	47.2
26	BUS-26	1.054	0	0	0	139	17
27	BUS-27	1.040	0	0	0	281	75.5
28	BUS-28	1.051	0	0	0	206	27.6
29	BUS-29	1.051	0	0	0	283.5	26.9
30	BUS-30	1.048	250	-154.936	154.936	0	0
31	BUS-31	0.982	573.2	-355.238	355.238	9.2	4.6
32	BUS-32	0.983	650	-402.834	402.834	0	0
33	BUS-33	0.997	632	-391.678	391.678	0	0
34	BUS-34	1.012	508	-314.83	314.83	0	0
35	BUS-35	1.049	650	-402.834	402.834	0	0
36	BUS-36	1.05	560	-347.057	347.057	0	0
37	BUS-37	1.000	540	-334.662	334.662	0	0
38	BUS-38	1.027	830	-514.388	514.388	0	0
39	BUS-39	1.030		-681.719	681.719	1104	250

A **Figura A-4**, a seguir, apresenta o diagrama unifilar correspondente ao sistema New England de 39 barras. Este sistema possui 9 geradores, que estão ligados às barras com numeração de 1 a 9, respectivamente; 18 barramentos de carga, correspondentes às barras 10, 13, 14, 17, 18, 22, 25, 26, 28, 30, 31 e 33 a 39, respectivamente; 34 linhas de transmissão; e 12 transformadores.

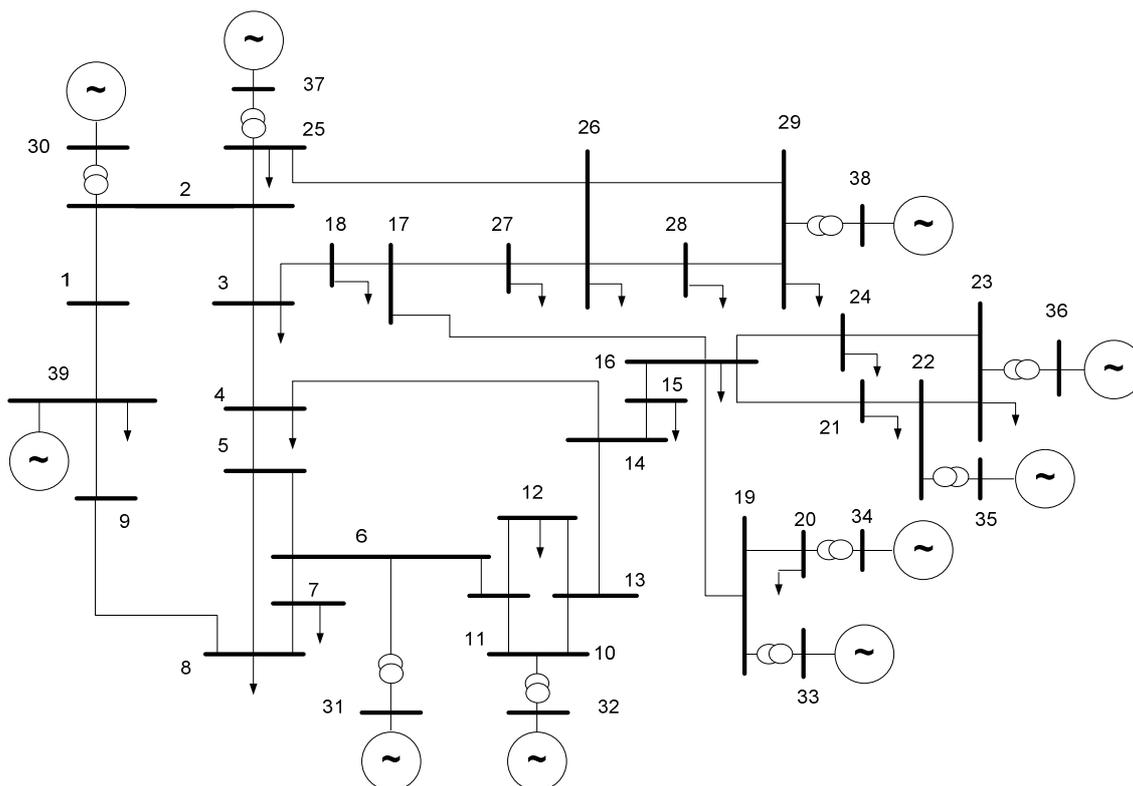


Figura A-4 – Sistema New England de 39 Barras [104],[105]

Os dados referentes aos parâmetros dos transformadores (TRF) e das 34 linhas de transmissão (LT) são apresentados na **Tabela A-7**, a seguir. Nela, as resistências e reatâncias são informadas em p.u, sendo considerada uma potência base de 100 MVA. A susceptância em MVar corresponde ao valor total da susceptância shunt da respectiva linha de transmissão. As barras de geração são denominadas “GER-XX”, onde “XX” corresponde ao número da barra. Já as barras de carga e as barras intermediárias são denominadas “CAR-XX”. Os modelos das linhas e dos transformadores são apresentados no manual do programa *PSAT* [91],[92].

Tabela A-7 – Dados dos Ramos do Sistema New England

BARRA DE	BARRA PARA	TIPO	R [pu]	X [pu]	B [MVar]
CAR-11	CAR-12	LT	0,3500	4,1100	69,870
CAR-11	CAR-10	LT	0,1000	2,5000	75,000
CAR-12	CAR-13	LT	0,1300	1,5100	25,720
CAR-12	CAR-35	LT	0,7000	0,8600	14,600

BARRA DE	BARRA PARA	TIPO	R [pu]	X [pu]	B [MVar]
CAR-12	GER-02	TRF	0,0000	1,8100	
CAR-13	CAR-14	LT	0,1300	2,1300	22,140
CAR-13	CAR-28	LT	0,1100	1,3300	21,380
CAR-14	CAR-15	LT	0,0800	1,2800	13,420
CAR-14	CAR-24	LT	0,0800	1,2900	13,820
CAR-15	CAR-16	LT	0,0200	0,2600	4,340
CAR-15	CAR-18	LT	0,0800	1,1200	14,760
CAR-16	CAR-17	LT	0,0600	0,9200	11,300
CAR-16	CAR-21	LT	0,0700	0,8200	13,890
CAR-16	GER-01	TRF	0,0000	2,5000	
CAR-17	CAR-18	LT	0,0400	0,4600	7,800
CAR-18	CAR-19	LT	0,2300	3,6300	38,040
CAR-19	CAR-10	LT	0,1000	2,5000	120,000
CAR-20	CAR-21	LT	0,0400	0,4300	7,290
CAR-20	CAR-23	LT	0,0400	0,4300	7,290
CAR-20	GER-03	TRF	0,0000	2,0000	
CAR-22	CAR-21	TRF	0,1600	4,3500	
CAR-22	CAR-23	TRF	0,1600	4,3500	
CAR-23	CAR-24	LT	0,0900	1,0100	17,230
CAR-24	CAR-25	LT	0,1800	2,1700	36,600
CAR-25	CAR-26	LT	0,0900	0,9400	17,100
CAR-26	CAR-27	LT	0,0700	0,8900	13,420
CAR-26	CAR-29	LT	0,1600	1,9500	30,400
CAR-26	CAR-31	LT	0,0800	1,3500	25,480
CAR-26	CAR-34	LT	0,0300	0,5900	6,800
CAR-27	CAR-28	LT	0,0700	0,8200	13,190
CAR-27	CAR-37	LT	0,1300	1,7300	32,160
CAR-29	GER-04	TRF	0,0700	1,4200	
CAR-29	CAR-30	TRF	0,0700	1,3800	
CAR-30	GER-05	TRF	0,0900	1,8000	
CAR-31	CAR-32	LT	0,0800	1,4000	25,650
CAR-32	CAR-33	LT	0,0600	0,9600	18,460
CAR-32	GER-07	TRF	0,0000	1,4300	
CAR-33	CAR-34	LT	0,2200	3,5000	36,100
CAR-33	GER-06	TRF	0,0500	2,7200	
CAR-35	CAR-36	LT	0,3200	3,2300	51,300
CAR-35	GER-08	TRF	0,0600	2,3200	

BARRA DE	BARRA PARA	TIPO	R [pu]	X [pu]	B [MVar]
CAR-36	CAR-37	LT	0,1400	1,4700	23,960
CAR-36	CAR-38	LT	0,4300	4,7400	78,020
CAR-36	CAR-39	LT	0,5700	6,2500	102,900
CAR-38	CAR-39	LT	0,1400	1,5100	24,900
CAR-39	GER-09	TRF	0,0800	1,5600	

Os dados referentes aos parâmetros das máquinas síncronas são apresentados na **Tabela A-8**, a seguir. As máquinas 1 e 3 a 9 são representadas pelo modelo 3 que representa os efeitos transitórios de enrolamentos do campo. A máquina 2 é representada pelo modelo 2, que corresponde ao modelo que representa apenas a reatância transitória direta no eixo, X'_d . Na definição dos dados das máquinas síncronas foi adotada uma potência base de 100 MVA.

Tabela A-8 – Dados das Máquinas Síncronas

BARRA	X_d [pu]	X_q [pu]	X'_d [pu]	X'_q [pu]	H [s]	T'_d [s]	T'_q [s]	D [pu]
1	0,2950	0,2820	0,0697	0,1700	30,3	6,56	1,50	97,5
2	0,1000	0,0690	0,0310	0,0000	42,0	10,20	0,00	40,0
3	0,2495	0,2370	0,0531	0,0876	35,8	5,70	1,50	100,0
4	0,2620	0,2580	0,0436	0,1660	28,6	5,69	1,50	100,0
5	0,6700	0,6200	0,1320	0,1660	26,0	5,40	0,44	30,0
6	0,2950	0,2920	0,0490	0,1860	26,4	5,66	1,50	80,0
7	0,2540	0,2410	0,0500	0,0814	34,8	7,30	0,40	100,0
8	0,2900	0,2800	0,0570	0,0911	24,3	6,70	0,41	90,0
9	0,2106	0,2050	0,0570	0,0587	34,5	4,79	1,96	140,0

Onde:

X_d é a reatância síncrona de eixo direto.

X_q é a reatância síncrona de eixo em quadratura.

X'_d é a reatância transitória de eixo direto.

X'_q é a reatância transitória de eixo em quadratura.

H é a constante de tempo de inércia do grupo gerador.

T'_d é a constante de tempo transitória de eixo direto.

T'_q é a constante de tempo transitória de eixo em quadratura.

D é a coeficiente de amortecimento.

A **Tabela A-9**, a seguir, apresenta os dados correspondentes aos sistemas de excitação das 9 unidades geradoras desse sistema. Estes dados permitem representar cada um dos sistemas de excitação através do modelo tipo II do programa PSAT, conforme pode ser observada na **Figura A-2**.

