

ATENÇÃO

O ORIGINAL DESTE ÍTEM NÃO FORNECE CONDIÇÕES
PARA OBTER UMA CÓPIA DIGITALIZADA COM
MELHOR QUALIDADE

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**RALLY-M: UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE
DE CONFIABILIDADE**

Antonio Souza Vieira Neto

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
"Mestre em Tecnologia Nuclear".**

Orientador: Dr. José Messias de Oliveira Neto

**São Paulo
1988**

LOCALIZAÇÃO			EXPRESSÃO ORIGINAL	EXPRESSÃO CORRIGIDA
CAP.	PAG.	ITEM/LINHA		
2	15	Segundo parágrafo, linha 5	... [44] sejam determinados. Os "prime implicants" de um [44] sejam determinados. Os "implicants", de um ...
2	25	Coluna referente ao método usado pelo módulo CRESSSI-M para o cálculo da não-confiabilidade.	Relação entre o número de jogos efetuados e o número de jogos falhos.	Relação entre o número de jogos falhos e o número de jogos efetuados.
3	35	Seção 3.4 item c.	c) Testados Periódicamente: ...	c) Testados Sequencialmente: ...
3	36	Equação 3.4-7	$Q(t) = \frac{1}{T_{max} (\lambda + \nu)} (T_{max} + e^{-(\lambda + \nu)T_{max}})$ <p>sendo ν a taxa de reparo.</p>	$\bar{Q}(t) = \frac{\lambda}{T_{max} (\lambda + \nu)} (T_{max} + \frac{e^{-(\lambda + \nu)T_{max}} - 1}{\lambda + \nu})$ <p>onde, ν é a taxa de reparo. OBS: a distribuição do tempo de reparo é considerada exponencial.</p>

TABELA Errata da Dissertação: 'EALLY-M: Um Sistema Computacional para a Análise de Confiabilidade' (2/2)

LOCALIZAÇÃO			EXPRESSION ORIGINAL	EXPRESSION CORRIGIDA
AP.	PAG.	ITEM/LINHA		
5	75	Equação 5.2.2-1.	$Q(t) = 1 - \frac{1 - e^{-(\lambda T \text{MART})}}{T \text{MART}}$ (5.2.2-1)	$Q(t) = 1 - \frac{1 - e^{-(\lambda T \text{MART})}}{T \text{MART} \lambda}$ (5.2.2-1)
8	165	Quinta e sexta linhas do primeiro parágrafo da seção 8.2.3.	... Capítulo 4, cujas principais características encontram-se nas TABELAS 4.4.2.1-1 e 2.4.2.1-2.	... APENDICE B, cujas principais características encontram-se nas TABELAS B.2.1-1 e B.2.1-2.
9	206	Quarta linha.	... bilidade média tem média igual a $7,43 \text{ E-}04$ e mediana igual a bilidade média tem média igual a $7,37 \text{ E-}04$ e mediana igual a ...
10	214	Nona linha do primeiro parágrafo da seção 10.2.1.2.	... Capítulo 4, não foi capaz de APENDICE B, não foi capaz de ...

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

RALLY-M: UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE
DE CONFIABILIDADE

ANTONIO SOUZA VIEIRA NETO

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Tecnologia Nuclear.

Orientador: Dr. José Messias de Oliveira Neto

SÃO PAULO
1988



COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NÚCLEAR/SP - IPEN

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que através de sugestões apoio ou estímulo, colaboraram direta ou indiretamente para a execução deste trabalho.

**RALLY-M : UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A
ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

Antonio Souza Vieira Neto

RESUMO

Esta dissertação trata do desenvolvimento de um novo sistema computacional, RALLY-M, destinado a efetuar a análise de confiabilidade de sistemas de engenharia.

A estrutura computacional deste novo sistema baseou-se na experiência alemã com o sistema RALLY, em relação qual apresenta alguns aperfeiçoamentos. É dada ênfase na capacidade de análise de árvores com estruturas não-monótonas, que é aumentada com a introdução de uma versão modificada do programa MOCUS.

**RALLY-M : A RELIABILITY ANALYSIS
COMPUTATIONAL PACKAGE**

Antonio Souza Vieira Neto

ABSTRACT

This dissertation deals with the development of a new computational package, RALLY-M to perform reliability analysis of engineering systems.

The structure of this new package is based on the german experience with the "RALLY Pack", relatively to which it contains a few improvements. Emphasis is given to its capacity of treating non monotone structured fault trees, which is augmented with the introduction of a modified version of the MOCUS program.

**RALLY-M : UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A
ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

ÍNDICE

	Página
1 INTRODUÇÃO	
1.1 RESUMO HISTÓRICO	1
1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	4
1.3 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	6
2 ANÁLISE DE ÁRVORES DE FALHAS: MÉTODOS E PROGRAMAS	
2.1 INTRODUÇÃO	6
2.2 FUNDAMENTOS DE ÁRVORES DE FALHAS	8
2.3 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS	9
2.3.1 Avaliação Qualitativa	9
2.3.1.1 Determinação de Cortes Mínimos	10
2.3.1.2 Determinação de "Prime Implicants"	14
2.3.1.3 Análise de Falhas com Causa Comum	15
2.3.2 Avaliação Quantitativa	16
2.3.2.1 Método Simulatório	16
2.3.2.2 Método Analítico	18
2.3.3 Avaliação da Propagação da Incerteza	19

ÍNDICE

	Página
2.3.4 Sistemas Computacionais Utilizados na Análise de Confiabilidade	21
2.3.4.1 Sistema RAS	21
2.3.4.2 Sistema WAM	23
2.4.4.3 Sistema RALLY	23
3 PROGRAMA RALLY-M	
3.1 INTRODUÇÃO	26
3.2 AVALIAÇÕES EFETUADAS PELO PROGRAMA RALLY-M	26
3.3 ESTRUTURA FUNCIONAL DO PROGRAMA RALLY-M	28
3.3.1 Bloco Gerenciador de Dados	28
3.3.2 Bloco de Determinação de Cortes Mínimos	31
3.3.3 Bloco de Avaliações Quantitativas	31
3.4 CARACTERÍSTICAS DA ÁRVORE DE FALHAS ANALISADA	33
3.5 FLEXIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO	37
3.6 CARACTERÍSTICAS COMPUTACIONAIS	37
4 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO MOCUS-M	
4.1 INTRODUÇÃO	41
4.2 PRINCIPAIS MODIFICAÇÕES INTRODUZIDAS NO MÓDULO MOCUS-M	41

ÍNDICE

	Página
4.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO MOCUS-M	42
4.3.1 Segmento de Preparação de Dados	46
4.3.1.1 Leitura de Dados	46
4.3.1.2 Análise da Consistência dos Dados	46
4.3.1.3 Reestruturação da Árvore	46
4.3.1.4 Delimitação das Áreas de Memória	48
4.3.1.5 Preparação de Variáveis	54
4.3.2 Segmento de Determinação de Cortes Mínimos	54
4.3.3 Características e Limitações Computacionais	73
5 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO CRESSC-M	
5.1 INTRODUÇÃO	74
5.2 VANTAGENS DO MÓDULO CRESSC-M EM RELAÇÃO AO MÓDULO CRESSC	74
5.2.1 Distribuição de Incerteza	74
5.2.2 Indisponibilidade	75
5.2.3 Acoplamento ao Módulos STREUSL-M	76
5.2.4 Inclusão de Comentários	76
5.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO CRESSC-M	76
5.3.1 Segmento de Determinação de Cortes	77
5.3.1.1 Algoritmo de Determinação de Cortes	77
5.3.1.2 Processo de Aceleração para a Determinação de Cortes	84

ÍNDICE

	Página
5.3.2 Segmento de Determinação de Cortes Mínimos	86
5.3.2.1 Ordenação dos Eventos Primários	86
5.3.2.2 Método de Determinação de Cortes Mínimos	87
5.3.3 Segmento de Ordenação dos Cortes Mínimos	90
6 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO CRESSEX-M	
6.1 INTRODUÇÃO	91
6.2 VANTAGENS DO MÓDULO CRESSEX-M EM RELAÇÃO AO MÓDULO CRESSEX	91
6.2.1 Distribuição de Incerteza	91
6.2.2 Indisponibilidade	92
6.2.3 Tempo de Processamento	93
6.2.4 Inclusão de Comentários	93
6.2.5 Acoplamento ao Módulo STREUSL-M	93
6.2.6 Complementação de Dados de Saída	94
6.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO CRESSEX-M	94
6.3.1 Segmento de Simulações do Comportamento do Sistema	96
6.3.2 Segmento de Determinação de Cortes Mínimos	107
6.3.3 Segmento de Análise Estatística dos Resultados Obtidos na Simulação	111

ÍNDICE

	Página
7 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO STREUSL-M	
7.1 INTRODUÇÃO	114
7.2 VANTAGENS DO MÓDULO STREUSL-M EM RELAÇÃO AO MÓDULO STREUSL	114
7.2.1 Precisão de Resultados	116
7.2.2 Flexibilidade de Uso	116
7.2.2.1 Acoplamento ao Módulo MOCUS-M	117
7.2.2.2 Avaliação de Eventos Intermediários	117
7.2.2.3 Alimentação Múltipla do Módulo ...	118
7.2.2.4 Avaliação de Sistemas sem Eventos Testados	118
7.2.3 Redução do Tempo de Processamento	119
7.2.4 Alterações no Relatório de Saída	120
7.2.4.1 Informações de Caráter Metodológico	120
7.2.4.2 Informações sobre o Tempo de Processamento	120
7.2.4.3 Informações sobre Eventos Intermediários	121
7.2.4.4 Indisponibilidade Pontual	121
7.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO STREUSL-M	121
7.3.1 Segmento de Preparação de Dados	122
7.3.2 Segmento de Estimativas Pontuais da Indisponibilidade Média do Sistema	133
7.3.2.1 Metodologia Utilizada	133
7.3.2.2 Avaliação da Indisponibilidade Média pela Sub-Rotina TIMUNA	138

ÍNDICE

	Página
7.3.2.3 Avaliação do Instante de Indisponibilidade Máxima	144
7.3.2.4 Avaliação da Probabilidade de Falha pela Sub-Rotina MEADNA	145
7.3.2.5 Comentários Finais	151
7.3.3 Segmento de Simulação da Indisponib. Média do Sistema	151
7.3.4 Segmento de Análise Estatística dos Valores Simulados	152
7.3.4.1 Estimção de Parâmetros da Distribuição de Incerteza	152
7.3.4.2 Determinação dos Parâmetros do Histograma da Distribuição de Incerteza	156
7.3.4.3 Testes de Aderência	156
7.4 TEMPOS DE PROCESSAMENTO	156
8 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÓDULOS DO PROGRAMA RALLY-M	
8.1 INTRODUÇÃO	162
8.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS QUE COMPÕEM O BLOCO DE DETERMINAÇÃO DE CORTES MÍNIMOS	162
8.2.1 Comparação de Aspectos Metodológicos e Construtivos	162
8.2.1.1 Comparação entre os Módulos que Utilizam o Método Analítico e o Método Simulatório	162
8.2.1.2 Comparação entre os Módulos que Utilizam o Método Simulatório	164
8.2.2 Desempenho Computacional	165
8.2.2.1 Grupo I de Testes	166

ÍNDICE

	Página
8.2.2.2 Grupo II de Testes	170
8.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS QUE COMPÕEM O BLOCO DE ANÁLISE QUANTITATIVA	179
8.3.1 Aspectos Metodológicos e Construtivos	179
8.3.2 Desempenho Computacional	180
8.3.3 Conclusões	181
9 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA RALLY-M	
9.1 INTRODUÇÃO	182
9.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ESVAZIAMENTO RÁPIDO DO TANQUE MODERADOR (SERTM)	187
9.3 DESCRIÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS	189
9.4 SUPOSIÇÕES ESTABELECIDAS PARA A ANÁLISE	192
9.5 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EFETUADA PELO PROGRAMA RALLY-M	192
9.5.1 Dados de Entrada do Programa RALLY-M	192
9.5.2 Estratégia de Análise Utilizada	193
9.5.3 Análise Efetuada pelo Bloco Gerenciador de Dados	193
9.5.4 Análise Efetuada pelo Bloco de Determinação de Cortes Mínimos	196
9.5.5 Análise Efetuada pelo Bloco de Análise Quantitativa	196
9.5.5.1 Análise Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M	196

ÍNDICE

	Página
9.5.5.2 Análise Efetuada pelo Módulo STREUSL-M	201
10 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
10.1 CONCLUSÕES	211
10.2 SUGESTÕES PARA FUTURO DESENVOLVIMENTO	212
10.2.1 Sugestão para Melhoria do Módulo MOCUS-M	212
10.2.1.1 Alteração no Algoritmo	212
10.2.1.2 Inclusão de um Novo Critério de de Encerramento	214
10.2.2 Sugestão para Melhoria do Módulo CRESSC-M	215
10.2.3 Sugestão para Melhoria dos Módulos CRESSEX-M e STREUSL-M	216
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	217
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DOS SÍMBOLOS USADOS NA ÁRVORE DE FALHAS	
APÊNDICE B - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÓDULO MOCUS-M E O PROGRAMA WAMCUT	
APÊNDICE C - ANÁLISE DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO CONSUMIDOS PELO SEGMENTO DE SIMULAÇÃO DO MÓDULO STREUSL-M	

**RALLY-M : UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A
ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

LISTA DE TABELAS

	Página
2 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS: MÉTODOS E PROGRAMAS	
2.3.1-1 Programas Principais Utilizados na Determinação de Cortes Mínimos	11
2.3.2-1 Programas Usados na Avaliação de Características de Confiabilidade ...	17
2.3.3-1 Programas Usados na Avaliação da Propagação da Incerteza	20
2.3.4-1 Principais Sistemas Computacionais de Análise de Confiabilidade	22
2.3.4.3-1 Avaliações Efetuadas pelo sistema RALLY	25
3 PROGRAMA RALLY-M	
3.3-1 Critérios de Encerramento dos Módulos do Programa RALLY-M	30
3.6-1 Características Computacionais dos Módulos do Programa RALLY-M	39
3.6-2 Dimensionamento de Parâmetros e Variáveis dos Módulos do Programa RALLY-M	40
4 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO MOCUS-M	
4.3.1.1-1 Informações de Entrada Fornecidas pelo Módulo TREBIL-M para o Módulo MOCUS-M	47

LISTA DE TABELAS

	Página
4.3.1.3-1 Procedimento de Compactação da Arvore, Devido a Presença de Eventos de Acionamento	49
4.3.1.5-1 Variáveis Definidas no Segmento de Preparação de Dados	55
4.3.2-1 Algoritmos Aplicados aos Portões Lógicos	57
4.3.2-2 Leis de Boole e de De Morgan	58
4.3.2-3 Variáveis Usadas pelo Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos	59
4.3.2-4 Variáveis Preparadas para o EXEMPLO 4.3.2-1	68
6 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO CRESSEX-M	
6.3-1 Cálculos Efetuados pelos Segmentos do Módulo CRESSEX-M	95
6.3.1-1 Expressões Usadas na Simulação da Ocorrência de Eventos	106
7 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO STREUSL-M	
7.2-1 Principais Diferenças entre os Módulos STREUSL e STREUSL-M	115
7.3.1-1 Dados Calculados no Segmento de Preparação de Dados	125
7.3.2-1 Avaliações Pontuais Efetuadas pelo Módulo STREUSL-M	134
7.4-1 Características Principais dos Modelos Examinados.....	157
7.4-2 Tempos de Processamento Consumidos pelos Segmentos do Módulo STREUSL-M	158

LISTA DE TABELAS

	Página
7.4-3 Participação Percentual dos Tempos de Processamento dos Segmentos do Módulo STREUSL-M em Relação ao Tempo Total	160
8 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÓDULOS DO PROGRAMA RALLY-M	
8.2.1.1-1 Tempos de Processamento dos Modelos da Série P Obtidos no Grupo I de Testes	168
8.2.1.1-2 Tempos de Processamento dos Modelos da Série S Obtidos no Grupo I de Testes	168
8.2.2.2-1 Estratégia Usada na Análise do Grupo II de Testes	171
8.2.2.2-2 Indisponibilidade para os Modelos S1, S3 e P5	173
8.2.2.2-3 Desempenho do Módulo CRESSC-M para o Modelo P1	174
8.2.2.2-4 Desempenho do Módulo CRESSEX-M para o Modelo P1	175
8.2.2.2-5 Desempenho do Módulo CRESSC-M para o Modelo P5	176
8.2.2.2-6 Desempenho do Módulo CRESSEX-M para o Modelo P5	177
8.2.2.2-7 Desempenho do Módulo CRESSC-M para o Modelo S3	178
8.2.2.2-8 Desempenho do Módulo CRESSEX-M para o Modelo S3	178
9 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA RALLY-M	
9.3-1 Codificação dos Eventos Primários	181
9.5.1-1 Informações Relacionadas com os Eventos Primários	183

LISTA DE TABELAS

	Página
9.5.3-1 Equivalente Booleano da Arvores de Falhas	195
9.5.3-2 Dados de Ocorrência dos Eventos Primários	197
9.5.4-1 Cortes Mínimos Obtidos pelo Módulo MOCUS-M	198
9.5.4-2 Caminhos Mínimos Obtidos pelo Módulo MOCUS-M	198
9.5.5.1-1 Principais Informações Obtidas pelo Processo de Simulações	199
9.5.5.1-2 Resultados de Análise de Confiabilidade Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M	200
9.5.5.1-3 Análise da Contribuição dos Eventos Primários para a Não-Confiabilidade e Indisponi- bilidade do SERTM	202
9.5.5.2-1 Ordenação dos Cortes Mínimos Fornecidos pelo MOCUS-M	203
9.5.5.2-2 Estimativas da Indisponibilidade Obtidas pelo STREUSL-M	204
9.5.5.2-3 Indisponibilidade Pontual do SERTM	205
9.5.5.2-4 Estimativa dos Percentis da Distribuição da Indisponibil. Média	207
9.5.5.2-5 Teste de Aderência da Distribui- ção da Indisponibilidade Média Simulada	208

**RALLY-M : UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A
ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

LISTA DE FIGURAS

	Página
3 PROGRAMA RALLY-M	
3.3.1-1 Fluxo de Informações do Programa RALLY-M	30
4 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO MOCUS-M	
4.3-1 Esquema Geral do Módulo MOCUS-M	43
4.3.1.4-1 Esquema da Ocupação da Área do Vetor W na Fase de Preparação de Dados	51
4.3.2-1 Esquema do Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos	60
4.3.2-2 Arvore de Falhas do Usada no EXEMPLO 4.3.2-1	67
5 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO CRESSC-M	
5.3-1 Esquema do Módulo CRESSC-M	78
5.3.2-1 Esquema do Método de Obtenção de Cortes Mínimos	88
6 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO CRESSEX-M	
6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M	97
6.3.2-1 Esquema do Método de Obtenção de Cortes Mínimos	108

LISTA DE FIGURAS

	Página
7 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO STRKUSL-M	
7.3.1-1 Esquema do Segmento de Preparação de Dados	123
7.3.1-2 Esquema da Sub-rotina IMPCOR	126
7.3.1-3 Esquema da Determinação do Número de Pontos Usados pelo Método de Quadratura Gaussiana	131
7.3.2-1 Esquema do Segmento de Estimativas Pontuais da Indisponibilidade	135
7.3.2.2-1 Esquema da Sub-rotina UNAV	140
7.3.2.2-2 Esquema da Sub-Rotina TIMONA ...	141
7.3.2.3-1 Esquema da Sub-Rotina UNAMAX ...	146
7.3.2.4-1 Esquema da Sub-Rotina MEAUNA ...	148
7.3.3-1 Esquema do Segmento de Simulação da Indisponibilidade Média do Sistema	153
8 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA RALLY-M	
9.1-1 Frequência de Ocorrência de Falha no Desligamento do Conjunto Crítico	184
9.1-2 Frequência de Ocorrência dos Cenários Resultantes do Evento Iniciador EI1	185
9.1-3 Frequência de Ocorrência dos Cenários Resultantes do Evento Iniciador EI2	186
9.2-1 Corte Típico da Célula Crítica	188
9.3-1 Arvore de Falhas do Sistema de Esvaziamento Rápido do Tanque Moderador	190
9.5.5.2-1 Gráfico da Função de Densidade de Probabilidade da Indisponibilidade Média Simulada	209

LISTA DE FIGURAS

	Página
9.5.5.2-2 Gráfico da Função de Distribuição Acumulada da Indisponibilidade Média Simulada	210

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 RESUMO HISTÓRICO

Durante as décadas de 1940 e 1950, os principais esforços relacionados com a segurança de instalações nucleares concentraram-se na introdução de redundâncias em componentes e sistemas de segurança, na adoção de um controle de qualidade rigoroso e na formulação de políticas de manutenção bem elaboradas.

Durante a década de 1960, matemáticos e engenheiros como D. F. Haasl, H. A. Watson, Z. W. Birnbaum, R. Barlow, F. Proschan, J. Esary e W. Weibull desenvolveram técnicas probabilísticas que permitiram a avaliação quantitativa da segurança de sistemas de engenharia. Dentre estas técnicas, uma das mais importantes foi, sem dúvida, a Análise de Arvore de Falhas [1-2], que permitiu a modelagem de sistemas em função dos modos de falha de seus componentes. Durante este período, contudo, a análise da segurança de unidades nucleares de potência manteve-se afastada deste desenvolvimento conservando-se fiel ao enfoque determinístico baseado no princípio do "máximo acidente crível" [3].

Trabalhos, como os efetuados por F. R. Farmer [4] e por Otway & Erdmann [5], procuraram evidenciar,

ainda na década de 1960, a necessidade de incorporar à análise de segurança de instalações nucleares elementos que permitissem a avaliação do risco para a população. Como resposta a estas ponderações, a "United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC)" patrocinou, durante o período de 1972 a 1975, a elaboração da primeira Análise Probabilística de Segurança (APS) de instalações nucleares. Este estudo, denominado "Reactor Safety Study" [6], também conhecido como Relatório WASH-1400, efetuou a análise das Unidades Nucleares Surry 1, do tipo PWR, e Peach Bottom 2, do tipo BWR, que representavam, na época, os projetos mais modernos de usinas nucleares.

A aplicação da metodologia de Análise Probabilística de Segurança, contudo, somente teve sua importância devidamente reconhecida após a divulgação das conclusões das comissões Kemeny [7] e Regovin [8], encarregadas de analisar o acidente nuclear ocorrido em Three Mile Island. A partir de então, a metodologia de Análise Probabilística de Segurança passou a ser utilizada intensamente. Um dos fatores que contribuíram para este desenvolvimento foi, sem dúvida, a divulgação e padronização de métodos e técnicas empregadas na Análise Probabilística de Segurança de usinas nucleares, ocorridos com a emissão dos relatórios: "Fault Tree Handbook" [9] e "PRA Procedures Guide", NUREG-2300, que consistem em guias técnicos contendo, respectivamente, a descrição da metodologia de Análise de Arvore de Falhas e dos principais métodos e

procedimentos de uma Análise Probabilística de Segurança.

Em 1986, mais de 30 instalações nucleares já tinham total ou parcialmente sido avaliadas sob o enfoque de Análise Probabilística de Segurança. Destas, mais de 10 envolveram o escopo completo de Análise Probabilística de Segurança, sendo duas efetuadas fora dos Estados Unidos, Biblis-B [10] e Sizewell-B [11], construídas, respectivamente, na Alemanha e Inglaterra.

Recentemente, em 1987, foram emitidos os resultados do relatório "Reactor Risk Reference" [12], NUREG-1150, que traz os resultados da reavaliação da análise probabilística de segurança das centrais nucleares: Zion, Surry, Sequoyah, Peach Bottom e Grand Gulf. Nestas análises, foram usadas as mais recentes metodologias e técnicas em APS.

No Brasil, programas importantes de APS têm sido desenvolvidos pela CNEN/RJ e, em menores proporções, pelo IPEN-CNEN/SP. Em 1983, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CEN) iniciou um programa de Análise Probabilística de Segurança da Unidade 1 da Central Nuclear Almirante Alvaro Alberto (ANGRA-I) [13], dando continuidade ao programa de análise de confiabilidade de sistemas de segurança iniciado pela COPPE em 1980. A primeira versão deste estudo foi apresentada em setembro de 1984 e consistiu na determinação das frequências dos cenários de acidentes que resultam em danos no reator. Em 1987, foi concluída a

primeira fase da Análise Probabilística de Segurança da Unidade Crítica do IPSN-CNEN/SP [14-15], onde foram estimadas as frequências de diversos cenários de acidente que podem resultar em uma temperatura na superfície do encamiçamento de combustível acima de 1000 C.

É importante salientar que embora a Análise Probabilística de Segurança tenha, nos últimos anos, avançado em muitos aspectos, sua estrutura metodológica conserva-se bastante semelhante à do estudo realizado no Relatório WASH-1400, onde a metodologia de Análise de Árvore de Falhas e de Árvore de Eventos continuam a ocupar um lugar de destaque.

1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

A partir da emissão do relatório WASH-1400, em 1975, um grande número de programas computacionais têm sido concebidos com a finalidade de dar suporte à Análise de Árvore de Falhas (AAF's).

Embora haja uma tendência de se produzir programas computacionais, para a análise de confiabilidade, cada vez mais flexíveis e precisos, estes, em geral, empregam métodos e simplificações cuja validade é restrita a determinadas circunstâncias. Estas limitações nem sempre são evidenciadas na documentação destes programas e podem induzir erros que invalidam sua utilização.

Visando diminuir problemas desta natureza, e com os quais o Departamento de Tecnologia de Reatores do IPEN-CNEN/SP vinha se defrontando, decidiu-se desenvolver um sistema computacional que tivesse grande flexibilidade e cuja documentação incluísse a descrição da metodologia empregada, suas limitações e virtudes.

Tendo-se em mente estes objetivos, partiu-se para o desenvolvimento de um sistema computacional que passou a se denominar RALLY-M, tomando por base o sistema computacional de análise de confiabilidade RALLY [16] e o programa MOCUS [17] que, na oportunidade, encontravam-se implantados no Centro de Processamento de Dados do IPEN-CNEN/SP.

As principais etapas da tarefa do desenvolvimento do sistema computacional RALLY-M foram:

- a) Estudar e interpretar os métodos de análise e estrutura computacional empregadas pelo programa MOCUS e pelos programas que compõem o sistema RALLY.
- b) Efetuar aperfeiçoamentos no sistema RALLY e no programa MOCUS, visando aumentar a precisão dos resultados, diminuir o tempo de processamento e ampliar a abrangência de utilização.
- c) Interligar os programas aperfeiçoados do sistema RALLY ao programa MOCUS aperfeiçoado e,

desta forma, criar o sistema denominado RALLY-M.

- d) Apresentar boa documentação do sistema RALLY-M, contendo uma descrição dos principais métodos e técnicas de análise.
- e) Analisar o desempenho dos programas que compõem o sistema RALLY-M.
- f) Apresentar sugestões para futuras melhorias nos programas que compõem o sistema RALLY-M.

1.3 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é constituída por 10 capítulos que visam apresentar uma análise do sistema RALLY-M. No capítulo 2, é efetuada uma rápida descrição do modelo de análise de árvore de falhas, citando os principais métodos e programas usados nas avaliações de características de confiabilidade de sistemas de engenharia.

O capítulo 3 apresenta uma introdução ao sistema computacional RALLY-M, contendo a descrição de suas principais características. O APÊNDICE A apresenta os principais símbolos usados nas árvores de falhas.

Nos capítulos 4 a 7, são apresentadas as descrições das técnicas e da metodologia empregadas nos programas MOCUS-M, CRESSC-M, CRESSEX-M e STREUSL-M, que compõem o sistema computacional RALLY-M, procurando evidenciar a

diferença entre eles e os programas originais.

O capítulo 8 apresenta uma análise comparativa entre os programas que executam avaliações qualitativas da confiabilidade de sistemas de engenharia (MOCUS-M, CRESSC-M e CRESSEX-M) e os que executam avaliações quantitativas (CRESSEX-M e STREUSL-M).

O capítulo 9 traz um exemplo de aplicação do sistema computacional RALLY-M na análise de confiabilidade do Sistema de Esvaziamento Rápido do Tanque Moderador do Conjunto Crítico da Unidade Crítica do IPEN-CNEN/SP.

Finalmente, no capítulo 10, são apresentadas as considerações finais da dissertação e sugestões para futuros aperfeiçoamentos no sistema computacional RALLY-M.

No APÊNDICE B, é feita uma análise comparativa entre o programa WAMCUT e o programa MOCUS-M. No APÊNDICE C, é efetuado um estudo sobre os tempos de processamento consumidos pelas principais etapas do programa STREUSL-M.

CAPÍTULO 2

2 ANÁLISE DE ÁRVORES DE FALHAS: METODOS E PROGRAMAS

2.1 INTRODUÇÃO

A Análise de Arvore de Falhas foi concebida em 1961 por H. A. Watson [1], da Bell Telephone Laboratories, durante o estudo da segurança do Sistema de Controle de Lançamento dos Misseis Minuteman da Força Aérea Americana. Em 1965, D. H. Hassl aperfeiçoou a técnica de elaboração de árvores de falhas [2], permitindo sua utilização em diversos ramos da indústria. A partir de então, a Análise de Árvore de Falhas vem se consolidando como ferramenta fundamental na análise de confiabilidade de sistemas de segurança de instalações nucleares.

2.2 FUNDAMENTOS DA ÁRVORE DE FALHAS

Árvore de falhas consiste num diagrama lógico dedutivo que registra os resultados de uma análise sistemática dos eventos que podem provocar um determinado evento indesejável, denominado evento topo. Construtivamente, a árvore de falhas é formada pela interligação de portões lógicos com eventos envolvendo o estado de equipamentos e/ou procedimentos operacionais. A descrição dos principais tipos de portões lógicos e eventos, usados em árvores de falhas, é apresentada no APÊNDICE A. Uma descrição

detalhada sobre os fundamentos da Análise de Árvore de Falhas encontra-se no relatório "Fault Tree Handbook" [9], emitido em 1981 por Haasl.

2.3 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS

A primeira etapa da Análise de Árvore de Falhas consiste em sua elaboração propriamente dita. Nesta fase, o analista de confiabilidade deve realizar um estudo minucioso, visando a compreensão do funcionamento do sistema e dos modos de falha que podem de alguma maneira contribuir para a ocorrência da falha do sistema. Embora a elaboração de árvores de falhas dependa da compreensão que o analista tem do sistema, sua construção pode ser facilitada com o uso de programas computacionais [18-20].

A segunda etapa consiste na avaliação da árvore de falhas, que pode ser efetuada sob o enfoque qualitativo e/ou quantitativo.

A avaliação de árvores de falhas de sistemas complexos de engenharia é, em geral, um trabalho tedioso e que facilmente pode consumir centenas de horas de um analista de confiabilidade. Por este motivo, a Análise de Árvore de Falhas é, geralmente, efetuada por programas computacionais.

2.3.1 Avaliação Qualitativa

A avaliação qualitativa da árvore de falhas é,

geralmente, feita através da determinação de cortes mínimos, de caminhos mínimos e/ou da análise de falhas múltiplas provocadas por uma causa comum.

Os cortes mínimos de uma árvore de falhas são todos os possíveis conjuntos formados pelo menor número de eventos de falha cuja ocorrência simultânea implica na ocorrência do evento topo. Caminhos mínimos são todos os possíveis conjuntos formados pelo menor número possível de eventos de sucesso cuja ocorrência simultânea implica na não ocorrência do evento topo.

Na prática, a determinação de cortes mínimos é o tipo de avaliação qualitativa mais efetuada, já que além de fornecerem importantes informações sobre as circunstâncias que provocam a ocorrência do evento topo, também são utilizados pela maior parte dos programas computacionais que efetuam avaliações quantitativas da árvore de falhas.

2.3.1.1 Determinação de Cortes Mínimos

Computacionalmente, a determinação dos cortes mínimos pode ser feita por métodos simulatórios ou analíticos. Uma lista contendo a referência dos principais programas usados na determinação de cortes mínimos encontra-se na TABELA 2.3.1-1.

Determinação de Cortes Mínimos Através de Método Simulatório: Os primeiros programas computacionais capazes de determinar cortes mínimos foram elaborados na

TABELA 2.3.1-1 Programas Principais Usados para a Determinação de Cortes Mínimos

Método Simulatório:

CRESSC	[16]
PREP (sub-rotina FATE)	[21]

Método Determinístico:

Algoritmo tipo "Top-Down" :

ALLCUTS	[22]
FATRAN	[23]
MOCUS	[17]
PRIME	[24]
SETS	[25-27]

Algoritmo tipo "Bottom-up" :

BUPCUTS	[28]
FTA-J-CUT	[29]
MFAULT	[30]
MICSUP	[31-32]
Nakashima & Hattori	[33]
PL-MOD	[34-35]
PREP (sub-rotina COMBO)	[21]
WAMCUT	[36]

Algoritmo "Top Down" e "Bottom Up" :

WAMCUT II	[37]
FTAP	[38]
GRAP	[39]

Algoritmo com Operações com "Bits" :

FAULTRAN	[40]
----------	------

Outras Técnicas :

DICOMIC	[41]
ELRAFT	[42]
SIFTA	[43]

década de 1960 e utilizaram o método simulatório. O procedimento comumente seguido por estes programas segue, em linhas gerais, os seguintes passos:

- 1) Simulação do instante de ocorrência dos eventos primários.
- 2) Verificação da ocorrência do evento topo, durante um período de tempo pré-estabelecido pelo programa. Caso o evento topo não ocorra, retorna-se ao primeiro passo. Caso contrário, os eventos primários simulados constituem um corte e são armazenados para serem utilizados no terceiro passo.
- 3) Determinação do menor número de eventos do corte cuja ocorrência simultânea implica na ocorrência do evento topo.

As principais desvantagens do uso do método simulatório na determinação de cortes mínimos são:

- a) não garante que todos os cortes mínimos de ordem inferior a um determinado valor sejam obtidos;
- b) seu tempo de processamento é, em geral, dependente do valor da não-confiabilidade do sistema analisado.

Com a elaboração, a partir do início da década de 70, de programas computacionais que usam modelos anali-

ticos que eliminam as desvantagens citadas acima, os programas computacionais que utilizam métodos simulatórios passaram a ser menos utilizados.

Os programas baseados em métodos simulatórios, conservam, contudo, alguns pontos de superioridade em relação aos programas que utilizam o método analítico, pois, em geral, exigem menor área de memória e seus tempos de processamento são menos influenciados pela ordem dos cortes mínimos (número de eventos que compõem o corte mínimo).

Determinação de Cortes Mínimos Através do Método Analítico: A idéia fundamental do método analítico de determinação de cortes mínimos consiste na aplicação das leis de Boole a todos os portões lógicos da árvore de falhas. Basicamente, os programas computacionais para a determinação de cortes mínimos utilizam algoritmos do tipo "top down" e do tipo "bottom up".

Algoritmo do tipo "Top Down"

O algoritmo do tipo "top down" desenvolve-se a partir da aplicação das leis de Boole ao portão situado imediatamente abaixo do evento topo, que é, desta forma, substituído por expressões constituídas por seus elementos de entrada (portões e/ou eventos primários). Este processo é repetido, sucessivamente, para cada um dos portões lógicos posicionados na entrada do portão transformado, até que não exista nenhum portão lógico a ser desenvolvi-

do.

O primeiro algoritmo do tipo "top down", elaborado para determinar cortes mínimos, foi concebido por Fussel e Vesely, em 1970, o qual baseou-se no fato dos portões lógicos do tipo "AND" aumentarem a ordem dos cortes e os portões do tipo "OR" aumentarem o número de cortes. Posteriormente, Fussel, Henery e Marshall implementaram este algoritmo no programa MOCUS [17]. Outros programas que utilizam algoritmo do tipo "top down" para a determinação de cortes mínimos são: ALLCUTS [22], FATRAM [23], PRIME [24] e SETS [25-27].

Algoritmo do Tipo "Bottom Up"

O algoritmo do tipo "bottom up" desenvolve-se a partir da aplicação das leis de Boole aos portões terminais da árvore de falhas, substituindo-os pelos seus cortes mínimos até que o evento topo seja alcançado.

Os programas MICSUP [31-32] e WAMCUT [36] são exemplos de programas que utilizam o algoritmo do tipo "bottom up" na determinação de cortes mínimos.

2.3.1.2 Determinação de "Prime Implicants"

Nos últimos anos tem sido dada especial atenção ao refinamento da análise de confiabilidade, em virtude da necessidade de, em alguns casos, modelar sistemas através de árvores de falhas com estruturas não-monótonas, isto é, que não sejam capazes de satisfazer, simultaneamente, as

seguintes condições:

- a) todos os eventos primários são relevantes para a ocorrência do evento topo;
- b) a ocorrência de um evento primário não pode causar mudança no estado do evento topo de "presente" para "ausente" (estrutura crescente).

Nestas condições, os cortes mínimos não são capazes de representar todos os menores conjuntos de eventos cuja ocorrência simultânea implique na ocorrência do evento topo, sendo necessário que os "prime implicants" [44] sejam determinados. Os "prime implicants", de um evento qualquer "E" (falha ou sucesso), é um conjunto de eventos cuja ocorrência simultânea implica na ocorrência do evento "E". "Prime implicant" é um "implicant" do evento "E" em que a eliminação de qualquer um de seus eventos faz com que a ocorrência simultânea de seus demais eventos não garanta a ocorrência do evento "E".

Como exemplos de programas capazes de determinar "prime implicants" pode-se destacar os elaborados por Worrell [25-27] e por Kumamoto & Henley [45].

2.3.1.3 Análise de Falhas com Causa Comum

Falhas provocadas por causas comuns são quaisquer ocorrências ou condições que resultem em falhas em mais de um componente. O método comumente utilizado na análise de falhas provocadas por causa comum baseia-se no

exame das causas que podem implicar na ocorrência de todos os eventos primários que compõem um corte mínimo. Exemplos de programas que empregam este tipo de metodologia são: COMCAN [46-47] e BACFIRE [48-49].

2.3.2 Avaliação Quantitativa

A avaliação da probabilidade de ocorrência do evento topo de uma árvore de falhas pode ser efetuada por meio de métodos simulatórios ou por métodos analíticos. A TABELA 2.3.2-1 apresenta uma lista contendo os principais programas usados na determinação de características de confiabilidade de sistemas de engenharia.

2.3.2.1 Método Simulatório: Até o final da década de 1960, apenas programas que utilizavam métodos de simulação encontravam-se disponíveis para a obtenção de informações probabilísticas do evento topo. Dentre os programas elaborados neste período, destaca-se o desenvolvido por Croseti & Kongsoe [51].

A partir do início da década de 1970, com a elaboração de programas utilizando métodos analíticos, houve uma sensível redução na utilização de programas que empregam o método simulatório, já que estes, em geral, requerem um elevado tempo de processamento para avaliarem sistemas com alta confiabilidade, tais como os utilizados na segurança de instalações nucleares.

Vale destacar, contudo, que para reduzir o tempo

TABELA 2.3.2-1 Programas Principais Usados na Avaliação de Características de Confiabilidade de Sistemas de Engenharia

Método Simulatório:

CRESSEX	[50]
Crosetti	[51]
REDIS	[52]
RELY4	[53]
SAFTE	[54]

Método Analítico:

ARM	[55]
Caldarola & Wickenhauser	[56]
FAULNET	[57]
FETA	[58]
FRANTIC	[59]
FRANTIC II	[60]
FTA-J-BAM	[29]
GO	[61]
IMPORTANCE	[62]
KITT 1 & 2	[21]
NOTED	[63]
PAFT F77	[64]
PATREC	[65]
PHAMAS	[66]
PL-MOD	[34]
QAFT	[67]
SALP	[68]
STREUSL	[69-70]
SUPER FOCUS	[71]
WAM-BAM	[72-73]

de processamento de programas que usam o método simulatório, alguns programas, como o RELY4 [53], desenvolvido por Kongsoe, utilizam um método de aceleração do processo de simulação denominado "importance sampling" [74].

2.3.2.2 Método Analítico: O primeiro passo para a avaliação quantitativa da árvore de falhas pelo método analítico consiste na obtenção de uma representação analítica da árvore de falhas em função de seus eventos primários. A representação mais utilizada baseia-se nos cortes mínimos.

Devido à grande quantidade de cálculos necessários para determinação do valor exato da confiabilidade e indisponibilidade de sistemas de engenharia complexos, os programas computacionais frequentemente utilizam métodos aproximados de cálculo [75]. Os principais métodos utilizados pelos programas computacionais são:

- a) método da inclusão-exclusão;
- b) determinação de cotas inferiores (soma de cortes mínimos) e cotas superiores (soma de caminhos mínimos);
- c) método de cotas min-max para eventos primários estatisticamente dependentes.

A maior parte dos programas computacionais utilizam o método da inclusão-exclusão, limitando-se a considerar apenas os termos de menor ordem que garantam um determinado grau de precisão.

O primeiro programa a utilizar o método analítico, KITT [21], foi elaborado por Vesely em 1970, tomando como base a Teoria Cinética de Arvore de Falhas [76-77].

Uma metodologia para a avaliação de sistemas não-monótonos, com componentes podendo adquirir múltiplos estados, foi desenvolvida por Caldarola [76].

2.3.3 Avaliação Quantitativa com Propagação da Incerteza

A influência da incerteza dos dados de ocorrência dos eventos primários sobre o valor da indisponibilidade do sistema, provocada pela ocorrência do evento topo, é, geralmente, avaliada computacionalmente pelos seguintes métodos:

- a) método da discretização [79-81];
- b) método dos momentos [82-83];
- c) método de Monte Carlo [84].

A TABELA 2.3.3-1 apresenta uma lista com os principais programas utilizados na análise de propagação de incerteza. Cabe destacar que o programa SAMPLE [6] foi usado no Relatório WASH-1400 e que o programa ADORAVA [92] foi elaborado no Brasil.

TABELA 2.3.3-1 Programas Principais Usados na Avaliação da Propagação da Incerteza

Método Simulatório:

FRANTIC	[85]
FRANTIC II	[60]
MOCARS	[86]
PROSA-2	[87]
PUFD	[88]
SAMPLE	[6]
STADIC	[89]
STADIC II	[90]
STREUSL	[69-70]

Método do Histograma:

DFD	[91]
-----	------

Método dos Momentos:

ADORAVA	[92]
BOUNDS	[93]
CORRELATE	[94]
SPASM	[95]

Combinação dos Três Métodos Anteriores:

MOMOD	[96]
-------	------

2.3.4 Sistemas Computacionais Utilizados na Análise de Confiabilidade

O uso de sistemas computacionais na análise de confiabilidade de sistemas de engenharia vem se consolidando como a ferramenta mais indicada para se efetuar tarefas complexas, tais como a análise probabilística de segurança de instalações nucleares. Sistemas computacionais são formados por diversos programas, interligados entre si, que efetuam diferentes avaliações baseadas em múltiplos métodos de análise.

Os principais sistemas computacionais atualmente em uso são: RAS [97], WAM [72] e RALLY [16]. A TABELA 2.3.4-1 apresenta um quadro sinótico indicando os programas que compõem cada sistema computacional.

2.3.4.1 Sistema RAS: O sistema computacional RAS ("Reliability Analysis System") é composto pelos programas: MOCUS, FATRAN, SRTPRN, POCUS, KITTI e COMCAN. Os programas MOCUS e FATRAN são usados para determinar cortes mínimos. O programa SRTPRN faz uma ordenação dos cortes mínimos segundo sua importância. Os programas POCUS e KITTI são usados para calcular características de confiabilidade de sistemas de engenharia. Finalmente, o programa COMCAN efetua uma análise das falhas múltiplas provocadas por uma causa comum.

Como característica principal, o RAS é capaz de efetuar análise para múltiplas fases de missão, isto é,

TABELA 2.3.4-1 Principais Sistemas Computacionais de Análise de Confiabilidade

SISTEMA	PROGRAMAS	REF.
RALLY	- TREBIL - TIMBER - CRESSEX - FESIVAR - CRESSC - CRESSCN - SLAP-MP - KARI - STREUSL	[16]
WAM	- WAMCUT - WAMBAM - SPASM - WANTAP - WANDRAW	[72]
RAS	- MOCUS - POCUS - KITT-1 - SRTPRN - FATRAN - COMCAN	[97]

múltiplos intervalos de tempo onde a análise deve ser efetuada com diferentes configurações da árvore de falhas e/ou diferentes taxas de ocorrência dos eventos primários.

2.3.4.2 Sistema WAM: O sistema computacional WAM é constituído pelos programas: WAMCUT, WAMBAM, SPASM, WAMTAP e WAMDRAW. O programa WAMCUT determina os cortes mínimos e os fornece ao programa WAMBAM que os utiliza para efetuar avaliações de confiabilidade do sistema de engenharia analisado. O programa SPASM realiza uma avaliação da propagação de incerteza.

2.3.4.3 Sistema RALLY: O sistema computacional RALLY é constituído pelos programas TREBIL, TIMBER, CRESSEX, FESIVAR, CRESSC, CRESSCN, SLAP-MP, KARY e STREUSL e é capaz de avaliar árvores de falhas contendo portões lógicos do tipo "AND", "OR" e "NOT". O sistema RALLY é utilizado em diversas empresas tais como: Bayer AG, KWU e a CNEN/RJ no Brasil.

A versão do sistema RALLY disponível na CNEN/RJ [98] é constituída apenas pelos programas TREBIL, CRESSC, CRESSEX e STREUSL, e apresenta diversas deficiências, tais como documentação limitada e inúmeras restrições metodológicas.

O programa TREBIL efetua uma análise da consistência dos dados de entrada do sistema RALLY e organiza-os para a utilização dos demais programas. O programa CRESSC determina cortes mínimos. O programa CRESSEX efetua avali-

ações de confiabilidade através do método simulatório. O programa STREUSL determina, através do método analítico, a indisponibilidade média de sistemas de engenharia e efetua a análise da propagação da incerteza dos dados de ocorrência dos eventos primários. A TABELA 2.3.4.3-1 apresenta um quadro sinótico das principais avaliações efetuadas pelos programas que compõem o sistema RALLY.

As principais características do sistema RALLY são:

- a) opera com árvores de falhas com estruturas monótonas;
- b) permite que sejam avaliados sistemas com eventos não-reparáveis que ocorrem em demanda e eventos reparáveis testados e/ou monitorados;
- c) considera a independência entre os eventos;
- d) considera que as taxas de ocorrência dos eventos primários são constantes com o tempo.

Uma versão aperfeiçoada do sistema computacional RALLY, denominada RALLY-M, vem sendo utilizado no IPEN-CNEN/SP desde 1985. A apresentação deste novo sistema é efetuada no capítulo 3. A descrição específica de cada um de seus programas, incluindo as principais diferenças em relação aos programas do sistema RALLY, são apresentadas a partir do capítulo 4.

TABELA 2.3.4.3-1 Avaliações Efetuadas pelo Sistema RALLY

PROGR.	AVALIAÇÃO QUALITATIVA		AVALIAÇÃO QUANTITATIVA	
	CALCULO EFETUADO	METODO	CALCULO EFETUADO	METODO
CRKSSC	Cortes mínimos.	Simulação.	Avaliação preliminar da indisponibilidade média.	Cálculo através da soma do produto das indisponibilidades médias dos componentes dos cortes mínimos.
CRKSKK	Cortes mínimos.	Simulação.	Não-confiabilidade.	Relação entre o número de jogos efetuados e o número de jogos falhos.
			Indisponibilidade média.	Proporção do tempo em que o sistema ficou indisponível em relação ao tempo total dos jogos.
SKKSKL	---	---	Indisponibilidade média.	Integração numérica gaussiana.
			Parâmetros da distribuição de incerteza da indisponibilidade média do sistema.	Obtenção de uma amostra de indisponibilidade média do sistema a partir de valores simulados para a taxa ou probabilidade de falhas.

CAPÍTULO 3

3 PROGRAMA RALLY-M

3.1 INTRODUÇÃO

O sistema computacional RALLY-M foi desenvolvido no Departamento de Tecnologia de Reatores do IPEN-CNEN/SP para efetuar a análise de confiabilidade de sistemas de engenharia complexos, sendo constituído pelos programas: TREBIL-M, CRESSC-M, CRESSEX-M, STREUSL-M e MOCUS-M. Os quatro primeiros programas possuem características parecidas aos programas correspondentes do sistema computacional RALLY [16], porém com inúmeras melhorias. O programa MOCUS-M foi desenvolvido a partir do programa MOCUS [17], sendo capaz de processar árvores de falhas que representem estruturas não-monótonas.

Para evitar confusões com sistemas de engenharia, o sistema computacional RALLY-M passará a ser denominado nesta dissertação de programa RALLY-M e os seus programas serão chamados de módulos.

3.2 AVALIAÇÕES EFETUADAS PELO PROGRAMA RALLY-M

As principais avaliações do programa RALLY-M, com a indicação dos módulos que as efetuam, são apresentadas a seguir:

Avaliações Qualitativas

- cortes mínimos (MOCUS-M, CRESSC-M, CRESSEX-M);
- caminhos mínimos (MOCUS-M).

Avaliações Quantitativas a Nivel de Sistema**Avaliações Pontuais:**

- indisponibilidade pontual (STREUSL-M);
- indisponibilidade média (STREUSL-M e CRESSEX-M);
- não-confiabilidade pontual (CRESSEX-M);
- valor máximo da indisponibilidade e instante em que ela ocorre (STREUSL-M);
- tempo médio entre falhas (CRESSEX-M);
- frequência de falhas (CRESSEX-M).

Propagação da Incerteza (STREUSL-M) :

- média, desvio padrão e mediana da distribuição de probabilidade que representa a incerteza da indisponibilidade média do sistema;
- valores da distribuição de probabilidade obtida nos percentis 5, 10, 15, ... , 95%;
- gráficos da função de distribuição de probabilidade e da função de densidade da distribuição da indisponibilidade média simulada;
- gráficos da função de distribuição de probabilidade e da função de densidade da distribuição de indisponibilidade média aproximada à normal e log-normal;
- teste de Kolmogorov para a análise da aderência.

Avaliações Quantitativas a Nivel de Componentes

- medidas de importância de eventos primários (CRESSEX-M);

- indisponibilidade média provocada pela ocorrência de eventos primários (CRESSEX-M);
- classificação dos cortes mínimos em ordem crescente de probabilidade de ocorrência (CRESSEX-M).

Avaliações de Caráter Computacional

- análise de erros na estrutura lógica da árvore (TREBIL-M);
- indicação do tempo de processamento gasto nas principais etapas de cálculo dos módulos CRESSC-M, CRESSEX-M e STREUSL-M;
- indicação das áreas de memória requeridas pelas principais variáveis do módulo MOCUS-M.

3.3 ESTRUTURA FUNCIONAL DO PROGRAMA RALLY-M

Funcionalmente, o programa RALLY-M pode ser subdividido em três blocos, que desempenham as tarefas de Gerenciamento dos Dados de Entrada do Programa, de Determinação de Cortes Mínimos e de Avaliação Quantitativa da Confiabilidade.

O fluxo de informações entre os módulos do programa RALLY-M é apresentado na FIGURA 3.3-1. Os critérios de encerramento do processamento de cada módulo encontram-se descritos na TABELA 3.3-1.

3.3.1 Bloco Gerenciador de Dados

O bloco gerenciador de dados é constituído por um único módulo, denominado TREBIL-M, o qual executa as seguintes operações:

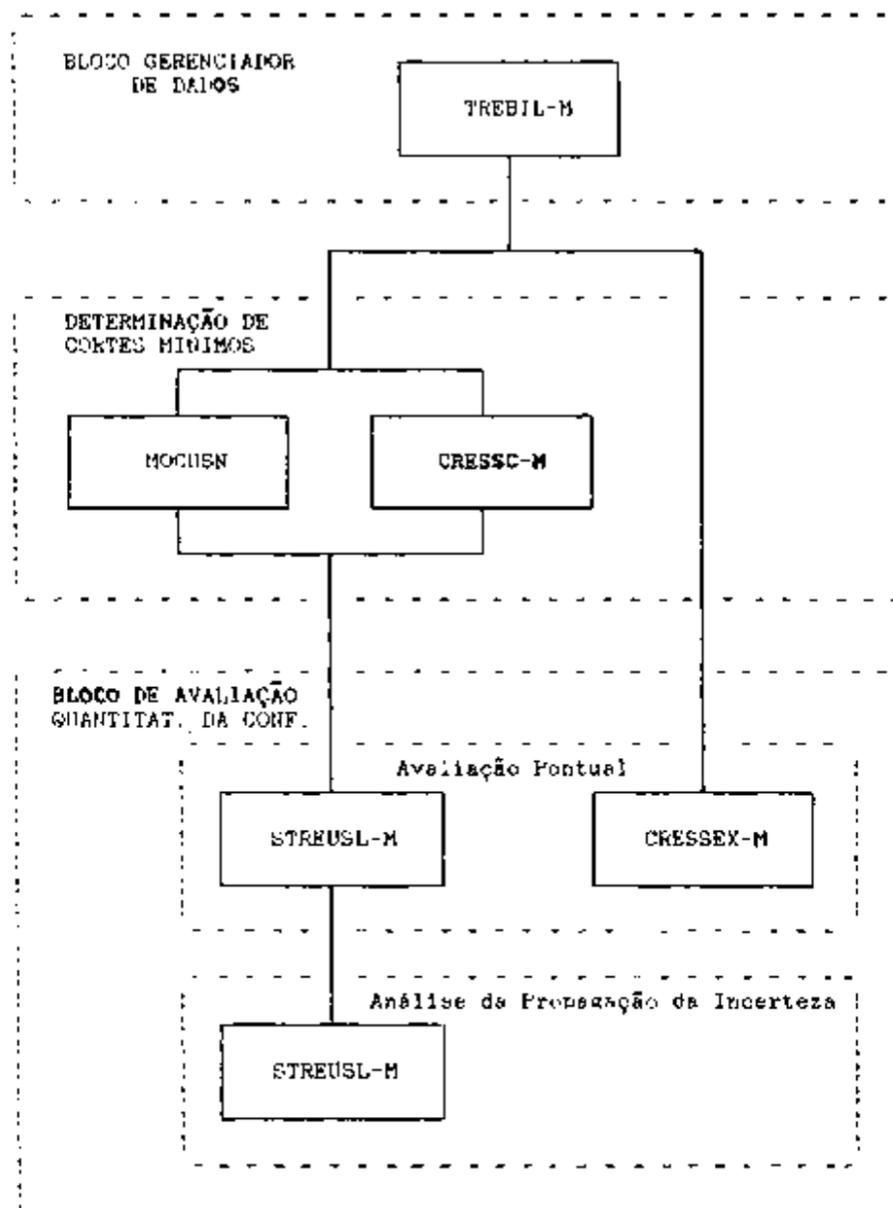


FIGURA 3.3-1 Fluxo de Informações do Programa RALLY-M

TABELA 3.3-1 Critérios de Encerramento do Processamento dos Módulos de Programa RALLY-M

CARACTERÍSTICA	NOCUS-M	CRSSC-M	CRSSK-E	STRBSL-M
CRITÉRIO DE ENCERRAMENTO DO PROCESSAMENTO ESTIPULADO PELO USUÁRIO	- Obtenção de todos os cortes mínimos de orden igual ou inferior a um valor pré-estipulado pelo usuário.	- Tempo de processamento - Número de cortes mínimos.	- Tempo de processamento - Coeficiente de variação da confiabilidade menor que um valor pré-definido.	- Tempo de processamento.

- a) lê as informações de entrada do programa RALLY-M;
- b) analisa a consistência dos dados lidos, tendo em vista a área de memória disponível;
- c) examina a existência de possíveis erros na lógica da árvore;
- d) constrói, na sub-rotina LOGIDR, a expressão da função de estrutura da árvore de falhas;
- e) prepara as informações para serem usadas pelos módulos MOCUS-M, CRESSC-M, CRESSEX-M e STREUSL-M.

3.3.2 Bloco de Determinação de Cortes Mínimos e "Implicants"

O bloco de determinação de cortes mínimos é constituído pelos módulos CRESSC-M e MOCUS-M. O módulo CRESSC-M determina cortes mínimos de árvores de falhas que representem estruturas monótonas através do método simulatório. O módulo MOCUS-M determina, além dos cortes mínimos de estruturas monótonas, os termos de uma forma disjuntiva normal ("implicants") de estruturas não-monótonas, utilizando para isto um algoritmo analítico do tipo "top down".

3.3.3 Bloco de Avaliação Quantitativa da Confiabilidade

O bloco de avaliação quantitativa é constituído pelos módulos CRESSEX-M e STREUSL-M. O módulo CRESSEX-M

utiliza o método de simulação de Monte Carlo em sua análise, estando capacitado a determinar a não-confiabilidade e indisponibilidade média de sistemas. O módulo STREUSL-M utiliza um método de integração numérica, baseado na soma da indisponibilidade média pontual dos cortes mínimos, para determinar a indisponibilidade média de sistemas.

O módulo STREUSL-M efetua, ainda, através do método de simulação, a análise da influência da propagação da incerteza associada às taxas de ocorrência e probabilidade de ocorrência em demanda dos eventos primários da árvore sobre a indisponibilidade média do sistema. Especificamente, o módulo STREUSL-M efetua a análise da propagação de incerteza de dados de ocorrência de eventos primários, definidos por parâmetros das distribuições de probabilidade: normal, log-normal, uniforme ou log-uniforme.

As principais limitações metodológicas do programa RALLY-M são:

- a) a consideração de independência estatística entre os eventos primários é uma suposição que nem sempre é verificada, podendo, em alguns casos introduzir erros consideráveis nos resultados;
- b) cada execução é capaz de avaliar apenas uma fase de missão.

3.4 CARACTERÍSTICAS DA ÁRVORE DE FALHAS ANALISADA

O programa RALLY-M é capaz de efetuar a análise de confiabilidade de sistemas de engenharia representados por árvores de falhas com portões lógicos do tipo "AND", "OR", "NOT" e K de N representando lógicas de votação 2 de 3, 2 de 4, 3 de 4 ou 3 de 6. Além disso, permite que sejam introduzidas as seguintes categorias de eventos primários:

a) **Não-Reparáveis:** eventos que ocorrem no tempo, segundo uma distribuição exponencial e que, após terem ocorrido, não podem ser eliminados.

A expressão que determina a não-confiabilidade provocada por eventos não-reparáveis é apresentada a seguir:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.4-1)$$

onde λ é a taxa de ocorrência do evento.

b) **Testados:** eventos que ocorrem no tempo, segundo uma distribuição exponencial e que, após a constatação de sua ocorrência, feita através de testes periódicos, podem ser eliminados (reparados).

Considera-se que, após cada teste, o componente voltará a se apresentar tão bom quanto novo. Os reparos, caso sejam necessários, são efetuados em períodos de dura-

ção constante. O valor da indisponibilidade pontual ($Q(t)$) é obtido pela expressão:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t^*} \quad (3.4-2)$$

Onde t^* é o período compreendido entre o instante do último teste antes de "t" e o instante "t", isto é:

$$t^* = t - \text{TWART INT} \left[\frac{t}{\text{TWART}} \right], \quad (3.4-3)$$

onde TWART é o intervalo entre testes e INT extrai o valor inteiro da expressão entre colchetes.

A indisponibilidade média provocada por eventos testados é dada por:

$$\begin{aligned} Q(t) &= \frac{1}{T_{\max}} \left[n \int_0^{\text{TWART}} (1 - e^{-\lambda t}) dt + \int_0^{t^*} (1 - e^{-\lambda t}) dt \right] \\ &= \frac{1}{T_{\max}} \left[n \left(\text{TWART} + \frac{e^{-\lambda \text{TWART}}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) + t^* + \frac{e^{-\lambda t^*}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right] \end{aligned} \quad (3.4-4)$$

onde T_{\max} é o tempo de observação do sistema,

$$n = \text{INT} \left[\frac{T_{\max}}{\text{TWART}} \right]$$

$$T^* = T_{\max} - (n \text{ TWART}).$$

Nos casos em que a área compreendida entre o último teste (instante $n \cdot \text{TWART}$) e T_{\max} representar menos que 1 % da soma das demais áreas, a indisponibilidade média é aproximada por:

$$\bar{Q}(t) = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda \text{ TWART}}}{\lambda \text{ TWART}} \quad (3.4-5)$$

c) **Testados Periodicamente:** são eventos testados que pertencem a grupos de eventos de mesmo período entre testes, que são testados sequencialmente. Exemplificando, para um grupo com "n" eventos, o i-ésimo evento do grupo será testado nos instantes " IT_m ", onde:

$$IT_m = i \frac{\text{TWART}}{n} + \text{TWART} (m - 1) \quad \text{unidades de tempo,}$$

sendo TWART o intervalo entre testes dos eventos do grupo e "m" é o número do teste do i-ésimo evento.

d) **Monitorados:** eventos reparáveis, que ocorrem no tempo, segundo uma distribuição exponencial, cujo estado "presente" ou "ausente" é constantemente examinado.

As expressões de indisponibilidade pontual e média usadas no programa RALLY-M são apresentadas a seguir [99].

Indisponibilidade Pontual

$$Q(t) = \frac{\lambda}{(\lambda + w)} - \frac{\lambda e^{-(\lambda+w)t}}{(\lambda + w)} \quad (3.4-6)$$

Indisponibilidade de Média

$$Q(t) = \frac{1}{T_{max} (\lambda + w)} (T_{max} + e^{-(\lambda+w)T_{max}}) \quad (3.4-7)$$

sendo w a taxa de reparo.

e) **Demandas:** eventos que ocorrem quando o componente se encontra sob demanda. Estes eventos representam falhas inerentes aos componentes, tais como falha na partida de uma bomba ou na mudança de estado e que, na hipótese de terem ocorrido, não podem ser eliminados durante o tempo de observação do sistema (T_{max}).

A probabilidade de falhas em demanda incorpora diversas falhas tais como: falha entre duas demandas consecutivas, falha na demanda e falha durante o tempo requerido para que a transição seja efetuada. A probabilidade de falha em demanda é constante, independentemente do número de demandas efetuadas.

O valor da probabilidade de falha em demanda é obtido de bases de dados apropriadas e deve ser fornecido

na entrada de dados do programa RALLY-M.

f) Acionamento ("house events"): eventos que representam uma chave de acionamento ou de eliminação de ramos da árvore de falhas.

3.5 FLEXIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO

O programa RALLY-M possui grande flexibilidade, permitindo a escolha "a priori" dos módulos cuja execução é desejada. Além disso, as avaliações que envolvem simulações nos módulos CRESSC-M, CRESSEX-M e STREUSL-M, podem ser reiniciadas a partir das informações obtidas em processamentos anteriores. Outra característica que dá bastante flexibilidade ao programa é que, além do evento topo, até 100 eventos intermediários da árvore de falhas podem ser avaliados em um mesmo processamento.

O programa RALLY-M apresenta uma entrada de dados bem documentada [100] e relatórios de saída auto-explicativos.

3.6 CARACTERÍSTICAS COMPUTACIONAIS E DE DIMENSIONAMENTO

O programa programa RALLY-M está codificado em FORTRAN IV, estando implantado no computador IBM-4341 do IPEN-CNEN/SP. Vale salientar que uma nova versão do programa RALLY-M especialmente elaborada para operar em microcomputadores do tipo PC encontra-se em fase final de

elaboração.

Informações sobre a complexidade computacional e a área de memória requerida pelos módulos do programa RALLY-M encontram-se na TABELA 3.6-1. O dimensionamento máximo de parâmetros e variáveis de cada módulo do programa RALLY-M encontram-se na TABELA 3.6-2.

TABELA 3.6-1 Características Computacionais dos Módulos do Programa RALLY-M

CARACTERÍSTICA	YREBIL-M	NOCUS-M	CRESSC-M	CRESSY-M	SYREUSL-M
COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL	- Média	- Grande	- Pequena	- Média	- Média
ÁREA DE MEMÓRIA (bytes)	541.744	516.744	256.856	219.512	434.352

TABELA 3.6-2 Dimensionamento Máximo de Parâmetros e Variáveis dos Módulos do Programa RALLY-M

MODELO	NÚMERO MÁXIMO DE PORTOS	NÚMERO MÁXIMO DE EVENTOS PRIMÁRIOS	NÚMERO MÁXIMO DE ENTRADAS DE PORTOS	NÚMERO MÁXIMO DE CORTES MÍNIMOS	ORDEM MÁXIMA DOS CORTES MÍNIMOS	NÚMERO MÁXIMO DE EVENTOS ESPECIAIS	NÚMERO MÁXIMO DE JOGOS SIMULADOS	NÚMERO MÁXIMO DE EVENTOS DE AÇIONAMENTO
TREBIL-B	2000	2000	6	---	---	100	---	100
MOCS-B	2000	(a)	7	(a)	(a)	100	---	100
CRSSC-B	---	600	---	8000	9	---	(b)	---
CRSSX-B	---	600	---	5000	9	50	(b)	---
STRUSL-B	---	500	---	5000	9	100	2000	---
Sub-rotina LOGIDB	1000	1000	---	---	---	100	---	---

Notas:

(a) Depende do valor dimensionado para o vetor W (ver seção 4.3.5).

(b) Não há limite de número de jogos.

CAPÍTULO 4

4 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO MOCUS-M

4.1 INTRODUÇÃO

O módulo MOCUS-M, elaborado no Departamento de Tecnologia de Reatores do IPEN-CNEN/SP, integra, junto com o módulo CRESSC-M, o Bloco de Determinação de Cortes Mínimos do programa RALLY-M. O módulo MOCUS-M é uma versão do programa MOCUS, capacitada para determinar, através de algoritmos determinísticos, além de cortes e caminhos mínimos, como o programa MOCUS, os termos de uma forma disjuntiva normal ("implicants") de árvores de falhas que representem estruturas não-monótonas.

O APENDICE B apresenta uma análise comparativa das principais características do módulo MOCUS-M e o programa WAMCUT.

4.2 PRINCIPAIS MODIFICAÇÕES INTRODUZIDAS NO PROGRAMA MOCUS

A elaboração do módulo MOCUS-M envolveu mudanças em praticamente todas as rotinas do programa MOCUS. O módulo MOCUS-M mantém, contudo, a estrutura básica do programa MOCUS. As principais mudanças implementadas na elaboração do módulo MOCUS-M, foram:

- a) introdução de novos algoritmos e adaptação dos

já existentes para permitir a determinação dos termos de uma forma disjuntiva normal de árvores de falhas com representação booleana não-monótona;

- b) inclusão de comandos de leitura e gravação de dados que permitem o acoplamento do programa MOCUS-M ao programa RALLY-M;
- c) melhoria do relatório de saída, que passou a ser totalmente escrito em português, a contar com novas tabelas e incorporar informações adicionais às tabelas já existentes.

4.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO MOCUS-M

Estruturalmente, o módulo MOCUS-M está dividido nos Segmentos de Preparação de Dados e de Determinação dos Termos de uma Forma Disjuntiva Normal. Para o caso particular em que a árvore de falhas representar uma estrutura monótona, os termos da forma disjuntiva normal serão os cortes mínimos da árvore. A FIGURA 4.3-1 apresenta um resumo da sequência de procedimentos executados pelo módulo MOCUS-M.

A fim de simplificar o texto, o termo "corte mínimo" passará ser usado indistintamente, neste capítulo, para designar os resultados obtidos pelo módulo MOCUS-M, significando, portanto, os termos de uma forma disjuntiva normal, no caso da árvore representar uma estrutura não-

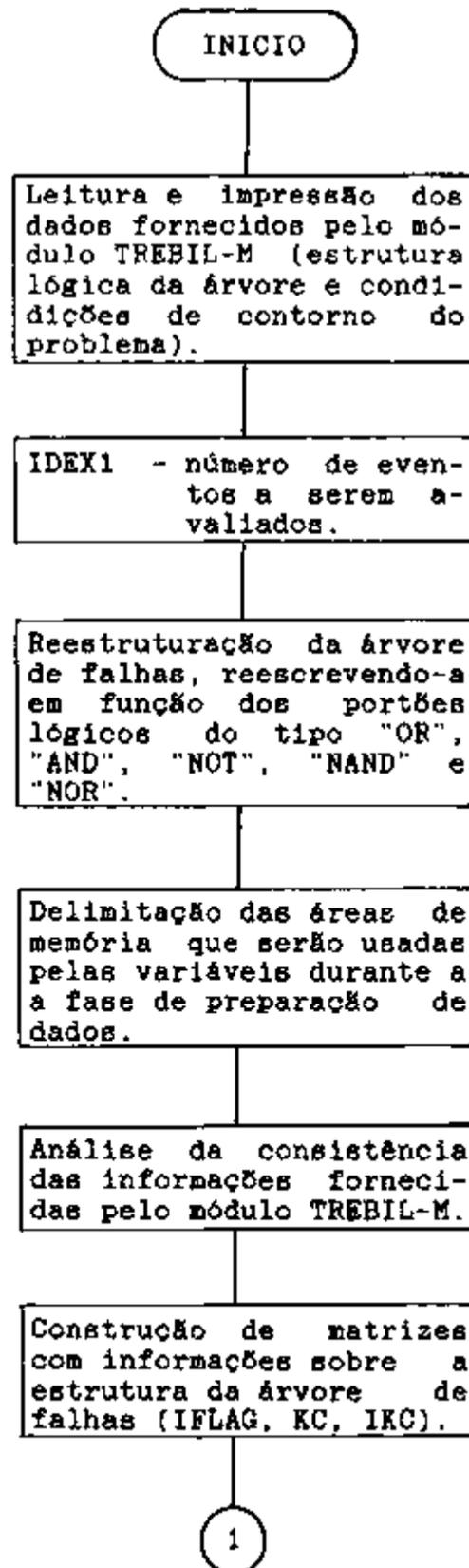


FIGURA 4.3-1 Esquema Geral do Módulo MOCUSN

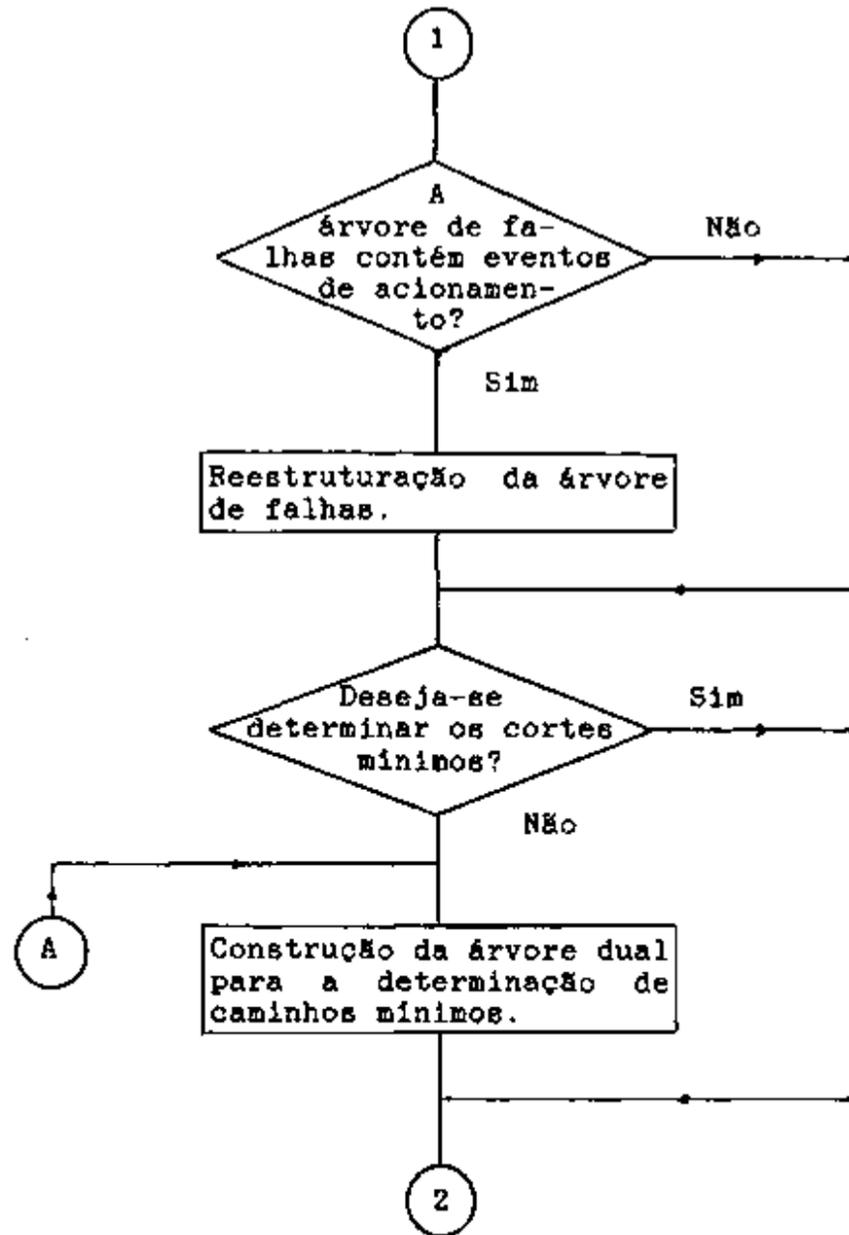


FIGURA 4.3-1 Esquema Geral do Módulo MOCUSN (Continuação)

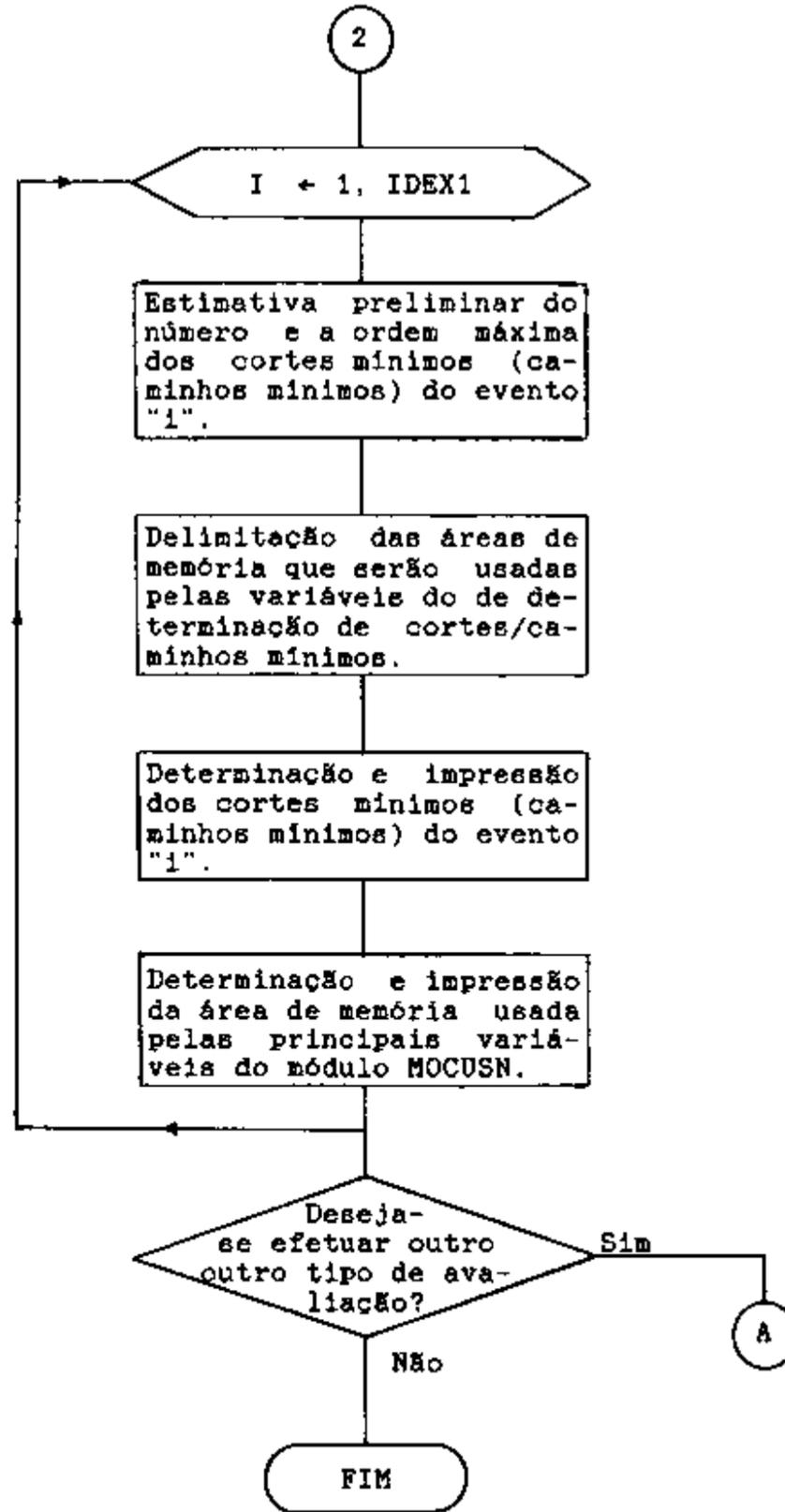


FIGURA 4.3-1 Esquema Geral do Módulo MOCUSN (Continuação)

monótona, e os cortes mínimos propriamente ditos, para árvores que representem estruturas monótonas.

4.3.1 Segmento de Preparação de Dados

O Segmento de Preparação de Dados envolve as atividades de: Leitura de Dados, Análise da Consistência dos Dados, Reestruturação da Árvore de Falhas, Delimitação de Áreas de Memória para as Variáveis do Módulo MOCUS-M e, finalmente, Preparação de Variáveis de Entrada para o Algoritmo de Determinação dos Cortes Mínimos.

4.3.1.1 Leitura de Dados: A leitura de dados é efetuada a partir de dados gravados pelo módulo TREBIL-M e armazenados na unidade de arquivo 19. A TABELA 4.3.1.1-1 apresenta as principais informações contidas neste arquivo.

4.3.1.2 Análise da Consistência dos Dados: O módulo MOCUS-M examina a consistência da lógica da árvore e verifica se todas as variáveis e parâmetros fornecidos encontram-se corretamente dispostos em seus campos ou apresentam conflito com o dimensionamento permitido.

4.3.1.3 Reestruturação da Árvore de Falhas: A compatibilização da estrutura fornecida na entrada de dados com a estrutura utilizada pelo módulo MOCUS-M é feita nas seguintes circunstâncias:

TABELA 4.3.1.1-1 Informações de Entrada Fornecidas pelo Módulo TREBIL-M ao Módulo MOCUS-M

NOME DA VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
W, GAT	Estrutura lógica da árvore de falhas.
NGTE	Nome dos eventos cujos cortes mínimos e/ou caminhos mínimos serão determinados.
IDEX1	Tipo de cálculo a ser efetuado (cortes mínimos e/ou caminhos mínimos).
ITMAX	Ordem máxima dos cortes mínimos desejada pelo usuário.
DUM2	Informação para gravação de cortes mínimos, para utilização futura.

a) Quando algum portão do tipo "AND" ou "OR", for conectado à entrada de um portão do tipo "NOT": Nestas circunstâncias, o portão "NOT" e o portão conectado são aglutinados em um único portão do tipo "NAND" ou "NOR", respectivamente. Este procedimento é necessário, pois, embora o módulo MOCUS-M opere internamente com portões do tipo "NOT", "NOR", "NAND", "AND" e "OR", o módulo TREBIL-M fornece a estrutura da árvore de falhas em função dos portões "NOT", "AND" e "OR".

b) Quando se desejar a determinação dos caminhos mínimos: Nestas circunstâncias, a árvore de falhas será substituída pela árvore dual, isto é, reestruturada pela substituição dos portões do tipo "AND", "OR", "NAND" e "NOR", pelos portões do tipo "OR", "AND", "NOR" e "NAND", respectivamente.

c) Quando existirem eventos de acionamento ("house events"): Neste caso, a estrutura da árvore será compactada, conforme o procedimento apresentado na TABELA 4.3.1.3-1.

4.3.1.4 Delimitação de Areas de Memória: As áreas de memória requeridas para armazenar variáveis indexadas, informações de controle do processamento e parâmetros, são alocadas pelo próprio módulo MOCUS-M, dentro da área disponível de um vetor "W", dimensionado em dupla precisão (8 bytes por palavra) na rotina (programa) principal. A FIGURA 4.3.1.4-1 ilustra a utilização da memória requeri-

TABELA 4.3.1.3-1 Procedimento de Compactação da Arvore Devido a Presença de Eventos de Acionamento

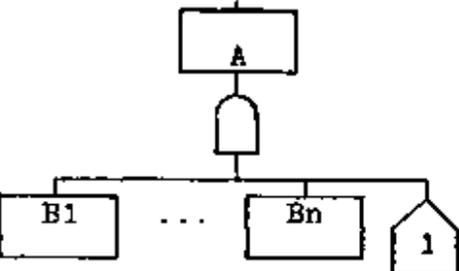
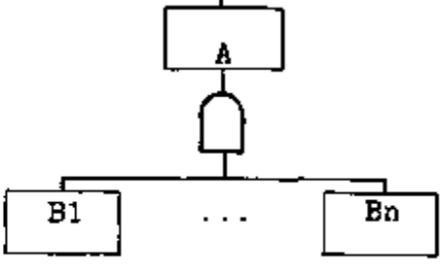
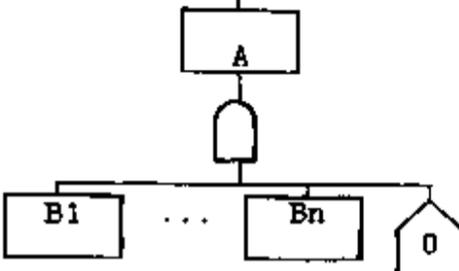
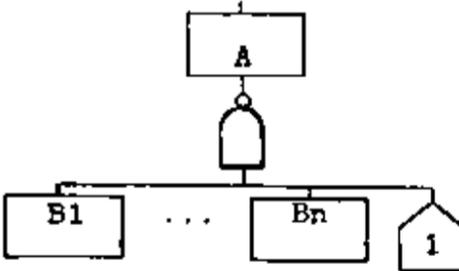
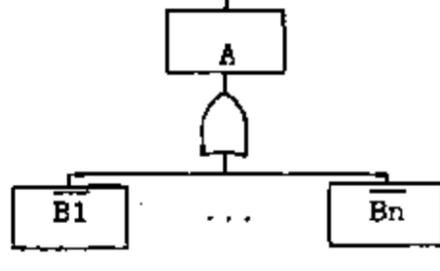
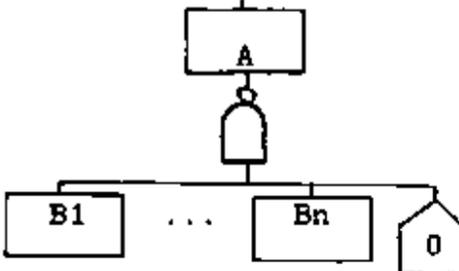
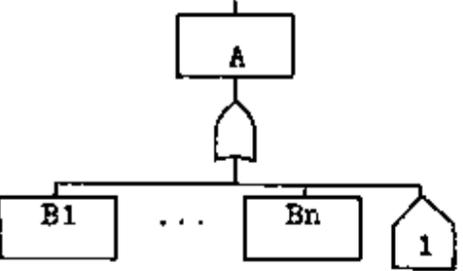
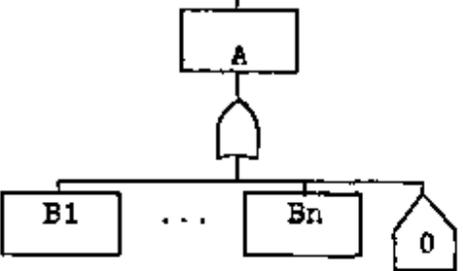
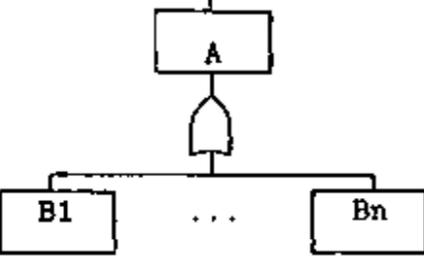
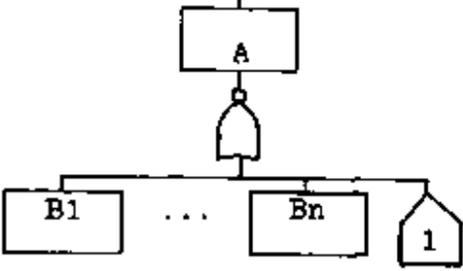
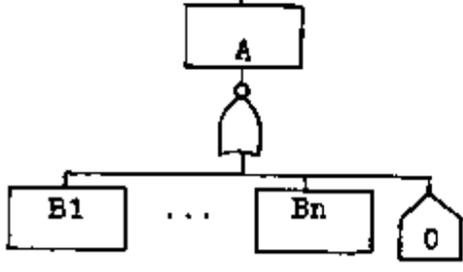
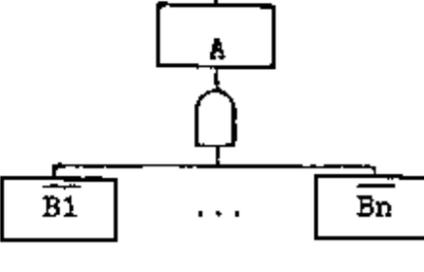
Estrutura Original	Estrutura Compactada
	
	
	
	

TABELA 4.3.1.3-1 Procedimento de Compactação da Arvore Devido a Presença de Eventos de Acionamento (Continuação)

Estrutura Original	Estrutura Compactada
	
	
	
	

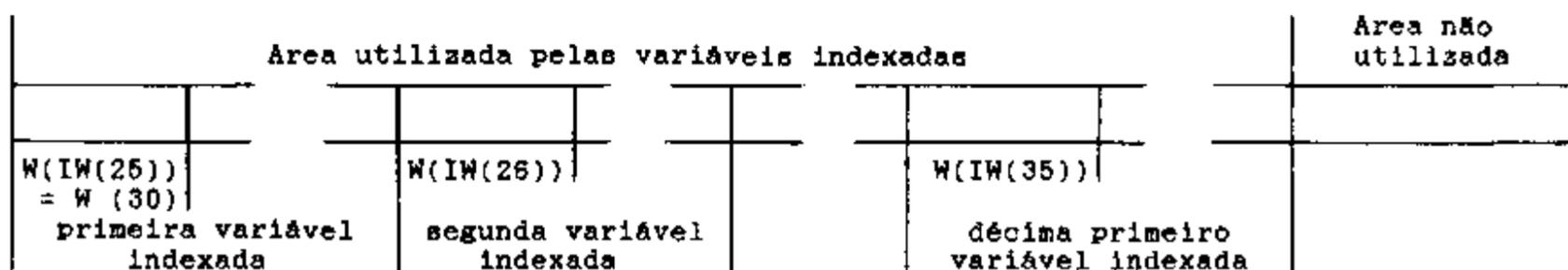
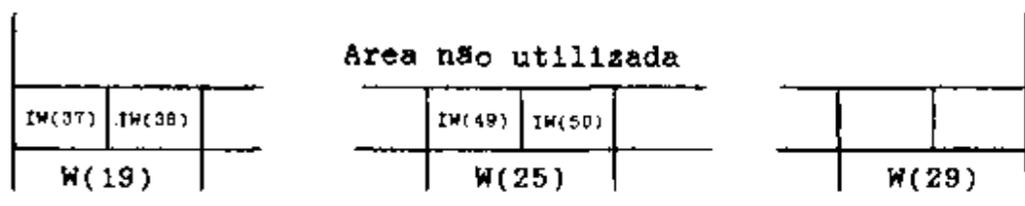
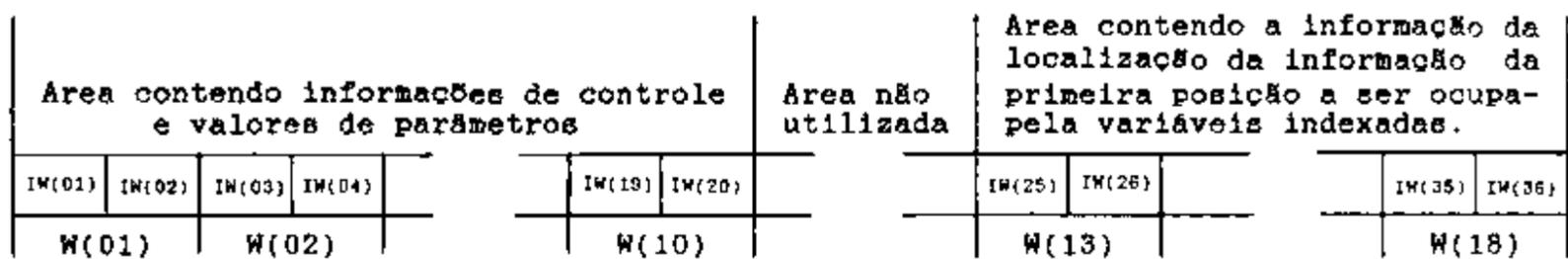


FIGURA 4.3.1.4-1 Esquema da Ocupação da Area do Vetor "W" na Fase de Preparação de Dados

da pelo vetor "W" no Segmento de Preparação de Dados.