Tabela A-9 – Dados dos Sistemas de Excitação

BARRA	K_a	T_a [s]	K_e	T_e [s]	K_f	T_f [s]
1	6,20	0,05	1,00	0,410	0,057	0,50
2	5,00	0,06	1,00	0,250	0,040	1,00
3	5,00	0,06	1,00	0,500	0,080	1,00
4	5,00	0,06	1,00	0,500	0,080	1,00
5	40,00	0,02	1,00	0,785	0,030	1,00
6	40,00	0,02	1,00	0,730	0,030	1,00
7	5,00	0,02	1,00	0,471	0,075	1,24
8	5,00	0,02	1,00	0,528	0,085	1,26
9	40,00	0,02	1,00	1,400	0,030	1,00

Onde:

K_a é o ganho do regulador de tensão.

T_a é a constante de tempo do regulador de tensão.

K_e é o parâmetro da excitatriz.

T_e é a constante de tempo da excitatriz.

K_f é o ganho da malha de estabilização do regulador de tensão.

T_f é a constante de tempo da malha de estabilização do regulador de tensão.

A.3 Sistema Equivalentado Sul/Sudeste de 1762 Barras [59]

Este sistema, definido na referência [59], é um equivalente do sistema de potência sul/sudeste brasileiro. Este equivalente compreende 1762 barras, 2515 linhas e transformadores e 57 máquinas síncronas. Todas as máquinas são representadas por modelos que consideram os efeitos subtransitórios e todos os reguladores automáticos de tensão (RAT's) das máquinas que têm estabilizadores foram modelados com estruturas semelhantes, consistindo de um ganho elevado e uma pequena constante de tempo. Os reguladores de velocidade não foram representados nas simulações frente a pequenas perturbações. O sistema contém um elo de corrente contínua que não foi

dinamicamente representado. As cargas ativas reativas foram modeladas com 100% de potência constante. A **Figura A-5** descreve de maneira geral o sistema, explicitando o complexo de geração de Itaipu e a **Figura A-6** mostra o detalhamento das linhas de 500 kV que atendem a área Rio de Janeiro/Espírito Santo, onde as incertezas foram consideradas nos experimentos realizados.

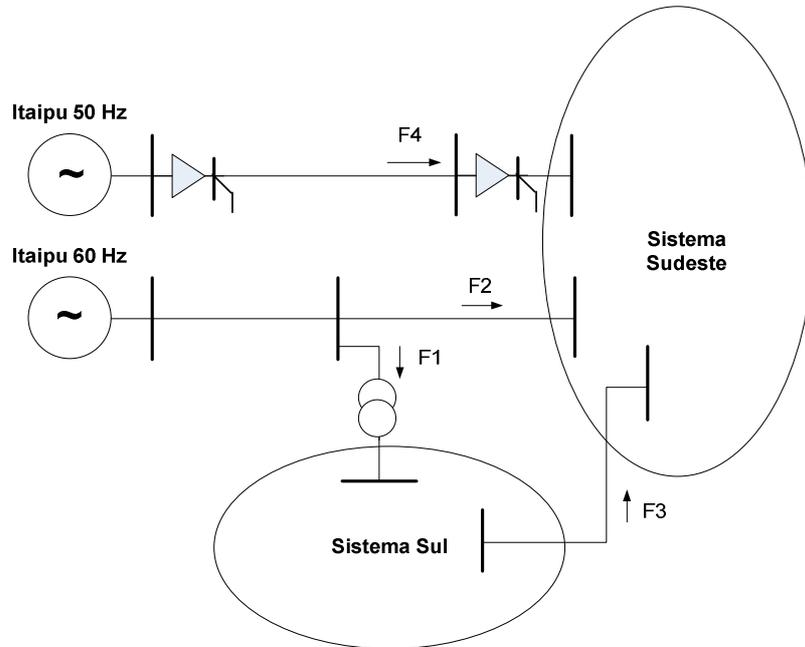


Figura A-5 – Sistema Equivalentado Sul/Sudeste de 1762 Barras [59]

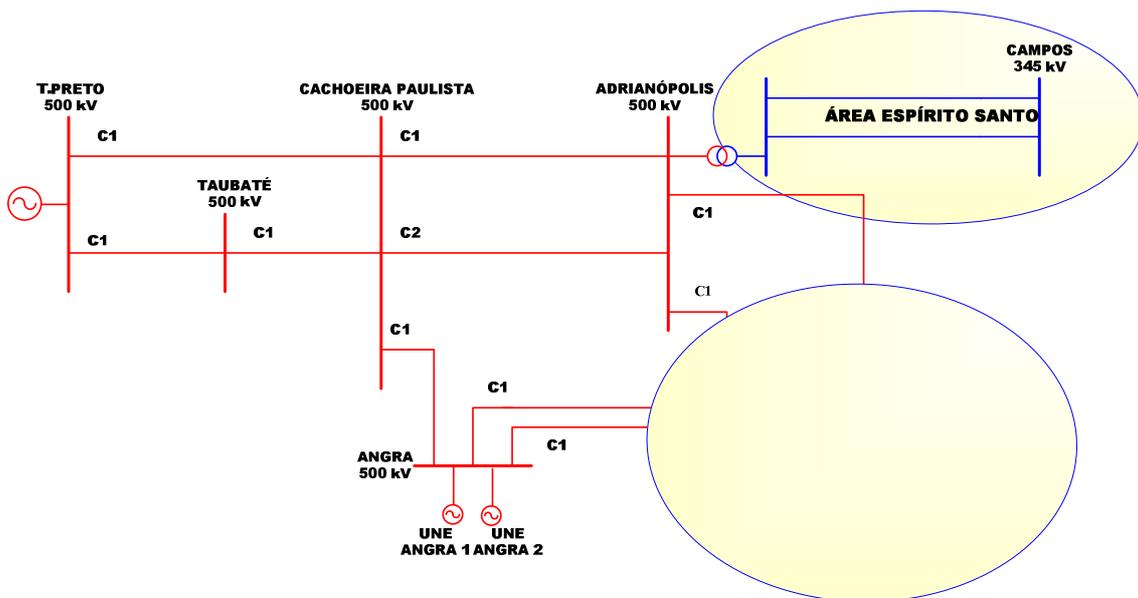


Figura A-6 – Sistema de Atendimento a Área Rio de Janeiro/Espírito Santo

A **Tabela A-10** apresenta as condições de fluxo de potência e a **Tabela A-11** mostra a geração total das regiões nos três cenários selecionados. Os cenários 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, às cargas pesada, média e leve.

Tabela A-10 – Condições de Fluxo de Potência do Sistema Sul/Sudeste

Cenários	F ₁ (MW)	F ₂ (MW)	F ₃ (MW)	F ₄ (MW)
1	1260	4100	142	5122
2	744	4526	181	5214
3	321	4370	192	4000

Tabela A-11 – Valor de Geração nas Regiões Sul, Sudeste e Itaipu.

Cenários	SE (MW)	S (MW)	Itaipu (MW)
1	21750	6400	10600
2	17300	6300	10600
3	11600	4000	8800

No CD em apenso do Anexo E encontram-se todos os dados utilizados nas simulações realizadas.

* * *

Anexo B

Manual de Utilização do Programa APPS –

Versão 1.0 (Análise Probabilística de

Pequenos Sinais)

Neste anexo apresenta-se o manual de utilização do programa *APPS (Análise Probabilística de Pequenos Sinais)*. O programa foi implementado na plataforma *MATLAB – Versão 7.1* e testado no sistema operacional Windows *XP, Versões 1.3.4 e 2 do PSAT*.

B.1 Manual de Utilização

O programa *APPS* utiliza um conjunto de dados determinísticos e probabilísticos da rede elétrica, passados ao programa através de arquivos em formato seqüencial, como ver-se-á a seguir.

A execução do programa pode ser feita com modo de “*processamento em batch*”, no qual as informações necessárias ao programa (nomes de arquivos de entrada) são passadas através de modo iterativo. Maiores detalhes serão informados no Anexo C.

B.2 Capacidade do programa

A **Tabela B-1** apresenta as principais capacidades e limitações do programa, no que tange ao número de modelos estocásticos, número de medidas corretivas, número de barras, linhas de transmissão, transformadores e geradores.

Tabela B-1 – Capacidade Atual do Programa APPS – Versão 1.0

Descrição	Capacidade
Número de Barras, Linhas de Transmissão e Transformadores	Limitado pela Capacidade do Programa MATLAB
Número de Máquinas e Controladores	Limitado pela Capacidade do Programa MATLAB
Número de Cenários de Intercâmbios com Incertezas	Limitado pela Capacidade do Programa MATLAB
Número de Patamares de Carga com Incertezas	Limitado pela Capacidade do Programa MATLAB
Número de Topologias com Incertezas	Limitado pela Capacidade do Programa MATLAB
Número Máximo de Lotes de Sorteio	9
Número de Barras de Carga com Ruídos	Limitado pela Capacidade do Programa MATLAB
Número de Áreas com Ruídos	Limitado pela Capacidade do Programa MATLAB

B.3 Dados de Entrada

O programa *APPS* necessita de dois arquivos de dados de entrada, o primeiro com *dados dos modelos estocásticos* associados a todos os componentes do sistema a serem analisados e o segundo contendo os *dados determinísticos* de linhas, transformadores, barras, máquinas, reguladores de tensão e estabilizadores.

Para a simulação de fluxo de potência e estabilidade a pequenas perturbações será utilizado o programa *PSAT - Versão 1.3.4* ou *2*. Os dados para este programa são fornecidos na forma de conjuntos de elementos encabeçados por um mnemônico identificador e terminados por um “*flag*” indicativo de fim de conjunto.

O formato de dados de entrada determinísticos pode ser consultado no manual de utilização do programa *PSAT – Versão 1.3.4* ou *2* [91],[92].

B.4 Dados de Modelos Estocásticos

O arquivo com dados de modelos estocásticos pode conter de um a quatro conjuntos de dados. Tais conjuntos referem-se aos dados de *medidas corretivas*, arquivos de *cenários*, *modelos de cenários e ruídos*. O formato de entrada desses dados é diferente e o mnemônico associado também. A ordem de entrada dos conjuntos é irrelevante, significando isso que os conjuntos de dados não guardam relações entre si. Assim, cada conjunto de dados segue a seguinte estrutura:

Linha contendo o mnemônico associado ao conjunto de dados, de acordo com a seguinte convenção:

TITU – Título do Caso;

MEDC – Dados de Medidas Corretivas;

ARQC – Dados de Arquivos de Cenários;

IINT – Dados de Modelos Estocásticos de Intercâmbios;

IPAT – Dados de Modelos Estocásticos de Patamares de Carga Lidos no Arquivo de Saída do Programa MODCAR;

NPAT – Dados de Modelos Estocásticos de Patamares de Carga Fornecidos pelo Usuário;

CONT – Dados de Níveis de Contingência (N-1 e N-2);

TOPN – Dados de Modelos Estocásticos de Topologias Lidos do Arquivo de Saída do Programa NH2 com terminação *.r*;

TOPD – Dados de Modelos Estocásticos de Topologias lidos no Arquivo de Dados de Entrada do Programa NH2 com terminação *.sub.*;

TOPU – Dados de Modelos Estocásticos de Topologias Fornecidas pelo Usuário;

SORT – Dados de Sorteio para Simulação Monte Carlo.