As 25 primeiras palavras do vetor "W" compartilham a mesma área de memória de 50 palavras de um vetor auxiliar, "IX", do tipo inteiro com 4 bytes por palavra. As informações de controle do processamento e dos parâmetros usados na avaliação são definidas nas primeiras 20 palavras de "IW" (IW(1) a IW(20)) e, desta forma, armazenadas em "W" (W(1) a W(10)). A área compreendida de IW(21) a IW(24) não é usada para armazenar informações.

A definição da primeira posição a ser ocupada pelas variáveis indexadas, dentro do vetor "W", são definidas entre IW(25) e IW(36), isto é, entre W(13) e W(18). Estes valores são estimados por expressões que consideram o número de portas lógicas (NG), o número de eventos primários (NI) e a área ocupada pelas variáveis cujas posições foram anteriormente definidas.

Ao final do Segmento de Preparação de Dados do módulo MOCUS-M, as variáveis alocadas a partir de W(IW(31)) tornam-se irrelevantes e duas novas variáveis (ICS e IT) são dimensionadas. ICS e IT representam, respectivamente, a matriz indicadora de cortes e o vetor indicador do número de elementos (portas e eventos primários) das linhas da matriz ICS. A primeira posição a ser ocupada por estas variáveis é definida em IW(31) e IW(32), respectivamente. O vetor IT ocupará a área compreendida entre W(IW(31)) e W(IW(32)-1) e a matriz ICS a área com-

preendida entre W(IW(32)) até, no máximo, a última palavra de W.

Determinação do Número de Palavras

O número total de palavras usadas por "W" pode ser previamente estimado, pelo usuário, em função dos dados da árvore de falhas fornecida e da estimativa do número e ordem máxima dos cortes mínimos (número de eventos do corte) a serem obtidos.

A estimativa do número de palavras ("NP") que serão usadas pelo vetor "W" é obtida pelo maior valor encontrado entre as expressões (4.3.1.4-1) e (4.3.1.4-2).

$$\begin{aligned}
 NP = & 10 \text{ NG} + 3 \text{ NE} + 39 + 2 \text{ INT}\left(\frac{\text{NG} + 3}{4}\right) + \\
 & + 1 \text{ INT}\left(\frac{7 \text{ NG} + 3}{4}\right) + \\
 & + 3 \text{ INT}\left(\frac{\text{NG} + 2}{2}\right) + \\
 & + \text{INT}\left(\frac{\text{NG} + 1}{2}\right) \qquad (4.3.1.4-1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 NP = & \text{NG} + 3 \text{ NE} + 30 + \text{INT}\left(\frac{\text{NG} + 1}{2}\right) + \\
 & + \text{INT}\left(\frac{\text{NG} + 3}{4}\right) + \text{INT}\left(\frac{7 \text{ NG} + 3}{4}\right) + \\
 & + \text{INT}\left[\frac{1,1}{4} \left\{((\text{NCOL} + 1) \text{ NLIM}) + 3\right\}\right] \\
 & \qquad (4.3.1.4-2)
 \end{aligned}$$

Onde :

INT ----- Valor inteiro do termo localizado imediatamente à direita.

NP ----- Número de palavras do vetor "W".

NG ----- Número de portões efetivos (portões da árvore reestruturada).

NE ----- Número de eventos primários.

NLIN ----- Número máximo de cortes obtidos durante o processamento do módulo MOCUS-M.

NCOL ----- Número máximo, desejado, de eventos dos cortes encontrados.

4.3.1.5 Preparação de Variáveis: A TABELA 4.3.1.5-1 apresenta as principais variáveis definidas para serem usadas no Segmento de Determinação de Cortes Mínimos.

4.3.2 Segmento de Determinação de Cortes Mínimos

A determinação de cortes mínimos é efetuada por um algoritmo analítico que se desenvolve no sentido do topo para a base da árvore de falhas (algoritmo do tipo "top down"). Este algoritmo considera, além dos portões lógicos do tipo "AND" e "OR", permissíveis pelo programa MOCUS, os portões do tipo "NOT", "NOR" e "NAND".

O desenvolvimento deste algoritmo envolve uma série de procedimentos sobre portões lógicos em uma matriz indicadora de cortes mínimos (matriz ICS). Os portões do tipo "OR" e "NAND" aumentam o número de linhas da matriz ICS e os do tipo "AND" e "NOR" o de colunas. Os portões do tipo "NOT" são usados apenas para indicar o complemento

TABELA 4.3.1.5-1 Variáveis Definidas no Segmento de Preparação de Dados

VARIAVEL	DESCRIÇÃO
NG	Número de portões da árvore efetiva ¹ (portões "OR", "AND", "NAND", "NOR" e "NOT").
NI	Número de eventos primários da árvore efetiva ¹ .
P	Indicador do portão lógico. P = 1, 2 ... NG
IKC(P)	Número de entradas no portão P.
IFLAG(P)	Indicador do tipo do portão lógico P. IFLAG(P) = "AND", "OR", "NOR", "NAND" ou "NOT".
KC(P,J)	Indicador do J-ésimo elemento de entrada do portão P. J = 1, 2 ... IKC(P)
NCOL	Indica o maior número de componentes dos cortes mínimos (estimativa preliminar não considerando a existência eventos primários repetidos).
NROW	Indica o maior número de cortes mínimos que poderão existir sem que haja insuficiência de área de memória.

Nota: (¹) A árvore de falhas é dita efetiva após ter passado pelo processo de reestruturação (veja seção 4.3.1.3)

de eventos primários.

O algoritmo "top down" é iniciado ao se estabelecer que $ICS(1,1)$ representa o portão "P" localizado imediatamente abaixo do evento que se deseja avaliar. A seguir, um dos algoritmos definidos na TABELA 4.3.2-1 é aplicado sobre o portão "P", de acordo com sua função lógica. A partir daí, o processo se repete para todos os portões que se situarem na primeira coluna da matriz ICS. A aplicação dos algoritmos definidos na TABELA 4.3.2-1 é efetuada até que existam apenas eventos primários na primeira coluna da matriz ICS. Este processo se repete para as colunas subsequentes, até que nenhum elemento da matriz ICS represente um portão lógico. As linhas de ICS representarão, então, os cortes mínimos da árvore de falhas. Este processo é intercalado por procedimentos de redução da matriz ICS, baseados nas leis de Boole e de De Morgan conforme apresentadas na TABELA 4.3.2-2.

A determinação dos caminhos mínimos, caso sejam desejados, é feita da mesma maneira, sobre a representação dual da árvore de falhas.

A TABELA 4.3.2-3 e a FIGURA 4.3.2-1 contêm, respectivamente, a definição das principais variáveis usadas no algoritmo "top down" e o fluxograma de seu desenvolvimento.

Para ilustrar a execução do algoritmo "top

TABELA 4.3.2-1 Algoritmos Aplicados aos Portões Lógicos

PORTAO LOGICO	ALGORITMO
"AND"	$\begin{aligned} \text{ICS}(\text{IX}, \text{IY}) &= \text{KC}(\text{P}, 1) \\ \text{ICS}(\text{IX}, \text{IT}(\text{IX})+1) &= \text{KC}(\text{P}, \text{I}) \\ \text{I} &= 2, \dots, \text{IKC}(\text{P}) \\ \text{IT}(\text{IX}) &= \text{IT}(\text{IX}) + \text{IKC}(\text{P}) - 1 \end{aligned} \quad (4.3-1)$
"NOR"	$\begin{aligned} \text{ICS}(\text{IX}, \text{IY}) &= \overline{\text{KC}(\text{P}, 1)} \\ \text{ICS}(\text{IX}, \text{IT}(\text{IX})+1) &= \text{KC}(\text{P}, \text{I}) \\ \text{I} &= 2, \dots, \text{IKC}(\text{P}) \\ \text{IT}(\text{IX}) &= \text{IT}(\text{IX}) + \text{IKC}(\text{P}) - 1 \end{aligned} \quad (4.3-2)$
"OR"	$\begin{aligned} \text{ICS}(\text{IX}, \text{IY}) &= \text{KC}(\text{P}, 1) \\ \text{ICS}(\text{MAX}+\text{J}-1, \text{I}) &= \text{ICS}(\text{IX}, \text{I}) \quad \text{para } \text{I} \neq \text{IY} \\ &= \text{KC}(\text{P}, \text{J}) \quad \text{para } \text{I} = \text{IY} \\ \text{IT}(\text{MAX}+\text{J}-1) &= \text{IT}(\text{IX}) \\ \text{I} &= 1, \dots, \text{IT}(\text{IX}) \\ \text{J} &= 2, \dots, \text{IKC}(\text{P}) \end{aligned} \quad (4.3-3)$
"NAND"	$\begin{aligned} \text{ICS}(\text{IX}, \text{IY}) &= \overline{\text{KC}(\text{P}, 1)} \\ \text{ICS}(\text{MAX}+\text{J}-1, \text{I}) &= \text{ICS}(\text{IX}, \text{I}) \quad \text{para } \text{I} \neq \text{IY} \\ &= \overline{\text{KC}(\text{P}, \text{J})} \quad \text{para } \text{I} = \text{IY} \\ \text{IT}(\text{MAX}+\text{J}-1) &= \text{IT}(\text{IX}) \\ \text{I} &= 1, \dots, \text{IT}(\text{IX}) \\ \text{J} &= 2, \dots, \text{IKC}(\text{P}) \end{aligned} \quad (4.3-4)$
"NOT"	$\text{ICS}(\text{IX}, \text{IY}) = \overline{\text{KC}(\text{P}, 1)} \quad (4.3-5)$

Onde: IX e IY indicam, respectivamente, a linha e a coluna ocupada pelo portão P na matriz ICS; MAX é o número de linhas da matriz ICS no instante da aplicação do algoritmo sobre P; IT(IX) é o número de elementos da linha IX da matriz ICS. A barra horizontal sobre um elemento (portão ou evento) indica o seu complemento. IKC(P) é igual a IKC(P) e KC(P,L) é igual a KC(P,L), para qualquer L.

TABELA 4.3.2-2 Leis de Boole e de De Morgan

Leis	Exemplo	Objetivo / Comentário
Idempotência	$X.X = X$	Eliminar os eventos repetidos dos cortes mínimos (sub-rotina COMPACT)
Absorção	$X + X.Y = X$	Eliminar os "super cortes" (sub-rotina SHRINK).
Complementação	$X.\bar{X} = \emptyset$	Eliminar os cortes mínimos inconsistentes (sub-rotina CORTNU).
	$\bar{\bar{X}} = X$	Usado no algoritmo de determinação dos cortes mínimos. (sub-rotina GATES)
Leis de De Morgan	$X.NOR.Y :$ $\overline{X+Y} = \bar{X}.\bar{Y}$ $X.NAND.Y :$ $\overline{X.Y} = \bar{X}+\bar{Y}$	Usado pelo algoritmo dos cortes mínimos. (sub-rotina GATES)

Nota: X e Y são elementos (portões ou eventos) quaisquer.

TABELA 4.3.2-3 Variáveis Usadas Pelo Algoritmo de Determinados Cortes Mínimos

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
MAX	Número de cortes (linhas de ICS). Esta variável sofre atualizações durante a execução do algoritmo "top down". MAX = 1, 2 ... NROW
MX	Menor valor entre ITMAX e NCOL (ver TABELAS 4.3.1.1-1 e 4.3.1.5-1, respectivamente).
ICS(IX,IY)	Matriz em cujas linhas são processadas as operações necessárias para a determinação dos cortes mínimos. Ao final do processo suas linhas representarão os cortes mínimos da árvore. IX = 1, 2 ... MAX IY = 1, 2 ... MX
IT(IX)	Número de elementos da linha IX de ICS. IT sofre sucessivas atualizações durante a execução do algoritmo "top down". IX = 1, 2 ... MAX

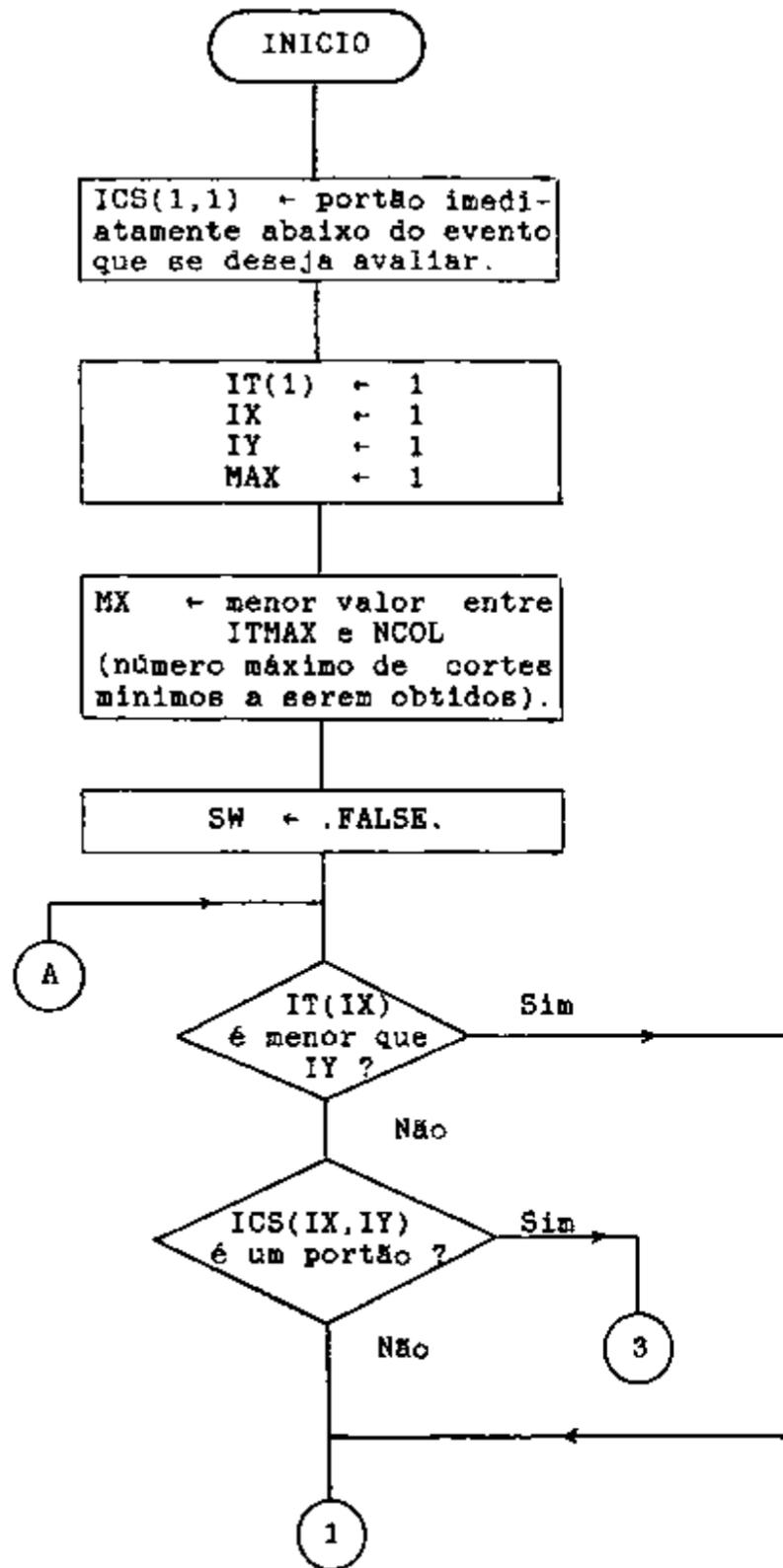


FIGURA 4.3.2-1 Esquema do Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos

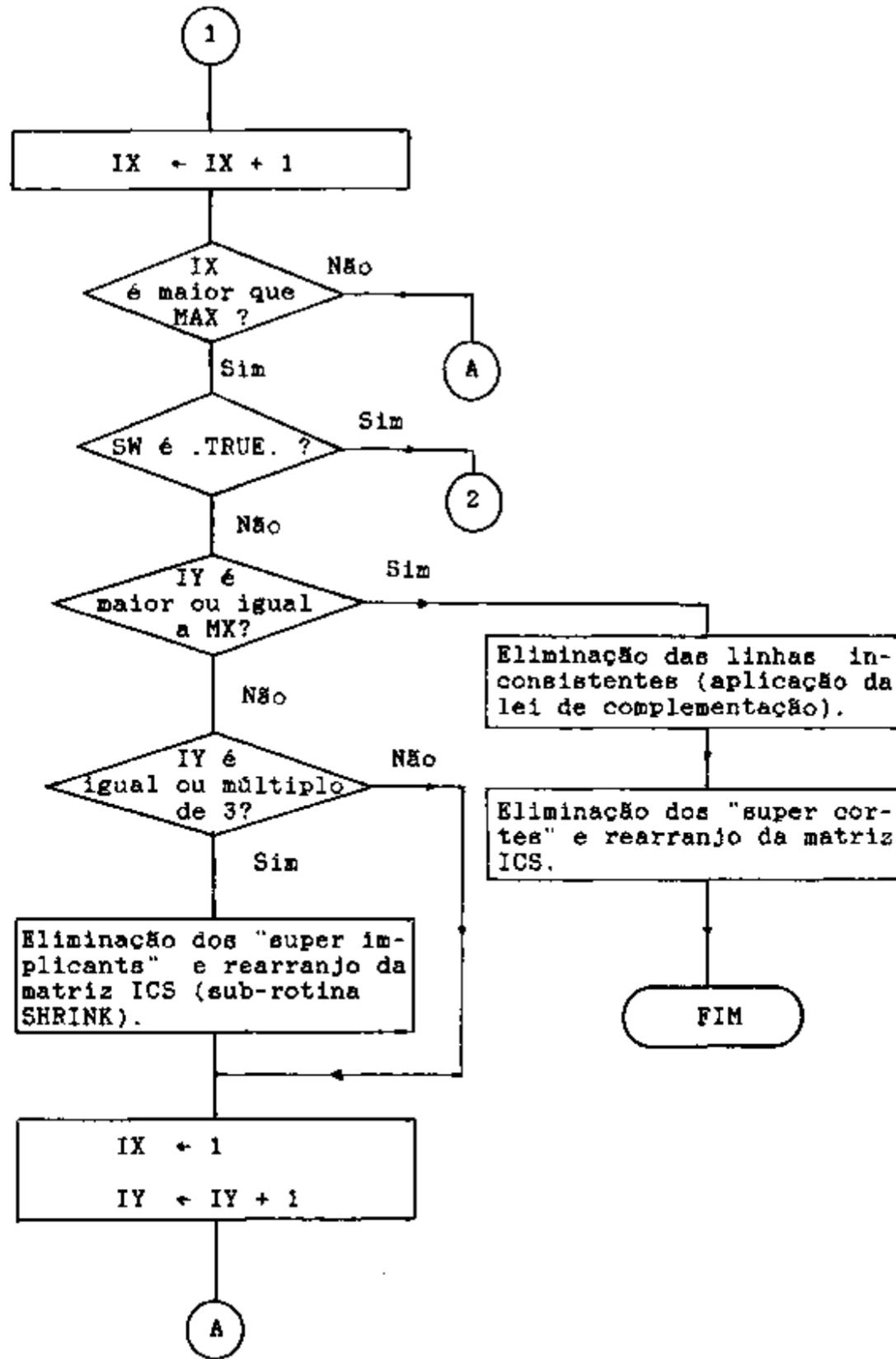


FIGURA 4.3.2-1 Esquema do Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos (Continuação)

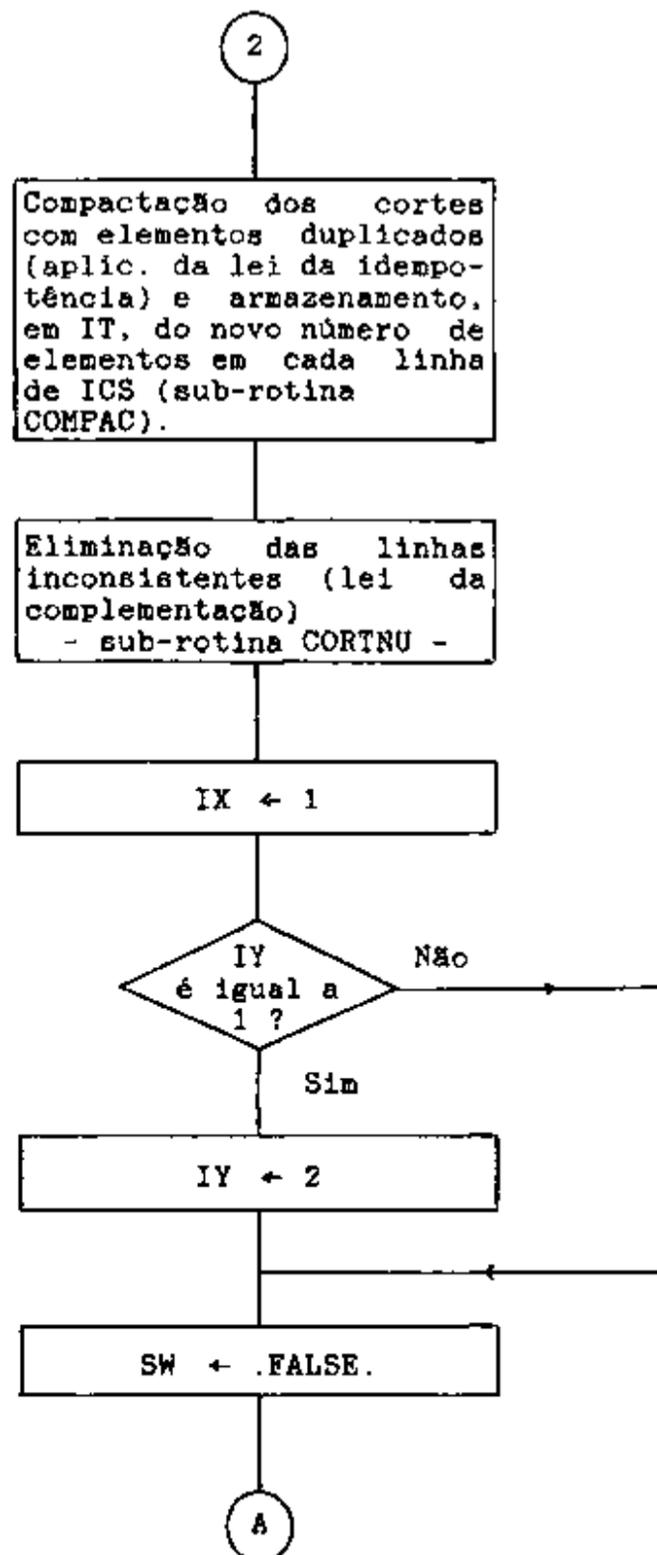


FIGURA 4.3.2-1 Esquema do Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos (Continuação)

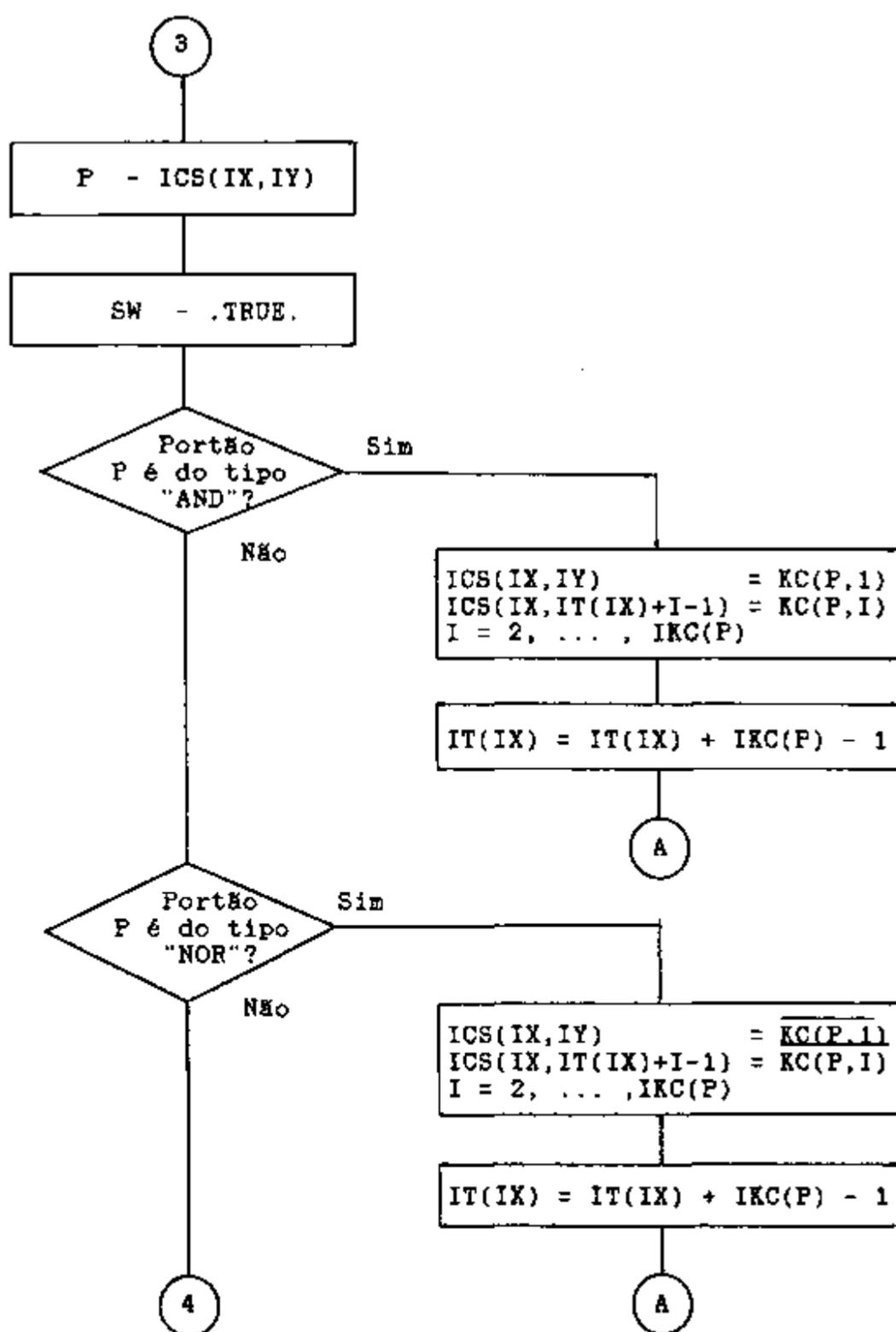


FIGURA 4.3.2-1 Esquema do Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos (Continuação)

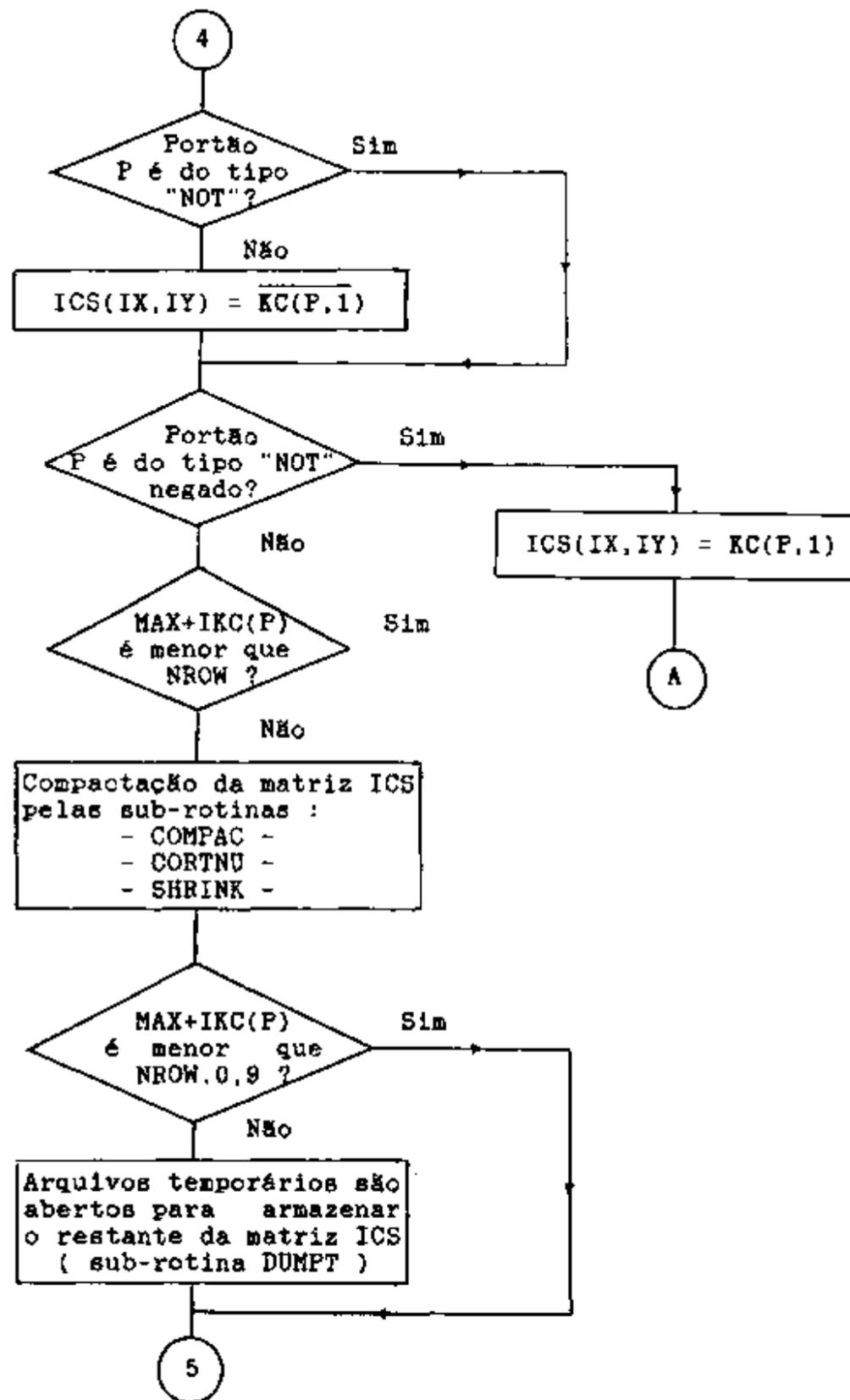


FIGURA 4.3.2-1 Esquema do Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos (Continuação)

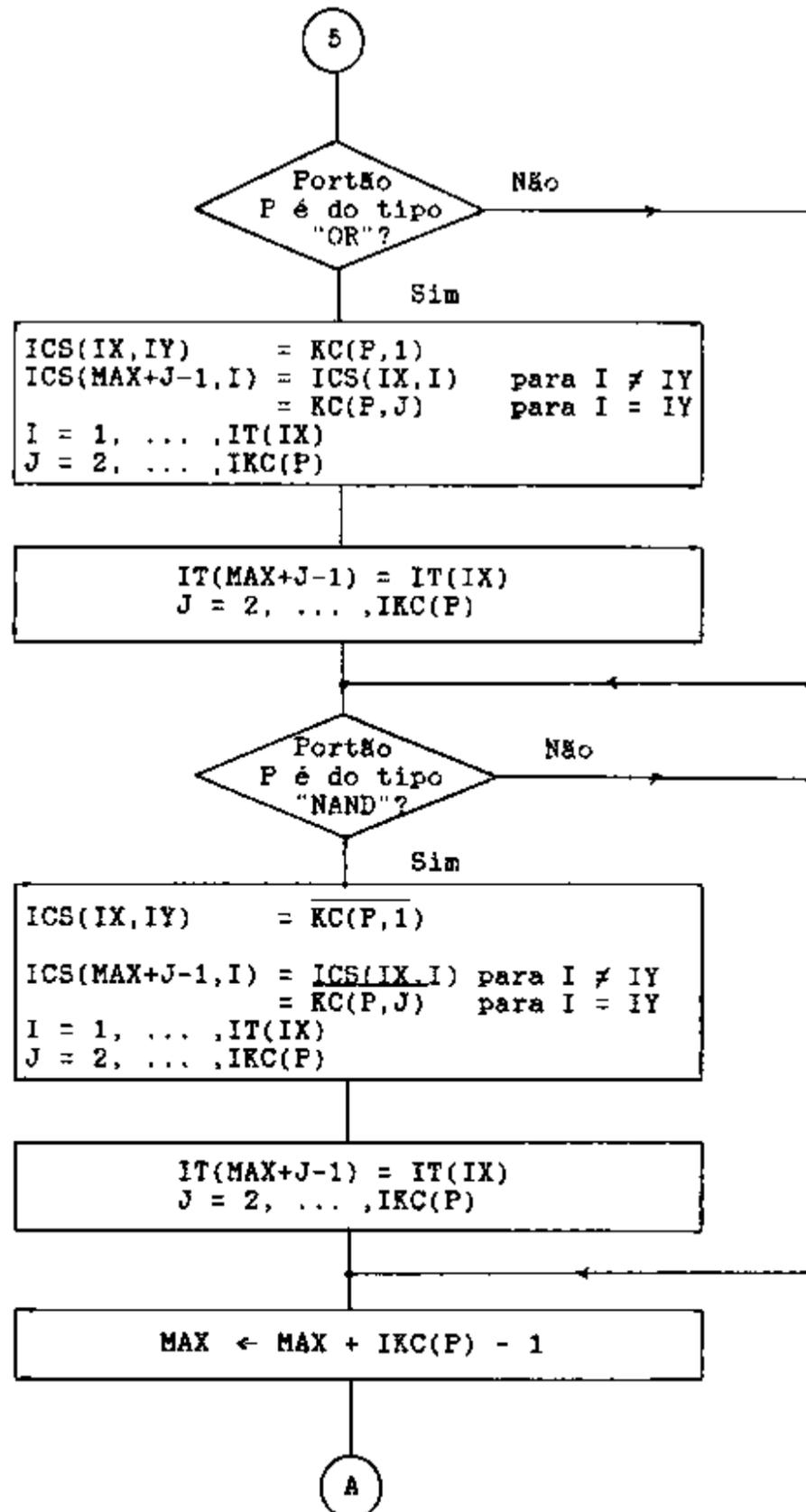


FIGURA 4.3.2-1 Esquema do Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos (Continuação)

down", considere o EXEMPLO 4.3.2-1, cuja árvore de falhas encontra-se representada na FIGURA 4.3.2-2 e cujos dados obtidos pelo Segmento de Preparação de Dados encontram-se na TABELA 4.3.2-4.

EXEMPLO 4.3.2-1

Matriz ICS(IX,IY)

Comentários

1	P1			O elemento ICS(1,1) passa a ser representado pelo portão localizado imediatamente abaixo do evento que se deseja determinar os cortes mínimos. Variáveis Atualizadas: IT(1) = 1; IT(i) = 0, onde i = 2, 3, 4. MAX = 0.
2				
3				
4				
	1	2	3	
1	P2			Resultado da aplicação do algoritmo (4.3-3) da TABELA 4.3.2-1, sobre o portão P1 (tipo "OR"). Variáveis Atualizadas: IT(2) = 1 e MAX = 2.
2	P6			
3				
4				
	1	2	3	
1	P3	P4		Resultado da aplicação do algoritmo (4.3-2) sobre o portão P2 (tipo "NOR"). Variáveis Atualizadas: IT(1) = 2, MAX = 2, P3 é um portão do tipo "NAND", P4 é um portão do tipo "AND".
2	P6			
3				
4				
	1	2	3	
1	P5	P4		Resultado da aplicação do algoritmo (4.3-4) sobre o portão P3 (tipo "NAND"). Variáveis Atualizadas: IT(3) = 2, MAX = 3, P5 é o complemento de um portão do tipo "NOT".
2	P6			
3	B	P4		

FIGURA 4.3.2-2 Árvore de Falhas do EXEMPLO 4.3.2-1

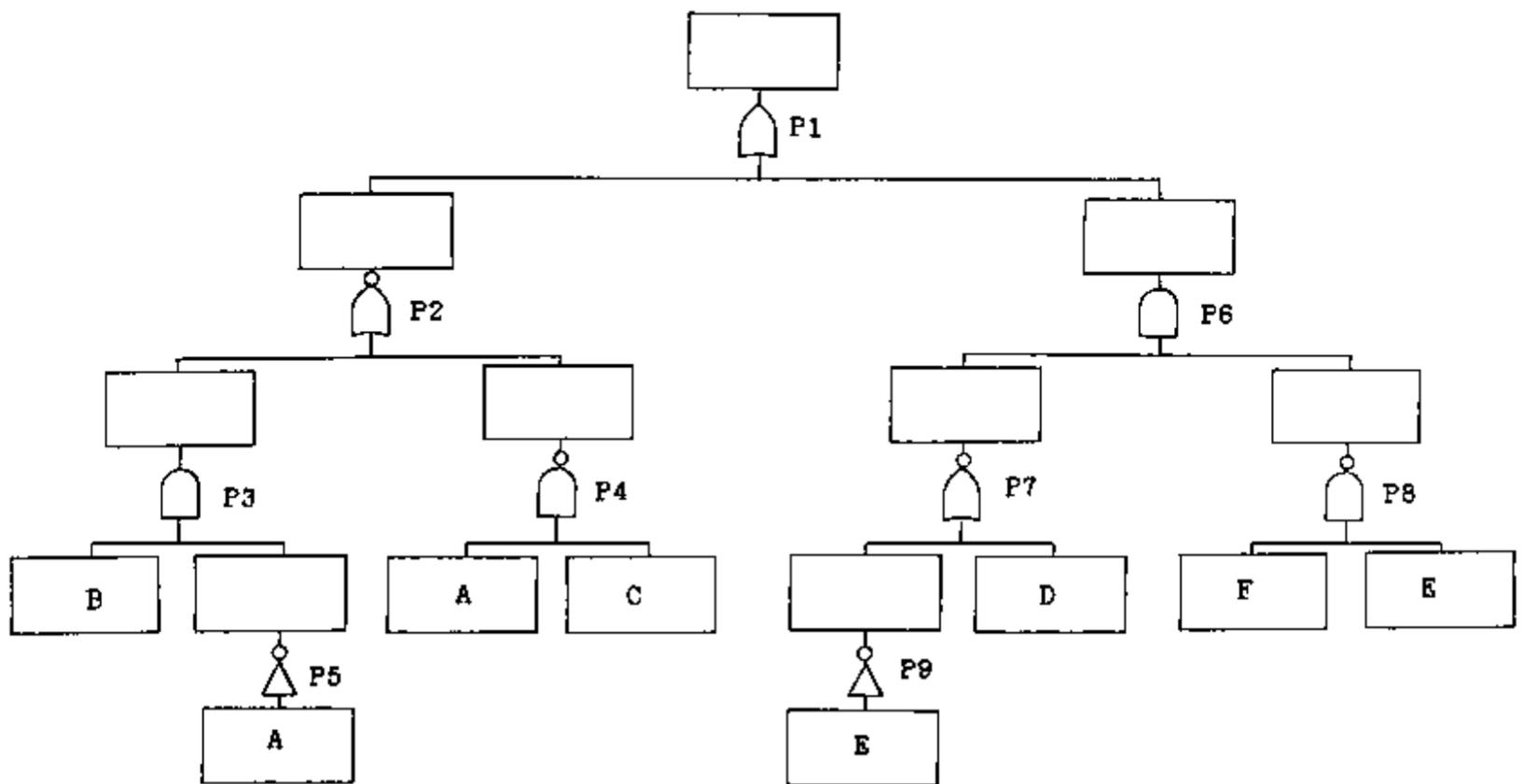


TABELA 4.3.2-4 Variáveis Preparadas para o Algoritmo de Determinação de Cortes Mínimos (EXEMPLO 4.3.2-1)

P	TIPO	IEC(P)	KC(P,1)	KC(P,2)
P1	"OR"	2	P2	P6
P2	"NOR"	2	P3	P4
P3	"AND"	2	P5	B
P4	"NAND"	2	A	C
P5	"NOT"	1	A	--
P6	"AND"	2	P7	P9
P7	"NOR"	2	D	P8
P8	"NOT"	1	E	--
P9	"NAND"	2	F	E

Outras Variáveis:

ITMAX = 5
 NCOL = 4
 NROW = 6

Matriz ICS(IX,IY)

Comentários

1	A	$\overline{P4}$	
2	P6		
3	\overline{B}	$\overline{P4}$	
4			
	1	2	3

A negação do portão "NOT" torna $\overline{P5}$ sem efeito.

1	A	$\overline{P4}$	
2	P7	P9	
3	\overline{B}	$\overline{P4}$	
4			
	1	2	3

Resultado da aplicação do algoritmo (4.3-1) sobre o portão P6 (tipo "AND").
Variável Atualizada:
IT(2) = 2.

1	A	$\overline{P4}$	
2	D	P9	P8
3	\overline{B}	$\overline{P4}$	
4			
	1	2	3

Resultado da aplicação do algoritmo (4.3-2) sobre o portão P7 (tipo "NOR").
Não existe portão na primeira coluna.
Variáveis Atualizadas:
IT(2) = 3,
P8 é o complemento de um portão do tipo "NOT".

1	A	A	C
2	D	P9	P8
3	\overline{B}	$\overline{P4}$	
4			

Resultado da aplicação do algoritmo (4.3-1) sobre o portão P4 (tipo "AND"), localizado em ICS(1,2).
Variável Atualizada:
IT(1) = 3.

Matriz ICS(IX,IY)

Comentários

1	A	A	C
2	\overline{D}	\overline{F}	$\overline{P8}$
3	\overline{B}	P4	
4	\overline{D}	\overline{E}	$\overline{P8}$
	1	2	3

Resultado da aplicação do algoritmo (4.3-4) sobre o portão P8 (tipo "NAND").
Variável Atualizada:
IT(4) = 3.

1	A	A	C
2	\overline{D}	\overline{F}	$\overline{P8}$
3	\overline{B}	A	C
4	\overline{D}	\overline{E}	$\overline{P8}$
	1	2	3

Resultado da aplicação do algoritmo (4.3-1) sobre o portão P4 (tipo "AND").
Não existe portão na segunda coluna.
Variável atualizada:
IT(3) = 4.

1	A	C	
2	\overline{D}	\overline{F}	$\overline{P8}$
3	\overline{B}	A	C
4	\overline{D}	\overline{E}	$\overline{P8}$
	1	2	3

Aplicação da lei de idempotência sobre a primeira linha da matriz ICS.
Reexame da segunda linha de ICS e constatação que nela não existe nenhum portão.
Variável Atualizada:
IT(1) = 2.

1	A	C	
2	\overline{D}	\overline{F}	\overline{E}
3	\overline{B}	A	C
4	\overline{D}	\overline{E}	$\overline{P8}$

A negação do portão "NOT" torna $\overline{P8}$, localizado em ICS(2,3), sem efeito.

Matriz ICS(IX,IV)

Comentários

1	A	C	
2	\bar{D}	\bar{F}	E
3	\bar{B}	A	C
4	\bar{D}	\bar{E}	E
	1	2	3

A negação do portão "NOT" torna P8 localizado em ICS(4,3) sem efeito. Não existe portão na terceira coluna da matriz ICS.

1	A	C	
2	\bar{D}	\bar{F}	E
3	\bar{B}	A	C
4			
	1	2	3

Resultado da aplicação da lei de complementação sobre a quarta linha da matriz ICS.

1	A	C	
2	\bar{D}	\bar{F}	E
3			
4			
	1	2	3

Eliminação dos "super cortes".

4.3.3 Características e Limitações Computacionais

A área total de memória utilizada pelo programa MOCUS-M é dada pela seguinte expressão:

$$\text{AREA} = 113 + \frac{8 \text{ NP}}{1024} \text{ Kbytes,} \quad (4.3.3-1)$$

onde "NP" é o número de palavras de dupla precisão do vetor W, reservadas para armazenar as variáveis e parâmetros utilizados pelo módulo. Em geral, 20000 palavras são suficientes para a análise de árvores de falhas com menos de 100 eventos primários e que possuam menos de 1000 cortes mínimos.

Os principais limites impostos pelo dimensionamento interno do módulo MOCUS-M, são:

- a) é capaz de determinar, em uma única execução, os cortes mínimos do evento topo e de até 100 eventos intermediários da árvore;
- b) pode utilizar até 100 eventos de acionamento ("house events");
- c) é capaz de processar árvores com até 2000 portas lógicas.

CAPÍTULO 5

5 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO CRESSC-M

5.1 INTRODUÇÃO

O módulo CRESSC-M foi desenvolvido no Departamento de Tecnologia de Reatores do IPEN-CNEN/SP para, junto com o módulo MOCUS-M, integrar o Bloco de Determinação de Cortes Mínimos do programa RALLY-M. O módulo CRESSC-M está capacitado para determinar, através do método simulatório, cortes mínimos de árvores de falhas que representem estruturas monótonas. Trata-se de uma nova versão do módulo CRESSC, pertencente ao programa RALLY.

5.2 VANTAGENS DO MÓDULO CRESSC-M EM RELAÇÃO AO CRESSC

O módulo CRESSC-M apresenta diversas melhorias em relação ao módulo CRESSC pertencente ao programa RALLY. O resumo das principais limitações do módulo CRESSC e dos procedimentos usados pelo módulo CRESSC-M, para eliminá-las, é apresentado a seguir.

5.2.1 Distribuição de Incerteza

No módulo CRESSC-M, as incertezas para as taxas de ocorrência e a probabilidade de ocorrência em demanda de eventos primários não estão limitadas à distribuição log-normal, como no módulo CRESSC, podendo ser representa-

das por quaisquer distribuições de probabilidade, caso seja fornecido o valor médio. Além disso, a distribuição log-uniforme, pode, ser representada, opcionalmente, pelo seu valor nos percentis 5% e 95%.

5.2.2 Indisponibilidade

Os valores da indisponibilidade média de componentes, $\bar{Q}(t)$, provocada pela ocorrência de eventos primários testados e monitorados, obtidos pelo módulo CRESSC-M, são mais precisos que os obtidos pelo módulo CRESSC. Especificamente, a expressão:

$$\bar{Q}(t) = 1 - \frac{1 - e^{-(\lambda \text{ TWART})}}{\text{TWART}}, \quad (5.2.2-1)$$

usada pelo módulo CRESSC no cálculo da indisponibilidade média provocada por eventos testados foi substituída pela expressão (3.4-4).

Para eventos monitorados, a expressão:

$$\bar{Q}(t) = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + \text{TMR}}, \quad (5.2.2-2)$$

usada pelo módulo CRESSC, foi substituída pela expressão (3.4-7). Nas expressões (5.2.2-2) e (5.2.2-2), λ significa a taxa de ocorrência do evento primário, TWART é o período compreendido testes e TMR é o tempo médio de reparo.

5.2.3 Acoplamento com o Módulo STREUSL-M

O módulo CRESSC-M, além de fornecer cortes mínimos ao módulo STREUSL-M, como ocorre no módulo CRESSC, também fornece uma estimativa preliminar da indisponibilidade média do sistema, provocada pela ocorrência do evento topo, facilitando assim, a tarefa de seleção dos cortes mínimos mais significativos efetuada pelo módulo STREUSL-M.

5.2.4 Inclusão de Comentários

O relatório de saída do módulo CRESSC-M incorpora diversas melhorias em relação ao relatório emitido pelo módulo CRESSC. Especificamente:

- a) contém explicações resumidas sobre os métodos de avaliação;
- b) inclui um número maior de informações sobre os eventos primários;
- c) contém informações sobre os tempos de processamento de diversos segmentos do módulo.

5.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO CRESSC-M

Funcionalmente, o módulo CRESSC-M é dividido nos Segmentos de Leitura de Dados, Preparação de Dados, Determinação de Cortes, Determinação de Cortes Mínimos e, fi-

nalmente, Ordenação dos Cortes Mínimos segundo sua indisponibilidade média.

Nesta seção serão descritos apenas os três últimos segmentos citados acima, já que as descrições dos segmentos de: Leitura e Preparação de Dados do módulo CRESSC-M encontram-se descritos em [100]. A FIGURA 5.3-1 apresenta o esquema de desenvolvimento do módulo CRESSC-M.

5.3.1 Segmento de Determinação de Cortes

5.3.1.1 Algoritmo de Determinação de Cortes

O procedimento utilizado para a determinação de cortes da árvore de falhas consiste das seguintes etapas:

- 1) Considera-se, inicialmente, que todos os componentes do sistema encontram-se intactos no instante inicial de observação, isto é, nenhum evento primário encontra-se presente.
- 2) Gera-se um número pseudo-aleatório ("RND"), entre 0 e 1, para cada evento primário e define-se como presente os eventos primários que satisfizerem a seguinte expressão:

$$\frac{\text{RND}}{q} < \text{ALFA}, \quad (5.3.1.1-1)$$

onde "q" é a indisponibilidade média ou probabi-

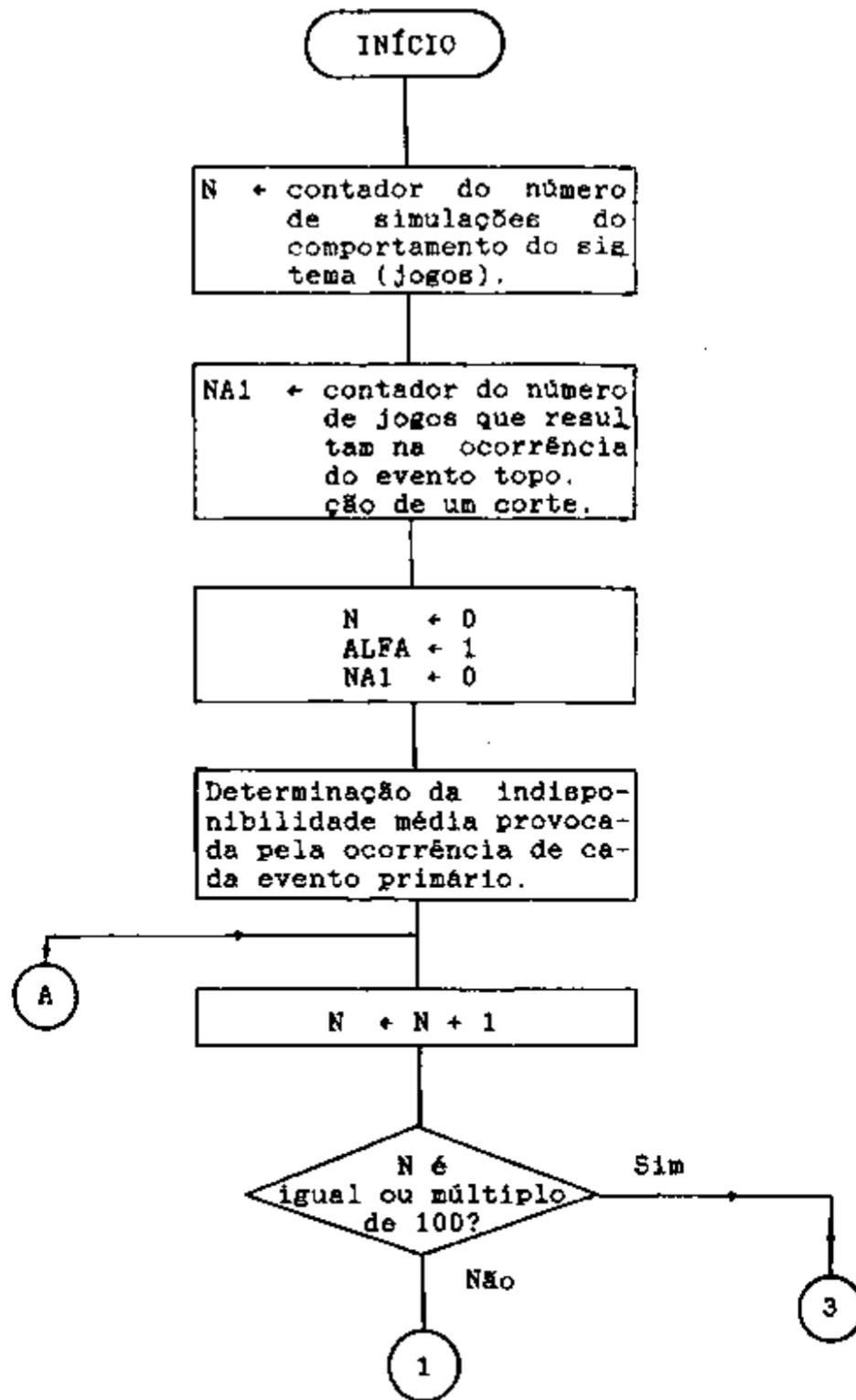


FIGURA 5.3-1 Esquema do Módulo CRESSC-M

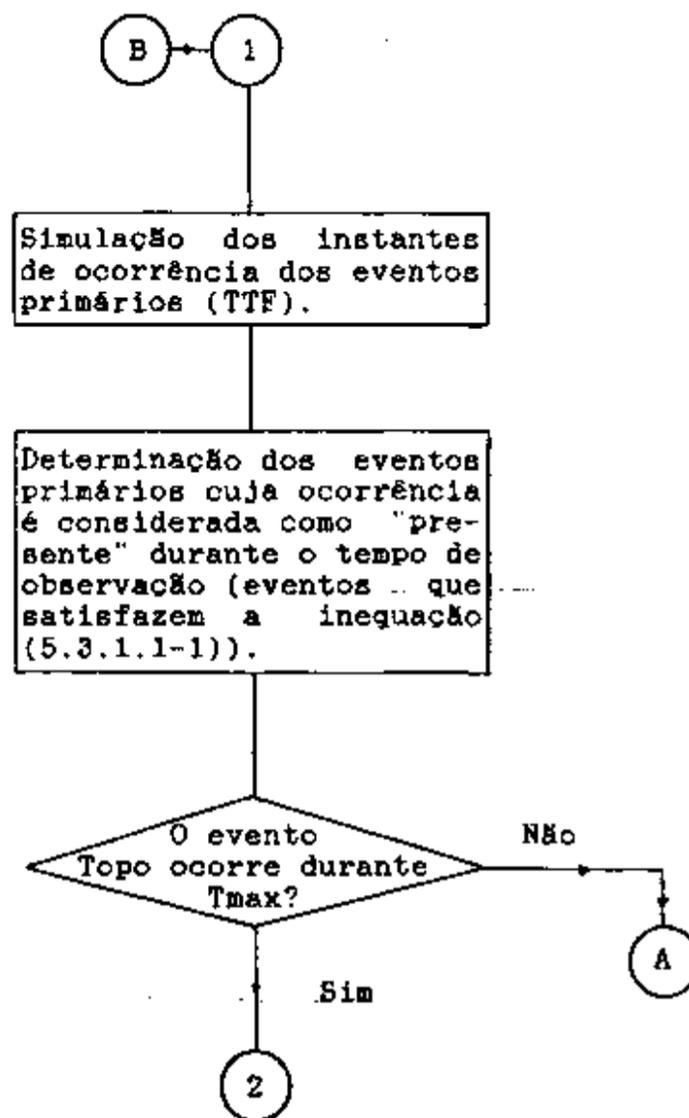


FIGURA 5.3-1 Esquema do Módulo CRESSC-M (Continuação)

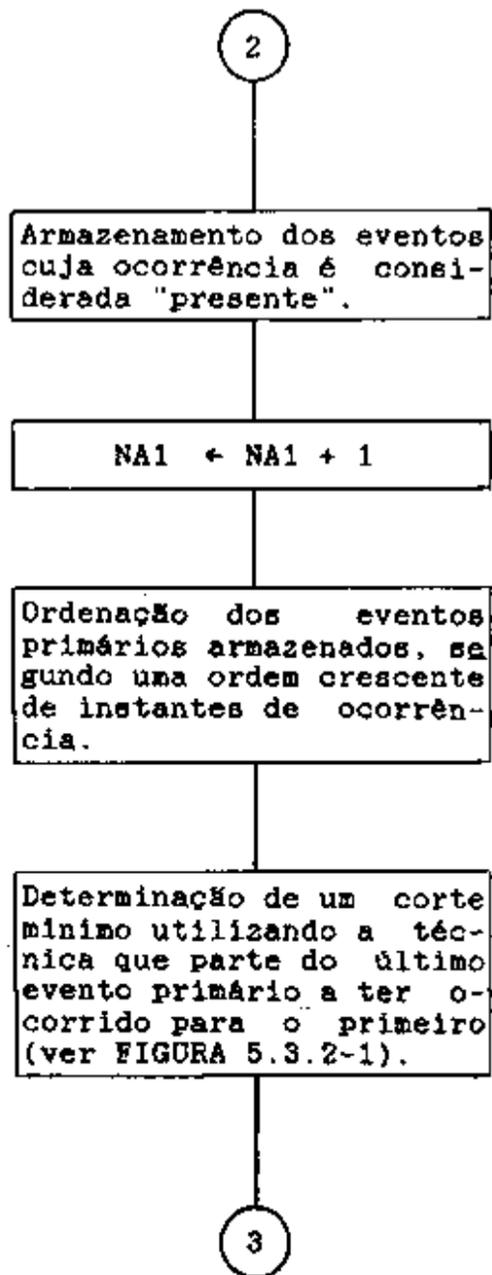


FIGURA 5.3-1 Esquema do Módulo CRESSC-M (Continuação)

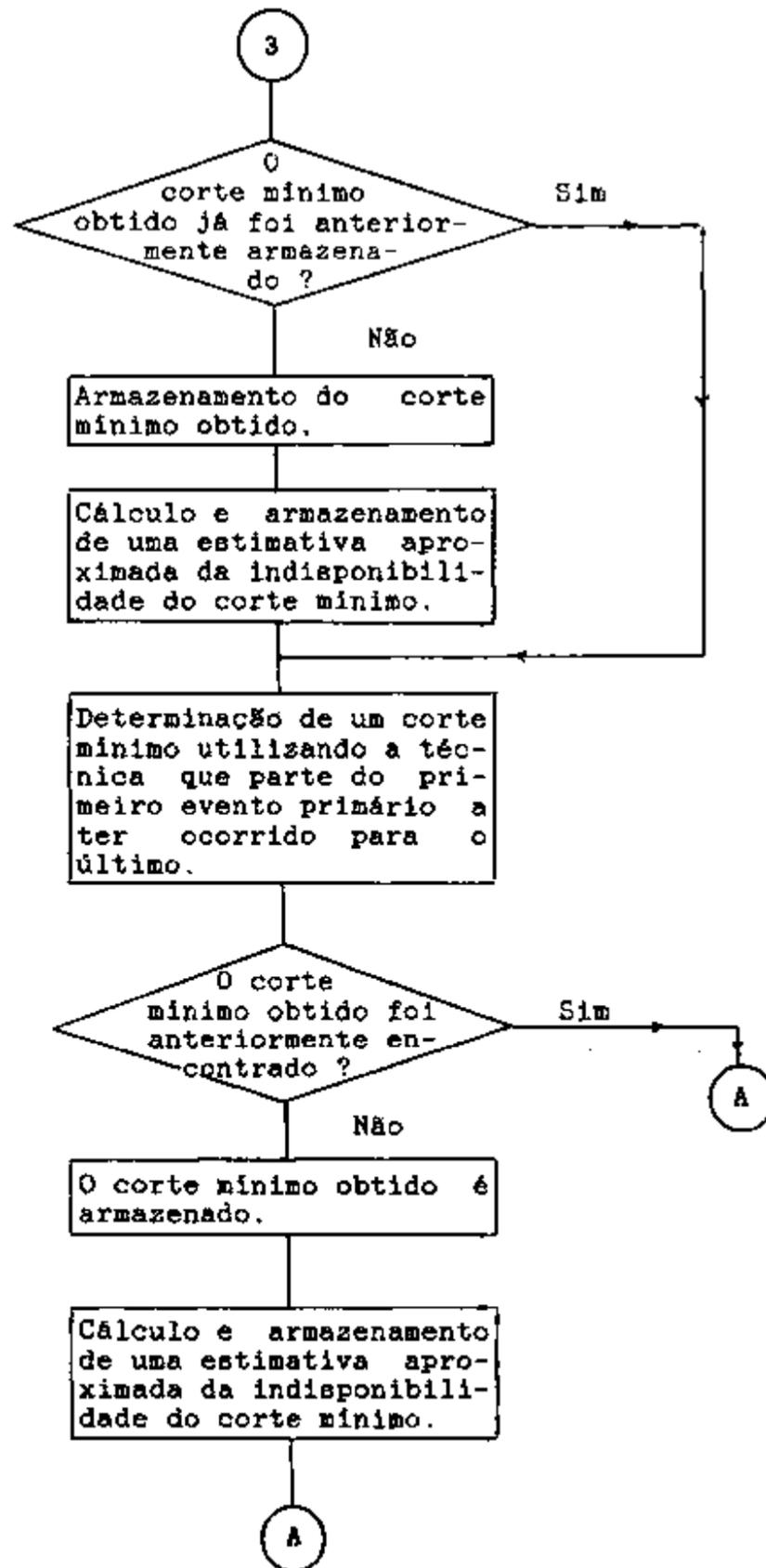


FIGURA 5.3-1 Esquema do Módulo CRESSC-M (Continuação)

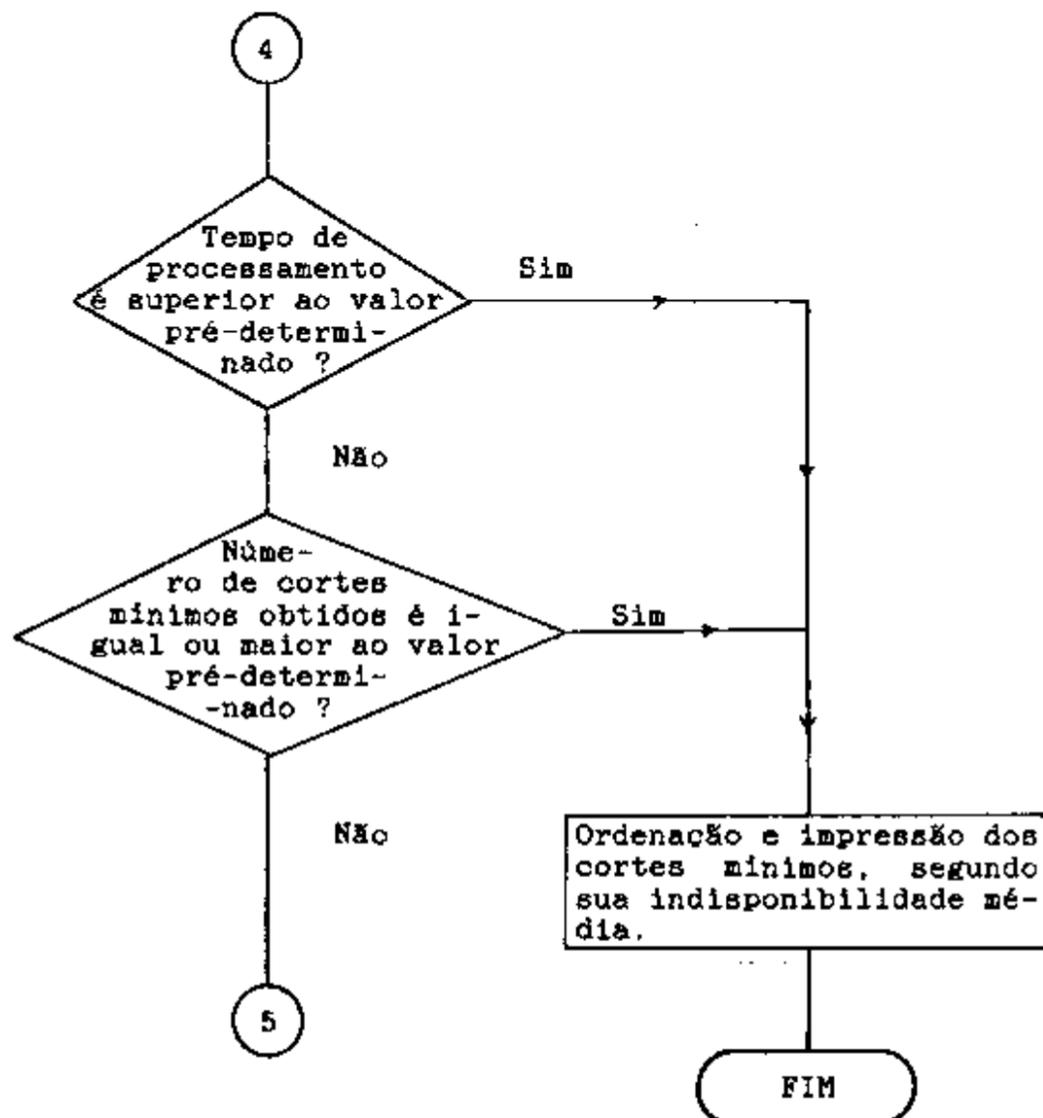


FIGURA 5.3-1 Esquema do Módulo CRESSC-M (Continuação)

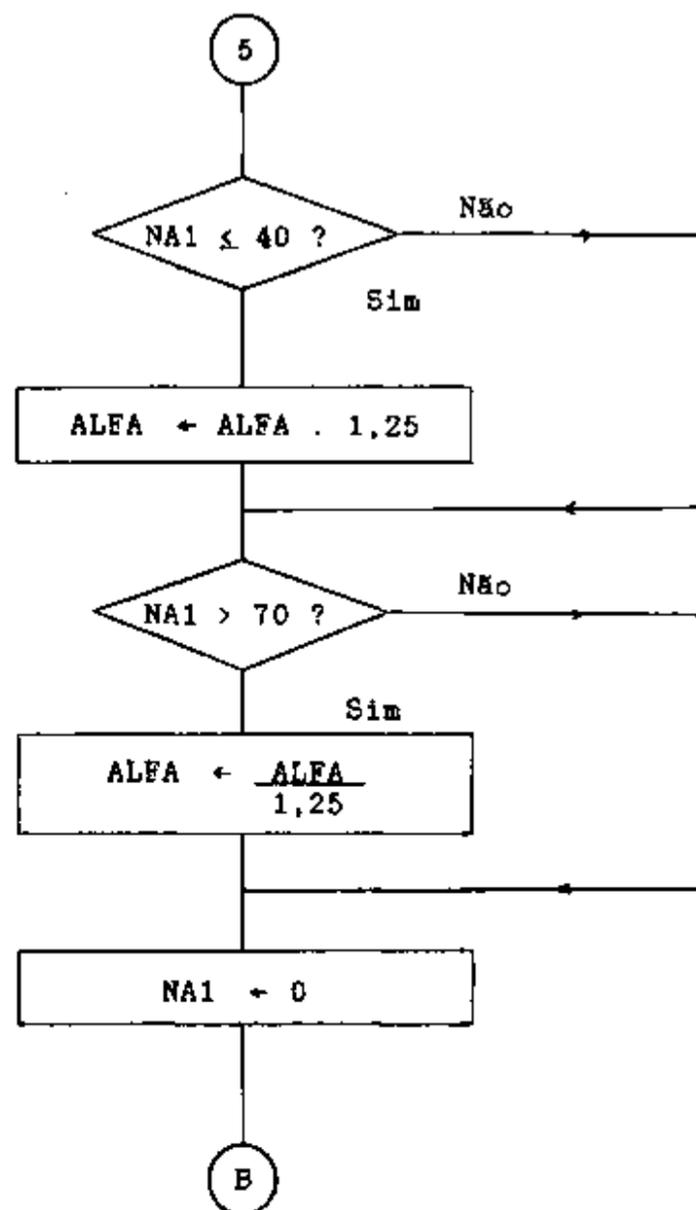


FIGURA 5.3-1 Esquema do Módulo CRESSC-M (Continuação)

lidade de falha em demanda provocada pela ocorrência do evento primário e ALFA é um parâmetro cujo valor inicial é 1,0 e sofre sucessivos ajustes a cada 100 jogos.

- 3) Examina-se o estado do evento topo pela expressão booleana da árvore de falhas contida na subrotina LOGIDR. Caso sua ocorrência venha a ser constatada, os eventos primários que satisfazem a inequação (5.3.1.1-1) compõem um corte e são armazenados para serem usados no Segmento de Determinação de Cortes Mínimos. Caso contrário, retorna-se ao passo 1 para uma nova simulação do comportamento do sistema (jogo).

5.3.1.2 Processo de Aceleração para a Determinação de Cortes

O processo de simulação da ocorrência de eventos primários, descrito na etapa 2 da seção 5.3.1.1, sofre grande influência do valor atribuído ao parâmetro ALFA, pois à medida que o valor de ALFA aumenta, a ocorrência de eventos primários durante o período de observação torna-se mais frequente, diminuindo, assim, o número de tentativas necessárias para se obter a ocorrência do evento topo.

Os sucessivos ajustes sofridos por ALFA alteram o valor da relação entre o número total de simulações do comportamento do sistema (jogos) e o número de simulações que resultaram em falha do sistema (ocorrência do evento

topo), fazendo convergir para aproximadamente 0,55.

O número de simulações (jogos) necessários para que o processo de aceleração se estabilize (NJE) é dado, aproximadamente, pela expressão:

$$NJE = \frac{\text{Ln } 0,55 - \text{Ln } \bar{Q}(t)}{\text{Ln } 1,25} \cdot 100 \quad (5.3.1.2-1)$$

onde: $\bar{Q}(t)$ é a indisponibilidade média do sistema e Ln é o logaritmo neperiano.

Este processo, entretanto, interfere na aleatoriedade da simulação da ocorrência de cortes, conforme pode ser observado no seguinte exemplo:

EXEMPLO 5.3.1.2-1

Suponha que C_1 e C_j sejam cortes de mesma probabilidade de ocorrência ("p"), formados por "m" e "n" ($m > n$) eventos primários, respectivamente. A probabilidade de ocorrência destes cortes é:

$$P(C_1) = P(C_j) = p \quad (5.3.1.2-2)$$

Ao se acelerar o processo de simulação de eventos primários, cada evento passa a ter a sua probabilidade de ocorrência multiplicada por ALFA, de modo que:

$$P'(C_1) = p \cdot (\text{ALFA})^m \quad (5.3.1.2-3)$$

$$P'(C_j) = p \cdot (\text{ALFA})^n \quad (5.3.1.2-4)$$

Onde P' denota a nova probabilidade de ocorrência dos cortes, levando-se em consideração o processo de aceleração.

Logo, caso ALFA seja maior que 1,0, a probabilidade de se obter o corte C_1 por simulação será $(\text{ALFA})^{(m-n)}$ vezes maior que a de se obter o corte C_j , embora ambos devessem ter a mesma probabilidade de ocorrência.

5.3.2 Segmento de Determinação dos Cortes Mínimos

Neste segmento são determinados cortes mínimos contidos no corte obtido no terceiro passo do Segmento de Determinação de Cortes. Este segmento subdivide-se em duas etapas: ordenação dos eventos primários e determinação dos cortes mínimos propriamente dito.

5.3.2.1 Ordenação dos Eventos Primários

Antes de se iniciar o processo de determinação de cortes mínimos, gera-se um instante de ocorrência (TTF) para cada evento primário através da expressão:

$$\text{TTF} = \frac{\text{RND}}{q} \cdot \text{Tmax}, \quad (5.3.2-1)$$

onde: "RND" é o mesmo número pseudo-aleatório gerado no Segmento de Determinação de Cortes, "q" é a indisponibilidade média ou probabilidade de falha em demanda provocada

pela ocorrência do evento primário considerado e T_{max} é o tempo de observação.

Após a determinação de TTF, os eventos primários são dispostos em ordem crescente, com a finalidade de evitar que a ordem com que são armazenados os eventos primários exerça influência na determinação dos cortes mínimos.

5.3.2.2 Método de Determinação de Cortes Mínimos

O método de determinação de cortes mínimos, propriamente dito, consiste em se definir como "presente" o estado de todos os eventos primários que compõem o corte examinado, passando a alterar sequencialmente o estado de cada evento primário de "presente" para "ausente". A partir deste ponto, o método utiliza duas técnicas que diferem, entre si, pela sequência com que são alterados os estados de ocorrência dos eventos primários do corte. Especificamente, uma das técnicas consiste em se processar as alterações seguindo uma ordem crescente de instantes de ocorrência dos eventos primários do corte armazenado (veja FIGURA 5.3.2-1) e a outra em se processar em ordem decrescente. Os eventos que durante este processo provocarem igual alteração no estado de ocorrência do evento topo farão parte de um corte mínimo e seus estados de ocorrência passam a ser definidos, na sequência, como "presentes". Após a alteração do estado de ocorrência do último evento primário, um corte mínimo terá sido determinado.

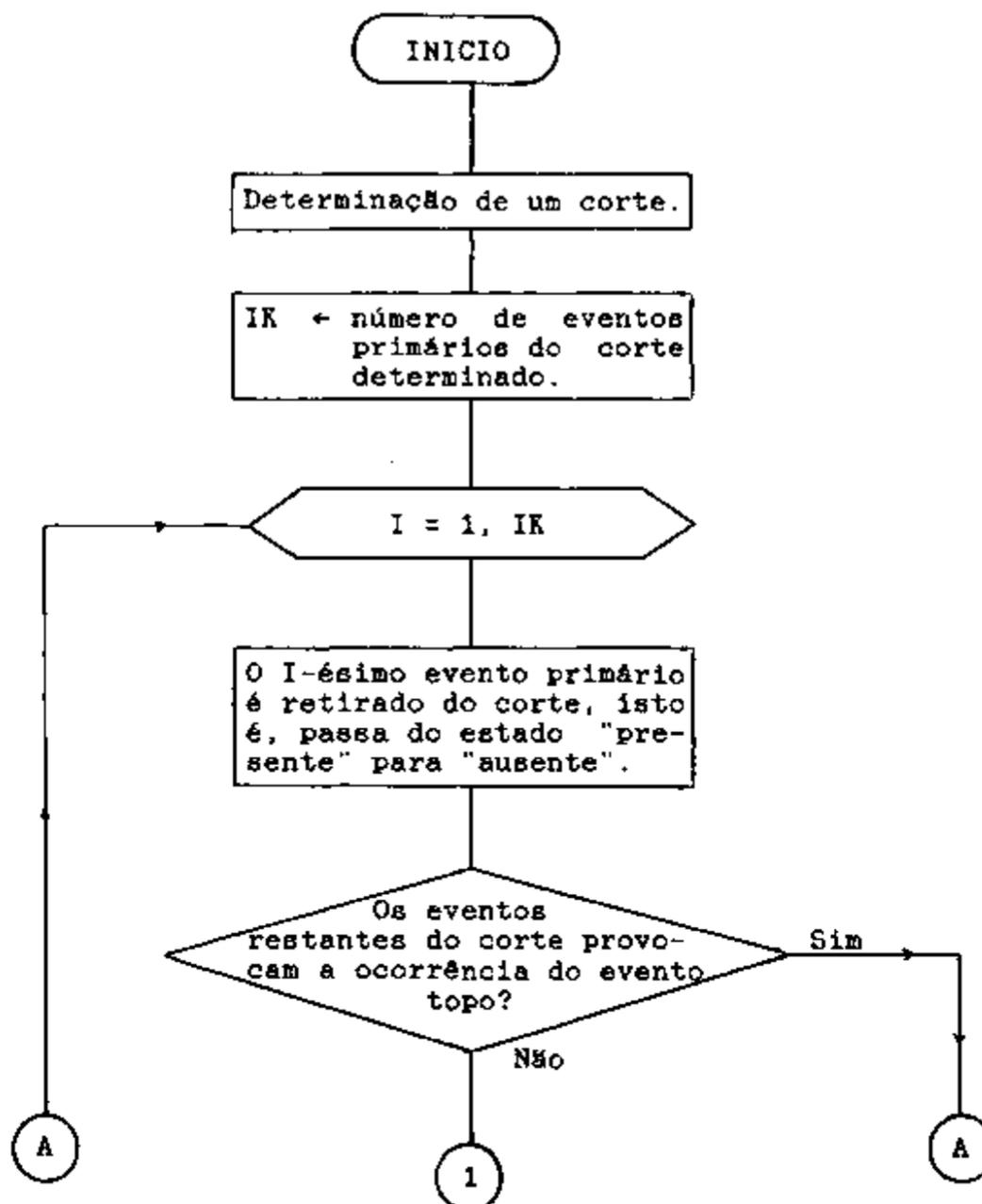


FIGURA 5.3.2-1 Esquema do Método de Obtenção de Cortes Mínimos (Técnica que parte do evento de menor instante de ocorrência para o de maior)

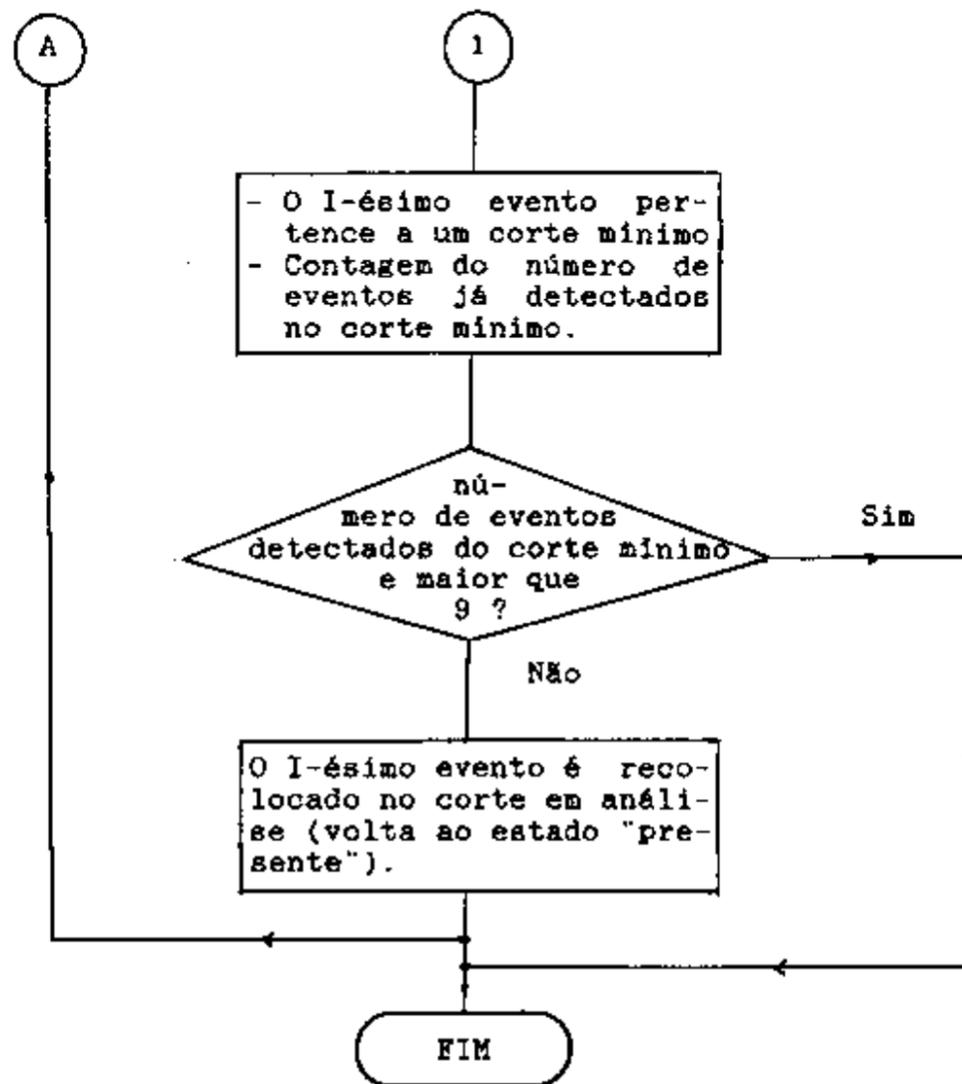


FIGURA 5.3.2-1 Esquema do Método de Obtenção de Cortes Mínimos (Técnica que parte do evento de menor instante de ocorrência para o de maior) - Continuação -

Eventualmente, os cortes mínimos obtidos pelas duas técnicas podem ser os mesmos ou já terem sido determinados anteriormente.

Crítérios de Encerramento

O processo de determinação de cortes e cortes mínimos é encerrado quando algum dos critérios abaixo for satisfeito:

- a) tempo de processamento for superior a um valor pré-estabelecido pelo usuário;
- b) número de cortes mínimos obtidos for superior a um valor pré-estabelecido na entrada de dados.

Caso nenhum dos critérios de encerramento seja satisfeito, retorna-se ao Segmento de Determinação de Cortes.

5.3.3 Segmento de Ordenação dos Cortes Mínimos

Ao final do processamento do módulo CRESSC-M, os cortes mínimos armazenados são impressos segundo uma ordem crescente de sua indisponibilidade aproximada (produto da indisponibilidade média de cada componente do corte).

CAPÍTULO 6

6 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO CRESSEX-M

6.1 INTRODUÇÃO

O módulo CRESSEX-M foi elaborado no Departamento de Tecnologia de Reatores do IPEN-CNEN/SP para integrar, junto com o módulo STREUSL-M, o Bloco de Análise Quantitativa do programa RALLY-M. O módulo CRESSEX-M está capacitado para determinar, através do método simulatório, a não-confiabilidade e a indisponibilidade média de sistemas de engenharia modelados por árvores de falhas que representem estruturas monótonas.

6.2 VANTAGENS DO MÓDULO CRESSEX-M EM RELAÇÃO AO MÓDULO CRESSEX

O módulo CRESSEX-M apresenta diversas melhorias em relação ao módulo CRESSEX, pertencente ao programa RALLY. O resumo das principais limitações do módulo CRESSEX e dos procedimentos incorporados ao módulo CRESSEX-M, para eliminá-las, é apresentado a seguir.

6.2.1 Distribuição de Incerteza

O módulo CRESSEX exige que a incerteza associada à taxa de ocorrência e à probabilidade de ocorrência em demanda dos eventos primários da árvore de falhas sejam representadas, na entrada de dados, por parâmetros de

distribuições normais ou log-normais. Para a distribuição normal, devem ser fornecidas a média e desvio padrão e, para a distribuição log-normal, a mediana e o fator de erro.

A limitação em apenas duas distribuições de probabilidade não se justifica, pois os cálculos efetuados pelo módulo CRESSEX baseiam-se apenas no valor médio destas distribuições. Em vista disto, o módulo CRESSEX-M incorpora procedimentos que permitem a utilização de qualquer tipo de distribuição de probabilidade, desde que seja fornecido seu valor médio. Além disso, possibilita o uso da distribuição log-uniforme representada, alternativamente, pelos valores nos percentis 5% e 95%. Para a distribuição log-uniforme, o valor médio é calculado pela expressão:

$$\text{Média} = \frac{(P95\% - P5\%)}{[-\ln(P95\%) - \ln(P5\%)]} \quad (6.2.1-1)$$

onde $P_i\%$ representa o valor no percentil "i" (i = 5%, 95%).

6.2.2 Indisponibilidade

O CRESSEX-M utiliza a expressão (3.4-4), para o cálculo da indisponibilidade média provocada pela ocorrência de um evento primário testado, e a expressão (3.4-7), para o cálculo da indisponibilidade média provocada

pela ocorrência de eventos monitorados. Estas expressões fornecem resultados mais precisos que os obtidos pelas expressões (5.2.2-1) e (5.2.2-2) usadas pelo módulo CRESSEX.

6.2.3 Tempo de Processamento

Os tempos de processamento de diversos segmentos do módulo CRESSEX-M, tais como de: Leitura, Simulação e Análise Estatística dos Valores Simulados, são monitorados. A impressão destes tempos no relatório de saída permite que se possa estimar, antes de reiniciar um processamento, o tempo necessário para a obtenção de um determinado coeficiente de variação da confiabilidade do sistema. Além disso, estes dados fornecem subsídios para a análise da influência de alguns parâmetros, tais como o número de eventos primários e de sua indisponibilidade, sobre o tempo total de processamento.

6.2.4 Inclusão de Comentários

O relatório de saída do módulo CRESSEX-M incorpora comentários que fornecem detalhes metodológicos que permitem uma melhor avaliação, pelo usuário, dos resultados obtidos. Especificamente, são apresentadas explicações sobre o processo de simulação e sobre as expressões usadas na obtenção dos resultados.

6.2.5 Acoplamento com o Módulo STREUSL-M

Estão incorporados ao módulo CRESSEX-M, comandos

de saída que permitem a gravação do resultado da soma dos valores da indisponibilidade média dos cortes mínimos para serem utilizados pelo módulo STREUSL-M no processo de seleção de cortes mínimos.

6.2.6 Complementação de Dados de Saída

O relatório de saída do módulo CRESSEX-M contém diversas tabelas com informações adicionais às tabelas impressas pelo módulo CRESSEX. Além disso, opcionalmente, também podem ser impressas estimativas parciais da indisponibilidade média e não-confiabilidade do sistema, atualizadas a cada simulação do comportamento do sistema em um período T_{max} .