IBARE – Dados de Modelos Estocásticos de Ruídos nas Cargas por barramento;

IARE – Dados de Modelos Estocásticos de Ruídos nas Cargas por Área Elétrica.

Linha contendo o número **9999** nas colunas 1 a 4, indicando o fim do conjunto de dados.

No **Anexo C** apresenta um exemplo de um arquivo de modelos estocásticos.

▪ **Dados de Medidas Corretivas**

Este conjunto de dados é composto de uma única linha para cada tipo de medida corretiva selecionada, cujo formato está apresentando na **Tabela B-2**, mais uma linha indicando o fim do conjunto de dados, contendo **9999** nas colunas de 1 a 4.

Convém observar que poderão existir três tipos de medidas corretivas, a primeira é o ajuste de controladores, a segunda é o redespacho de potência ativa dos geradores e a terceira é o mínimo corte de carga. Além disso, há a opção para a análise sem medidas corretivas.

Tabela B-2 – Formato de Linha para Dados de Medidas Corretivas

Campo	Coluna	Formato	Descrição
Identificação	2 - 30	S4	Identificação alfanumérica contendo “ <i>CMDC</i> ” ou um “ <i>SMDC</i> ” significando, respectivamente, análise <i>com medidas corretivas</i> ou <i>sem medidas corretivas</i> .
Tipo de medidas corretivas	21 - 28	S4	Identificação do tipo de medidas corretivas: AJTC = Ajuste de Controladores RDSP = Redespacho de Potência Ativa dos Geradores (Inibido na Versão 1.0) CTCG = Mínimo Corte de Carga (Inibido na Versão 1.0)
Critério de estabilidade	33 - 55	F6	Identificação do critério de amortecimento: 5.0 = 5% de amortecimento desejável 10.0 = 10.0% de amortecimento desejável 15.0 = 15% de amortecimento desejável

Notas: as opções CMDC, AJTC, RDSP e CTCG estão inibidas na versão APPS 1.0.

▪ **Dados de Arquivos de Cenários**

Este conjunto de dados é composto de tantas linhas quantas forem necessárias para a informação do nome de arquivo de cenários com configuração *N*, sendo que cada linha contém até 5 dados (formato apresentado na **Tabela B-3**) mais uma linha indicando o fim do conjunto de dados, contendo **9999** nas colunas de 1 a 4.

Cabe destacar que neste bloco **ARQC**, o usuário deve informar na mesma linha do mnemônico, mais duas informações relacionadas aos tipos de incertezas em cenários e a informação sobre o tratamento de convexidade.

O primeiro campo nas colunas 14 – 17, o usuário deve informar o tipo de incerteza em cenário a ser analisado:

INTE – Incertezas somente em cenários de intercâmbios;

PATA – Incertezas somente em patamares de carga;

TOPO – Incertezas somente em topologias;

IPAT – Incertezas em intercâmbios e patamares de carga;

ITOP – Incertezas em intercâmbios e topologias;

PTOP – Incertezas em patamares de carga e topologias;

IPTO – Incertezas em intercâmbios, patamares de carga e topologias.

O segundo campo nas colunas 32 – 34 devem informar se irá tratar ou não a convexidade, ou seja, o usuário deve colocar em formato alfanumérico a palavra “SIM” ou “NÃO”. No caso “SIM” irá tratar a convexidade e no caso “NAO” os casos sem sucesso serão retirados da estatística.

Tabela B-3 – Formato de Linha para Dados de Arquivos de Cenários

Campo	Dimensão	Formato	Descrição
Número do Intercâmbio	Livre	D	Número de intercâmbio, conforme definido no bloco IINT
Tipo de Intercâmbio	Livre	S	Identificação alfanumérica do tipo de Intercâmbio, conforme definido no bloco IINT
Número do Patamar de Carga	Livre	D	Número do patamar de carga, conforme definido no bloco NPAT .
Tipo de Patamar de Carga	Livre	S	Identificação alfanumérica do tipo de patamar de carga, conforme definido no bloco NPAT
Número da Topologia	Livre	D	Este campo deverá conter um “N”, um “N-1” ou um “N-2” significando respectivamente, a topologia N (condição normal), topologia N-1 (contingência N-1) ou topologia N-2 (contingência N-2)
Nome do Arquivo	Livre	S10	Identificação alfanumérica do nome de arquivo de cenários para topologia “N”

Nota: Cabe destacar apenas que deve ter um espaço em branco entre os dados.

▪ **Dados de Incertezas em Cenários**

Para cada cenário devem ser fornecidos três conjuntos de dados, identificados por mnemônicos. O **Anexo C** apresentam diversos exemplos para melhor ilustrar o processo.

Assim, cada cenário deverá possuir os seguintes conjuntos de dados:

- **Dados Relativos a Incertezas em Intercâmbios (IINT)**

Este conjunto de dados é composto de tantas linhas quantas foram necessárias para declaração de todos os cenários de intercâmbio, cujo formato está apresentado na **Tabela B-4**, mais uma linha indicando o fim do conjunto de dados, contendo 9999 nas colunas de 1 a 4.

Tabela B-4 – Formato de Linha Típica para Dados Estocásticos de Cenários de Intercâmbios

Campo	Colunas	Formato	Descrição
Número do Intercâmbio	Livre	D	Número de identificação do Cenário de intercâmbio (entre 1 e o número máximo de identificação)
Probabilidade do Cenário de Intercâmbio	Livre	F	Probabilidade associada ao cenário de intercâmbio (valores entre 0 e 1)
Identificação do cenário de Intercâmbio	Livre	S	Identificação alfanumérica do cenário de intercâmbio

Nota: Cabe destacar apenas que deve ter um espaço em branco entre os dados.

- **Dados Relativos a Incertezas em Patamares de Carga (IPAT ou NPAT)**

Este conjunto de dados pode ser fornecido de duas formas, identificados por mnemônicos *IPAT* ou *NPAT*. O fornecimento de dados pelo mnemônico *IPAT* é utilizado quando se desejar informar os dados de modelos estocásticos através da leitura dos dados de arquivo de saída do programa *MODCAR*. Uma vez que todas as informações essenciais ao mesmo são passadas através de arquivo, é necessário fornecer apenas em uma linha o nome do arquivo de saída do programa *MODCAR*, mais uma linha indicando o fim do conjunto de dados, contendo **9999** nas colunas de 1 a 4, cujo formato está apresentando na **Tabela B-5**. O fornecimento de dados dos modelos estocásticos associados a patamares de carga pelo mnemônico *NPAT* é composto de tantas linhas quantas forem necessárias para a declaração de todos os patamares de carga, sendo que cada linha pode conter até um patamar de carga (formato apresentado na **Tabela B-6**), mais uma linha indicando o fim do conjunto de dados, contendo **9999** nas colunas de 1 a 4 .

Tabela B-5 – Formato da Linha de Identificação dos Modelos Estocásticos Fornecidos pelo Arquivo de Saída do Programa MODCAR

Campo	Colunas	Formato	Descrição
Nome do Arquivo de Saída do Programa MODCAR	Livre	S	Identificação alfanumérica do nome do arquivo de saída do programa MODCAR

Nota: Cabe destacar apenas que deve ter um espaço em branco entre os dados.

Tabela B-6 – Formato da Linha de Identificação dos Modelos Estocásticos de Cenários de Patamares de Carga

Campo	Colunas	Formato	Descrição
Número do Patamar de Carga	Livre	D	Descrição do patamar de carga (este número será utilizado no outro bloco de dados – ARQC para associar esse patamar a outros cenários)
Probabilidade do Patamar de carga	Livre	F	Probabilidade associada ao patamar de carga (valores entre 0 e 1)
Nome do Patamar de Carga	Livre	S	Nome do patamar de carga (pesada ou média ou leve ou mínima)

Nota: Cabe destacar apenas que deve ter um espaço em branco entre os dados.

▪ **Dados Relativos a Incertezas em Topologias (TOPN ou TOPD ou TOPU)**

Estes dados são informados através de 4 conjuntos de dados identificados através dos mnemônicos *CONT*, *TOPN*, *TOPD* e *TOPU*. O primeiro conjunto (*CONT*) é formado por duas linhas, a primeira contendo uma identificação alfanumérica para a contingência *N-1* (até 3 caracteres) e a segunda com identificação alfanumérica para a contingência *N-2* (até 3 caracteres), cujo formato está apresentado **Tabela B-7**.

Para os dados de modelos estocásticos de topologia, os mesmos podem ser fornecidos de três formas: identificados por mnemônicos *TOPN* ou *TOPD* ou *TOPU*. O primeiro conjunto identificado pelo mnemônico *TOPN* é composto por apenas uma linha com identificação alfanumérica do nome de arquivo de saída do programa *NH2* (vide **Tabela B-8**), mais uma linha indicando o fim do conjunto de dados, contendo 9999 nas colunas de 1 a 4. O segundo conjunto identificado pelo mnemônico *TOPD* também é composto por apenas 1 linha com identificação alfanumérica do nome do arquivo de dados de entrada ou apenas o bloco “*DCTS*” utilizado pelo programa *NH2* (vide **Tabela B-9**), mais uma linha indicando o fim de dados, contendo **9999** nas colunas de 1 a 4.

Por fim, existe o terceiro modo para informação de dados de modelos estocásticos de topologia, devendo o conjunto formado de tantas linhas quantas forem necessárias para a declaração de todas as contingências simples (*N-1*) de linhas de transmissão ou transformadores para os cenários a serem analisados.

Tabela B-7 – Formato de Linha de Identificação do Tipo de Contingências

Campo	Colunas	Formato	Descrição
Nível de Contingência	Livre	S	Identificação alfanumérica do nível de contingência: <i>N-1</i> = Topologia <i>N-1</i> <i>N-2</i> = Topologia <i>N-2</i>

Tabela B-8 – Formato de Linha de Identificação do Nome de Arquivo de Saída do Programa NH2

Campo	Colunas	Formato	Descrição
Nome do Arquivo de Saída do Programa <i>NH2</i>	Livre	S	Identificação alfanumérica do nome de arquivo de saída do programa <i>NH2</i>

Tabela B-9 – Formato de Linha Típica para Dados Estocásticos de Topologias N-1

Campo	Colunas	Formato	Descrição
Número da Topologia	Livre	D	Número de identificação da topologia <i>N-1</i> (entre 1 e o número máximo de identificação)
Barra de Origem	Livre	D	Este campo deverá conter o número da barra de origem
Barra de Destino	Livre	D	Este campo deverá conter o número de barra de destino
Número do Circuito	Livre	D	Este campo deverá conter o número do circuito
Taxa de transição	Livre	F	Taxa de falha em número de ocorrências por ano
Tempo de Reparo	Livre	F	Tempo médio de reparo em horas

Nota: Cabe destacar apenas que deve ter um espaço em branco entre os dados.