6.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO CRESSEX-M

Funcionalmente, o módulo CRESSEX-M é dividido nos segmentos de: Leitura de Dados, Preparação de Dados, Simulação do Comportamento do Sistema, Determinação de Cortes Mínimos e Análise Estatística dos Resultados Obtidos na Simulação. Um resumo das principais avaliações e procedimentos usados nestes segmentos encontram-se na TABELA 6.3-1.

Nesta seção, serão descritos apenas os três últimos segmentos citados acima, já que as descrições dos segmentos de Leitura e Preparação de Dados do módulo CRESSEX-M encontram-se documentadas em [50], [98], [100].

TABELA 6.3-1 Atividades Efetuadas pelos Segmentos do Módulo CRESSEX-M

SEGMENTO	CÁLCULOS - PROCEDIMENTOS
LEITURA	- Leitura dos dados dos eventos e de informações de controle do processamento fornecidos pelo módulo TREBIL-M.
PREPARAÇÃO DE DADOS	- Cálculo do valor médio da distribuição de probabilidade que representa a incerteza da taxa de ocorrência e a probabilidade de ocorrência em demanda dos eventos primários.
SIMULAÇÃO	- Número de jogos com falha do sistema. - Soma dos períodos em que o sistema se encontrou indisponível. - Determinação de cortes mínimos.
AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA	- Indisponibilidade média. - Não-confiabilidade em T_{max} . - Frequência relativa de falhas.

6.3.1 Segmento de Simulações do Comportamento do Sistema

O método de análise empregado no Segmento de Simulação do Comportamento do Sistema baseia-se na execução de um determinado número "N" de jogos, onde cada jogo consiste da simulação do estado ("presente" ou "ausente") dos eventos primários ao longo de um intervalo de tempo pré-estabelecido pelo usuário (Tmax). Na simulação destes eventos são levadas em consideração: a distribuição exponencial do tempo de espera para sua ocorrência, os tipos de detecção destes eventos (testado, monitorado, não-reparável) e os tempos em que o evento se encontra "ausente" após ter estado "presente" (tempo de reparo do componente). Como o módulo CRESSEX-M não trata da propagação de incerteza dos eventos primários, são considerados apenas o valor médio das distribuições de probabilidade que representam a incerteza dos dados de ocorrência dos eventos primários. A FIGURA 6.3.1-1 apresenta o esquema do Segmento de Simulação do Comportamento do Sistema.

A ocorrência de um evento primário é caracterizada, dentro de um jogo, quando o número pseudo-aleatório, "RND", gerado para o evento primário, for maior que a probabilidade de ocorrência do evento primário durante o tempo de observação do sistema (Tmax). Nestes casos, o instante de ocorrência dos eventos primários, detectados por testes ou por monitoração, são calculados para o instante em que a probabilidade de ocorrência adquire o valor "RND".

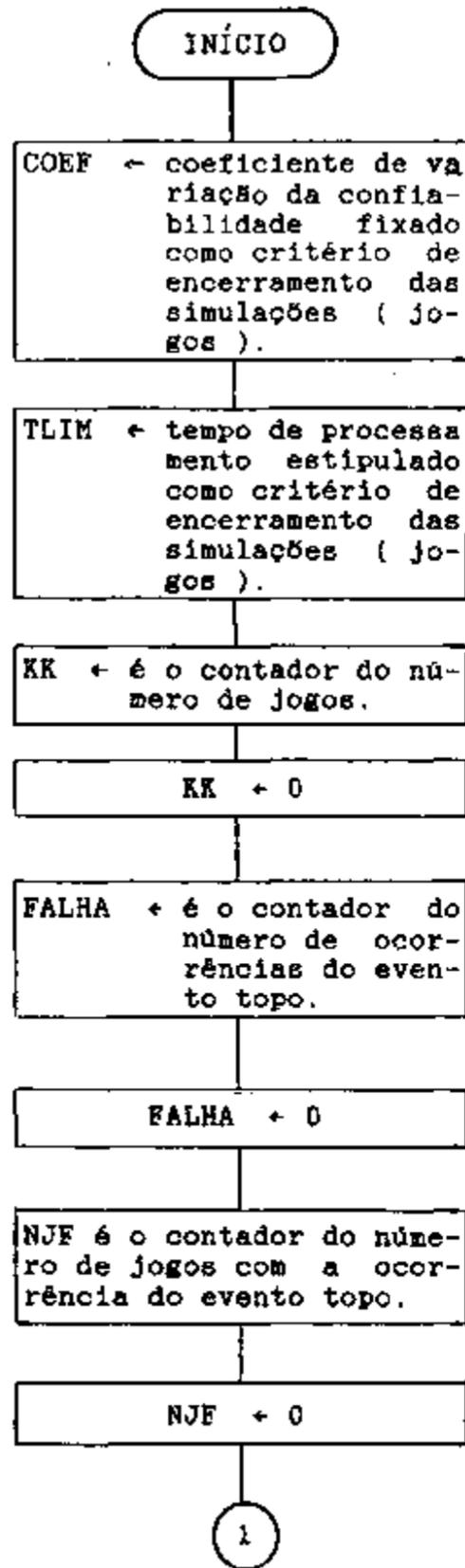


FIGURA 6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M

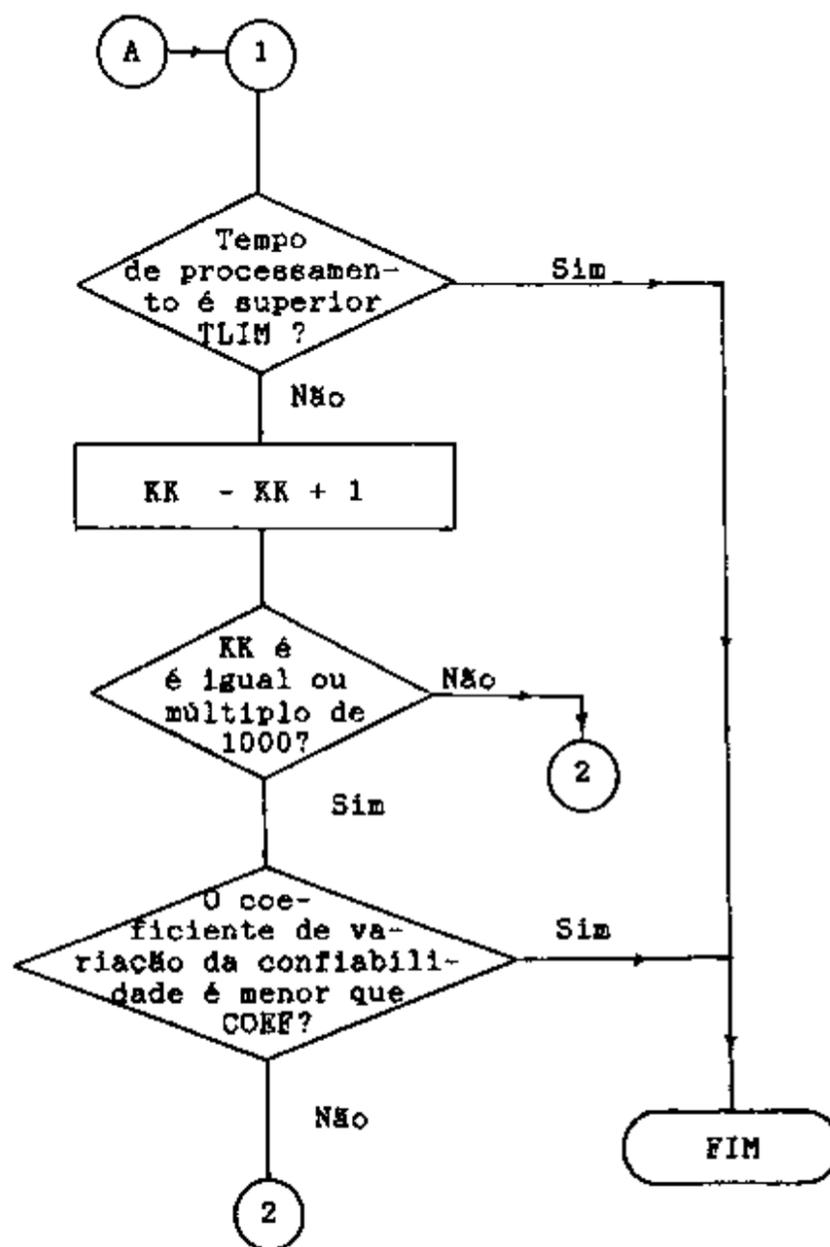


FIGURA 6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M

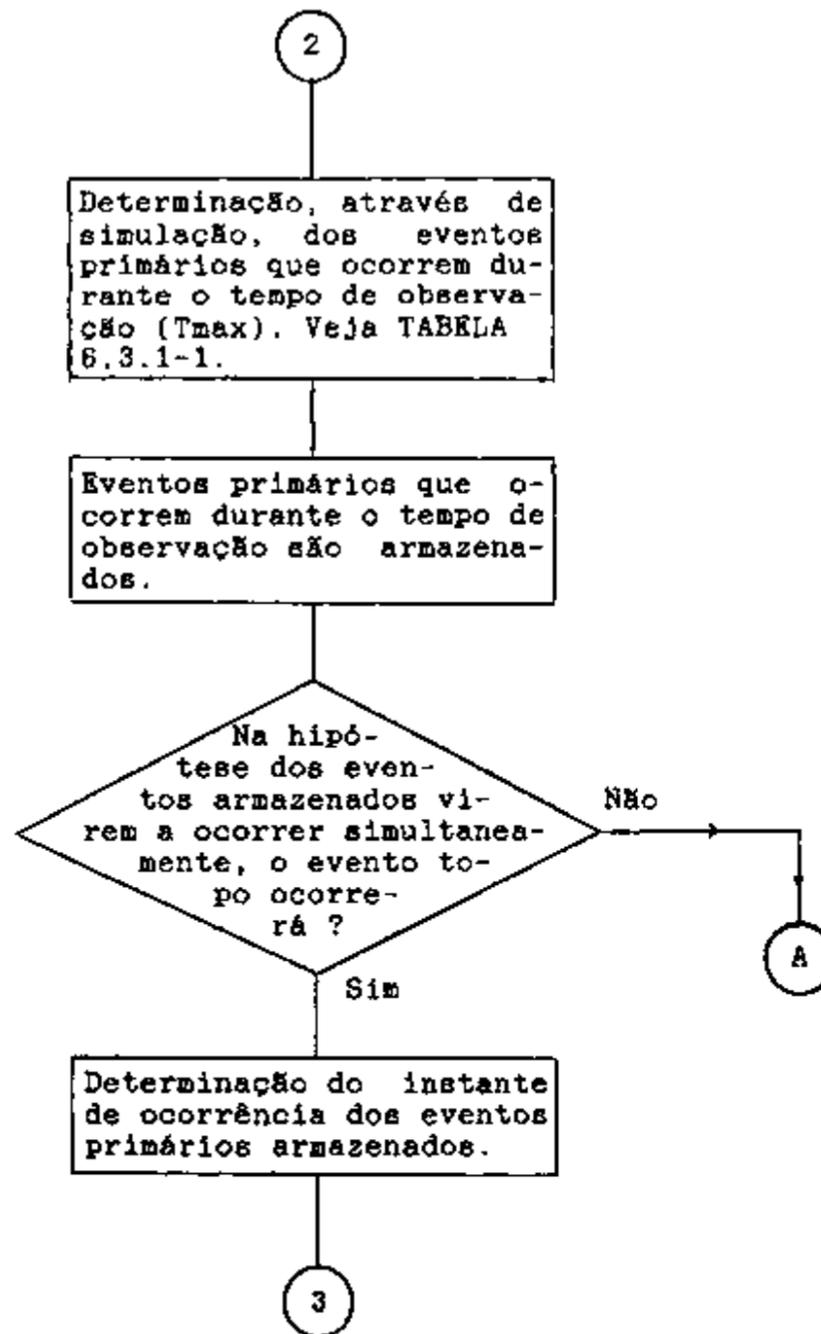


FIGURA 6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M (Continuação)

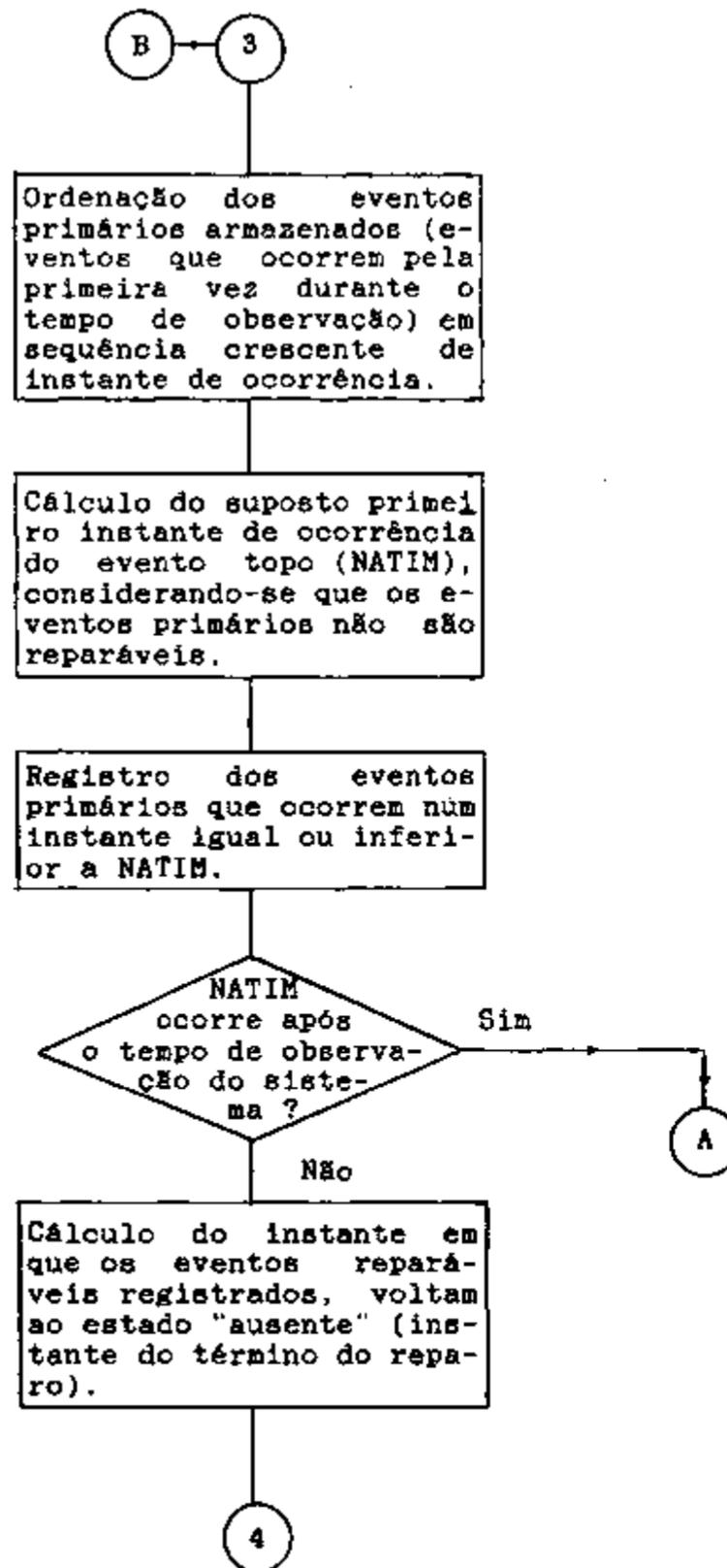


FIGURA 6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M (Continuação)

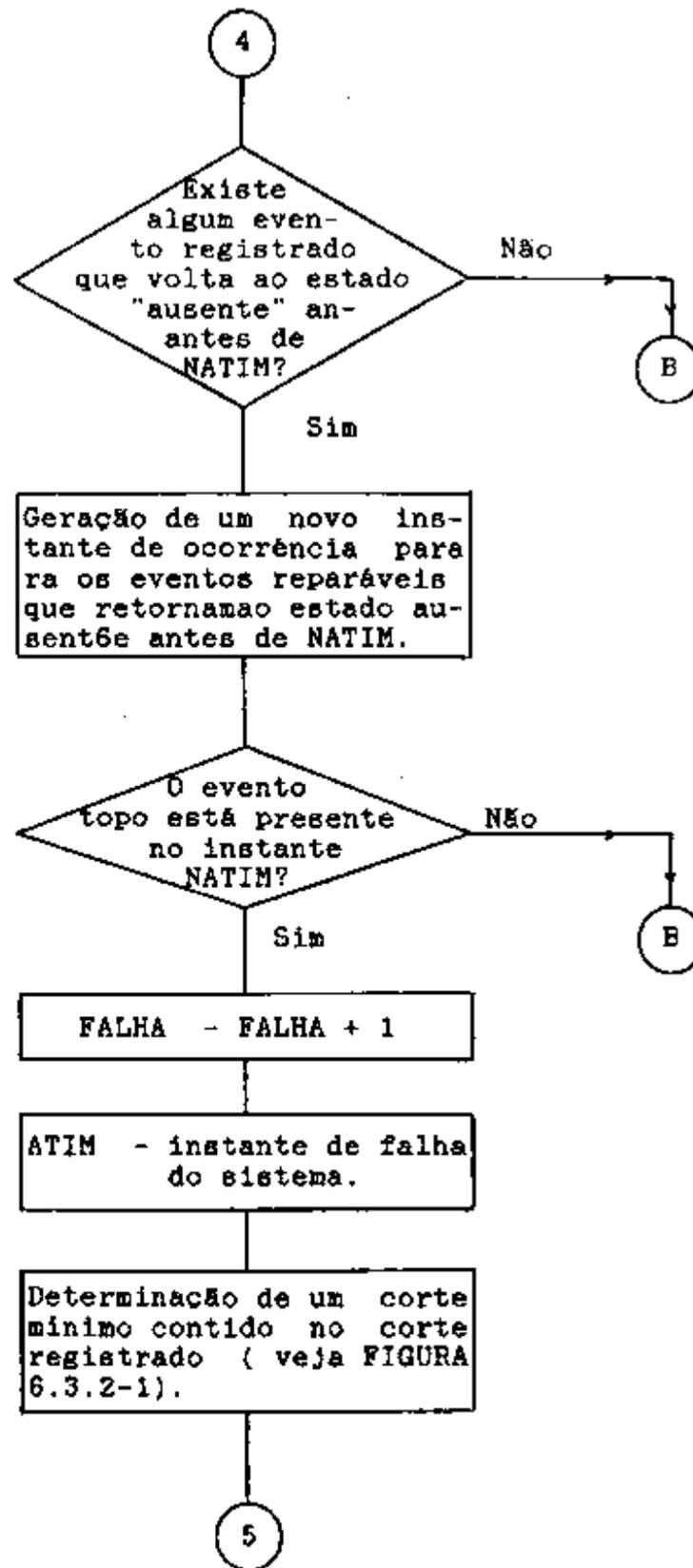


FIGURA 6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M

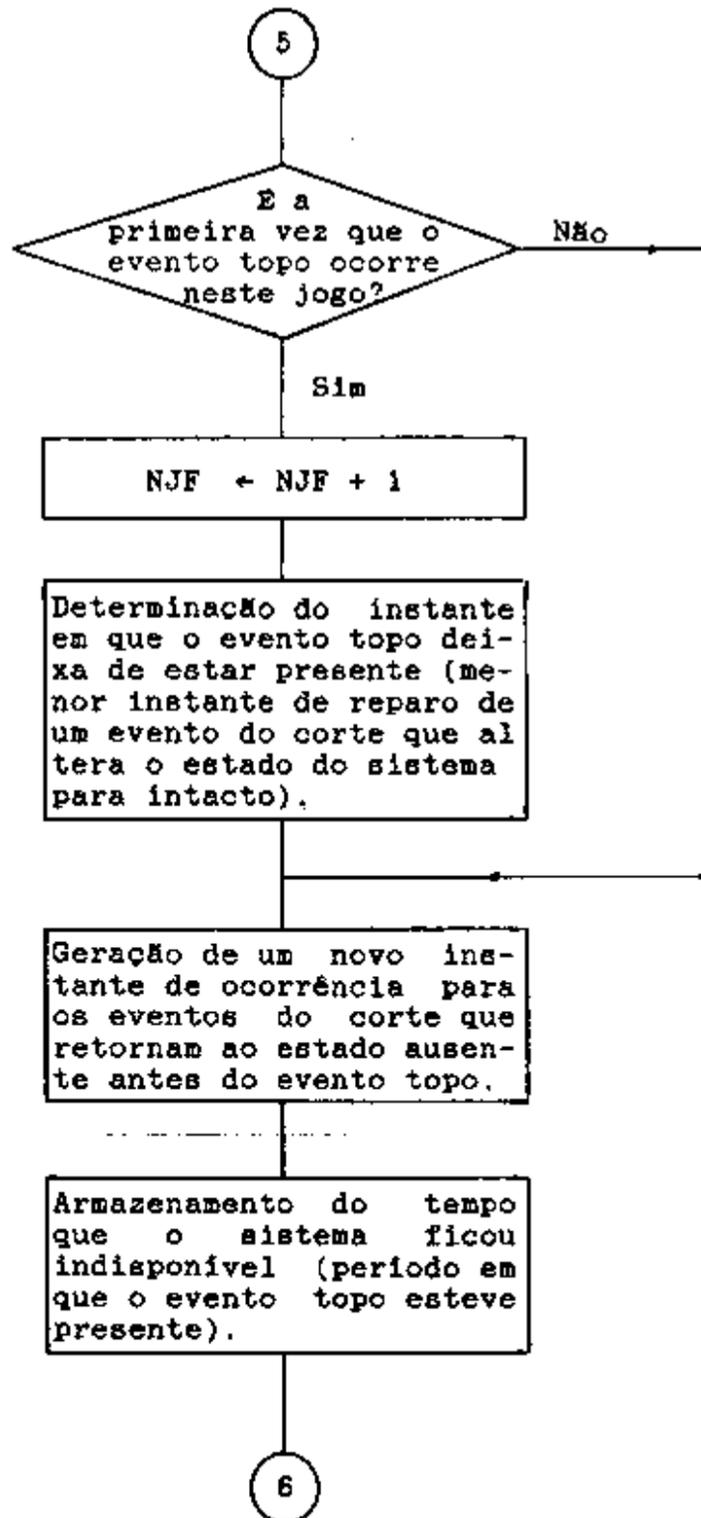


FIGURA 6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M (Continuação)

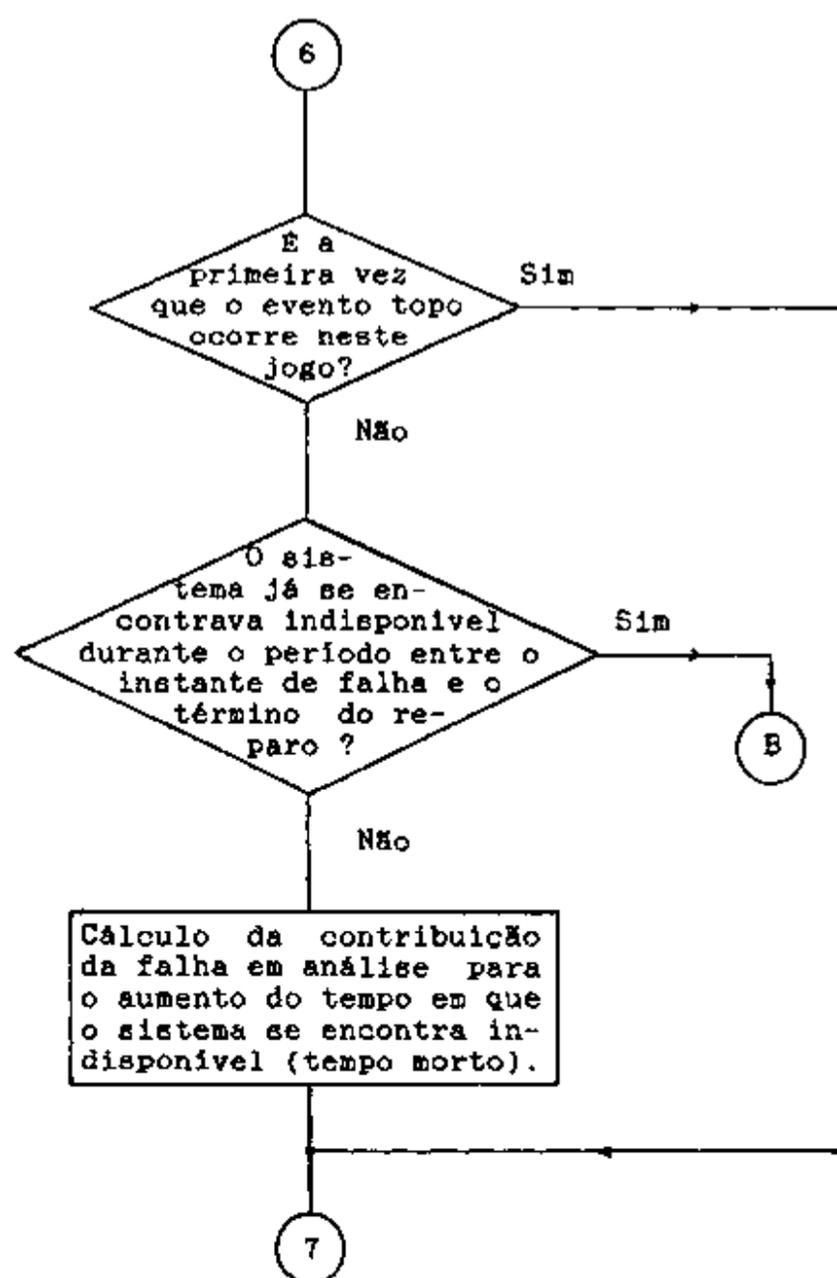


FIGURA 6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M (Continuação)

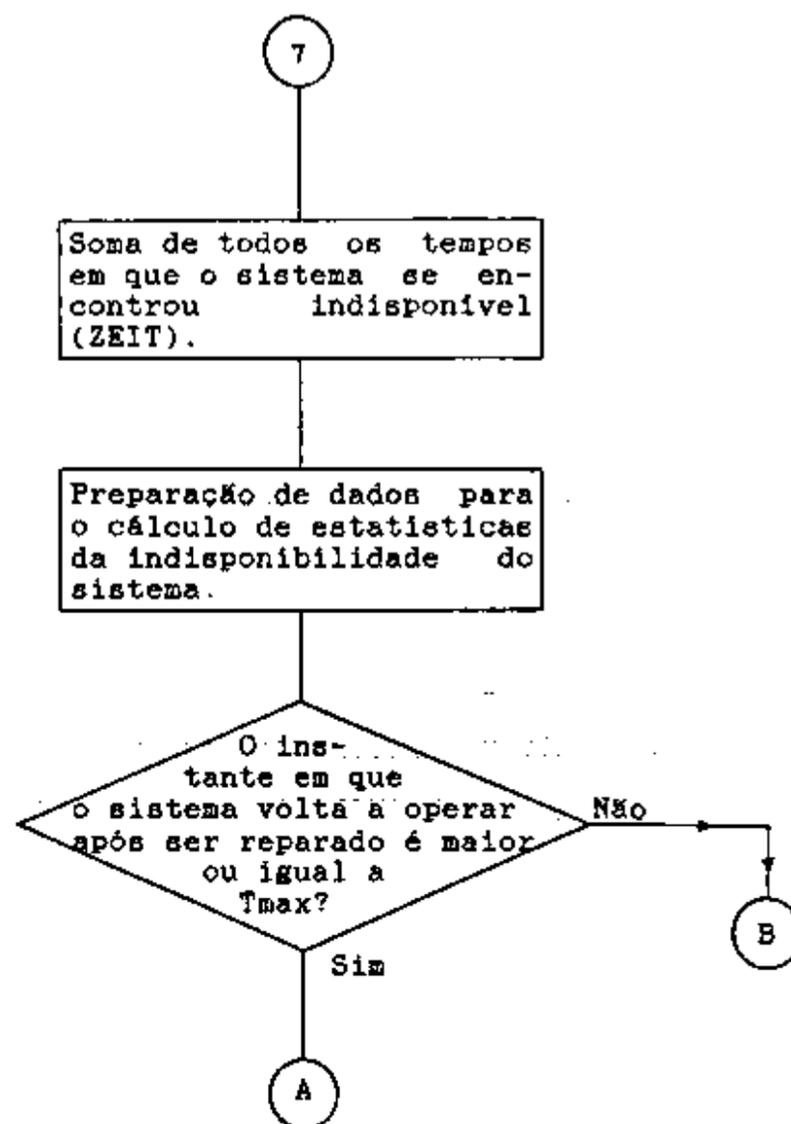


FIGURA 6.3.1-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M (Continuação)

Os eventos primários que ocorrem em demanda são tratados independentemente do tempo. Especificamente, supõe-se que o evento primário ocorre no instante zero. Esta suposição, evidentemente, nem sempre representa a realidade, podendo distorcer o valor da função de densidade do tempo de espera para a primeira ocorrência do evento topo.

Durante cada jogo, a influência das mudanças de estado (ocorrência ou não-ocorrência) dos eventos primários sobre o estado do evento topo é verificada pela função de estrutura da árvore de falhas contida na sub-rotina LOGIDR, construída pelo módulo TREBIL-M e, posteriormente, "linkeditada" ao módulo CRESSEX-M. Desta forma, é possível determinar, em cada jogo, os instantes de ocorrência do evento topo e os períodos de indisponibilidade do sistema. A TABELA 6.3.1-1 resume as principais considerações utilizadas para simular a ocorrência dos eventos primários e do evento topo.

Após os reparos, caso sejam concluídos antes do término do período de observação, repete-se o processo, simulando-se da mesma forma o comportamento do sistema.

Nos casos em que o evento topo não tiver ocorrido durante o tempo de observação do sistema (T_{max}), o jogo não terá simulado a falha do sistema, retornando-se ao início do Segmento de Simulações do Comportamento do Sistema para a execução de um novo jogo.

TABELA 6.3.1-1 Expressões Usadas na Simulação da Ocorrência de Eventos

CÁLCULO	EVENTO PRIMÁRIO		EVENTO TOPO (Sistema)
	EXPRESSÃO UTILIZADA	TIPO DE DETECÇÃO	
CONDIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DA OCORRÊNCIA	$RND > e^{-(\lambda T_{max})}$	- testado - monitorado	$\emptyset(X) = 1^{(a)}$
	$RND > p$	- não-reparável ^b	sub-rotina LOGIDR
INSTANTE DA PRIMEIRA OCORRÊNCIA	$-\text{Ln} \left[RND \frac{1}{\lambda} \right]$	- testado - monitorado	Menor instante em que $\emptyset(X)$ altera o seu valor de 0 para 1.
	instante zero	- não-reparável	
INSTANTE QUE O SISTEMA TORNA-SE DISPONÍVEL APÓS A OCORRÊNCIA DO EVENTO TOPO	$\frac{TWART}{NOL(I)} + TWART \text{INT} \left[\frac{TTF}{TWART} + 1 \right] + TMR$	- testado	Instante em que $\emptyset(X)$ altera seu valor de 1 para 0.
	TTF + TMR	- monitorado	
	—	- não-reparável	

Notas:

(a) $\emptyset(x)$ é a função de estrutura do evento topo da árvore de falhas.

$$\text{Onde: } \emptyset(X) = \begin{cases} 1, & \text{se o evento topo ocorrer.} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

(b) O termo "não-reparável" foi usado na coluna referente ao "tipo de detecção" para designar eventos que ocorrem em demanda e que não podem ser eliminados após terem ocorrido.

Nomenclatura:

"RND" é um número pseudo aleatório entre 0 e 1; " λ " é taxa de ocorrência do evento primário; " T_{max} " é o tempo de observação; " p " é a probabilidade de ocorrência em demanda do evento primário; "TWART" é o intervalo entre testes; "NOL(I)" é a quantidade de eventos primários, pertencentes ao grupo de intervalo entre testes "I", que serão testados sequencialmente; "TTF" é o tempo para que o evento considerado ocorra pela primeira vez durante T_{max} ; "TMR" é o tempo médio de reparo.

6.3.2 Segmento de Determinação de Cortes Mínimos

A rigor, este Segmento pode ser interpretado como um apêndice do Segmento de Simulação do Comportamento do Sistema, sendo processado todas as vezes que for simulada a ocorrência do evento topo.

O método utilizado na determinação do corte mínimo consiste em se alterar, sequencialmente, o estado dos eventos primários de "presente" para "ausente", partindo do último evento primário a ocorrer para o primeiro. Os eventos primários que, tendo seu estado modificado, produzirem a mesma modificação no estado do evento topo são registrados e reassumem, na sequência, o estado "presente". Ao se encerrar este processo os eventos primários registrados constituirão um corte mínimo.

A FIGURA 6.3.2-1 apresenta o esquema do algoritmo de determinação de cortes mínimos.

Fim da Execução de Jogos

A execução de jogos é encerrada quando o tempo de processamento for maior que um valor pré-fixado pelo usuário ou quando o coeficiente de variação da confiabilidade (desvio padrão / média) for menor que um valor percentual previamente definido.

A verificação do critério de tempo de processamento é efetuada no início de cada jogo, enquanto que, o

TABELA 6.3.1-1 Expressões Usadas na Simulação da Ocorrência de Eventos

CÁLCULO	EVENTO PRIMÁRIO		EVENTO TOPO (Sistema)
	EXPRESSÃO UTILIZADA	TIPO DE DETECÇÃO	
CONDIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DA OCORRÊNCIA	$RND > e^{-\lambda T_{max}}$	- testado - monitorado	$\theta(X) = 1^{(a)}$
	$RND > p$	- não-reparável ^b	sub-rotina LOGIDR
INSTANTE DA PRIMEIRA OCORRÊNCIA	$- \ln \left[RND \frac{1}{\lambda} \right]$	- testado - monitorado	Tem o instante em que $\theta(X)$ altera o seu valor de 0 para 1.
	instante zero	- não-reparável	
INSTANTE QUE O SISTEMA TORNA-SE DISPONÍVEL APÓS A OCORRÊNCIA DO EVENTO TOPO	$\frac{NOL(I)}{TWART} + TWART \text{INT} \left[\frac{TTR}{TWART} + 1 \right] + TMR$	- testado	Instante em que $\theta(X)$ altera seu valor de 1 para 0.
	$TTF + TMR$	- monitorado	
	—	- não-reparável	

Notas:

(a) $\theta(X)$ é a função de estrutura do evento topo da árvore de falhas.

Onde: $\theta(X) = \begin{cases} 1, & \text{se o evento topo ocorrer} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$

(b) O termo "não-reparável" foi usado na coluna referente ao "tipo de detecção" para designar eventos que ocorrem em demanda e que não podem ser eliminados após terem ocorrido.

Notação:

RND é um número pseudo-aleatório entre 0 e 1; λ é taxa de ocorrência do evento primário; T_{max} é o tempo de observação; p é a probabilidade de ocorrência em demanda do evento primário; TWART é o intervalo entre testes; NOL(I) é a quantidade de eventos primários, pertencentes ao grupo de intervalo entre testes "I", que serão testados sequencialmente; TTF é o tempo para que o evento considerado ocorra pela primeira vez durante T_{max} ; TMR é o tempo médio de reparo.

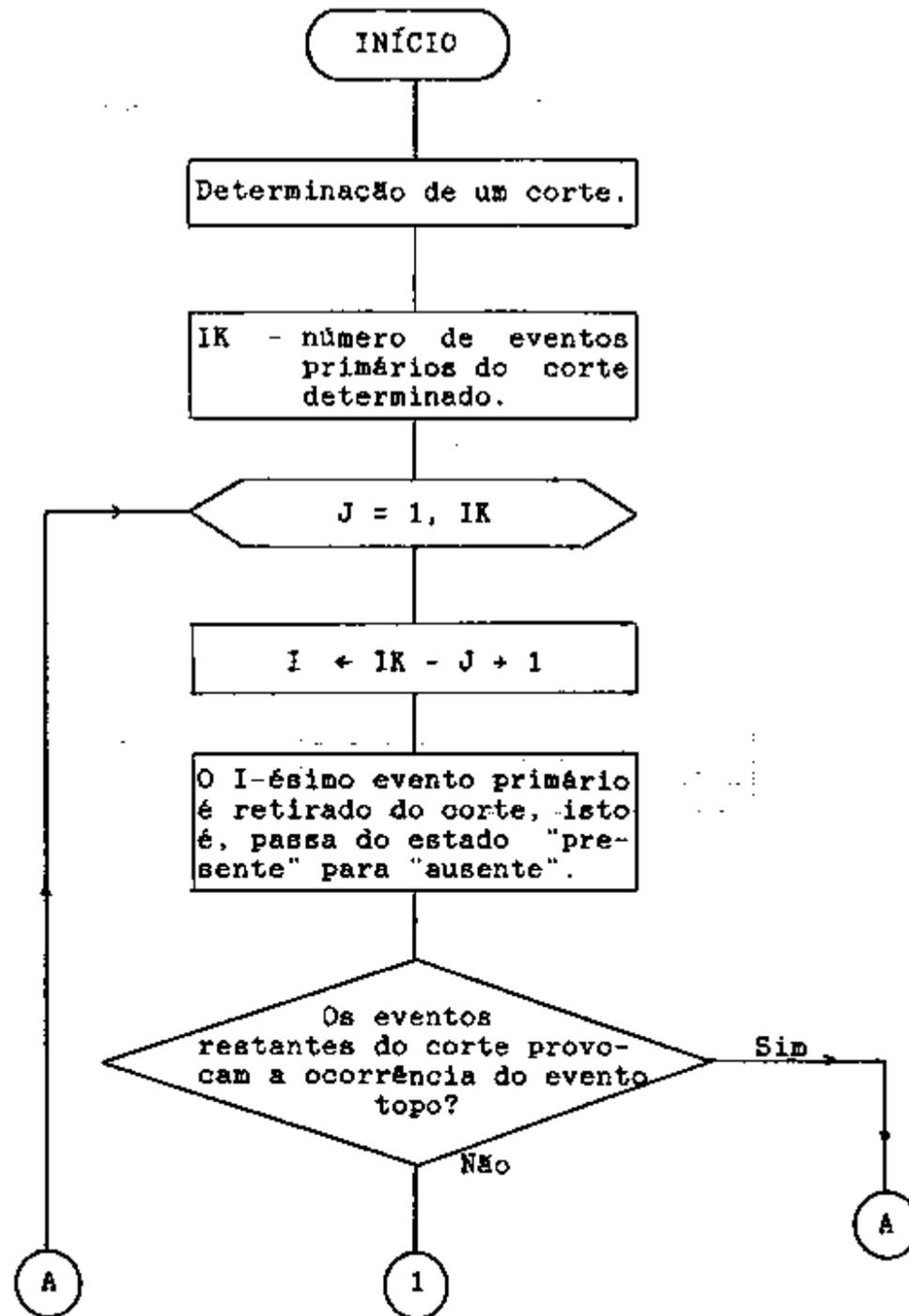


FIGURA 6.3.2-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M

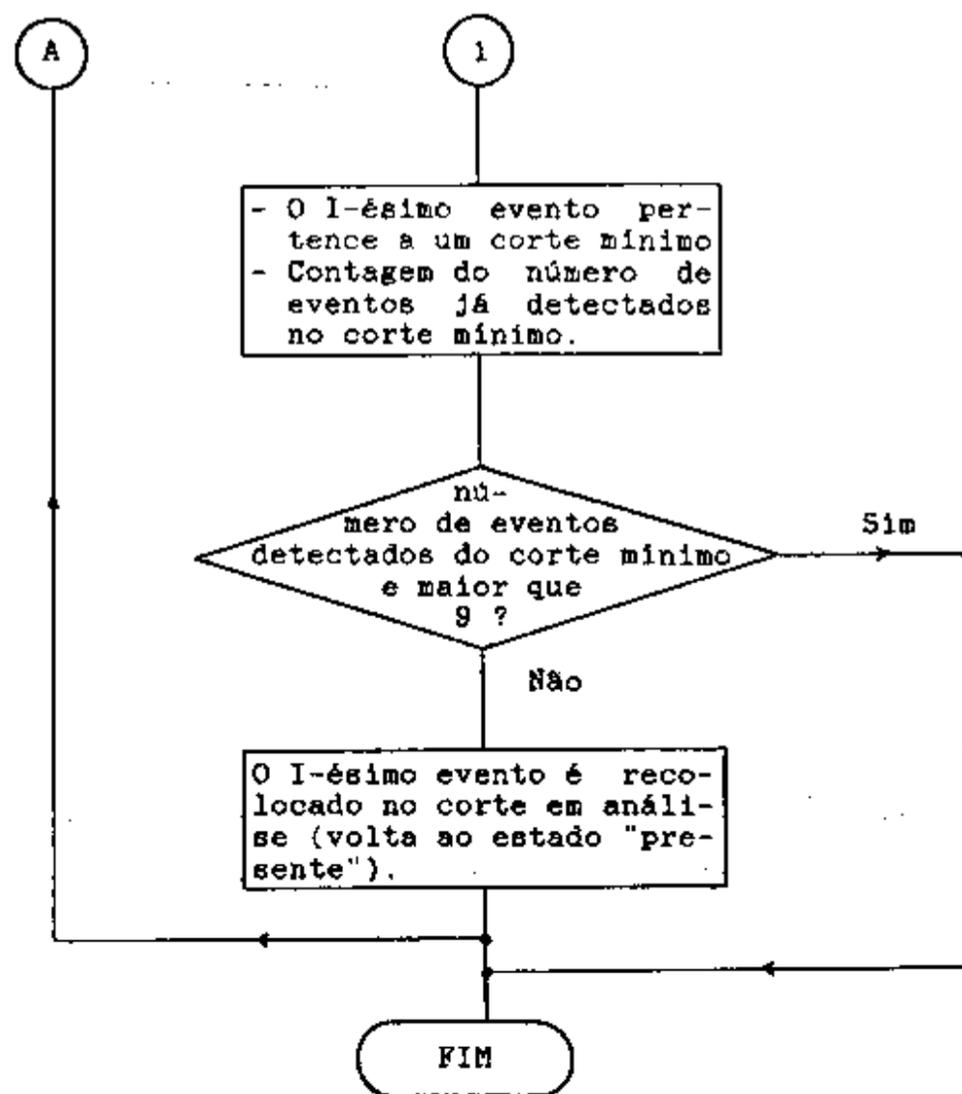


FIGURA 6.3.2-1 Esquema da Simulação Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M (Continuação)

coeficiente de variação da confiabilidade é verificado a cada 1000 jogos.

O coeficiente de variação da confiabilidade (CV) é calculado pela expressão:

$$\begin{aligned}
 CV &= \sqrt{\frac{Nq(1-q)}{Nq}} \\
 &= \sqrt{\frac{1-q}{Nq}} \\
 &= \sqrt{\frac{R_s}{NF}} \quad (6.3.2-1)
 \end{aligned}$$

que é obtida pressupondo-se que a distribuição do número de jogos com falha do sistema (ocorrência do evento topo) entre os N jogos é binomial com parâmetros:

q ----- probabilidade de falha do sistema (NF/N), onde NF é o número de falhas do sistema;

R_s ----- confiabilidade pontual do sistema.

Para sistemas com confiabilidade superior a 0,99 a expressão (4.3.2-1) é aproximada por:

$$CV = \sqrt{\frac{1}{NF}} \quad (6.3.2-2)$$

6.3.3 Segmento de Análise Estatística dos Resultados Obtidos na Simulação

Após a execução do último jogo, as informações acumuladas sobre a ocorrência do evento topo são utilizadas no cálculo de diversas características de confiabilidade do sistema. São elas:

Tempo Médio de Indisponibilidade do Sistema:

$$TMI = \frac{ZEIT}{NJF} \quad (6.3.3-1)$$

Tempo Médio entre Falhas do Sistema:

$$SMTBF = \frac{N T_{max} - ZEIT}{NJF} \quad (6.3.3-2)$$

Não-Confiabilidade do Sistema no Instante T_{max}:

$$F_s = \frac{NJF}{N} \quad (6.3.3-3)$$

Desvio Padrão da Não-Confiabilidade do Sistema:

$$S_c = \sqrt{\frac{F_s (1 - F_s)}{N - 1}} \quad (6.3.3-4)$$

Indisponibilidade Média do Sistema em Tmax:

$$Q = \frac{ZEIT}{(N \cdot Tmax)} \quad (6.3.3-5)$$

Desvio Padrão da Indisponibilidade Média do Sistema

$$S_1 = \frac{1}{N(N-1)(Tmax)} \left[Z1 - \frac{(ZEIT)}{N} \right] \quad (6.3.3-6)$$

Frequência Relativa de Falhas no Intervalo I:

$$FR(I) = \frac{NE(I)}{N} \quad (6.3.3-7)$$

Onde:

- N ----- Número total de jogos simulados.
- NJF ----- Número de jogos com falha do sistema.
- NE(I) ---- Número de jogos cuja primeira falha do sistema ocorreu no intervalo I.
- I ----- I = (1, 2, ..., 100) e representa o intervalo:
- $$\left[(I - 1) \frac{Tmax}{100}, I \frac{Tmax}{100} \right]$$
- Tmax ----- Tempo de observação do sistema durante um jogo.
- Z1 ----- Soma do quadrado dos tempos em que o sistema se encontrou indisponível nos "N" jogos.

ZEIT ----- Total acumulado dos tempos em que o sistema se encontrou indisponível durante os "N" jogos.

CAPÍTULO 7

7 PROGRAMA RALLY-M: MÓDULO STREUSL-M

7.1 INTRODUÇÃO

O módulo STREUSL-M foi elaborado no Departamento de Tecnologia de Reatores do IPEN-CNEN/SP para integrar, junto com o módulo CRESSEX-M, o Bloco de Análise Quantitativa do programa RALLY-M. Trata-se de uma versão aprimorada do módulo STREUSL, pertencente ao programa RALLY, capacitado para efetuar, através de métodos analíticos, a avaliação da indisponibilidade média de sistemas de engenharia e análise da propagação de incerteza.

7.2 VANTAGENS DO MÓDULO STREUSL-M EM RELAÇÃO AO MÓDULO STREUSL

O módulo STREUSL-M é fruto de diversos aperfeiçoamentos introduzidos no módulo STREUSL. Dentre os principais pontos de superioridade do Módulo STREUSL-M, destacam-se:

- Maior precisão dos resultados;
- Maior flexibilidade de uso;
- Maior consistência e clareza nos relatórios de saída;
- Menor tempo de processamento.

A TABELA 7.2-1 apresenta um resumo comparativo das principais características dos módulos STREUSL-M e

TABELA 7.2-1 Principais Diferenças entre os Módulos STREUSL e STREUSL-M

INFORMAÇÃO	STREUSL	STREUSL-M
Eventos cuja Análise de Confiabilidade Pode Ser Efetuada	Evento topo.	Evento topo e 100 eventos intermediários.
Módulos Fornecedores de Cortes Mínimos	CRESSEX e CRESSC (em processamentos diferentes).	CRESSC-M, MOCUS-M e CRESSEX-M (em um mesmo processamento ou não).
Cortes Mínimos Utilizados	Todos os cortes mínimos fornecidos.	Cortes mínimos necessários para se obter resultados com uma precisão pré-definida pelo usuário.
Intervalo Entre Testes	Valores múltiplos do período compreendido entre o instante zero e o primeiro teste de componente do sistema.	Qualquer intervalo.
Area de Memória	360.000 Bytes	434.352 Bytes

STREUSL.

7.2.1 Precisão de Resultados

A precisão das estimativas da indisponibilidade média de sistemas foi sensivelmente melhorada com as mudanças introduzidas. Para isto, contribuíram principalmente as alterações feitas no procedimento de integração numérica, que será detalhada nas seções 7.3.1 e 7.3.2, e nas expressões analíticas usadas no cálculo da indisponibilidade, provocada pela ocorrência de eventos primários testados e monitorados.

Eventos Testados: A expressão (3.4-5) é usada no cálculo da indisponibilidade média em substituição à expressão aproximada (5.2.2-1).

Eventos Monitorados: A expressão (5.2.2-2), que originalmente era usada para o cálculo da indisponibilidade média de componentes provocada pela ocorrência de eventos monitorados, passou a ter seu uso limitado aos casos em que o erro proporcionado pelo seu uso fosse menor que 1%. Em caso contrário é usada a expressão (3.4-7), que apresenta melhores resultados.

7.2.2 Flexibilidade de Uso

Os aperfeiçoamentos incorporados ao módulo STREUSL-M, no sentido de dotá-lo de grande flexibilidade, não acarretaram acréscimos significativos na área de memória ou no tempo de processamento e encontram-se, resumida-

mente, descritos a seguir.

7.2.2.1 Acoplamento ao Módulo MOCUS-M: No programa RALLY, os cortes mínimos usados pelo módulo STREUSL no cálculo da indisponibilidade média do sistema somente podem ser fornecidos pelos módulos CRESSC ou CRESSEX. No programa RALLY-M, o fornecimento de cortes mínimos para o módulo STREUSL-M pode ser efetuado pelos módulos CRESSC-M, CRESSEX-M e MOCUS-M, o que permite ao usuário se beneficiar de algumas características do módulo MOCUS-M, tais como: a garantia de que todos os cortes mínimos de ordem igual ou inferior a um determinado valor estipulado pelo usuário e o fato do tempo de processamento não depender da probabilidade de ocorrência dos cortes mínimos.

7.2.2.2 Avaliação de Eventos Intermediários: O módulo STREUSL limita-se a analisar a confiabilidade relacionada unicamente com o evento topo. Nestas circunstâncias, a análise de eventos intermediários da árvore de falhas somente pode ser efetuada em outro processamento independente, com a estrutura da árvore de falhas convenientemente alterada. Em vista disso, introduziram-se ao módulo STREUSL-M uma série de procedimentos que permitem a análise de confiabilidade de até 100 sub-sistemas (eventos intermediários) em um mesmo processamento. Esta modificação exigiu que fosse incorporada ao módulo STREUSL novas variáveis para armazenar informações sobre estes eventos, além de comandos especiais para controlar a execução do

módulo.

7.2.2.3 Alimentação Múltipla do Módulo: Durante a execução do programa RALLY, apenas um de seus módulos poder fornecer cortes mínimos para o módulo STREUSL. Esta característica dificulta a análise de eventos intermediários, pois não permite que possa escolher os módulos que, por suas características, apresentem melhor desempenho.

Em vista disto, foram incorporados ao módulo STREUSL-M procedimentos que permitem que os cortes mínimos do evento topo e de eventos intermediários possam ser fornecidos por módulos distintos do programa RALLY-M. É possível, por exemplo, analisar, num mesmo processamento, a indisponibilidade média do sistema, provocada pela ocorrência do evento topo utilizando cortes mínimos fornecidos pelo módulo CRESSC-M e a indisponibilidade média provocada pela ocorrência de eventos intermediários, a partir de cortes mínimos fornecidos pelo módulo MOCUS-M.

7.2.2.4 Avaliação de Sistemas sem Eventos Testados

O módulo STREUSL-M não está limitado, como o módulo STREUSL, a efetuar exclusivamente a análise de sistemas que contenham pelo menos um evento testado, estando capacitado a processar árvores de falha contendo qualquer combinação, envolvendo os eventos: monitorado, em demanda, testados ou não-reparáveis.

7.2.3 Redução do Tempo de Processamento

Todos os cortes mínimos do evento topo fornecidos na entrada de dados do módulo STREUSL são considerados no processo de cálculo da indisponibilidade média do sistema. Isto inclui, indistintamente, tanto cortes mínimos que contribuem fortemente para a indisponibilidade do sistema, quanto os cortes com contribuição desprezível. Este procedimento provoca, evidentemente, uma utilização ineficiente do tempo de processamento.

Assim, com o objetivo de reduzir o tempo de processamento, o módulo STREUSL-M incorpora um critério de seleção de cortes mínimos para o cálculo da indisponibilidade. Este critério consiste em selecionar o menor número de cortes mínimos cuja soma das suas indisponibilidades médias implica em um erro, em relação ao valor obtido considerando todos os cortes mínimos, menor que um valor percentual pré-estabelecido pelo usuário.

A implementação computacional deste critério, quando os cortes mínimos são fornecidos pelo CRESSC-M ou CRESSEX-M, é feita junto aos comandos de leitura da indisponibilidade média dos cortes mínimos. Como o módulo MOCUS-M não fornece estimativas das indisponibilidades médias ao módulo STREUSL-M, foi necessária a construção da sub-rotina IMPCOR com esta finalidade, implicando num acréscimo de 68904 bytes na memória do módulo.

7.2.4 Alterações no Relatório de Saída

O relatório de saída do módulo STREUSL-M apresenta diversas melhorias, em relação ao relatório de saída do módulo STREUSL. As principais diferenças entre os relatórios emitidos pelos dois módulos são as seguintes:

7.2.4.1 Informações de Caráter Metodológico: O relatório de saída, conforme originalmente proposto no módulo STREUSL, não fornece informações que permitem aos usuários, que não conheçam, "a priori", detalhes da metodologia empregada, uma avaliação crítica dos resultados. Além disso, a falta de explicações sobre as tabelas e o fato de ser escrito em inglês dificultam a sua anexação em trabalhos ou relatórios no Brasil.

A fim de atenuar estes problemas, elaborou-se um relatório de saída inteiramente escrito em português, auto-explicativo, contendo ao lado de cada avaliação probabilística uma descrição sucinta do método de cálculo utilizado. Além disso, procurou-se eliminar as dúvidas mais comuns com respeito a tabelas e gráficos, com a introdução de comentários e indicações de escala para permitir uma rápida e mais eficiente leitura das curvas.

7.2.4.2 Informações sobre o Tempo de Processamento: As informações sobre os tempos de processamento do módulo STREUSL são imprecisas e impossibilitam uma boa avaliação de seu desempenho. Em virtude disto, foram introduzidas modificações para permitir a determinação dos tempos de

processamento nos segmentos de: Leitura de Dados; Preparação de Dados; Estimativas da Indisponibilidade Média; Simulação e de Análise Estatística da Amostra Simulada. Diversas etapas do Segmento de Simulação também são avaliadas quanto ao tempo de processamento.

7.2.4.3 Informações Sobre Eventos Intermediários: Passaram a ser impressas informações sobre os eventos intermediários avaliados (cortes mínimos, indisponibilidade, análise da propagação da incerteza, etc).

7.2.4.4 Indisponibilidade Pontual: A fim de possibilitar o estudo do comportamento da função de indisponibilidade pontual do sistema ao longo do tempo, introduziu-se uma tabela que fornece os valores dessa indisponibilidade em 100 instantes de tempo regularmente distribuídos e nos instantes de teste que produzam alterações maiores que 10% na indisponibilidade do sistema (pontos de inflexão da função de indisponibilidade). Esta tabela é construída pela sub-rotina UNAMAX, sendo sua impressão opcional.

7.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO STREUSL-M

O módulo STREUSL-M é composto pelos segmentos de:

- Leitura de Dados;
- Preparação de Dados;
- Estimativas da Indisponibilidade Média de Eventos de Interesse;
- Simulações da Indisponibilidade Média de Eventos

- de Interesse (Propagação da Incerteza) e
- Análise Estatística da Amostra Simulada.

O segmento de Leitura de Dados encontra-se descrito no manual do usuário [100]. A descrição dos demais segmentos são apresentadas nesta seção.

7.3.1 Segmento de Preparação de Dados

Neste segmento, são definidos os valores dos parâmetros e variáveis que serão usados nas avaliações de confiabilidade. A sequência de cálculos deste segmento é ilustrada pelo fluxograma da FIGURA 7.3.1-1. A TABELA 7.3.1-1 identifica os dados calculados neste segmento e aponta o tipo de avaliação a que se destinam. Algumas informações que complementam a TABELA 7.3.1-1 são apresentadas a seguir.

- a) A seleção de cortes mínimos, caso tenham sido fornecidos pelo módulo MOCUS-M, é feita pela sub-rotina, IMPCOR cujo fluxograma é apresentado na FIGURA 7.3.1-2.
- b) O cálculo do valor médio e dos percentis 5% e 95% das distribuições de probabilidade: log-normal, normal, log-uniforme e uniforme, associadas às taxas de falha e probabilidade de falha em demanda, são efetuadas pelas expressões deduzidas na referência [69].

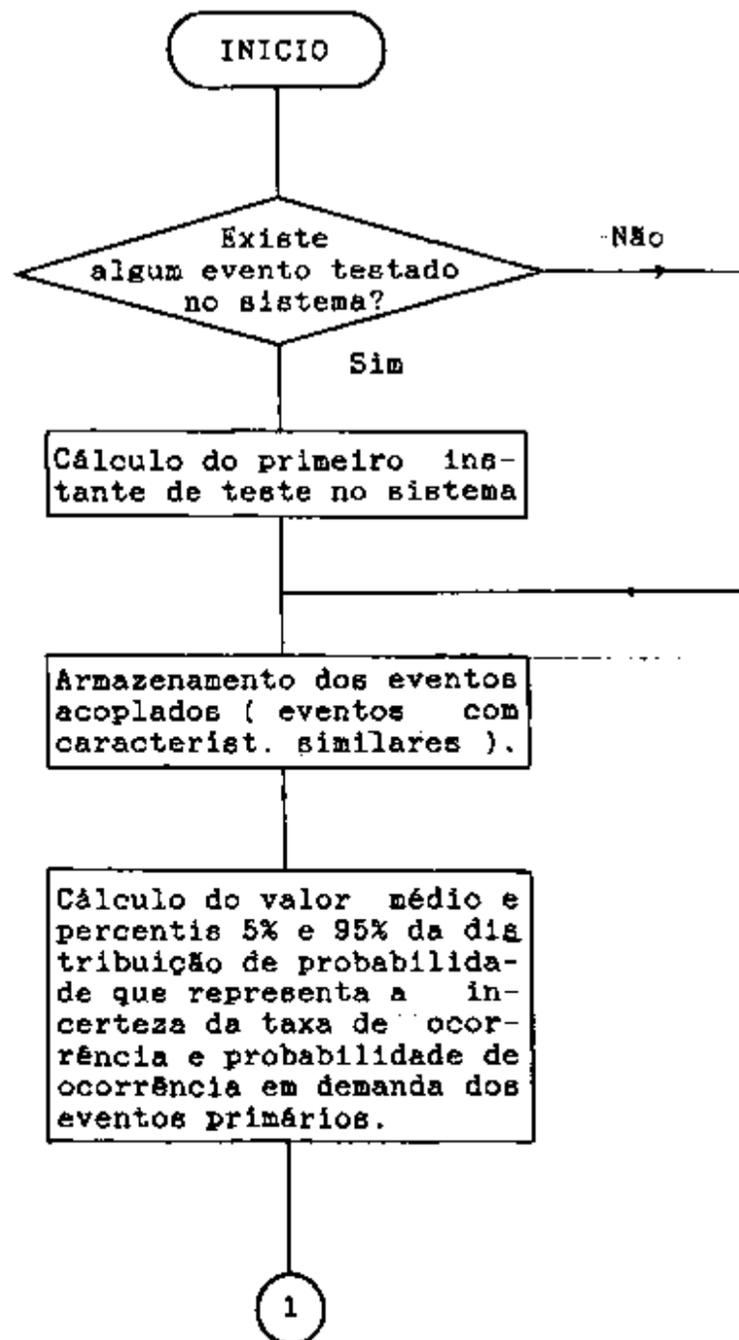


FIGURA 7.3.1-1 Esquema do Segmento de Preparação de Dados

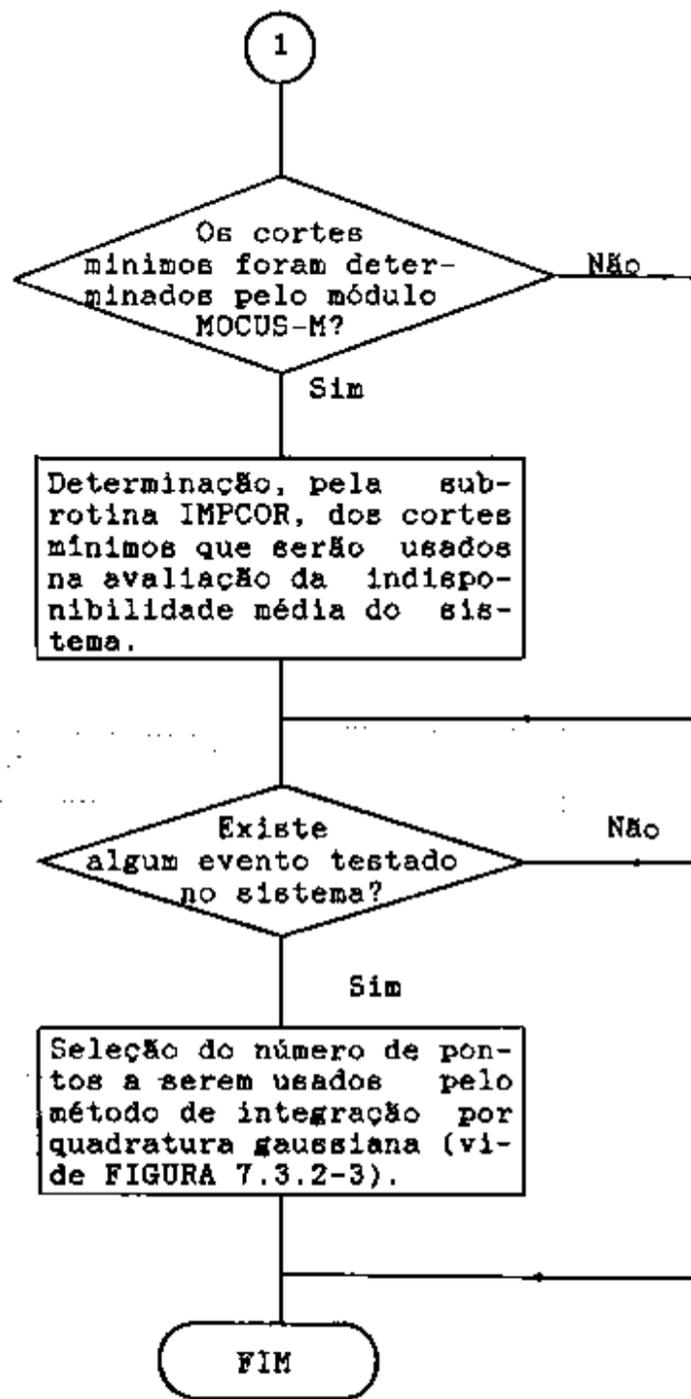


FIGURA 7.3.1-1 Esquema do Segmento de Preparação de Dados (Continuação)

TABELA 7.3.1-1 Dados Calculados no Segmento de Preparação de Dados

VALORES CALCULADOS	AVALIAÇÃO A QUE SE DESTINA O VALOR CALCULADO
- Cortes mínimos selecionados dentre os fornecidos pelo módulo MOCUS-M (opcional).	Indisponibilidade média do sistema.
- Valor médio e percentis 5% e 95% da probabilidade ou taxa de falhas fornecida.	Indisponibilidade média pontual do sistema.
- Primeiro instante de teste de componentes do sistema (ISTEP). - Vetor identificador dos grupos de componentes cujos instantes de testes não são múltiplos de ISTEP. - Número de pontos usados pelo método de quadratura gaussiana	Indisponibilidade média pontual para sistemas com dependência temporal.
- Vetor que contém eventos cuja taxa de ocorrência ou a probabilidade de ocorrência em demanda são acoplados.	Distribuição de incerteza da indisponibilidade média do sistema.

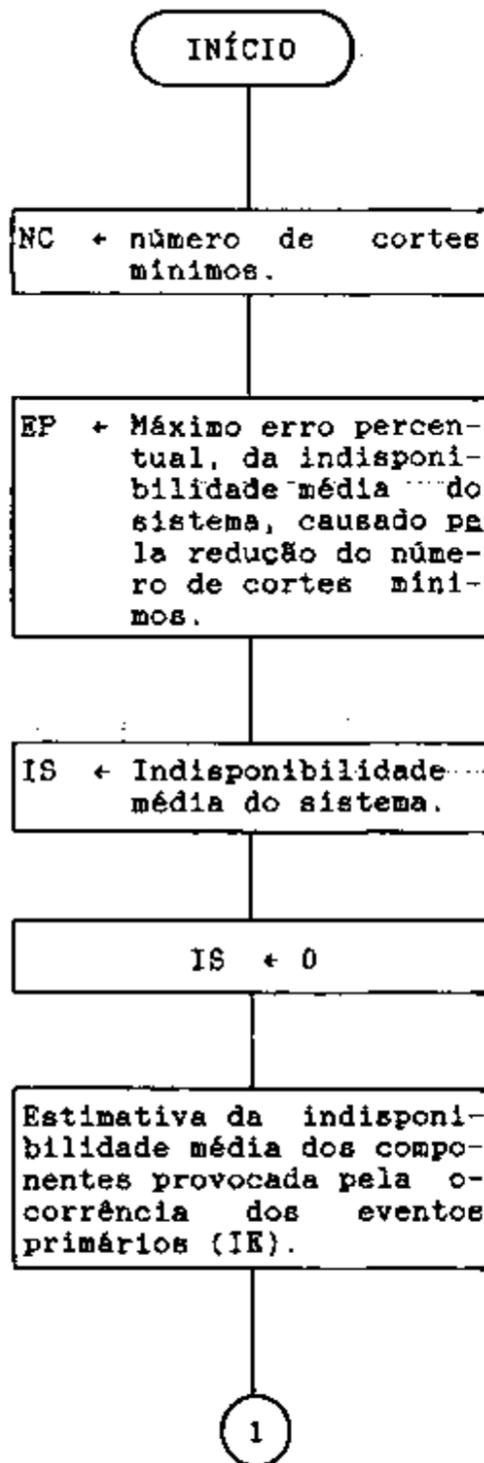


FIGURA 7.3.1-2 Esquema da Sub-Rotina IMPCOR

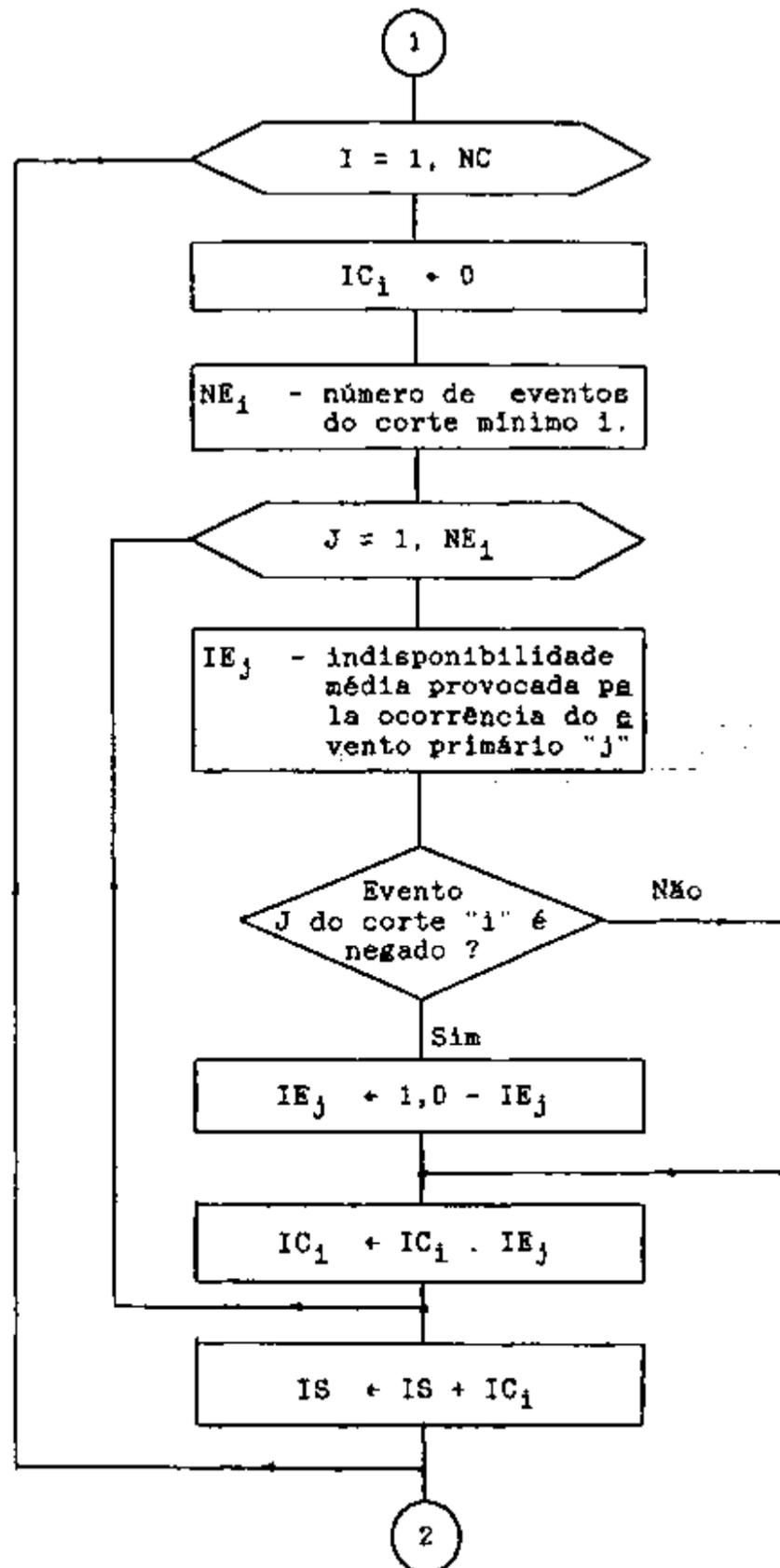


FIGURA 7.3.1-2 Esquema da Sub-Rotina IMPCOR (Continuação)

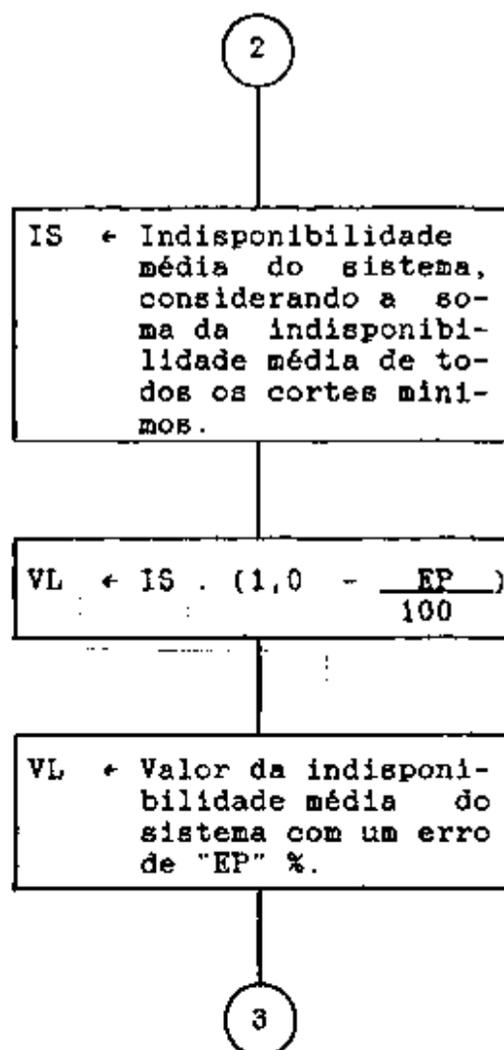


FIGURA 7.3.1-2 Esquema da Sub-Rotina IMPCOR (Continuação)

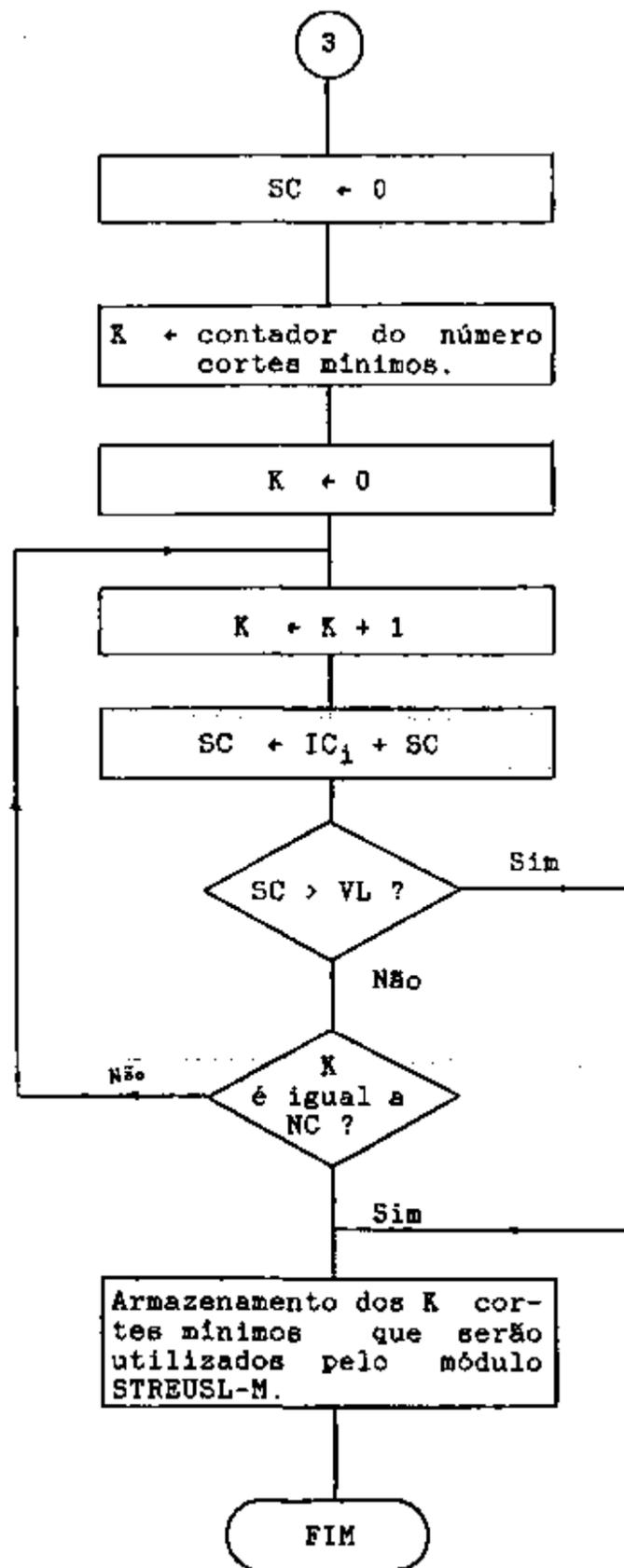


FIGURA 7.3.1-2 Esquema da Sub-Rotina IMPCOR (Continuação)

- c) O vetor identificador dos grupos de eventos primários testados sequencialmente é calculado para ser usado na determinação dos passos de integração numérica, cujo procedimento será descrito na seção 7.3.2.2.
- d) O número de pontos escolhidos para ser usado pelo método de integração por quadratura gaussiana, usado na determinação da indisponibilidade média pela sub-rotina TIMUNA, teve seu critério de seleção modificado. Originalmente, o número de pontos "i" ($i=1,2,\dots,5$), usado pelo método, era obtido quando o erro percentual entre o valor obtido para a indisponibilidade média usando "i" e "i + 1" pontos por intervalo, fosse menor que 4%. Este limite foi alterado para 1%, a fim de melhorar a precisão do resultado. A FIGURA 7.3.1-3 esquematiza o procedimento utilizado para esta seleção.
- e) Eventos primários acoplados, isto é, oriundos de componentes que apresentam similaridade entre si quanto ao tipo, fabricação, regime de operação e condições ambientais, são armazenados para serem utilizados, posteriormente, no Segmento de Simulações da Indisponibilidade Média de Eventos de Interesse.

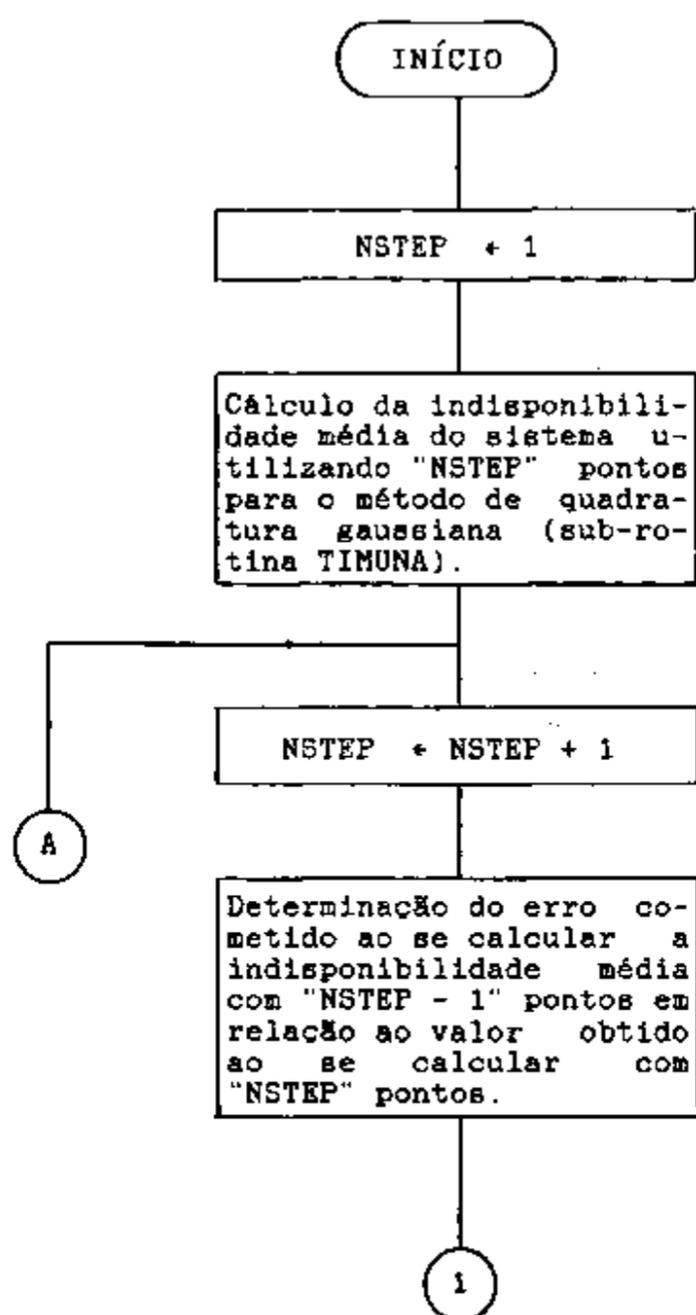


FIGURA 7.3.1-3 Esquema da Determinação do Número de Pontos Usados pelo Método de Quadratura Gaussiana

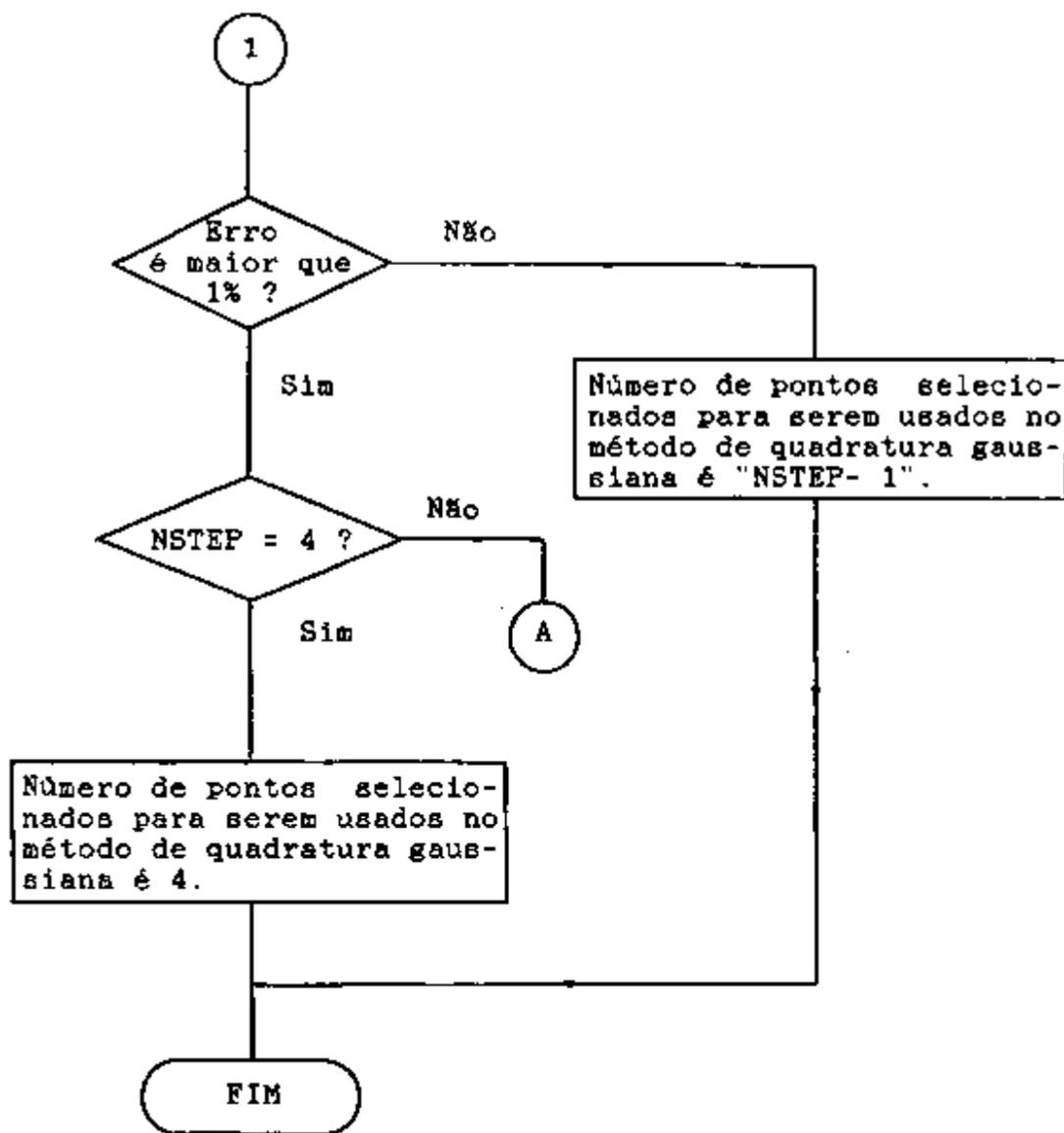


FIGURA 7.3.1-3 Esquema da Determinação do Número de Pontos Usados pelo Método de Quadratura Gaussiana (Continuação)

7.3.2 Segmento de Estimativas Pontuais da Indisponibilidade Média do Sistema

Neste segmento, é efetuada uma estimativa pontual da indisponibilidade média do sistema, considerando a média das distribuições de probabilidade que representam a incerteza da taxa de ocorrência e a probabilidade de ocorrência em demanda dos eventos primários. Também são efetuadas estimativas pessimistas e otimistas, considerando os valores da distribuição nos percentis 5% e 95%, respectivamente.

A TABELA 7.3.2-1 indica os cálculos efetuados em função do tipo de dependência do sistema com o tempo. A FIGURA 7.3.2-1 apresenta o fluxograma do Segmento de Estimativas da Indisponibilidade do Sistema.

7.3.2.1 Metodologia Utilizada

A metodologia utilizada no cálculo da indisponibilidade média provocada pelo evento analisado é baseada no método de cortes mínimos. Neste método, a indisponibilidade de um sistema pode ser calculada através da indisponibilidade da união dos "m" cortes mínimos ("C"), isto é:

$$Q_S(t) = Q_{(U_{P_m}, C_i)}(t) \quad (7.3.2.1-1)$$

que pode ser expandida através do princípio de inclusão-exclusão da seguinte forma:

TABELA 7.3.2-1 Avaliações Pontuais Efetuadas pelo Módulo STREUSL-M

DEPENDÊNCIA TEMPORAL	RESULTADO OBTIDO	PARÂMETRO DE LOCAÇÃO	SUB-ROTINA UTILIZADA
SIM	Indisponibilidade média	média	TIMUNA
	Indisponibilidade média (aproximação)	média	MEAUNA
	Indisponibilidade média	percentis 5% e 95%	TIMUNA
	Indisponibilidade nos instantes de teste	média	UNAMAX
	Indisponibilidade máxima obtida durante o tempo de observação	média	UNAMAX
NÃO	Probabilidade de falha	média	MEAUNA
	Probabilidade de falha	percentis 5% e 95%	MEAUNA

Nota : O parâmetro de locação é referente à taxa de ocorrência e a probabilidade de ocorrência em demanda dos eventos primários.