▪ **Dados de Incertezas em Cargas**

Os dados e modelos estocásticos de cargas são classificados como ruídos e podem ser fornecidos de duas formas: por barras e/ou por área elétrica.

Assim, os dados de incertezas em cargas podem ser fornecidos através de 2 conjuntos de dados, identificados por mnemônicos **IBAR** e **IARE**:

- **Dados Relativos a Cargas por Barras (IBAR)**

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada barra de carga, cujo formato está apresentado na **Tabela B-10**, mais uma linha indicando o fim do conjunto de dados, contendo **9999** nas colunas de 1 a 4.

Tabela B-10 – Formato de Linha Típica para Dados de Carga por Barra

Campo	Colunas	Formato	Descrição
Número da Barra	Livre	D	Este campo deve conter o número da barra de carga.
Parcela Z da Carga Ativa	Livre	F	Representa o percentual (%) de carga Ativa com modelagem de impedância constante (Z)
Parcela I da Carga Ativa	Livre	F	Representa o percentual (%) de carga ativa com modelagem de Corrente Constante (I)
Parcela P da Carga Ativa	Livre	F	Representa o percentual (%) de carga ativa com modelagem de potência constante (P)
Parcela Z de Carga Reativa	Livre	F	Representa o percentual (%) de carga reativa com modelagem impedância constante (Z)
Parcela I de Carga Reativa	Livre	F	Representa o percentual (%) de carga reativa com modelagem de corrente constante (I)
Parcela P da Carga Reativa	Livre	F	Representa o percentual (%) de carga reativa com modelagem de potência constante (P)
Tipo de Ruído	Livre	S	Identificação alfanumérica do tipo ruído: MAG = Incerteza na magnitude da carga MOD = Incerteza na modelagem da carga
Tipo de Acoplamento	Livre	S	Identificação do tipo de acoplamento: P = Incerteza somente na potência ativa Q = Incerteza somente na potência reativa PQ = Incerteza nas potências ativa e reativa
Tipo de Sorteio	Livre	S	Este campo deve conter um “ CONF ” ou um “ NCONF ” significando, respectivamente, sorteio conforme ou sorteio não conforme. Esta informação é útil quando do sorteio pelo método

Campo	Colunas	Formato	Descrição
			de simulação Monte Carlo. Se o sorteio for conforme o programa assumirá sorteio de cada barra de carga, e no caso de sorteio não conforme, o programa considera sorteio da carga total de todas as barras com incertezas
Tipo de distribuição	Livre	S	Identificação alfanumérica do tipo de distribuição: NORM = distribuição normal EXPO = distribuição exponencial RETA = distribuição retangular TRIA = distribuição triangular WEIB = distribuição Weibull LOGN = distribuição Log LAPL = distribuição Laplace
Desvio Padrão	Livre	F	Este campo deverá conter a porcentagem de desvio padrão para tipo de distribuição

- **Dados Relativos a Cargas por Área Elétrica (IARE)**

Os mesmos dados que são fornecidos para os dados de incertezas por barramento podem ser informados por área elétrica, excetuando-se o campo relativo a número da barra. Neste campo deve ser informado o número da área elétrica. Assim, todas as barras de carga dessa área apresentarão os mesmos dados de modelos estocásticos.

Convém a observar que não é obrigatório que cada barra de carga ou área elétrica esteja associado a um modelo estocástico. Quando isso não acontece, isto é, se não existem dados estocásticos para determinada carga ou área, o programa considera que a carga ou área não possui incerteza.

- **Linhas de Comentários**

Para facilitar a identificação dos dados nos arquivos de entrada, em alguns pontos é permitido o uso de linhas com comentários, adicionadas pelo usuário. Tais linhas sempre precisam ser iniciadas com o caractere “%” e não existem limitações.

No arquivo de dados de modelos estocásticos podem ser empregados entre os conjuntos de dados, bem como em qualquer posição quando se desejar utilizar linhas para comentários sobre os dados.

B.5 Encerramento dos Arquivos de Dados

Os arquivos de dados de modelos estocásticos deverão ser encerrados com o código “9999” na ultima linha, ocupando as colunas de 1 a 5.

B.6 Dados Determinísticos da Rede Elétrica

Para cada cenário para topologia N devem ser fornecidos 8 conjuntos de dados, identificados por mnemônicos, assim como no caso do arquivo de modelos estocásticos. Todavia, ao contrario daquele arquivo, neste caso os conjuntos de dados guardam relações entre si, devendo os conjuntos serem fornecidos numa ordem específica. No Anexo C.2 apresentam exemplo para melhor ilustrar.

Assim, cada cenário para topologia N deverá possuir os seguintes conjuntos de dados:

- **Dados Relativos à Título do Cenário**

Este conjunto é formado por tantas linhas quantas forem necessárias para descrição do título do cenário a ser analisado, cuja primeira coluna deve ser obrigatoriamente informada pelo caractere de comentário “%”.

- **Dados Relativos à Barra (Bus.con = [...])**

Este conjunto de dados é composto por tantas linhas quantas forem necessárias para a declaração de todas as barras do sistema.

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada barra do sistema, cujo formato está apresentado na **Tabela B-11**, mais uma coluna indicando o fim do conjunto de dados, contendo “[;” na última coluna de dados.

Tabela B-11 – Formato de Linha Típica para Dados de Barra

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
—	Número da Barra	—	1 - 5	D5
V_b	Tensão Base	p.u	7-11	F5
V_o	Tensão Inicial	p.u	13-17	F5
θ_o	Ângulo Inicial	p.u	19-25	F7
A_i	Número da Área	—	27-29	D3
R_i	Número da Região	—	31-33	D3

- **Dados Relativos às Barras de Referência – Barras Swing (SW.con = [...])**

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada barra de referência.

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada barra de referência do sistema, cujo formato está apresentado na **Tabela B-12**, mais uma coluna indicando o fim do conjunto de dados, contendo ‘;’ na última coluna de dados.

Tabela B-12 – Formato de Linha Típica para Dados de Barra Referência

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
—	Número da Barra	—	1 - 5	D5
S_n	Potência Base	MVA	7-11	F5
V_n	Tensão Base	p.u	13-17	F5
V_o	Magnitude da Tensão	p.u	19-23	F5
θ_o	Ângulo de Referência	p.u	25-30	F6
Q_{max}	Geração de Potência Reativa Máxima	p.u	32-39	F8
Q_{min}	Geração de Potência Reativa Mínima	p.u	41-48	F8
V_{max}	Tensão Máxima	p.u	50-54	F5
V_{min}	Tensão Mínima	p.u	56-60	F5
P_o	Potência Ativa Suposta	p.u	62-62	D1
γ	O Campo é Sempre Unitário	—	64-64	D1

- **Dados Relativos às Barras com Tensão Controlada - Barras PV (PV.con = [...])**

Este conjunto de dados é formado por tantas linhas quantas forem necessárias para informação dos dados de barras com tensão controlada.

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada barra controlada do sistema, cujo formato está apresentado na **Tabela B-13**, mais uma coluna indicando o fim do conjunto de dados, contendo “;” na última coluna de dados.

Tabela B-13 – Formato de Linha Típica para Dados de Barra Controlada

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
—	Número da Barra	—	1 - 5	D5
S_n	Potência Base	MVA	7-11	F5
V_n	Tensão Base	kV	13-17	F5
P_g	Potência Ativa	p.u	19-23	F5
V_o	Magnitude da Tensão	p.u	25-29	F5
Q_{max}	Geração de Potência Reativa Máxima	p.u	31-38	F8
Q_{min}	Geração de Potência Reativa Mínima	p.u	40-47	F8
V_{max}	Tensão Máxima	p.u	49-53	F5
V_{min}	Tensão Mínima	p.u	55-59	F5
γ	O Campo é Sempre Unitário	—	61-61	D1

▪ **Dados Relativos às Barras de Carga – Barras PQ (PQ.con = [...])**

Este conjunto de dados é composto por tantas linhas quantas forem necessárias para informação dos dados de barras de carga.

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada barra de carga do sistema, cujo formato está apresentado na **Tabela B-14**, mais uma coluna indicando o fim do conjunto de dados, contendo “;” na última coluna de dados.

Tabela B-14 – Formato de Linha Típica para Dados de Barra de Carga

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
—	Número da Barra	—	1 - 5	D5
S_n	Potência Base	MVA	7-11	F5

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
V_n	Tensão Base	kV	13-17	F5
P_L	Potência Ativa	p.u	19-24	F6
Q_L	Potência Reativa	p.u	26-31	F6
V_{max}	Tensão Máxima	p.u	33-37	F5
V_{min}	Tensão Mínima	p.u	39-43	F5
u	O Valor é Sempre Unitário	—	45-45	S1

- **Dados Relativos às Linhas de Transmissão e Transformadores (Line.con = [...])**

Este conjunto de dados é formado por tantas linhas quantas forem necessárias para fornecimento dos dados de linhas de transmissão e transformadores.

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada linha e transformador do sistema, cujo formato está apresentado na **Tabela B-15**, mais uma coluna indicando o fim do conjunto de dados, contendo “;” na última coluna de dados.

Tabela B-15 – Formato de Linha Típica para Dados de Linhas e Transformadores

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
—	Número da Barra De	—	1 - 5	D5
—	Número da Barra Para	—	7 - 11	D5
S_n	Potência Base	MVA	13-17	F5
V_n	Tensão Base	kV	19-23	F5
f_n	Frequência Base	Hz	25-28	F4
—	Campo Não Utilizado	—	30-34	F5
k_T	Tensão Primária/Tensão Secundária	kV/kV	36-40	F5
r	Resistência	p.u	42-48	F7
x	Reatância	p.u	50-56	F7
B	Susceptância	p.u	58-64	F7
a	Tape Fixo	p.u/p.u	66-70	F5
\emptyset	Defasagem Angular	Graus	72-76	F5
I_{max}	Corrente máxima	p.u	78-81	F4

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
P_{max}	Potência Máxima	p.u	83-87	F5
S_{max}	Potência Aparente Máxima	p.u	89-93	F5

▪ **Dados Relativos às Máquinas (Syn.con = [...])**

Este conjunto de dados é composto de tantas linhas quantas forem necessárias para informação dos dados de máquinas.

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada máquina do sistema, cujo formato está apresentado na **Tabela B-16**, mais uma coluna indicando o fim do conjunto de dados, contendo “];” na última coluna de dados.