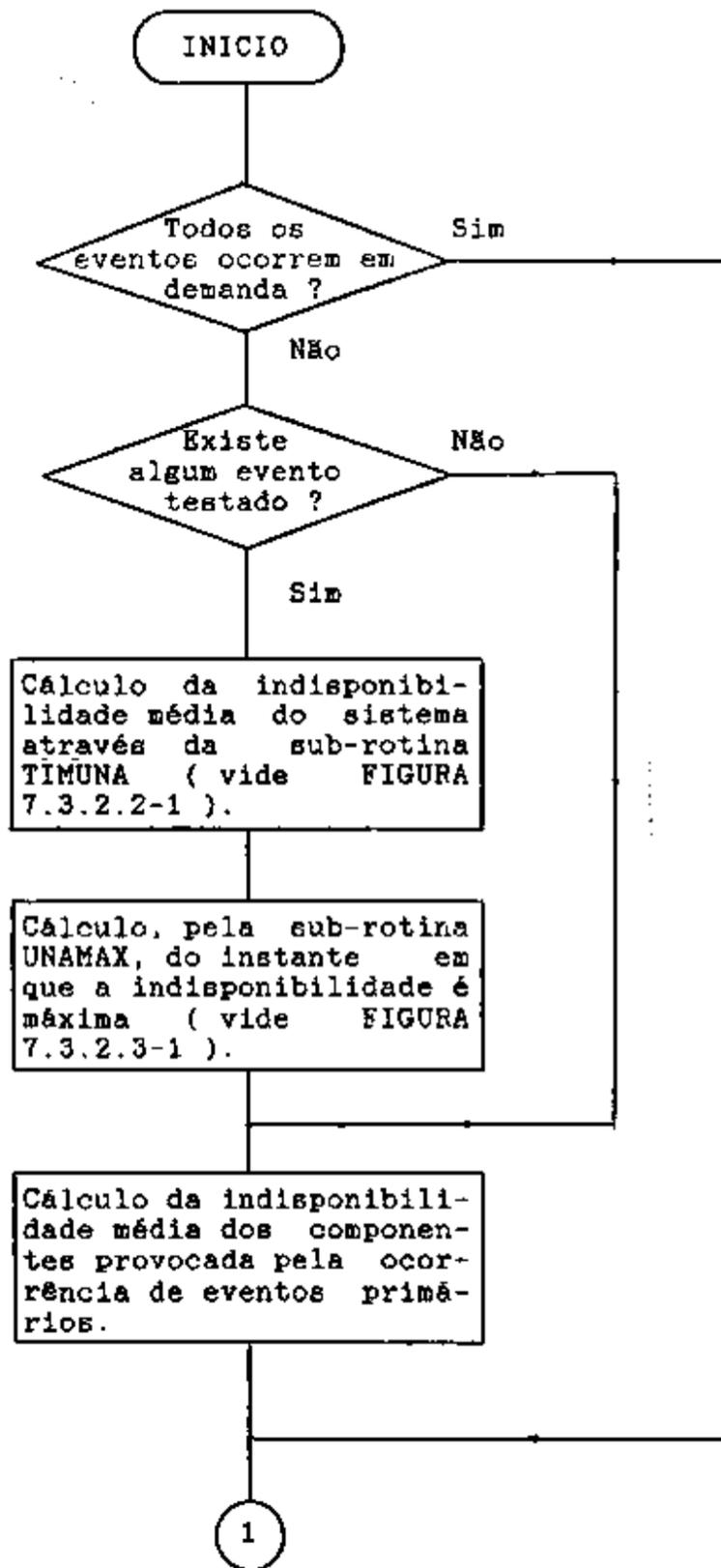


FIGURA 7.3.2-1 Esquema do Segmento de Estimativas Pontuais da Indisponibilidade

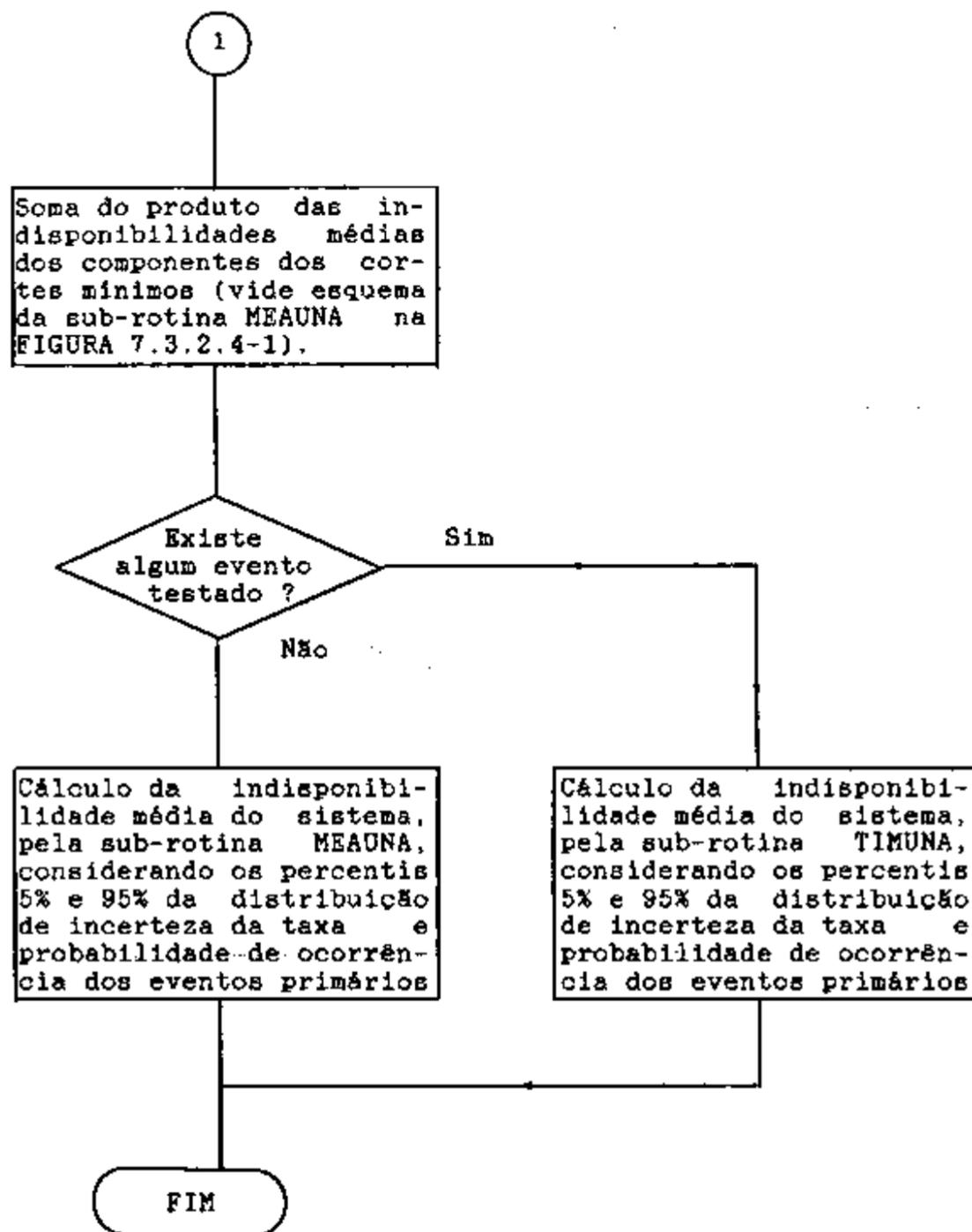


FIGURA 7.3.2-1 Esquema do Segmento de Estimativas Pontuais da Indisponibilidade (Continuação)

$$Q_S(t) = \sum_{i=1}^m Q_{C_i}(t) - \sum_{i=2}^m \sum_{j=1}^{i-1} Q_{(C_i, C_j)}(t) + \dots$$

$$\dots + (-1)^{m-i} Q_{(C_1, C_2, \dots, C_m)}(t)$$
(7.3.2.1-2)

A expressão (7.3.2.1-2), quando implementada em programas computacionais, requer, em geral, um tempo excessivo de processamento quando empregada na avaliação de sistemas complexos. Isto levou o módulo STREUSL-M, da mesma forma que o módulo STREUSL, a usar a seguinte aproximação como base em suas avaliações:

$$Q_S(t) \approx \sum_{i=1}^m Q_{C_i}(t)$$
(7.3.2.1-3)

que fornece uma aproximação conservativa da indisponibilidade do sistema. Nos casos em que todos os cortes mínimos tiverem indisponibilidade menor que 0,01, o erro cometido por esta aproximação será, em geral, inferior a 0,5%.

As indisponibilidades pontuais dos cortes mínimos, $Q_C(t)$, são calculadas pela expressão:

$$Q_C(t) = Q_{(n_{i=1}^{n_i}, X_{v,i})}(t)$$

$$= \prod_{k=1}^{n_i} Q_{X_{k,i}}(t)$$
(7.3.2.1-4)

onde: $Q_{X_{k,i}}$ indica a indisponibilidade de um componente devido a ocorrência do k-ésimo evento primário do i-ésimo

corde mínimo cujo número total de eventos é "n₁".

As indisponibilidades pontuais ($Q_{X_{k,1}}(t)$), para eventos testados e monitorados, são calculadas através das expressões (3.4-2) e (3.4-6), respectivamente.

7.3.2.2 Avaliação da Indisponibilidade Média pela Sub-rotina TIMUNA

Nos casos em que a indisponibilidade do sistema é uma função do tempo, a indisponibilidade média é obtida por:

$$\bar{Q}_S(t) = \frac{1}{T_{max}} \int_0^{T_{max}} Q_S(t) dt \quad (7.3.2.2-1)$$

ou seja:

$$\bar{Q}_S(t) \approx \frac{1}{T_{max}} \int_0^{T_{max}} \sum_{i=1}^m Q_{C_i}(t) dt \quad (7.3.2.2-2)$$

que é implementada na sub-rotina TIMUNA através da seguinte expressão:

$$\bar{Q}_S(t) = \frac{1}{T_{max}} \left\{ I_f + \sum_{k=1}^l I_k \right\} \quad (7.3.2.2-3)$$

onde T_{max} é o tempo de observação, "l" é o número do último intervalo, I_k representa a área da k-ésimo intervalo de integração e I_f é a área compreendida entre o último instante de teste e T_{max}.

O intervalos de integração são delimitados por dois instantes consecutivos de testes de componentes no sistema. Cada valor I_k ($k = 1, 2, \dots, n$) é calculado pelo método de quadratura gaussiana, utilizando 1, 2, 3 ou 4 valores pontuais da indisponibilidade do sistema, conforme previamente definido durante a fase de preparação de dados, de forma que:

$$I_k \approx \int_{T_{k-1}}^{T_k} Q(t) dt, \quad (7.3.2.2-4)$$

onde T_k é o k -ésimo instante de teste de componente.

O cálculo da indisponibilidade pontual do sistema é feito pela função computacional UNAV, cujo desenvolvimento é esquematizado na FIGURA 7.3.2.2-1.

O esquema de desenvolvimento da sub-rotina TIMUNA é apresentado na FIGURA 7.3.2.2-2.

Comentários sobre Modificações Introduzidas

Os passos de integração usados pelo módulo STREUSL, correspondem ao intervalo de tempo compreendido entre o instante zero e o instante do primeiro teste de componente do sistema. Este passo é adequado para sistemas cujos testes de eventos primários ocorre num instante múltiplo ao do primeiro teste do sistema. Em casos mais gerais, entretanto, a existência de um ou mais eventos

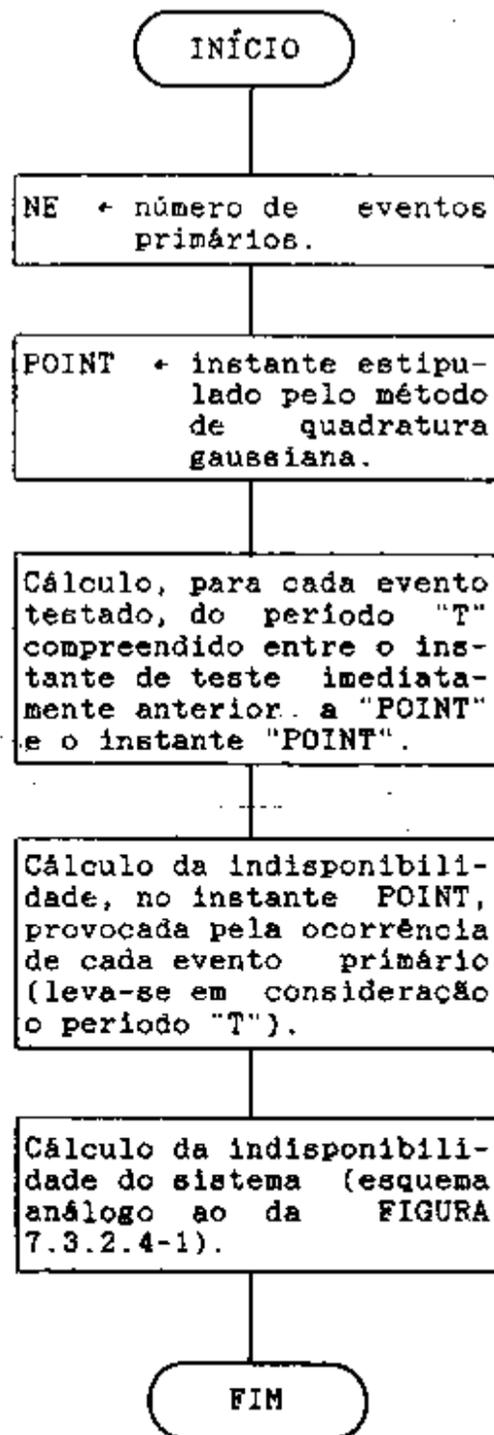


FIGURA 7.3.2.2-1 Esquema da Sub-Rotina UNAV

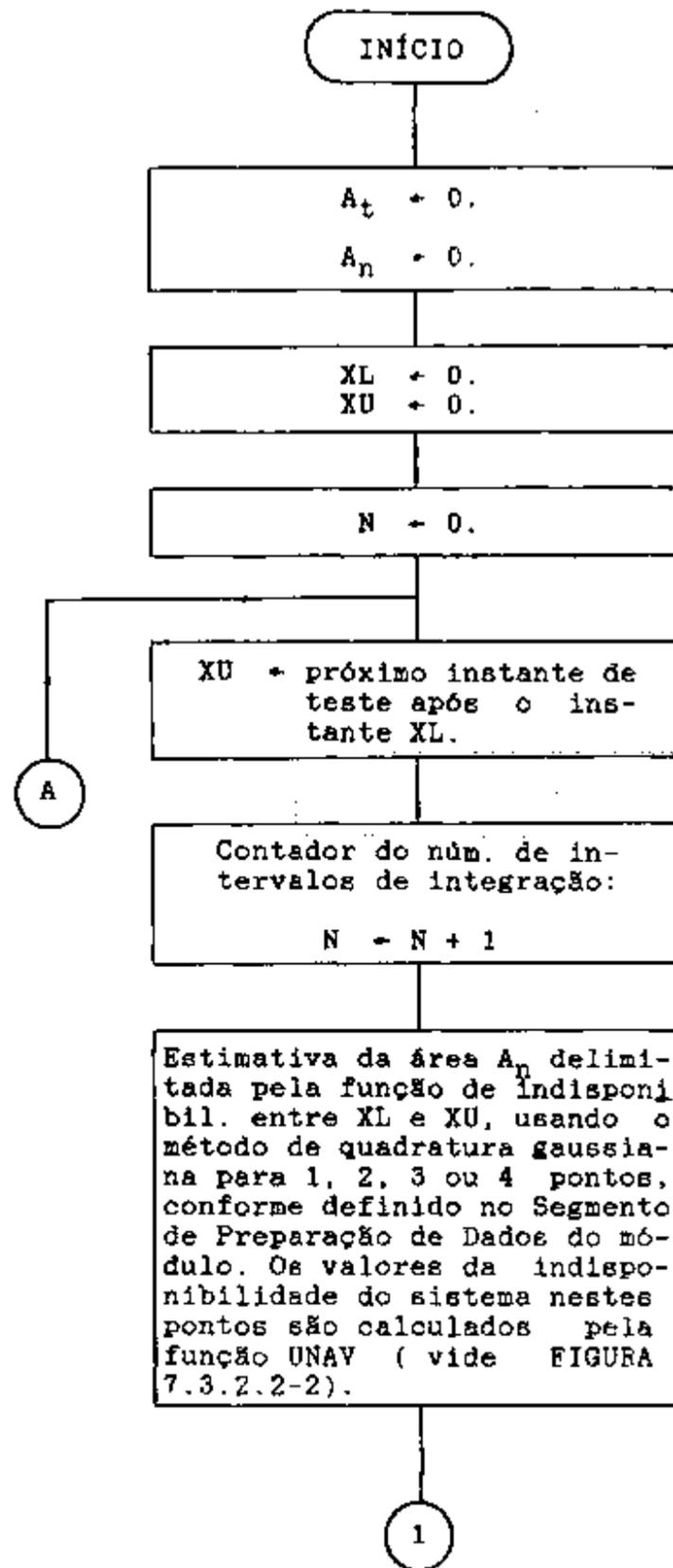


FIGURA 7.3.2.2-2 Esquema da Sub-Rotina TIMUNA

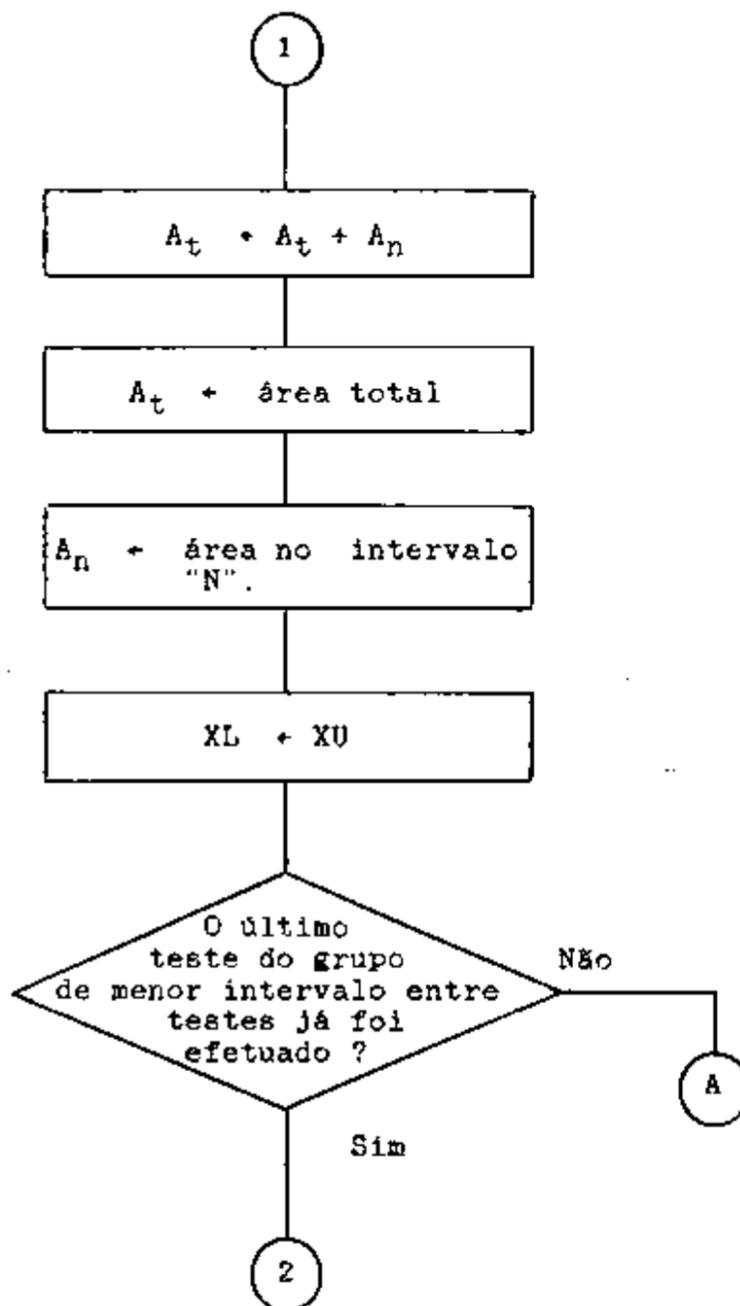


FIGURA 7.3.2.2-2 Esquema da Sub-Rotina TIMUNA (Contin.)

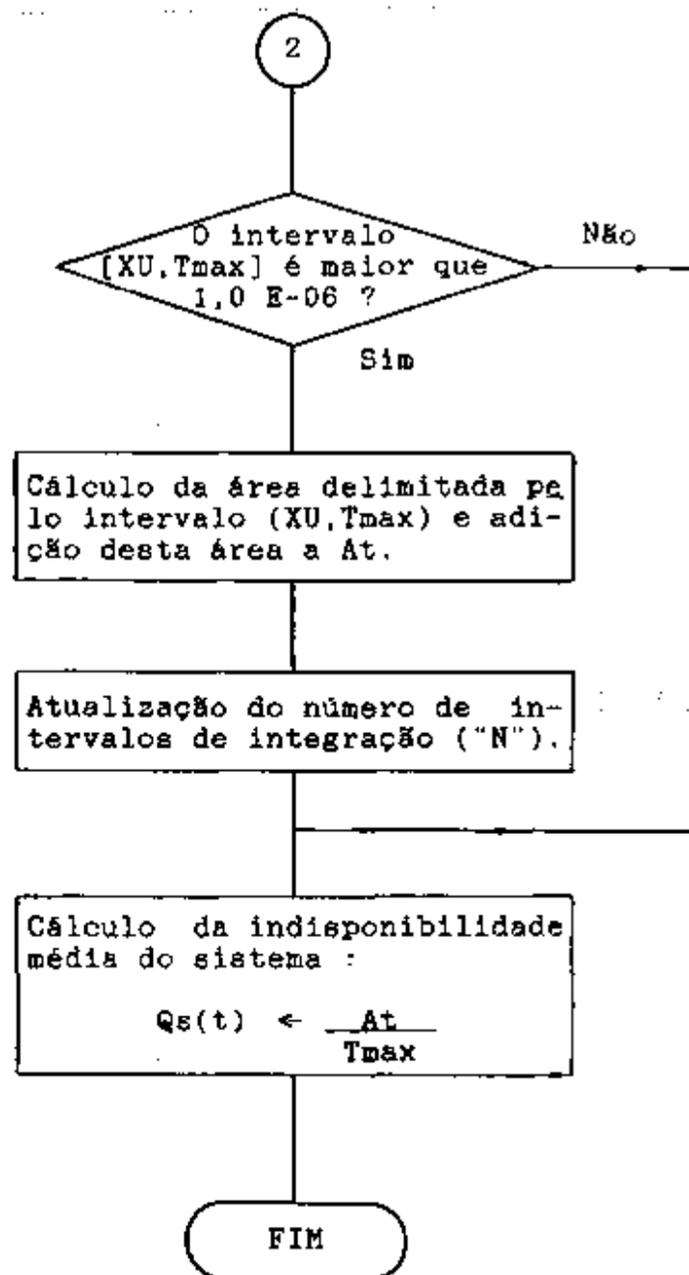


FIGURA 7.3.2.2-2 Esquema da Sub-Rotina TIMUNA (Cont.)

cujos testes não obedecem a esta regra, implica no aparecimento de intervalos de integração contendo pontos de inflexão. O método de integração por quadratura gaussiana, usado na avaliação da área delimitada em cada intervalo, pode, portanto, fornecer resultados que comprometem a precisão da indisponibilidade média a ser calculada.

Para eliminar este tipo de problema, o módulo STREUSL-M incorpora procedimentos na rotina principal e, particularmente, na sub-rotina TIMUNA, para que os intervalos de integração sejam definidos por dois testes consecutivos de componentes do sistema.

Procedimentos semelhantes também foram incorporados à sub-rotina UNAMAX para permitir que a indisponibilidade pontual máxima pudesse ser obtida para estes casos.

O acréscimo no tempo de processamento decorrente destas modificações depende principalmente do número de intervalos de integração adicionados.

O fato de não ter sido necessária a utilização de variáveis indexadas fez com que estas mudanças não provocassem um aumento significativo na memória usada pelo módulo (menos que 5 Kbytes).

7.3.2.3 Avaliação do Instante de Indisponibilidade Máxima

A sub-rotina UNAMAX calcula o valor da indisponibilidade do sistema em cada instante de teste do estado dos eventos primários e indica o valor máximo alcançado

dentro do intervalo $[0, T_{max}]$. O fluxograma desta sub-rotina encontra-se na FIGURA 7.3.2.3-1.

7.3.2.4 Avaliações da Probabilidade de Falha pela Sub-Rotina MEAUNA

Nos casos em que a indisponibilidade for constante com o tempo, isto é, só existirem eventos que ocorrem em demanda, o cálculo é simplificado e a expressão (7.3.2.1-3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q_S = \sum_{i=1}^m Q_{C_i} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n_i} Q_{X_{k,i}} \quad (7.3.2.4-1)$$

que é implementada na sub-rotina MEAUNA (vide FIGURA 7.3.2.4-1).

Nestas condições, Q_S e $Q_{X_{k,i}}$ também podem ser interpretados como sendo a probabilidade de falha do sistema "S" e de ocorrência do evento "X", respectivamente.

O cálculo da indisponibilidade média de sistemas dependentes do tempo, através da sub-rotina MEAUNA, é efetuado substituindo-se Q_C da expressão (7.3.2.3-1) pela indisponibilidade média dos componentes provocada pela ocorrência de eventos testados e monitorados. Nestes casos, a sub-rotina MEAUNA fornece resultados aproximados, já que em geral :

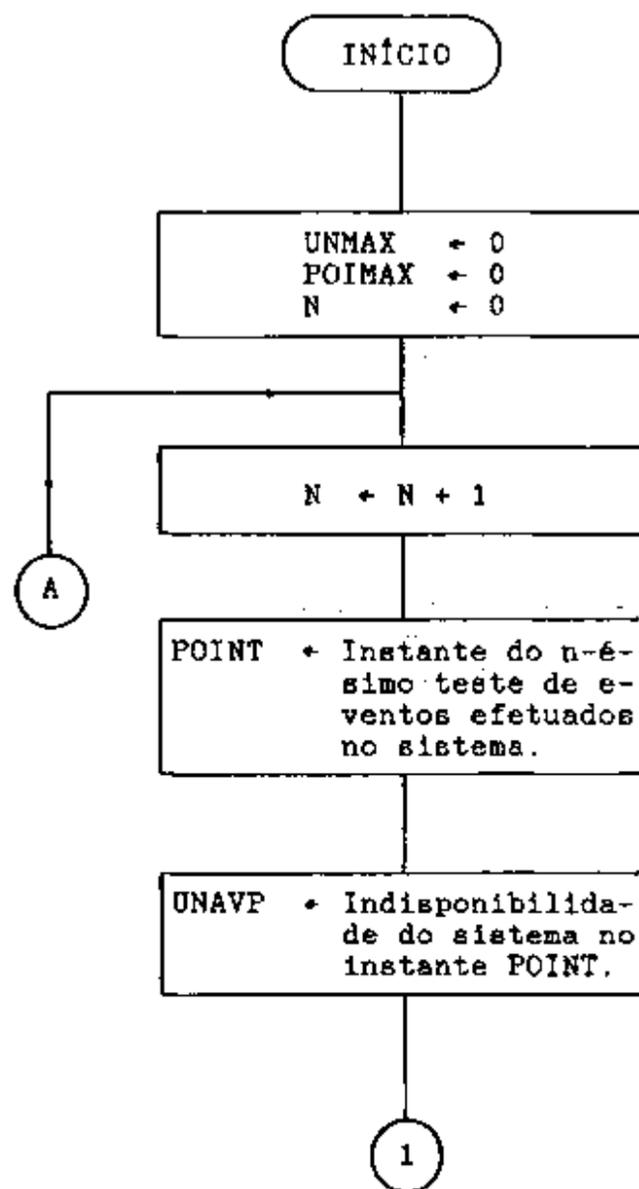


FIGURA 7.3.2.3-1 Esquema da Sub-Rotina UNAMAX

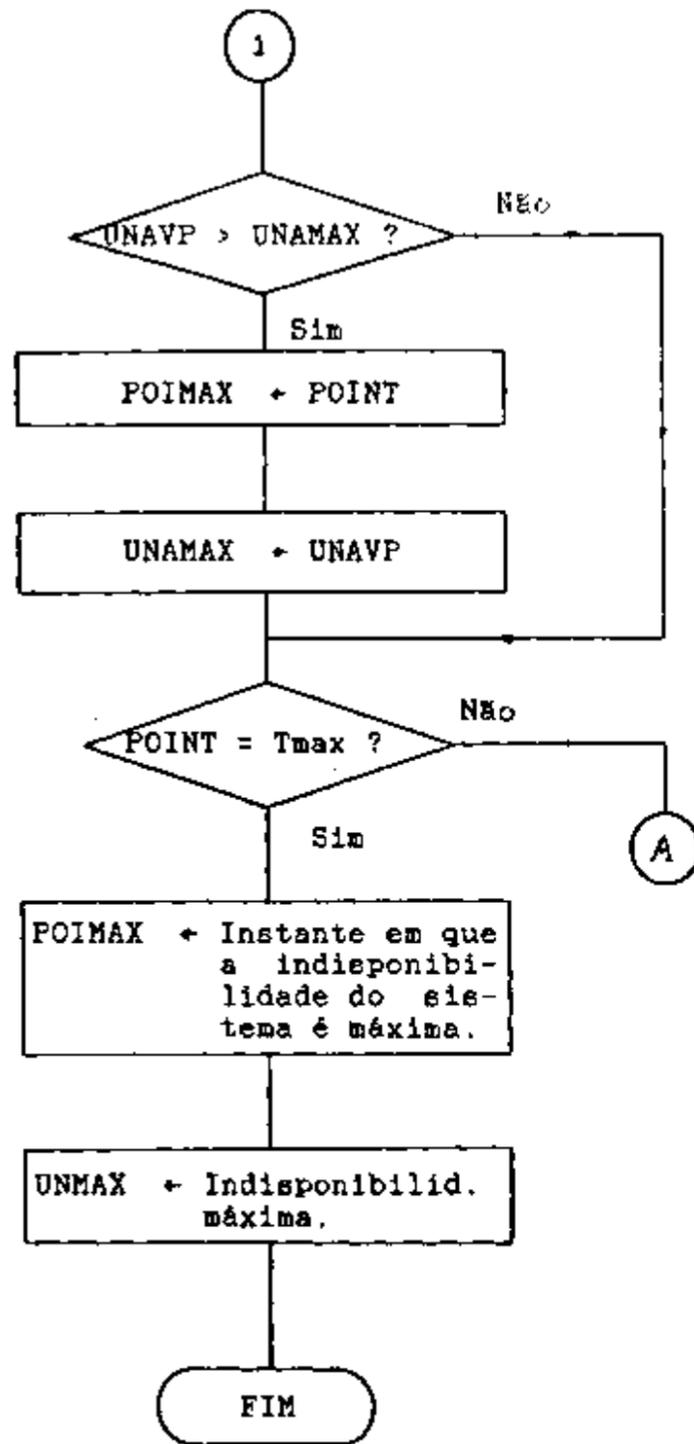


FIGURA 7.3.2.3-1 Esquema da Sub-Rotina UNAMAX Contin.)

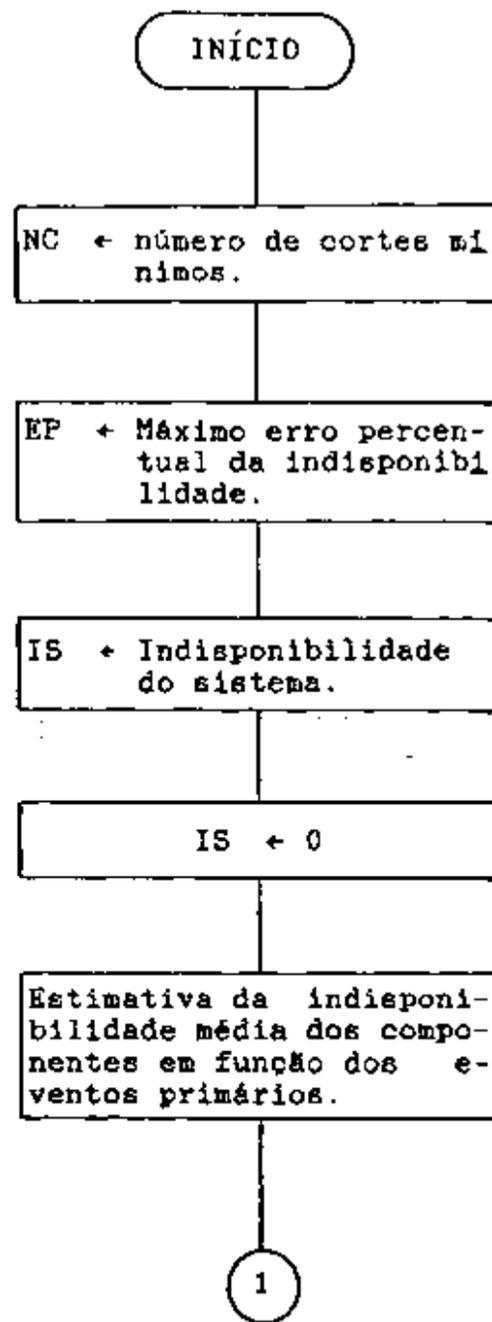


FIGURA 7.3.2.4-1 Esquema da Sub-rotina MEAUNA

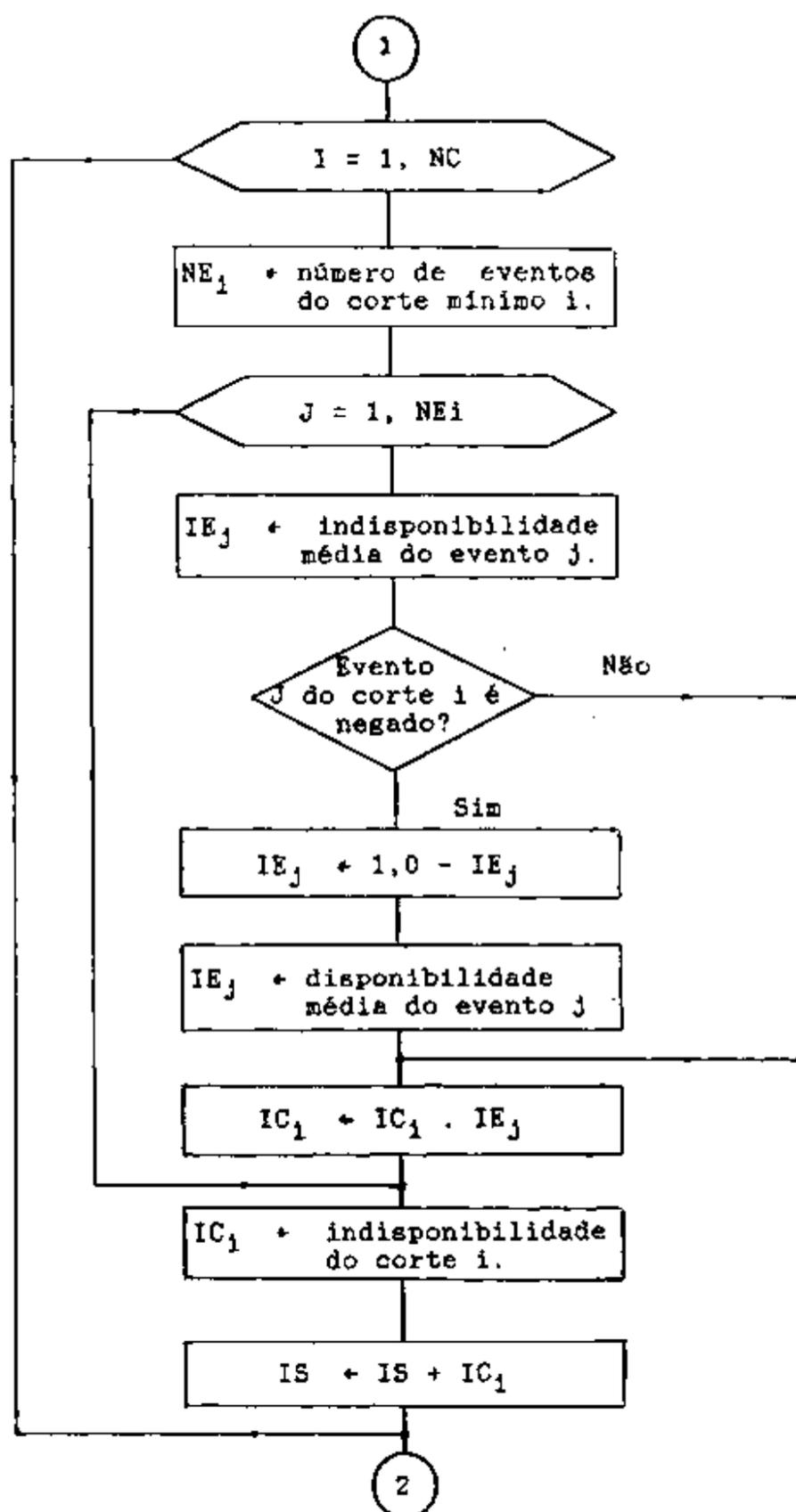


FIGURA 7.3.2.4-1 Esquema da Sub-Rotina MEAUNA (Contin.)



FIGURA 7.3.2.4-1 Esquema da Sub-Rotina MEAUNA (Contin.)

$$Q_{C_i}(t) = \prod_{k=1}^{n_i} Q_{X_{k,i}}(t) \quad (7.3.2.4-2)$$

A indisponibilidade média ($\bar{Q}_{X_{k,i}}(t)$) de eventos testados e monitorados são calculadas respectivamente pelas expressões (3.4-4) e (3.4-7).

7.3.2.5 Comentários Finais

O método de cálculo que considera a dependência temporal do sistema (implementado na sub-rotina TIMUNA) só será empregado pelo módulo STREUSL-M quando existir, pelo menos, um evento testado. Isto se deve ao fato dos eventos monitorados, em geral, serem fracamente dependentes do tempo.

7.3.3 Segmento de Simulação da Indisponibilidade Média do Sistema

O módulo STREUSL-M faz uma inferência sobre a propagação das incertezas associadas às taxas de ocorrência e probabilidade de ocorrência em demanda dos eventos primários. Estas incertezas podem ser representadas pelas distribuições de probabilidade: log-normal, normal, log-uniforme ou uniforme, convenientemente parametrizadas na entrada de dados [98] e se propagam através da árvore de falhas produzindo a distribuição de probabilidade que representa a incerteza associada à indisponibilidade média provocada pela ocorrência do evento de interesse (evento topo ou intermediário).

Computacionalmente a distribuição de probabili-

dade que representa a incerteza associada à indisponibilidade média é estimada através de simulações das taxas de ocorrência e probabilidades de ocorrência em demanda dos eventos primários.

Os componentes cuja taxa ou probabilidade de falha forem acopladas usam o mesmo valor simulado. A FIGURA 7.3.3-1 apresenta o fluxograma do Segmento de Simulação da Indisponibilidade Média do Sistema.

7.3.4 Análise Estatística dos Valores Simulados

Uma rápida descrição da Análise Estatística dos Valores Simulados da indisponibilidade média é apresentada a seguir.

7.3.4.1 Estimação de Parâmetros das Distribuições de Incerteza dos Eventos de Interesse: Inicialmente são estimados a média (\bar{x}) e desvio padrão (S) da amostra:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.3.4.1-1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7.3.4.1-2)$$

Os elementos da amostra são, então, ordenados e esta passa a ser analisada sob o enfoque de estatística de ordem onde são calculados os valores dos elementos em 19

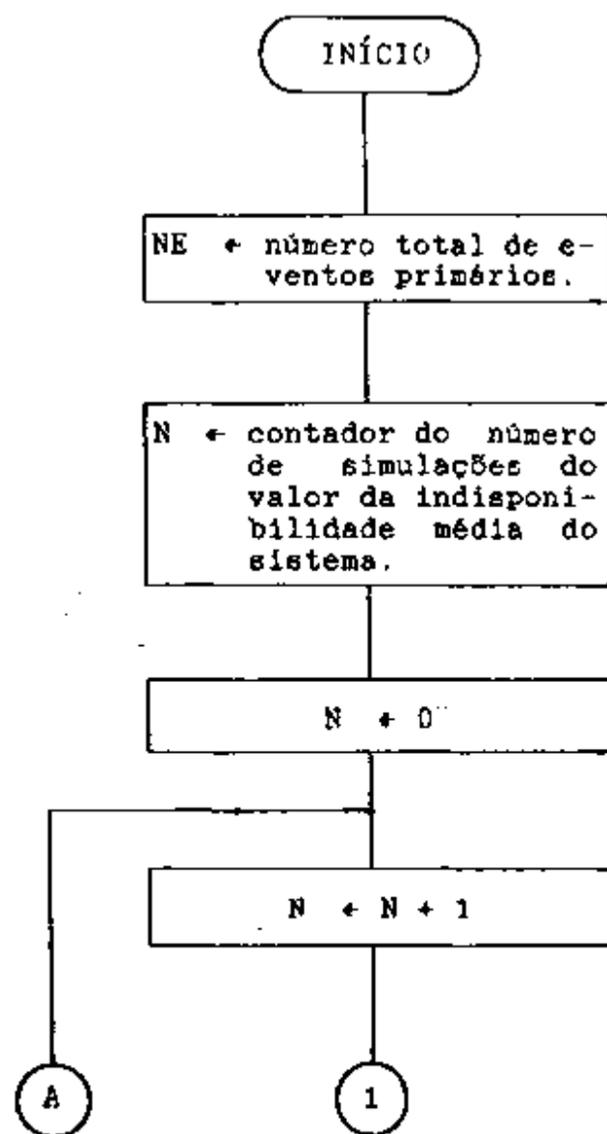


FIGURA 7.3.3-1 Esquema do Segmento de Simulação da Indisponibilidade Média do Sistema

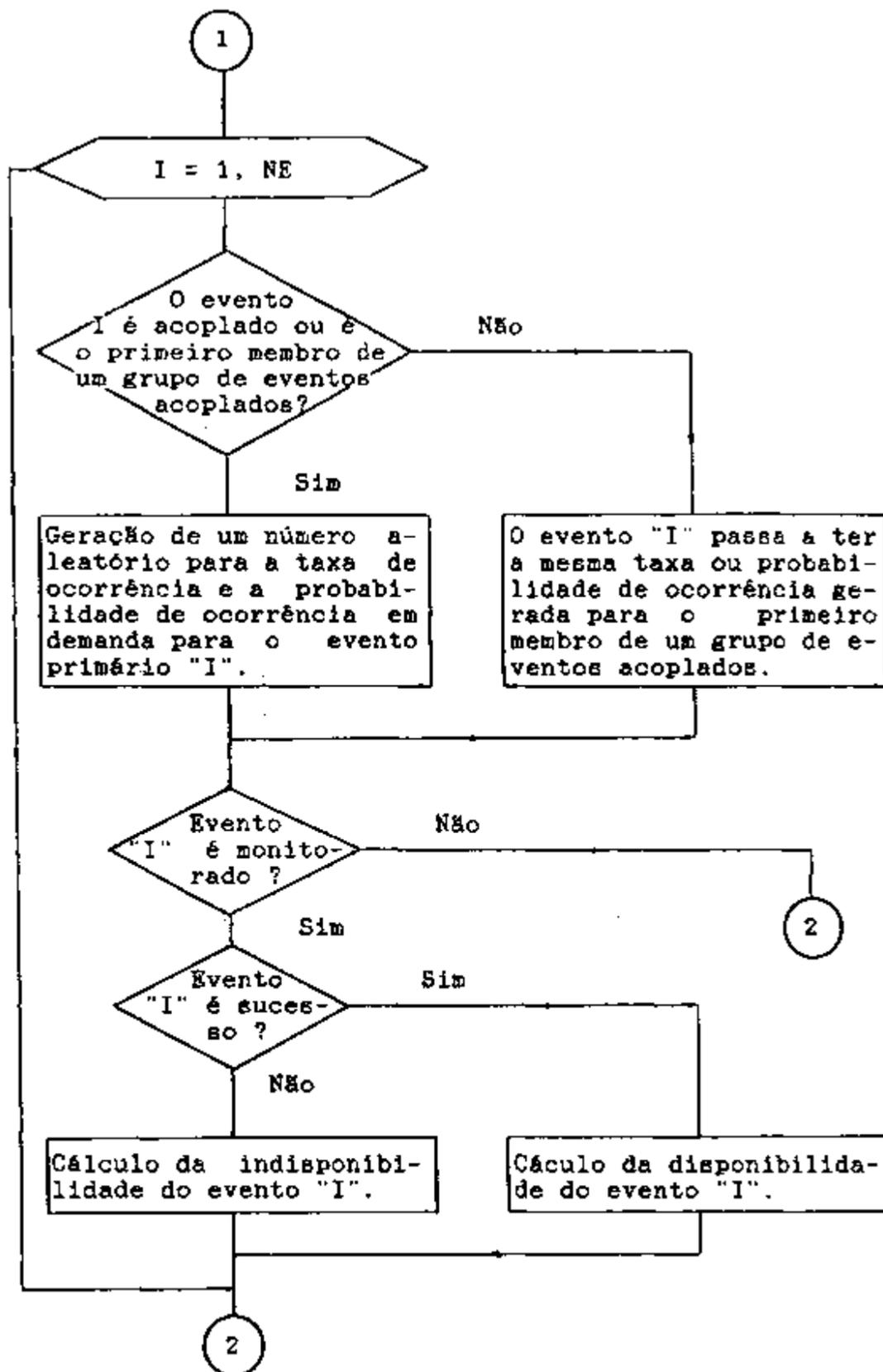


FIGURA 7.3.3-1 Esquema do Segmento de Simulação da Indisponibilidade Média do Sistema (Contin.)