Tabela B-16 – Formato de Linha Típica para Dados de Linhas e Transformadores

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
—	Número da Barra	—	1 - 5	D5
S_n	Potência Base	MVA	7-11	F5
V_n	Tensão Base	kV	13-17	F5
f_n	Frequência Base	Hz	19-20	D2
—	Modelo da Máquina	—	22-24	F3
x_l	Reatância de Dispersão	kV/kV	26-31	F6
r_a	Resistência da Armadura	p.u	33-39	F7
x_d	Reatância Síncrona do Eixo Direto	p.u	41-46	F6
x'_d	Reatância Transitória do Eixo Direto	p.u	48-54	F7
x''_d	Reatância Subtransitória do Eixo Direto	p.u	56-63	F8
T'_{do}	Constante de Transitória do Eixo Direto	S	65-71	F7
T''_{do}	Constante de Subtransitória do Eixo Direto	s	73-80	F8
x_q	Reatância Síncrona do Eixo em Quadratura	p.u	82-87	F6
x'_q	Reatância Subtransitória do Eixo em Quadratura	p.u	89-95	F7
x''_q	Constante de Transitória do Eixo Quadratura	s	97-104	F8
T'_{qo}	Constante de Subtransitória do Eixo Quadratura	s	106-112	F7

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
M	Constante de Inércia = 2 H	kWs/KVA	114-121	F8
D	Coefficiente de Amortecimento	p.u	123-129	F7
K _w	Ganho de velocidade	—	131-137	F7
K _P	Ganho de Potência Ativa	—	139-142	F4
Y _P	Percentual de Ativo Conectado na Barra	[0-1]	144-145	D2
Y _Q	Percentual de Reativo Conectado na Barra	[0-1]	147-150	F4
T _{AA}	Constante de Tempo de Dispersão Adicional do Eixo d	s	152-155	F4

▪ **Dados Relativos aos Reguladores de Tensão (Exc.con = [...])**

De forma similar aos dados de máquinas, porém com informação dos dados de reguladores de tensão das máquinas.

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada regulador de tensão da máquina, cujo formato está apresentado na **Tabela B-17**, mais uma coluna indicando o fim do conjunto de dados, contendo ‘;’ na última coluna de dados.

Tabela B-17 – Formato de Linha Típica para Dados de Regulador de Tensão

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
—	Número da Máquina	—	1 - 5	D5
—	Modelo do Regulador de Tensão	MVA	7-8	F2
V _{rmáx}	Tensão Máxima do Regulador de Tensão	p.u	10-14	F5
V _{rmín}	Tensão Mínima do Regulador de Tensão	p.u	16-20	F5
K _a	Ganho	p.u/p.u	22-27	F6
T _a	Constante de Tempo	s	29-35	F7
K _f	Ganho do Estabilizador	p.u/p.u	37-42	F6
T _f	Constante de Tempo do Estabilizador	s	44-50	F7
T _e	Constante de Tempo	s	52-55	F4
T _r	Constante de Tempo	s	57-63	F7
A _e	Coefficiente A _e	s	65-71	F7
B _e	Coefficiente B _e	s	80-85	F6

- **Dados Relativos aos Estabilizadores (Pss.con = [...])**

De forma similar aos reguladores de tensão, porém com informação dos dados de estabilizadores das máquinas.

Este conjunto de dados é composto de uma linha para cada estabilizador de tensão da máquina, cujo formato está apresentado na **Tabela B-18**, mais uma coluna indicando o fim do conjunto de dados, contendo ‘];’ na última coluna de dados.

Tabela B-18 – Formato de Linha Típica para Dados de Estabilizador de Tensão

Variável	Descrição	Unidade	Colunas	Formato
—	Número do Regulador de Tensão	—	1 - 5	D5
—	Modelo do Estabilizador	—	7 - 9	F3
—	Sinal do Estabilizador 1 \rightarrow w, 2 \rightarrow P _g e 3 \rightarrow V _g	—	11 - 14	F4
V _{srmax}	Sinal de Saída Máxima do Estabilizador	p.u	16 - 21	F6
V _{srmin}	Sinal de Saída Mínima do Estabilizador	p.u	23 - 28	F6
K _w	Ganho do Estabilizador	p.u/p.u	30 - 35	F6
T _w	Constante de Tempo Wash-out	s	37 - 43	F7
T ₁	Primeira Constante de Tempo do Estabilizador	s	45 - 51	F7
T ₂	Segunda Constante de Tempo do Estabilizador	s	53 - 59	F7
T ₃	Terceira Constante de Tempo do Estabilizador	s	61 - 67	F7
T ₄	Quarta Constante de Tempo do Estabilizador	s	69 - 75	F7
K _a	Ganho do Sinal Adicional	p.u/p.u	77 - 82	F6
T _a	Constante de Tempo do Sinal Adicional	s	84 - 90	F7
K _p	Ganho da Potência Ativa	p.u/p.u	92 - 97	F6
K _v	Ganho da Magnitude da Tensão	p.u/p.u	99 - 104	F6
V _{amax}	Sinal Adicional Máximo	p.u	106 - 111	F6
V _{amin}	Sinal Adicional Mínimo	p.u	113 - 118	F6
V _{smax}	Sinal de Saída Máximo	p.u	120 - 125	F6
V _{smin}	Sinal de Saída Mínimo	p.u	127 - 132	F6
e _{thr}	Campo Não Utilizado	p.u	134 - 141	F8
w _{thr}	Campo Não Utilizado	p.u	143 - 150	F8
s ₂	Campo Não Utilizado	Alfanumérico	152 - 153	S2

- **Dados Relativos aos nomes das barras (Vname.bus = {...})**

Este conjunto de dados é formado por identificação alfanumérica dos nomes de todas as barras do sistema.

Cada linha do arquivo deve ser composta apenas com 6 nomes de barras do sistema entre aspas (‘), separadas por ponto e vírgula (;) e um espaço em branco entre os nomes.

Este conjunto relativo aos nomes das barras, deverá ser encerrado com caractere “};”.

Convém destacar que maiores detalhes quantos aos dados de entrada determinísticos da rede elétrica podem ser consultados no manual do programa *PSAT*.

B.7 Execução do Programa

A execução do programa é bastante simples (vide Anexo E). Todas as informações essenciais são passadas através do arquivo de dados probabilísticos. Os arquivos de saída são gerados automaticamente pelo programa durante a execução, nos quais serão impressas as informações relativas aos dados probabilísticos e determinísticos de cada estado do espaço probabilístico. Assim, os seguintes arquivos de saída são gerados:

Arquivo de saída contendo os dados probabilísticos lidos, cujo nome será igual ao nome do arquivo de dados determinísticos com extensão *.prob*.

Arquivo de saída contendo os dados determinísticos de cada estado do espaço probabilístico com topologia N, cujo nome será idêntico ao nome do arquivo de dados determinístico com topologia N acrescida da extensão *.det*.

Arquivo de saída contendo todos os dados do espaço probabilístico de cenários. No caso com incertezas apenas em ruídos o mesmo não é gerado pelo programa.

A execução é feita interativamente e o usuário será solicitado a fornecer apenas o nome do arquivo de dados estocásticos. Ao final da simulação do protótipo computacional será gerado mais um arquivo de saída:

- Na análise considerando incertezas apenas em cenários é gerado um arquivo de saída com extensão *.smc*. Neste arquivo são impressos os indicadores propostos sem medidas corretivas. Por outro lado, se a análise for com medidas corretivas será gerado um arquivo com extensão *.cmd*.

É impresso também um gráfico com mapeamento dos autovalores de todos os estados do espaço probabilístico e as respectivas linhas do lugar das faixas de amortecimentos constantes, para 5%, 10% e 15%. São plotados também as linhas do lugar das faixas de frequências constantes, para 0.1 Hz, 0.3 Hz, 0.4 Hz, 0.7 Hz e 1.0 Hz.

- Na análise considerando incertezas apenas em ruídos é gerado um arquivo de saída com extensão *.rui*. Neste arquivo são impressos os histogramas sem medidas corretivas da parte real dos autovalores (média, parte real dos autovalores e parte real dos autovalores críticos) e dos amortecimentos (média, amortecimentos e amortecimentos críticos). Nesta análise serão também gerados 6 gráficos com os histogramas e 6 gráficos com os coeficientes β dessas variáveis aleatórias.
- Na análise considerando incertezas em cenários e ruídos é gerado um arquivo de saída com a extensão idêntica ao caso considerando incertezas apenas em ruídos, porém neste caso os 6 gráficos com os coeficientes β não são gerados.

No Anexo C apresentam-se trechos de um arquivo de saída, mostrando as informações acima mencionadas.

* * *

Anexo C

Arquivo de Dados Para o Sistema Teste 5

Barras

Este anexo contém um exemplo de preparação de arquivo de dados de entrada e arquivos de saída do sistema teste 5 barras do Anexo A para o *programa APPS*, versão 1.0.

C.1 Arquivo de Dados de Entrada

C.1.1 Arquivo de Dados Probabilísticos

```
*****
%          DADOS PROBABILISTICOS DO SISTEMA
%*****
%=====
%  INICIO ** LEITURA DO TITULO DO CASO ESTUDADO  **
%=====
TITU
%
% CASO ESTUDADO : COM TRATAMENTO DA CONVEXIDADE
% SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS - TESE DO ADRIANO
% SOMENTE COM AVR - SEM RV E SEM PSS
% INCERTEZAS SOMENTE EM CENARIOS
% SEM MEDIDAS CORRETIVAS
% INCERTEZAS : CENARIOS DE INTERCAMBIOS : 2
9999
%=====
%  INICIO ** LEITURA DE DADOS DE MEDIDAS CORRETIVAS  **
%=====
MCCORRETIVA.con
MEDC
%( M_CORRETIVA ) ( TIPO ) (CRITERIO ESTABILIDADE)
% COM MEDIDA CORRETIVA : Ajuste de Controladores
%   CMDC          AJTC          10.
% COM MEDIDA CORRETIVA : Redespacho de Potencia Ativa de Geradores
%   CMDC          RDSP          10.
% COM MEDIDA CORRETIVA : Minimo Corte de Carga
%   CMDC          CTCG          10.
% SEM MEDIDA CORRETIVA
%   SMDC          SMDC          10.
9999
%=====
%          FIM ** LEITURA DE DADOS DE MEDIDAS CORRETIVAS  **
%=====
%          INICIO ** LEITURA DE ARQUIVOS DE CENARIOS  **
%=====
```

```

ARQUIVO.con
%(ARQ) (TIPO_INCERTeza) (TRATA_CONVEXIDADE)
ARQC      INTE      SIM
%( NINT ) ( TINT ) ( NPAT ) ( TPAT ) ( NTOP ) ( NOME_ARQ )
  1  AREA1EXP  1  PESADA  N  sap_1d_n.m
  2  AREA2EXP  1  PESADA  N  sap_2d_n.m
9999
=====
%          FIM ** LEITURA DE ARQUIVOS DE CENARIOS      **
=====
%          INICIO ** DADOS DE INCERTEZAS EM CENARIOS    **
=====
CENARIOS.con
-----
%          INICIO ** DADOS DE INCERTEZAS NOS INTERCAMBIOS **
IINT
%( NINT ) ( PROBj ) ( INTERC )
  1  0.100000  AREA1EXP
  2  0.900000  AREA2EXP
9999
%          FIM ** DADOS DE INCERTEZAS NOS INTERCAMBIOS **
-----
%          INICIO ** DADOS DE INCERTEZAS EM PATAMARES DE CARGA **
IPAT
%( TIPO )      ( NOME_ARQMODCAR)
9999
NPAT
%(NPAT) ( PROBj ) ( PATAMAR )
9999
%          FIM ** DADOS DE INCERTEZAS EM PATAMARES DE CARGA **
-----
%          INICIO ** DADOS DE INCERTEZAS EM TOPOLOGIAS **
CONT
%(NIVEL_CONT)
9999
TOPN
%( NOME_ARQNH2)
9999
TOPD
%(NOME_ARQDCTS)
9999
TOPU
%NTOP (DE) (PA) (CIRC) (TX_FALHA) (TM_REPAR)
%          (ocorr/ano) (horas)
9999
%          FIM ** DADOS DE INCERTEZAS EM TOPOLOGIAS **
-----
%          FIM ** DADOS DE INCERTEZAS EM CENARIOS **
=====
%          INICIO ** DADOS DE INCERTEZAS EM RUIDOS      **
=====
RUIDOS.con
-----
%          INICIO ** DADOS DE SORTEIO ** SIMULACAO MONTE CARLO **
SORT
%( LOTE 1 ) ( LOTE 2 ) ( LOTE 3 ) ( LOTE 4 ) ( LOTE 5 ) ( LOTE 6 ) ( LOTE 7 ) ( LOTE 8 ) ( LOTE 9 )
9999
%          FIM ** DADOS DE SORTEIO ** SIMULACAO MONTE CARLO **
-----
%          INICIO ** DADOS DE INCERTEZAS NAS CARGAS **
IBAR
%NBAR ( ATIVO ) ( REATIVO ) TIPO TIPO TIPO TIPO DESVIO
%      %Z %I %P %Z %I %P RUIDO ACOPLA SORTEIO DIST (%)
9999
IARE
%NARE ( ATIVO ) ( REATIVO ) TIPO TIPO TIPO TIPO DESVIO
%      %Z %I %P %Z %I %P RUIDO ACOPLA SORTEIO DIST (%)
9999
%          FIM ** DADOS DE INCERTEZAS NAS CARGAS **
-----
%          FIM ** DADOS DE INCERTEZAS EM RUIDOS      **
=====
%

```

C.1.2 Arquivo de Dados Determinísticos

%

```

% Sistema Teste ADRIANO 5 Barras
% 5 Barras e 2 Geradores - Cenario 1
% Somente com AVR - Sem RV e Sem PSS

Bus.con = [ ...
%NBAR VBASE VINIC TETINIC NAR RAR
  1 1.000 1.050 0.0 1 1;
  11 1.000 1.000 0.0 1 1;
  3 1.000 1.000 0.0 1 1;
  4 1.000 1.000 0.0 1 1;
  5 1.000 1.050 0.0 1 1];

SW.con = [ ...
%NUMB SBASE VBASE VINIC TETINI QMAX(pu) QMIN(pu) VMAXI VMINI P C
  4 3120. 1.000 1.000 0.0 3.205 -3.205 1.050 0.900 2 1];

PV.con = [ ...
%NUMB SBASE VBASE P(pu) V(pu) QMAX(pu) QMIN(pu) VMAXI VMINI C
  1 3120. 1.000 .8494 1.050 0.526410 -0.52641 1.050 0.900 1;
  5 3120. 1.000 .0801 1.050 0.049640 -0.04964 1.050 0.900 1];

PQ.con = [ ...
%NUMB SBASE VBASE P (pu) Q (pu) VMAXI VMINI C
  3 3120. 1.000 .60897 .16025 1.050 0.950 1;
  5 3120. 1.000 .24038 0. 1.050 0.950 1];

Line.con = [ ...
% DE PARAL SBASE VBASE FREQ L(KM) kV/kV R( pu ) X( pu ) B( pu ) TAPEF ANGDF IMAX PMAXI SMAXI
  1 11 3120. 1.000 60. 0.00 0.00 0.00 0.07 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00;
  11 3 3120. 1.000 60. 0.00 0.00 0.00 0.03 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00;
  3 4 3120. 1.000 60. 0.00 0.00 0.00 12.0 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00;
  3 5 3120. 1.000 60. 0.00 0.00 0.00 1.50 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

Twt.con = [ ...
%BARP BAR2S BAR3T SBASE FREQ VB1(kV) VB2(kV) VB3(kV) R12(pu) R13(pu) R23(pu) X12(pu) X13(pu) X23(pu) TAPEF IMAX1 IMAX2 IMAX3 PMAX1 PMAX2
PMAX3 SMAX1 SMAX2 SMAX3
];

Ltc.con = [ ...
%BARD BARPA SBASE VBASE FREQ TAPEN(kV/kV) H(pu) K(1/s) TAPMAX(pu/pu) TAPMIN(pu/pu) DELT(pu/pu) VREF(pu) XT(pu) RT(pu) BCONT TCONT
];

Tap.con = [ ...
%BARD SBASE VBASE H(pu) K(1/s) TAPMIN(pu/pu) TAPMAX(pu/pu) VREF(pu) PN(pu) QN(pu) ALFAP BETAQ
];

Phs.con = [ ...
%BARD BARPA SBASE VP(kV) VS(kV) FREQ TM (s) KP(gain) KI(gain) PREF(pu) RT(pu) XT(pu) ANGMAX(rad) ANGMIN(rad)
];

Shunt.con = [ ...
%BARR SBASE VBASE FREQ COND(pu) SUSCEP(pu)
];

Breaker.con = [ ...
%NLIN NUMB SBASE VBASE FREQ STAT T1( s ) T2( s ) R( pu ) X( pu ) B( pu ) A(pu/pu) ANGDF
];

Fault.con = [ ...
%NUMB SBASE VBASE FREQ Tf( s ) Tc( s ) Rf( pu ) Xf( pu )
];

Syn.con = [ ...
%NUMB SBASE VBASE FQ MOD X1(pu) Ra (pu) Xd(pu) Xld(pu) X1ld(pu) Tldo(s) T1ldo(s) Xq(pu) Xlq(pu) X1lq(pu) Tlqo(s) T1lqo(s) ( H ) D( pu )
(Kw) Kp (Yr) (Yq) (Taa)
  1 3120. 1.00 60 5.2 0.000 0.0000 .23750 .095000 0.070000 4.700 0.06 .17750 0.00 0.0000 0.0 0.11 54.0 0.00
0.00 0 1.00 1.00 0.000;
  5 300. 1.00 60 3 0.000 0.0000 0.950 0.380 0.00 4.700 0.00 0.71 0.00 0.0000 0.0 0.11 9.0 0.00
0.00 0 1.00 1.00 0.000];

Tg.con = [ ...
%NUMG TIPTURB WREF(pu) R(pu/pu) TMAX(pu) TMIN(pu) Ts-TP1/T2-TP2(s) Tc-TP1/T1-TP2(s) T3-TP1(s) T4-TP1(s) T5-TP1(s)
];

Exc.con = [ ...
%NUMG TP Vmax Vmin Ka(pu) Ta( s ) Kf(pu) Tf( s ) NUSE Te( s ) Tr( s ) ( Ae ) ( Be )
  1 2 10.30 -10.9 40.0 0.050 0.06 0.5000 0 0.410 0.001 0.0000 0.000;
  2 2 10.30 -10.9 6.20 0.050 0.06 0.5000 0 0.410 0.001 0.0000 0.000];

Pss.con = [ ...
%NPSS MOD EPSS Vs_max Vs_min Kw(pu) Tw( s ) T1( s ) T2( s ) T3( s ) T4( s ) Ka(pu) Ta( s ) Kp(pu) Kv(pu) Va_max Va_min Vs_max Vs_min Ethr(pu)
Wthr(pu) S2
];

Varname.bus = { ...
'ALFA ' ; 'INTERMED1 ' ; 'GAMMA ' ; 'DELTA ' ; 'BETA ' ; ' ' ;
};

```

C.2 Arquivo de Dados de Saída

Na análise com incertezas apenas em cenários, as saídas do programa são compostas de quatro arquivos da seguinte forma:

C.2.1 Arquivo de Saída com Dados Determinísticos Lidos

É um arquivo com extensão *.det* com todos os dados da rede elétrica, máquinas e controladores lidos.

```

*****
CASO BASE : %
            % Sistema Teste ADRIANO 5 Barras
            % 5 Barras e 2 Geradores - Cenario 1
            % Somente com AVR - Sem RV e Sem PSS
*****
***** DADOS DETERMINISTICOS LIDOS *****
*****
===== DADOS DE BARRAS =====
-----
Barra Nome da barra V Inic Ang Inic Pger Qmax Qmin Pcarga Qcarga Vmax Vmin Area
      (pu) (grau) (MW) (Mvar) (MVar) (MW) (MVar) (pu) (pu)
-----
1 ALFA 1.050 0.00 2650.13 1642.4 -1642.4 0.00 0.00 1.050 0.900 1
11 INTERMED1 1.000 0.00 0.00 0.0 0.0 0.00 0.00 0.000 0.000 1
3 GAMMA 1.000 0.00 0.00 0.0 0.0 1899.99 499.98 1.050 0.950 1
4 DELTA 1.000 0.00 SWING 9999.6 -9999.6 0.00 0.00 1.050 0.900 1
5 BETA 1.050 0.00 249.91 154.88 -154.88 749.99 0.00 1.050 0.900 1
-----
===== DADOS DE LINHAS =====
-----
( De ) ( Pa ) ( Circ ) ( R ) ( X ) ( B ) ( Tap ) ( Tmn ) ( Tmx ) ( Phs ) ( Bc ) ( Pmax ) ( Smax )
      (perc) (perc) (MVar) (pu) (pu) (pu) (pu) (pu) (graus) (MW) (MVA)
-----
1 11 1 0.0000 7.0000 0.0000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0 0.0
11 3 1 0.0000 3.0000 0.0000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0 0.0
3 4 1 0.0000 1200.00 0.0000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0 0.0
3 5 1 0.0000 150.00 0.0000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0 0.0
-----
===== DADOS DE MAQUINAS =====
-----
Barra (Base) MO ( X1 ) ( Ra ) ( Xd ) ( Xld ) ( Xlld ) Tldo Tlldo ( Xq ) ( Xlq ) ( Xllq ) Tlqo Tllqo ( H ) ( D ) ( Kw ) ( Kp ) ( Yr ) ( Yq ) ( Taa )
      (MVA) (pu) (pu) (pu) (pu) (pu) (seg) (seg) (pu) (pu) (pu) (seg) (seg) (pu) (pu)
-----
1 3120 5 0.0000 0.0000 0.2375 0.0950 0.0700 4.700 0.060 0.1775 0.0000 0.0000 0.000 0.110 54.0 0.00 0.00 0.00 1.00 1.00 0.000
5 300 3 0.0000 0.0000 0.9500 0.3800 0.0000 4.700 0.000 0.7100 0.0000 0.0000 0.000 0.110 9.0 0.00 0.00 0.00 1.00 1.00 0.000
-----
===== DADOS DE REGULADORES DE TENSAO =====
-----
NUMG TP Vrmax Vrmin Ka (pu) Ta ( s ) Kf (pu) Tf ( s ) NUSE Te ( s ) Tr ( s ) ( Ae ) ( Be )
-----
1 2 10.30 -10.9 40.000 0.050 0.060 0.500 0.00 0.410 0.0010 0.0000 0.0000
2 2 10.30 -10.9 6.200 0.050 0.060 0.500 0.00 0.410 0.0010 0.0000 0.0000
-----
===== DADOS DO SINAL ADICIONAL DE ESTABILIZACAO =====
-----
NPSS MOD EPSS Vs_max Vs_min Kw (pu) Tw ( s ) T1 ( s ) T2 ( s ) T3 ( s ) T4 ( s ) Ka (pu) Ta ( s ) Kp (pu) Kv (pu) Va_max Va_min Vs_max Vs_min Ethr (pu)
Wthr (pu) S2
-----
*****
***** DIAGNOSTICO DE DADOS DETERMINISTICOS *****
*****

```

```

=====
===== DADOS DE BARRAS =====
=====
Total de Barras do Sistema : 5
Total de Barras PV       : 2
Total de Barras PQ       : 2
Total de Barras Swing    : 1
=====
===== DADOS DE LINHAS DE TRANSMISSAO =====
=====
Total de Linhas de Transmissao do Sistema : 4
=====
===== DADOS DE MAQUINAS =====
=====
Total de Maquinas do Sistema : 2
=====
===== DADOS DE REGULADORES DE TENSAO =====
=====
Total de Reguladores de Tensao do Sistema : 2
=====
===== DADOS DO SINAL ADICIONAL DE ESTABILIZACAO =====
=====
Total do Sinal Adicional de Estabilizacao : 0
=====

```

C.2.2 Arquivo de Saída com Dados Probabilísticos Lidos

É um arquivo com extensão *.prob* com todos os dados probabilísticos lidos.

```

*****
***** DADOS PROBABILISTICOS LIDOS E DIAGNOSTICO *****
*****
***** INICIO DADOS DE INCERTEZAS EM CENARIOS *****
*****
===== DADOS DE INCERTEZAS NOS INTERCAMBIOS =====
=====
No. Cenario  Probabilidade Intercambio  Caracteristica Intercambio
              (pu)
-----
          1          0.10000          AREA1EXP
          2          0.90000          AREA2EXP
-----
===== DADOS DE INCERTEZAS NOS PATAMARES DE CARGA =====
=====
No. Patamar  Probabilidade do Patamar  Caracteristica do Patamar
              (pu)
***** MENSAGEM : NAO EXISTEM INCERTEZAS NOS PATAMARES DE CARGA *****
=====
===== DADOS DE INCERTEZAS EM TOPOLOGIAS =====
=====
***** MENSAGEM : NAO EXISTEM INCERTEZAS NAS TOPOLOGIAS *****
=====
***** FIM DADOS DE INCERTEZAS EM CENARIOS *****
*****
***** INICIO DADOS DE RUIDOS *****
*****
***** INICIO DADOS DE SORTEIO *****
*****
***** MENSAGEM : NAO EXISTEM DADOS DE SORTEIO *****
*****
***** FIM DADOS DE SORTEIO *****
*****
===== RUÍDO SOMENTE NAS CARGAS =====
=====
***** MENSAGEM : NAO EXISTEM RUIDOS NAS BARRAS E AREAS *****
=====
***** FIM DADOS DE RUIDOS *****
*****

```

```

*****
***** DIAGNOSTICO DE DADOS PROBABILISTICOS *****
*****
***** INICIO INCERTEZAS EM CENARIOS *****
*****
***** CENARIOS COM INCERTEZAS *****
*****
-----
Cenarios de Intercambios com Incertezas
-----
AREALEXP
AREA2EXP
Total de Intercambios com incertezas      : 2
-----
Patamares de Carga com Incertezas
-----
Total de Patamares de Carga com Incertezas : 0
-----
Topologias com Incertezas
-----
No. Topologia  Barrade  Barrapara  Circuito  Topologia
-----
**** MENSAGEM : NAO EXISTEM INCERTEZAS NA TOPOLOGIA DA REDE ****
Mensagem : Nao Existem Incertezas na Topologia N-1
Mensagem : Nao Existem Incertezas na Topologia N-2
-----
*****
***** FIM INCERTEZAS EM CENARIOS *****
*****
***** INICIO INCERTEZAS EM RUIDOS *****
*****
RUIDO NAS BARRAS
-----
*****
***** FIM INCERTEZAS EM RUIDOS *****
*****

```

C.2.3 Arquivo de Saída com Dados do Espaço Probabilístico de Cenários

É um arquivo com extensão *.cena* com todos os dados do espaço probabilístico de cenários.

```

CASO BASE :
% Sistema Teste ADRIANO 5 Barras
% 5 Barras e 2 Geradores - Cenario 2
% Somente com AVR - Sem RV e Sem PSS
-----
Espaco Probabilistico de Cenarios
-----
Cenario  Intercambio  P.Carga  Barde  Barpar  Circ  Topologia  Probabilidade  Load Flow  Violacao  Nome Arquivo
-----
1  AREALEXP  PESADA  -  -  -  N  1.00000e-001  Viavel  Tensao  sap_ld_n.m
2  AREA2EXP  PESADA  -  -  -  N  9.00000e-001  Viavel  Tensao  sap_2d_n.m
-----
Violacoes de Tensao Obtidas em Cada Barra do Cenario do Espaco Probabilistico de Cenarios
-----
Cenario  Barramento  Violacao de Tensao  Nome Arquivo
-----
1  1  Sem Violacao  sap_ld_n.m
1  11  Violacao Vmax
1  3  Sem Violacao
1  4  Sem Violacao
1  5  Sem Violacao
2  1  Sem Violacao  sap_2d_n.m
2  11  Violacao Vmax
2  3  Sem Violacao
2  4  Sem Violacao
2  5  Sem Violacao
-----

```

```

-----
Dimensao do Espaco Probabilistico de Cenarios
-----
Dimensao do Espaco Probabilistico de Cenarios : 2
-----

Estados de Cenarios Retirados da Estatistica
-----
Total de Estados Retirados da Estatistica : 0
Probabilidade Total de Estados Retirados da Estatistica : 0.00000 (pu)
-----

Estatistica dos Estados de Cenarios
-----
Total de Estados Viaveis : 2
Total de Estados Inviaveis : 0
Probabilidade Total de Estados Viaveis : 1.00000 (pu)
Probabilidade Total de Estados Inviaveis : 0.00000 (pu)

```

C.2.4 Arquivo de Saída com os Indicadores Obtidos

É um arquivo com extensão *.smc* com todos os indicadores obtidos na análise com incertezas apenas em cenários e sem atuação nas medidas corretivas.

```

#####
TRATAMENTO ESTATISTICO DE RESULTADOS GLOBAIS DE CENARIOS
*** SEM MEDIDAS CORRETIVAS ***
#####
*****
% CASO ESTUDADO : COM TRATAMENTO DA CONVEXIDADE
%
% SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS - TESE DO ADRIANO
% SOMENTE COM AVR - SEM RV E SEM PSS
% INCERTEZAS SOMENTE EM CENARIOS
% SEM MEDIDAS CORRETIVAS
% INCERTEZAS : CENARIOS DE INTERCAMBIOS : 2
*****
#####
##### RESULTADOS OBTIDOS - AUTOVALORES #####
#####
-----
NUMERO      AUTOVALORES      AMORT (%)      FREQ (Hz)
-----
Estado : 1
1   -1000.00000 +j   0.00000   100.00000   0.00000
2   -1000.00000 +j   0.00000   100.00000   0.00000
3   -12.71360 ±j   12.29290   71.89012   1.95650
4   -17.31580 +j   0.00000   100.00000   0.00000
5   -14.05830 +j   0.00000   100.00000   0.00000
6   -0.00190 ±j   7.46390    0.02546   1.18790
7   -8.59120 +j   0.00000   100.00000   0.00000
8   -6.05120 +j   0.00000   100.00000   0.00000
9   -0.85884 ±j   1.59490   47.41202   0.25383
10  0.00071 ±j   0.40607   -0.17485   0.06463
11  -0.70193 ±j   0.46445   83.39664   0.07392
Estado : 2
1   -1000.00000 +j   0.00000   100.00000   0.00000
2   -999.99999 +j   0.00000   100.00000   0.00000
3   -12.56160 ±j   12.27060   71.53440   1.95290
4   -17.92460 +j   0.00000   100.00000   0.00000
5   -17.40650 +j   0.00000   100.00000   0.00000
6   -8.94880 ±j   3.97510   91.38928   0.63265
7   5.80430 +j   0.00000  -100.00000   0.00000
8   -6.98850 +j   0.00000   100.00000   0.00000
9   1.32130 +j   0.00000  -100.00000   0.00000
10  -1.66090 +j   0.00000   100.00000   0.00000
11  0.02879 ±j   0.27578  -10.38306   0.04389
12  -0.67061 ±j   0.82760   62.95657   0.13172
-----
#####
##### RESULTADOS OBTIDOS - AUTOVALORES CRITICOS #####
#####
-----
ESTADO      AUTOVALORES CRITICOS      AMORTECIMENTOS CRITICOS (%)
-----
1   0.00071 ±j   0.40607      -0.17485
2   5.80430 ±j   0.00000     -100.000
-----

```

```

#####
####  RESULTADOS OBTIDOS - INDICADORES PROBABILISTICOS  ####
#####
***** PROBABILIDADE DAS FAIXAS DE AMORTECIMENTO - PAM *****
-----
Prob Amort < 0 -----> 1.00000 (pu)
0 <= Prob Amort =< 5 -----> 0.00000 (pu)
5 < Prob Amort =< 10 -----> 0.00000 (pu)
10 < Prob Amort =< 15 -----> 0.00000 (pu)
15 < Prob Amort =< 20 -----> 0.00000 (pu)
Prob Amort > 20 -----> 0.00000 (pu)
-----
***** PROBABILIDADE DAS FAIXAS DE FREQUENCIA - PFE *****
-----
0.0 <= Prob Frequencia < 0.1 Hz --> 1.00000 (pu)
0.1 <= Prob Frequencia =< 0.6 Hz --> 1.00000 (pu)
( MODOS INTER-AREAS)
0.6 < Prob Frequencia =< 2.0 Hz --> 1.00000 (pu)
( MODOS LOCAIS)
2.0 < Prob Frequencia =< 3.0 Hz --> 0.00000 (pu)
( MODOS INTRA-PLANTA)
Prob Frequencia > 3.0 Hz --> 0.00000 (pu)
-----
***** PROBABILIDADE DE ESTABILIDADE E INSTABILIDADE *****
-----
Prob de Estabilidade - POE -----> 0.00000 (pu)
Prob de Instabilidade - POI -----> 1.00000 (pu)
-----
***** EXPECTANCIAS *****
-----
Exp Preal Autoval Criticos - EMC -> 5.223941
Exp Amortecimentos Criticos - EFA -> -90.017485 (%)
-----
MEDIA DA PARTE REAL DOS AUTOVALORES E AMORTECIMENTOS CRITICOS
-----
Media Preal Autoval Crit - MAM ---> 2.902505
Media Amortecimentos Crit - MAC ---> -50.087423 (%)
-----
MEDIANA DA PARTE REAL DOS AUTOVALORES E AMORTEC. CRITICOS *
-----
Mediana Preal Autoval Crit - MDM -> 2.902505
Mediana Amortecimentos Crit - MDA -> -50.087423 (%)
-----
* NUMERO DE ESTADOS DE INSUCESSO, SUCESSO PARCIAL E TOTAL *
-----
Numero de Estados de Insucesso --> 2
Numero de Estados de Sucesso Parcial --> 0
Numero de Estados de Sucesso Total --> 0
-----
* PROBABILIDADE DOS ESTADOS DE INSUCESSO, SUCESSO PARCIAL E TOTAL *
-----
Probabilidade dos Estados de Insucesso --> 1.00000 (pu)
Probabilidade dos Sucesso Parcial --> 0.00000 (pu)
Probabilidade dos Estados de Sucesso Total --> 0.00000 (pu)
-----

```

Por outro lado, na análise considerando incertezas apenas em ruídos, além dos arquivos de saída com os dados determinísticos e probabilísticos lidos, idênticos aos obtidos na análise com incertezas apenas em cenários, é gerado mais um arquivo de saída com extensão *.rui*. Este arquivo apresenta todas as amostras de sorteio, assim como os dados do histograma das variáveis aleatórias média da parte real dos autovalores, da parte real

dos autovalores, da parte real dos autovalores críticos, da média dos amortecimentos, dos amortecimentos e dos amortecimentos críticos. Serão também gerados 6 histogramas e 6 gráficos, num total de 12 arquivos do tipo *.grf*. Esses histogramas referem-se às variáveis aleatórias anteriormente mencionadas e os gráficos referem-se aos coeficientes de variação β dessas variáveis.

Na análise considerando a combinação de incertezas em cenários e ruídos são gerados apenas 6 arquivos do tipo *.grf*. Nestes arquivos são plotados os histogramas das mesmas variáveis aleatórias anteriormente mencionadas para ruídos.

* * *

Anexo D

Validação PSAT vs ANAREDE & PACDYN

Neste anexo registra-se uma avaliação de resultados de fluxo de potência e pequenas perturbações para validação do programa *PSAT* perante os programas *ANAREDE* e *PACDYN*. Para isso, foi utilizado o sistema New England (Vide Anexo A).

Os resultados obtidos na análise de fluxo de potência foram praticamente os mesmos, considerando-se o uso do programa *PSAT* versão 1.3.4 e o programa *ANAREDE* versão 08/03/05. A diferença nos níveis de tensão encontrados nas barras 1, 10, 12 e 25, cerca de 0.05%, é irrelevante.

A **Figura D-1** mostra os valores de níveis de tensão nos barramentos.

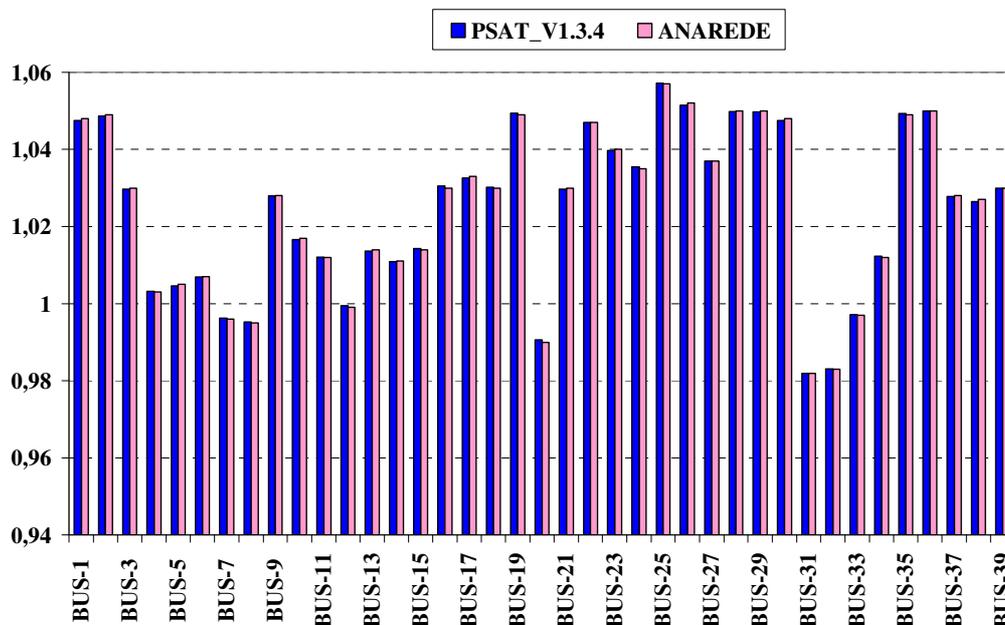


Figura D-1 – Resultados dos Programas PSAT e ANAREDE – Níveis de Tensão nas Barras em p.u

Nos dois programas (*ANAREDE* e *PSAT*) a convergência é alcançada em 3 iterações.

Foi também efetuada uma análise de pequenas perturbações utilizando os programas *PSAT* e *PACDYN versão 6.3*. A **Figura D-2** mostra o mapeamento dos pólos obtidos utilizando os programas *PSAT* e *PACDYN* respectivamente.

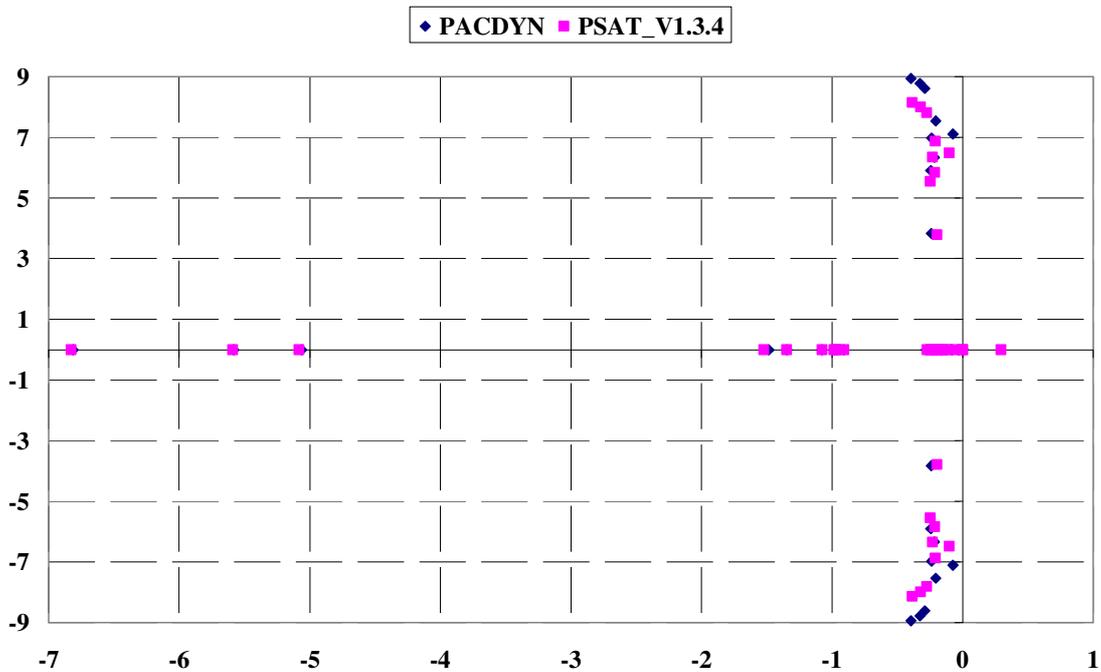


Figura D-2 – Resultados dos Programas *PSAT* e *PACDYN* – Autovalores do Sistema

Os resultados obtidos apresentados na **Figura D-2** mostram claramente que não há diferença significativa entre os dois programas. Considera-se então como validado o processamento de cálculo utilizado pelo programa *PSAT* (Nota: a proposta conceitual desta Tese independe de eventuais diferenças entre os programas *PSAT* e *PACDYN*).

Cabe destacar que na análise de pequenas perturbações os resultados são bem próximos entre os programas *PSAT* e *PACDYN*, desde que no programa *PSAT* se considere a reatância de dispersão igual a zero ($x_L = 0.0$).

* * *

Anexo E

APPS: Programa Fonte Executável

O programa fonte e o módulo executável do aplicativo *APPS 1.0* encontram-se no CD em apenso.

Instruções de uso e instalação:

- Instalar *MATLAB, Versão 7.1*. Para outras versões, o *APPS* não foi testado.
- Criar um diretório com o nome *APPSV1.0* ou outro nome a critério do usuário.
- Copiar todos os arquivos dos programas *PSAT 2.0* e *APPS 1.0* para o diretório criado no passo anterior (vide referência [91]).
- Criar arquivos de dados probabilísticos e determinísticos e gravar no diretório criado no passo anterior.
- Dar um “duplo click” no ícone do programa *MATLAB* e abrir. Em seguida levar o “mouse” no campo superior direito da tela e direcionar para o diretório criado no passo anterior.
- Para processar o programa *APPS* deve-se digitar no console do *MATLAB* o mnemônico “**am_apps**” e dar comando **ENTER**.
- O programa *APPS* solicita o nome do arquivo de dados probabilísticos.
- Ao final de processamento são gerados arquivos de saída e gráficos, conforme a análise efetuada.

* * *