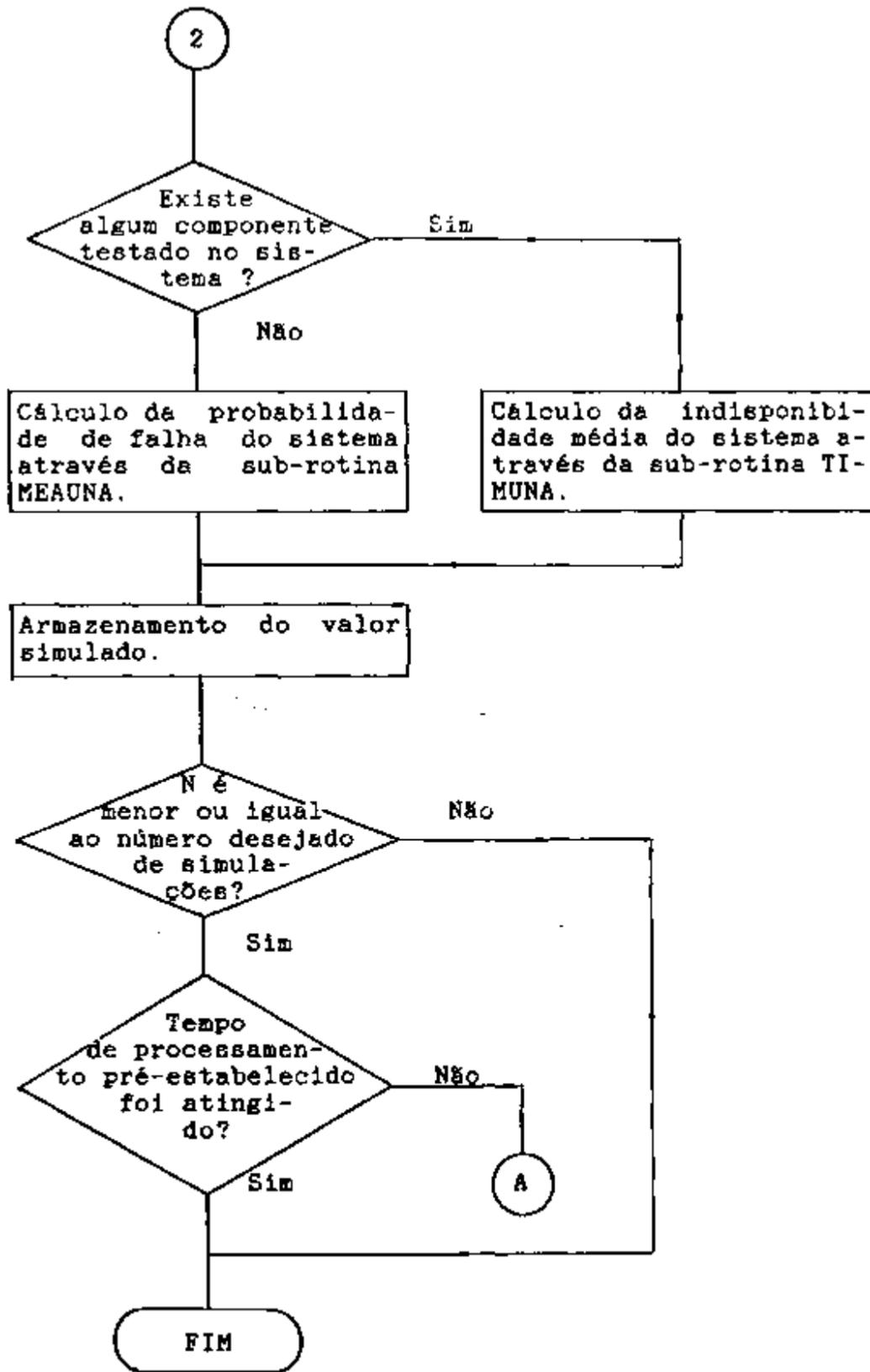


FIGURA 7.3.3-1 Esquema do Segmento de Simulação da Indisponibilidade Média do Sistema (Contin.)

percentis de interesse, com seus respectivos intervalos de confiança bilateral, à esquerda e à direita. O intervalo de confiança à direita estende-se de $-\infty$ ao limite fornecido e o esquerdo, do limite até $+\infty$.

7.3.4.2 Determinação dos Parâmetros de um Histograma para a Distribuição Obtida: Os "n" elementos da amostra são agrupados em "h" classes de mesma amplitude (largura do intervalo) onde são calculadas suas frequências relativas de ocorrência.

$$h = \text{INT} \left\lfloor \sqrt{n} \right\rfloor, \quad \text{para } n \leq 440 \quad (7.3.4.2-1)$$

$$h = 20, \quad \text{para } n > 440 \quad (7.3.4.2-2)$$

7.3.4.3 Testes de Aderência: Efetua-se, através do método de Kolmogorov, um teste de aderência da distribuição empírica da amostra relativa às distribuições normal e lognormal.

7.4 ANÁLISE DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO

A fim de possibilitar uma análise dos tempos de processamento dos segmentos do módulo STREUSL-M, foram examinados 12 casos-exemplo, cujas principais características são apresentadas na TABELA 7.4-1. Estes casos-exemplo foram processados em um computador IBM-4341, a partir do "módulo de carga" do STREUSL-M.

A TABELA 7.4.1-2 lista os tempos de

TABELA 7.4-1 Características Principais dos Modelos Examinados

CASO	CARACTERÍSTICAS						
	NE	NC	I	NCTS	NPT	NPG	NJ
1	1	1	1	1	1	1	100
2	41	87	2	1	20	2	100
3	80	32	2	14	50	1	100
4	80	32	2	14	270	1	100
5	80	64	3	17	50	1	100
6	88	44	7	16	1	3	100
7	119	1	1	1	10	2	100
8	118	1	1	1	10	2	200
9	119	2	1	1	10	2	100
10	119	58	2	1	10	2	100
11	119	472	4	16	160	1	89
12	119	87	2	-	-	-	372

Nomenclatura :

NE número de eventos primários
 NC número de cortes mínimos
 I ordem dos cortes mínimos
 NCTS número de componentes testados sequencialmente
 NPT número de intervalos de integração
 NPG número de pontos usados pelo método de quadratura gaussiana
 NJ número total de simulações da indisponibilidade média do sistema

Comentários :

- 1) O CASO-2 não possui eventos testados sequencialmente.
- 2) O CASO-12 é composto exclusivamente por eventos primários cuja ocorrência é detectada em demanda.

TABELA 7.4.1-2 Tempos de Processamento dos Segmentos do Módulo STREUSL-M

CASO	TL (s)	TP + TE (s)	TS (s)			TA (s)	TOTAL GERAL (s)
			TGu	Tm	TOTAL		
1	0,157	0,201	0,07	0,19	0,26	1,55	2,17
2	0,409	1,895	3,15	34,58	37,73	1,30	41,34
3	0,574	1,840	6,15	25,89	32,04	1,43	35,88
4	0,436	6,970	6,60	142,20	148,86	1,50	157,71
5	0,950	3,050	6,80	40,90	47,70	1,49	53,19
6	0,418	0,419	7,17	3,85	11,04	1,43	13,31
7	0,536	0,890	9,64	11,86	21,50	1,83	24,76
8	0,539	0,896	19,54	23,80	43,34	2,71	47,48
9	0,534	0,887	9,98	11,90	21,88	1,84	25,14
10	0,715	1,244	9,61	16,40	26,01	1,37	29,34
11	2,320	35,880	6,73	607,30	614,03	1,52	653,55
12	3,777	7,030	35,36	1,85	37,21	1,40	49,42

processamento observados nos segmentos de: Leitura (TL); Preparação de Dados (TP); Estimativa da Indisponibilidade Média do Sistema (TE); Simulação (TS) e de Análise Estatística dos Valores Simulados (TA). O tempo de simulação foi subdividido nos tempos de geração das taxas de ocorrência dos eventos primários (Tg) e de avaliação da indisponibilidade média do sistema (Ta).

A participação percentual do tempo de processamento de cada segmento do módulo, em relação aos respectivos tempos totais de processamento, são apresentados na TABELA 7.4.1-3. Nesta tabela, também são indicados os tempos consumidos pelos segmentos de geração de números pseudo-aleatórios (Tg) e de avaliação da indisponibilidade média do sistema (Ta) durante as simulações.

A análise das TABELAS 7.4.1-2 e 7.4.1-3 permite que sejam observadas as seguintes tendências:

- a) A contribuição percentual do tempo consumido na leitura de dados (TL), para o tempo total de processamento, embora pequena, tende a aumentar à medida que o número de cortes mínimos for aumentado.
- b) O Segmento de Simulação apresenta, em geral, a maior contribuição para o tempo total de processamento. O APENDICE C traz um estudo detalhado dos tempos consumidos por este segmento.

TABELA 7.4-3 Participação Percentual do Tempo de Processamento dos Segmentos do Modelo STREUSL-II em Relação ao Tempo Total

CASO EXEMPLO	TL (%)	TP + TI (%)	SIMULAÇÃO (TS) %			TA (%)
			Tg	Ta	Tg + Ta	
1	7,22	9,25	2,94	9,06	11,96	71,56
2	0,89	4,56	7,62	83,65	91,20	3,14
3	1,60	5,13	17,14	72,15	89,29	3,98
4	0,28	4,42	4,18	89,17	94,35	9,95
5	1,79	5,73	12,78	76,89	89,68	2,80
6	3,14	3,15	53,88	29,08	82,96	10,72
7	2,16	3,69	38,94	47,90	86,85	7,39
10	2,84	4,24	32,75	55,89	88,65	4,67
11	0,35	5,46	1,03	92,92	93,95	0,23
12	7,64	14,23	71,55	3,74	75,30	2,82

Observação : O caso 12 utiliza-se da sub-rotina HIAUNA, os demais usam a sub-rotina TIKUNA.

Onde: TL, TP, TI, TS e TA representam, respectivamente, os tempos consumidos nos Segmentos de: Leitura de Dados, Preparação de Dados, Estimativas da Indisponibilidade Média, Simulação da Indisponibilidade Média e de Análise da Amostra Simulada.

Os tempos, Tg e Ta, representam, respectivamente, os tempos consumidos pelo processo geração de dados de ocorrência de eventos primários, e de determinação dos valores da indisponibilidade média obtidos a partir dos conjuntos de dados de ocorrência de eventos simulados.

- c) O cálculo das funções aproximadas para a amostra simulada, contribui com cerca de 70% para o tempo total de processamento do segmento de análise estatística dos resultados (TA), caso todas as opções de análise tenham sido escolhidas pelo usuário.

CAPÍTULO 8

8 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÓDULOS DO PROGRAMA RALLY-M

8.1 INTRODUÇÃO

O uso eficiente do programa RALLY-M está intimamente ligado à escolha adequada dos módulos a serem utilizados na determinação de cortes mínimos e da indisponibilidade média de sistemas. Esta escolha nem sempre é fácil, já que a precisão dos resultados e o tempo de processamento destes módulos são diferentemente influenciados por características específicas do sistema analisado, tais como: redundâncias, indisponibilidade dos componentes, etc.

Neste capítulo, é efetuada uma análise comparativa de aspectos metodológicos e do desempenho computacional (tempo de processamento e precisão nos resultados) dos módulos do programa RALLY-M.

8.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS QUE COMPÕEM O BLOCO DE DETERMINAÇÃO DE CORTES MÍNIMOS

8.2.1 Comparação Aspectos Metodológicos e Construtivos

8.2.1.1 Comparação entre os Módulos que Utilizam o Método Determinístico e o Método Simulatório

O módulo MOCUS-M utiliza métodos analíticos para determinar cortes mínimos, enquanto que o CRESSC-M e

CRESSEX-M usam métodos simulatórios. As principais características dos módulos, decorrentes da utilização de uma ou outra metodologia são apresentados a seguir.

Características dos módulos CRESSC-M e CRESSEX-M:

- a) Estão capacitados para reiniciar um processamento, a partir dos dados obtidos em processamentos anteriores.
- b) Apresentam, em geral, a tendência de encontrar, primeiramente, os cortes mínimos de menor confiabilidade.
- c) Possuem baixa complexidade computacional e ocupam área de memória relativamente pequena.

Características do Módulo MOCUS-M:

- a) Garante que todos os cortes mínimos menores que uma determinada ordem serão determinados;
- b) O tempo de processamento não depende do valor da não-confiabilidade do sistema analisado.
- c) Obtém, além de cortes mínimos de árvores de falhas que representam estruturas monótonas, os termos de uma forma disjuntiva normal de árvores que representam estruturas não-monótonas.

8.2.1.2 Comparação entre os Módulos que Utilizam o Método Simulatório

Embora os módulos CRESSC-M e CRESSEX-M utilizem métodos simulatórios na determinação de cortes, apresentam algumas diferenças no algoritmo de simulações, são elas:

- a) As simulações de falhas do sistema, feitas no CRESSEX-M, baseiam-se na função de confiabilidade dos componentes, enquanto que as do CRESSC-M baseiam-se na indisponibilidade média do componentes;
- b) A simulação da ocorrência de eventos primários efetuada pelo CRESSC-M sofre um processo de aceleração, enquanto que nenhum fator é usado pelo CRESSEX-M para acelerar as simulações de ocorrência de eventos primários.

Embora o CRESSEX-M simule a ocorrência de eventos primários mais lentamente que o CRESSC-M, o seu algoritmo conserva, ao longo dos jogos, a tendência de encontrar primeiro os cortes de maior probabilidade de ocorrência. O CRESSC-M, entretanto, não garante esta tendência, conforme análise efetuada na seção 5.3.1.2, podendo, em alguns casos, serem simulados cortes mínimos de maior probabilidade de ocorrência com menor frequência que os de menor probabilidade.

A tentativa do CRESSEX-M em reproduzir fielmente o comportamento de sistemas faz com que sua estrutura

computacional seja mais complexa que a do CRESSC-M e exija um tempo maior de processamento.

A determinação de um corte mínimo contido em um corte é feita por ambos os módulos, a partir de um mesmo algoritmo. O CRESSC-M, entretanto, o utiliza segundo técnicas distintas e, por isto, pode encontrar até dois cortes mínimos.

8.2.2 Desempenho Computacional

O desempenho computacional dos módulos CRESSC-M, CRESSEX-M e MOCUS-M foram analisados com base na execução de 197 casos-teste derivados dos modelos (árvores de falhas) S_i e P_i ($i = 1, 2, \dots, 5$), apresentadas no capítulo 4, cujas principais características encontram-se nas TABELAS 4.4.2.1-1 e 4.4.2.1-2.

Os modelos da série P apresentam diferentes "larguras" (número de eventos posicionados na entrada de portas lógicas), o que permite que se avalie o comportamento dos módulos ao se aumentar o número de eventos primários e o número de cortes mínimos, sem que sua ordem (número de componentes do corte mínimo) seja aumentada. Os modelos da série S apresentam diferentes "alturas" (número de níveis) e possibilitam que se examine a influência da variação da ordem e número de cortes mínimos sobre o tempo de processamento.

Evidentemente, a análise efetuada, tendo por

base estes modelos, não cobre toda a gama de aplicações. Fornece, entretanto, informações que permitem avaliar algumas tendências importantes.

Os tempos de processamento usados para as comparações foram obtidos a partir do "módulo de carga" do módulo STREUSL-M, em um computador IBM-4341, e não incluem os tempos de "compilação" e "linkedição".

A estratégia usada na análise consistiu na execução de dois grupos de testes cuja descrição encontra-se a seguir.

8.2.2.1 Grupo I de Testes

Objetivo: Examinar a capacidade dos módulos em obter todos os cortes mínimos em modelos com diferente número de eventos primários, cortes mínimos e ordens.

Procedimento: Foram determinados os tempos de processamento, para que todos os cortes mínimos dos modelos S_i e P_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) fossem obtidos.

Considerou-se que todos os eventos primários dos casos analisados ocorressem em demanda e cuja probabilidade de ocorrência fosse representada por uma distribuição log-normal com mediana igual a 0,001 e fator de erro igual a 3. Além disso, pré-fixou-se o tempo máximo de processamento em 2000 segundos.

Obviamente, a execução dos módulos CRESSC-M e CRESSEX-M, que utilizam métodos simulatórios, só foi efetuada após a determinação do número total de cortes mínimos pelo MOCUS-M.

As TABELAS B.2.2.1-1 e B.2.2.1-2 apresentam os resultados obtidos no grupo I de testes para os modelos das séries P e S, respectivamente.

Análise dos Resultados:

Módulo CRESSEX-M: Nenhum dos modelos analisados pelo CRESSEX-M teve todos os cortes mínimos determinados dentro do período de tempo de 2000 segundos. Estes testes, portanto, não permitiram que se estabelecesse uma tendência do comportamento do módulo CRESSEX-M. Sugerem, entretanto, uma grande dificuldade do módulo em determinar cortes mínimos de baixa probabilidade de ocorrência ($1,0 \times 10^{-6}$ ou menor).

Módulo CRESSC-M: O módulo CRESSC-M obteve todos os cortes mínimos para os modelos da série P, dentro do período pré-estipulado de 2000 segundos. O crescimento do tempo de processamento de um modelo para outro, deu-se numa proporção muito superior à do aumento do número de cortes mínimos. Isto se deve, provavelmente, ao aumento do número de eventos primários das árvores consideradas.

Para os modelos da série S, o módulo CRESSC-M obteve todos os cortes mínimos apenas para S1 e S2. O

TABELA 8.2.2.1-1 Tempos de Processamento dos Modelos da Série P Obtidos no Grupo I de Testes

MODULO	MODELOS: TEMPOS DE PROCESSAMENTO (ε)				
	P1	P2	P3	P4	P5
MOCUSN	1,5	2,8	4,8	7,6	10,6
CRESSC-M	26,0	200,0	290,0	995,0	1071,0
CRESSEX-M	>2000,	>2000,	>2000,	>2000,	>2000,

TABELA 8.2.2.1-2 Tempos de Processamento dos Modelos da Série S Obtidos no Grupo I de Testes

MODULO	MODELOS: TEMPOS DE PROCESSAMENTO (s)				
	S1	S2	S3	S4	S5
MOCUSN	1,5	10,1	48,0	720,0	>2000,
CRESSC-M	26,0	1807,0	>2000,	>2000,	>2000,
CRESSEX-M	>2000,	>2000,	>2000,	>2000,	>2000,

elevado tempo de processamento, para esta série, pode ser atribuído à elevação da ordem e número de cortes mínimos destes modelos. Exemplificando: embora os modelos S2 e P4 contenham o mesmo número de cortes mínimos e S2 possua a metade dos eventos primários de P4, o tempo de processamento de S2 é o dobro do tempo de P4.

Módulo MOCUS-M: O MOCUS-M obteve todos os cortes mínimos dos modelos da série P em tempos relativamente baixos (menores que 10 segundos). O crescimento dos tempos de processamento, de uma árvore para outra, fez-se numa proporção inferior à do crescimento do número de cortes mínimos de um modelo para outro.

Para modelos da série S, observa-se que o crescimento do tempo de processamento do módulo MOCUS-M fez-se numa proporção superior à do crescimento do número de cortes mínimos. Este fato pode ser explicado pela influência do aumento da ordem dos cortes mínimos sobre o tempo de processamento.

Conclusões: Em todos os casos analisados no grupo I, o tempo de processamento do MOCUS-M mostrou-se sensivelmente inferior ao usado pelo CRESSC-M e CRESSEX-M.

O simples aumento da ordem máxima dos cortes mínimos e do número de eventos primários em um modelo, sem que ocorra alteração significativa da proporção do número de cortes mínimos de cada ordem, tem pouca

influência sobre os tempos usados pelo MOCUS-M. Para modelos de baixa ordem (menores que 4), o MOCUS-M se mostra sensivelmente mais veloz que os módulos CRESSC-M e CRESSEX-M, devendo, por isto, ser o preferido para estes casos.

O baixo desempenho do CRESSEX-M faz com que ele deva ser evitado como módulo de obtenção de todos os cortes mínimos.

8.2.2.2 Grupo II de Testes

Objetivo: Estabelecer a influência da confiabilidade do sistema sobre os tempos de processamento dos módulos CRESSC-M e CRESSEX-M e compará-los aos obtidos pelo MOCUS-M.

Procedimento: Calculou-se, através do módulo STREUSL-M, a indisponibilidade média dos sistemas representados pelos modelos P1, S3 e P5, para os casos em que a probabilidade de ocorrência dos eventos primários fossem iguais a: $1,0 \text{ E-}03$, $1,0 \text{ E-}04$, $1,0 \text{ E-}05$, $1,0 \text{ E-}06$ e $1,0 \text{ E-}07$. Para cada uma destas situações, as indisponibilidades médias do sistema obtidas, considerando-se todos os cortes mínimos, foram usadas como referência na determinação do erro percentual, cometido ao se considerar os cortes mínimos determinados pelos módulos CRESSC-M e CRESSEX-M, em diferentes tempos de processamento. A TABELA 8.2.2.2-1 apresenta um quadro sinótico indicando a estratégia usada pelo grupo II de testes. Os valores de indisponibilidade,

TABELA B.2.2.2-1 Estratégia Usada para a Análise do Grupo II de Testes

MÓDULOS EXECUTADOS	CASOS PROCESSADOS	CONDIÇÕES PRE-FIXADAS		RESULTADOS OBTIDOS	VALORES PARA COMPARAÇÃO
		PROB. DE FALHA	TEMPO (s)		
- CRESSC-M (25) - CRESSEX-M (25)	P1	1,0 E-03 1,0 E-04 1,0 E-05 1,0 E-06 1,0 E-07	1,5 4,0 6,0 8,0 10,0	- Cortes mínimos para todas as condições pré-fixadas.	- Disponibilidade média; - Erro percentual entre a disponibilidade média obtida e a conseguida com a consideração de todos os cortes mínimos.
- CRESSC-M (15) - CRESSEX-M (15)	S3	1,0 E-03 1,0 E-04 1,0 E-05 1,0 E-06 1,0 E-07	36,0 48,0 60,0	- Cortes mínimos para todas as condições pré-fixadas.	- Disponibilidade média; - Erro percentual entre a disponibilidade média obtida e a conseguida com a consideração de todos os cortes mínimos.
- CRESSC-M (25) - CRESSEX-M (25)	P5	1,0 E-03 1,0 E-04 1,0 E-05 1,0 E-06 1,0 E-07	11,0 15,0 20,0 25,0 30,0	- Cortes mínimos para todas as condições pré-fixadas.	- Disponibilidade média; - Erro percentual entre a disponibilidade média obtida e a conseguida com a consideração de todos os cortes mínimos.

Comentários : 1) O número entre parenteses ao lado de cada módulo indica o número de processamentos efetuados.
2) Os resultados quantitativos foram obtidos pela execução do módulo STREUSL-M.

considerando-se todos os cortes mínimos, obtidos através do módulo MOCUS-M, encontram-se na TABELA 8.2.2.2-2.

Os resultados da análise do tempo de processamento requeridos pelo modelo P1 são apresentados nas TABELAS 8.2.2.2-3 e 8.2.2.2-4, pelo modelo P5 nas TABELAS 8.2.2.2-5 e 8.2.2.2-6, e finalmente, pelo modelo S3 nas TABELAS 8.2.2.2-7 e 8.2.2.2-8.

Para facilitar a comparação, os tempos de processamento usados pelo MOCUS-M foram escritos em **negrito** nestas tabelas.

Fixou-se, para os modelos S3 e P5, o valor 1.0×10^{-10} para representar a probabilidade de ocorrência dos eventos primários que pertencem a cortes de ordem 1, evitando, assim, que houvessem 2 ou 3 cortes cuja confiabilidade fosse muito menor que as demais.

Conclusões:

O erro cometido ao se considerar os cortes mínimos obtidos pelo CRESSC-M e CRESSEX-M, para o cálculo da indisponibilidade média, dependem da importância dos cortes obtidos, tendo pouca relevância o número de cortes mínimos determinados.

Os cortes mínimos obtidos pelo CRESSEX-M deverão ser usados apenas como indicadores dos cortes mais importantes, reservando-se aos módulos CRESSC-M ou MOCUS-M a

TABELA 8.2.2.2-2 Indisponibilidade para os Modelos S1, S3 e P5

PROBABILIDADE DE OCORRENCIA DE EVENTOS	INDISPON. (CASO-P1)	INDISPON. (CASO-S3)	INDISPON. (CASO-P5)
1,0 E-03	2,3 E-02	6,4 E-03	3,1 E-02
1,0 E-04	1,7 E-03	6,4 E-05	3,1 E-04
1,0 E-05	1,7 E-04	6,4 E-07	3,1 E-06
1,0 E-06	1,7 E-05	7,9 E-09	3,1 E-08
1,0 E-07	1,7 E-06	1,8 E-09	3,1 E-10

Comentários:

- 1) As indisponibilidades foram obtidas considerando todos os cortes mínimos dos modelos examinados.
- 2) Os tempos de processamento para o módulo MOCUSN obter todos os cortes mínimos para os modelos P1, S3 e P5 são, respectivamente, 1,5 , 48,0 e 11,0 segundos.
- 3) Cada análise é efetuada com os eventos primária de mesma probabilidade de ocorrência.

TABELA 8.2.2.2-3 Desempenho do Módulo CRESSC-M para o Modelo P1

PROBABILID. DE OCORRER. DE EVENTOS	TEMPO = 1,5 a			TEMPO = 4 a			TEMPO = 6 a			TEMPO = 8 a			TEMPO = 10 a		
	NCO	INDISP.	E %	NCO	INDISP.	E %	NCO	INDISP.	E %	NCO	INDISP.	E %	NCO	INDISP.	E %
1,0 E-03	67	2,1 E-02	9	93	2,3 E-02	0	96	2,3 E-02	0	99	2,3 E-02	0	101	2,3 E-02	0
1,0 E-04	6	1,7 E-03	0	92	1,7 E-03	0	96	1,7 E-03	0	98	1,7 E-03	0	100	1,7 E-03	0
1,0 E-05	2	1,7 E-04	0	88	1,7 E-04	0	96	1,7 E-04	0	97	1,7 E-04	0	98	1,7 E-04	0
1,0 E-06	1	8,5 E-06	100	20	1,7 E-05	0	95	1,7 E-05	0	98	1,7 E-05	0	100	1,7 E-05	0
1,0 E-07	1	8,5 E-07	100	2	1,7 E-06	0	88	1,7 E-06	0	94	1,7 E-06	0	96	1,7 E-06	0

Nomenclatura:

NCO ----- número de cortes mínimos obtidos.
 INDISP. ----- indisponibilidade média calculada pelo SPHUSL-E a partir dos cortes mínimos obtidos.
 E% ----- erro percentual entre a indisponibilidade considerando apenas os cortes obtidos e a indisponibilidade de referência.

TABELA 8.2.2.2-4 Desempenho do Módulo CRESSEX-M para o Modelo P1

PROBABILID. DE FALHA DOS COMPON.	TEMPO = 1,5 s			TEMPO = 4 s			TEMPO = 6 s			TEMPO = 8 s			TEMPO = 10 s		
	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%
1,0 E-03	9	1,0 E-02	20	17	1,8 E-02	26	23	1,6 E-02	29	30	1,9 E-02	21	31	1,8 E-02	21
1,0 E-04	2	1,7 E-03	0	2	1,7 E-03	0	2	1,7 E-03	0	2	1,7 E-03	0	2	1,7 E-03	0
1,0 E-05	0	--	-	1	0,5 E-05	100	1	0,5 E-05	100	1	0,5 E-05	100	1	0,5 E-05	100
1,0 E-06	0	--	-	1	0,5 E-06	100	1	0,5 E-06	100	1	0,5 E-06	100	1	0,5 E-06	100
1,0 E-07	0	--	-	0	--	-	0	--	-	0	--	--	0	--	-

Nomeclatura:

- NCO ----- número de corte mínimos obtidos.
 INDISP. ----- indisponibilidade média calculada pelo SYMOSL-E a partir dos cortes mínimos obtidos.
 % ----- erro percentual entre a indisponibilidade considerando apenas os cortes obtidos e a indisponibilidade de referência.

TABELA 8.2.2.2-5 Desempenho do Módulo CRESSC-M para o Modelo P5

PROBABILID. DE FALHA DOS COMPON.	TEMPO = 11 m			TEMPO = 15 m			TEMPO = 20 m			TEMPO = 25 m			TEMPO = 30 m		
	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%
1,0 E-03	331	2,6 E-02	30	394	2,8 E-02	11	427	2,9 E-02	8	436	3,1 E-02	0	442	3,1 E-02	0
1,0 E-04	194	1,4 E-04	123	312	2,2 E-04	42	393	2,0 E-04	1	421	3,0 E-04	4	436	3,1 E-04	0
1,0 E-05	13	9,3 E-08	3365	160	1,1 E-06	144	299	2,1 E-06	49	388	2,7 E-06	15	420	3,1 E-06	0
1,0 E-06	2	1,4 E-10	2265	0	5,7 E-10	5391	140	9,9 E-09	216	297	2,1 E-08	49	387	2,7 E-08	16
1,0 E-07	-	--	-	1	7,2 E-13	43372	10	7,2 E-12	4247	180	1,3 E-10	141	340	2,4 E-10	30

Legendário:

NCO ----- número de cortes mínimos obtidos.
 INDISP. ----- indisponibilidade média calculada pelo SYMUSL-M a partir dos cortes mínimos obtidos.
 % ----- erro percentual entre a indisponibilidade considerando apenas os cortes obtidos e a indisponibilidade de referência.

TABELA B.2.2.2-6 Desempenho do Módulo CRESSEX-M para o Modelo P5

PROBABILID. DE FALHA DOS COMPON.	TEMPO = 10 s			TEMPO = 15 s			TEMPO = 20 s			TEMPO = 25 s			TEMPO = 30 s		
	NCO	INDISP.	%												
1,0 E-03	42	3,0 E-03	943	58	4,2 E-03	645	77	5,5 E-03	489	88	6,2 E-03	485	98	7,0 E-03	347
1,0 E-04	1	7,2 E-07	43372	1	7,2 E-07	43327	1	7,2 E-07	43372	3	2,1 E-06	14805	3	2,1 E-06	14805
1,0 E-05	0	--	-	0	--	-	0	--	-	0	--	-	0	--	-
1,0 E-06	0	--	-	0	--	-	0	--	-	0	--	-	0	--	-
1,0 E-07	0	--	-	0	--	-	0	--	-	0	--	-	0	--	-

Legendário:

NCO ----- número de cortes mínimos obtidos.
INDISP. ----- indisponibilidade média calculada pelo STREUSL-M a partir dos cortes mínimos obtidos.
% ----- erro percentual entre a indisponibilidade considerando apenas os cortes obtidos e a indisponibilidade de referência.

TABELA 8.2.2.2-7 Desempenho do Módulo CRESSC-II para o Modelo S3

PROBABILID. DE OCORRER. DE EVENTOS	TEMPO = 36 s			TEMPO = 48 s			TEMPO = 60 s		
	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%
1,0 E-03	261	6,4 E-03	0	304	6,4 E-03	0	325	6,4 E-03	0
1,0 E-04	267	6,4 E-05	0	292	6,4 E-05	0	325	6,4 E-05	0
1,0 E-05	252	6,4 E-07	0	293	6,4 E-07	0	322	6,4 E-07	0
1,0 E-06	249	6,4 E-09	23	294	6,4 E-09	23	318	6,4 E-09	23
1,0 E-07	323	6,4 E-11	2312	272	6,4 E-11	2712	296	9,1 E-10	98

TABELA 8.2.2.2-8 Desempenho do Módulo CRESSII-II para o modelo S3

PROBABILID. DE OCORRER. DE EVENTOS	TEMPO = 36 s			TEMPO = 48 s			TEMPO = 60 s		
	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%	NCO	INDISP.	%
1,0 E-03	33	2,4 E-03	167	42	3,0 E-03	113	49	3,5 E-03	82
1,0 E-04	1	7,2 E-07	8789	1	7,2 E-07	8789	2	1,4 E-06	4471
1,0 E-05	0	--		-	--	0	-	6,4 E-07	0
1,0 E-06	0	--		-	--	0	-	6,4 E-09	23
1,0 E-07	0	--		-	--	0	-	9,1 E-10	98

Nomenclatura:

- NCO ----- número de corte mínimos obtidos.
 INDISP. ----- indisponibilidade média calculada pelo STRESS-II a partir dos cortes mínimos obtidos.
 % ----- erro percentual entre a indisponibilidade considerando apenas os cortes obtidos e a indisponibilidade de referência.

tarefa de fornecer cortes mínimos ao módulo STREUSL-M para o cálculo da indisponibilidade do sistema.

Para modelos que representem sistemas com indisponibilidade dominada por cortes mínimos de baixa ordem, como nos casos examinados no grupo II de testes, o módulo MOCUS-M, de maneira geral requer um tempo de processamento inferior ao requerido pelo módulo CRESSC-M. Vale ressaltar, contudo, que esta superioridade do módulo MOCUS-M pode ser prejudicada nos casos em que cortes de elevada ordem (4 ou maior) forem os principais contribuidores para a indisponibilidade do sistema.

8.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS QUE COMPÕEM O BLOCO DE ANÁLISE QUANTITATIVA

8.3.1 Aspectos Metodológicos e Construtivos

O módulo STREUSL-M efetua avaliações de confiabilidade através de um método analítico baseado nos cortes mínimos, enquanto que o módulo CRESSEX-M utiliza o método simulatório.

A precisão dos resultados obtidos pelo CRESSEX-M é definida pelo coeficiente de variação da confiabilidade estabelecido pelo usuário.

O método analítico utilizado pelo STREUSL-M introduz, em geral, resultados menos precisos que o módulo CRESSEX-M, quando:

- a) o sistema analisado tiver indisponibilidade média inferior a $1,0 \text{ E-}03$, já que a partir deste valor os termos de ordem 1 da expressão (7.3.2.1-2), em geral, não são suficientes para obtenção de resultados com erro inferior a 0,1%.
- b) a duração de testes de eventos representar uma parcela significativa do intervalo entre testes;
- c) os cortes mínimos recebidos como entrada, não forem suficiente para uma boa avaliação da indisponibilidade do sistema.

8.3.2 Desempenho Computacional

O tempo de processamento do módulo STREUSL-M no cálculo da indisponibilidade média do sistema é, em geral, inferior ao do CRESSEX-M, já que o tempo do CRESSEX-M depende fortemente do valor da confiabilidade do sistema. Exemplificando: a análise, pelo módulo CRESSEX-M, de um sistema modelado por uma árvore de falhas com 100 eventos primários e indisponibilidade da ordem de $1,0 \text{ E-}07$ exigirá horas de processamento em um computador IBM-4341, já que serão necessários cerca de $1,0 \text{ E+}09$ simulações do comportamento do sistema para que um coeficiente de variação da confiabilidade da ordem de 5% seja atingido. Entretanto, a comparação correta entre os módulos somente poderá ser feita levando-se em conta o tempo usado pelos módulos que fornecem cortes mínimos ao módulo STREUSL-M, o qual depende dos fatores mencionados na seção 8.2.

8.3.3 Conclusões

De maneira geral, o módulo STREUSL-M deverá ser utilizado na análise de sistemas com indisponibilidade inferior a $1,0 \text{ E-}04$, já que o tempo de processamento do módulo CRESSEX-M pode se tornar proibitivo a partir deste valor. Por outro lado, o CRESSEX-M deve ser utilizado, preferencialmente, quando a indisponibilidade média do sistema for superior a $1,0 \text{ E-}03$, onde, a partir deste valor, a precisão do STREUSL-M passa a ser afetada mais fortemente.

Deve-se destacar, entretanto, que a execução de ambos os módulos é aconselhável quando se deseja obter informações complementares, tais como: importância (CRESSEX-M), indisponibilidade pontual máxima (STREUSL-M), etc.

CAPÍTULO 9

9 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA RALLY-M

9.1 INTRODUÇÃO

O programa RALLY-M tem sido utilizado, desde 1985, como ferramenta básica na execução da análise probabilística de segurança de projetos desenvolvidos no Departamento de Tecnologia de Reatores do IPEN-CNEN/SP. Sua aplicação tem-se concentrado em três escopos de análise. São eles:

a) **Revisão de Projetos em Fase de Desenvolvimento:**

Neste escopo, o programa RALLY-M é utilizado como ferramenta de verificação do atingimento de metas de confiabilidade pré-estabelecidas. Nos casos em que a meta não for atingida, o projeto é rejeitado, sendo encaminhado aos projetistas um relatório destacando seus pontos fracos. Um novo projeto é então concebido e encaminhado para a análise de confiabilidade, repetindo-se o processo até que a meta seja atingida e o sistema aprovado.

Dentro deste escopo, o programa RALLY-M foi utilizado na definição da configuração dos sistemas de segurança da Unidade Crítica do IPEN-CNEN/SP, cujo estudo encontra-se documentado na referência [102]. Presentemente, programa RALLY-M encontra-se sendo utilizado em estu-

dos de melhoria de projetos de sistemas de segurança de reatores de potência.

b) Análise da Confiabilidade de Sistemas com Projeto Final: Neste escopo, a análise de confiabilidade é feita em um nível refinado, sendo considerados os efeitos da propagação da incerteza e de falhas de modo comum.

Dentro deste escopo, o programa RALLY-M foi usado para a determinação da frequência de falha no desligamento do conjunto crítico da Unidade Crítica [15]. A FIGURA 9.1-1 apresenta os resultados deste estudo e indica a frequência de ocorrência dos principais eventos causadores da falha no desligamento.

c) Determinação da Frequência de Ocorrência de Cenários de Acidentes: Dentro deste escopo, o programa RALLY-M foi utilizado para determinar a frequência de ocorrências de cenários que podem resultar em temperatura superior a 1000 C no encançamento do combustível [14]. Os resultados obtidos, nesta análise, para os cenários resultantes dos eventos iniciadores: retirada incontrolada de um elemento de controle (EI1) e queda de um dispositivo experimental de Cádmiio (EI2), encontram-se, respectivamente, nas FIGURAS 9.1-2 e 9.1-3.

Para exemplificar a utilização do programa RALLY-M é apresentado, neste capítulo, um resumo da análise do Sistema de Esvaziamento Rápido da Unidade Crítica do IPEN-CNEN/SP. Este exemplo consiste numa versão bastante

FIGURA 9.1-1 Arvore de Falhas do Sistema de Desligamento da Unidade Crítica

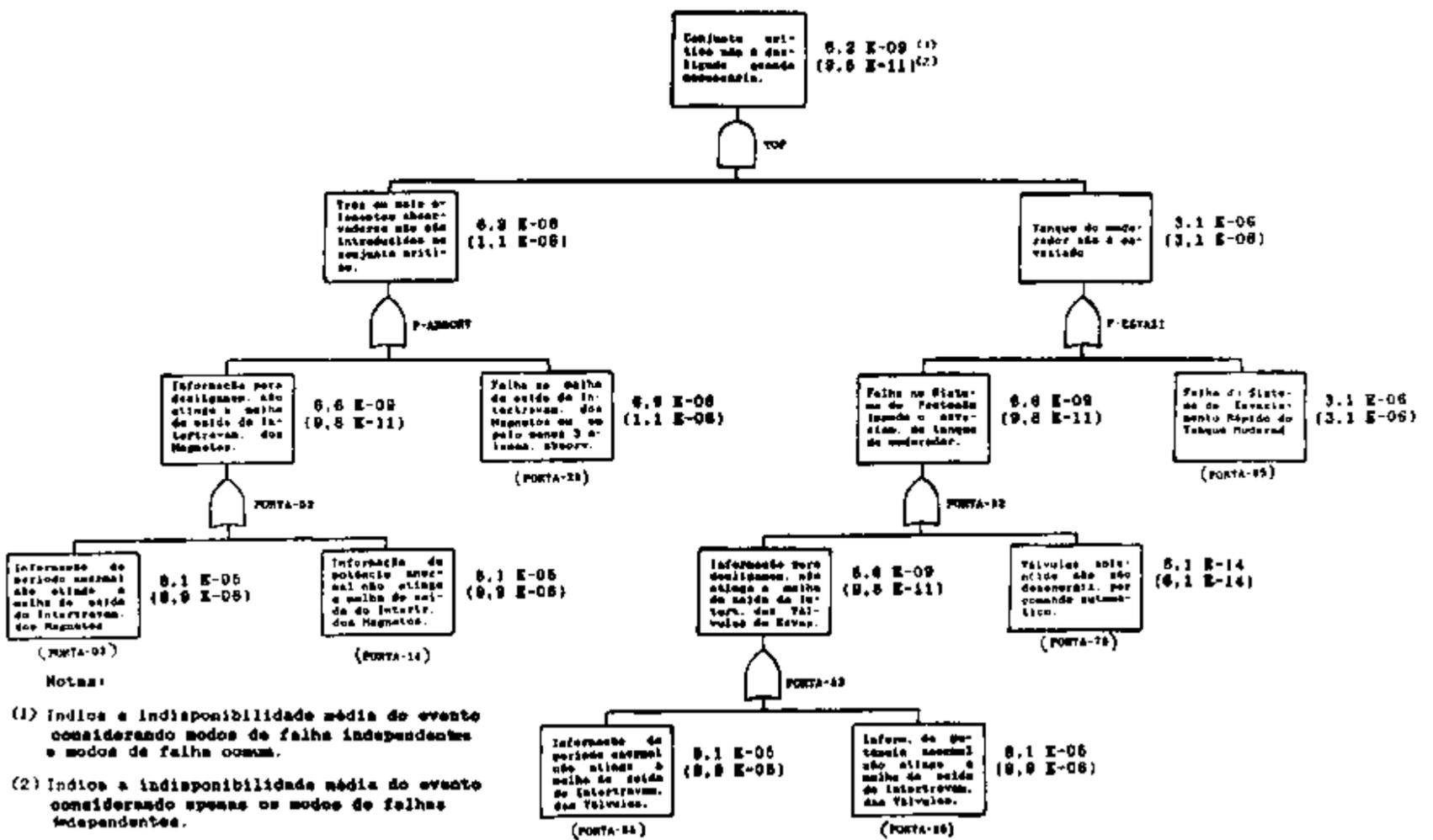


FIGURA 9.1-2 Frequência de Ocorrência dos Cenários Resultantes do Evento Iniciador EI1

IE1	PeC	RIM	MDS		PoC	RIM	MDS		Accident Frequenc. - F1
			V1	V2			V1	V2	
									1 success
									2 success
									3 success
									4 1.1 E-21
									5 success
									6 1.7 E-20
									7 5.1 E-12

Onde, EI1 é o evento iniciador de acidente: retirada incontrolada de um elemento de controle, "F1" é a frequência de ocorrência do evento iniciador "IE1", "PeC" é a rede de canais de período, "PoC" é a rede de canais de potência, "RIM" é o Sistema de Proteção, "MDS" é o Sistema de Esvaziamento Rápido do Tanque Moderador e, finalmente, "Vi" é a via de drenagem "i" (i = 1,2).

FIGURA 9.1-3 Frequência de Ocorrência dos Cenários Resultantes Evento Iniciador EI2

IE2	PoC	RIM	MDS		PeC	RIM	MDS		Accident frequenc. = F2
			V1	V2			V1	V2	
									1 success
									2 7.8 E-15
									3 success
									4 1.8 E-20
									5 1.5 E-12

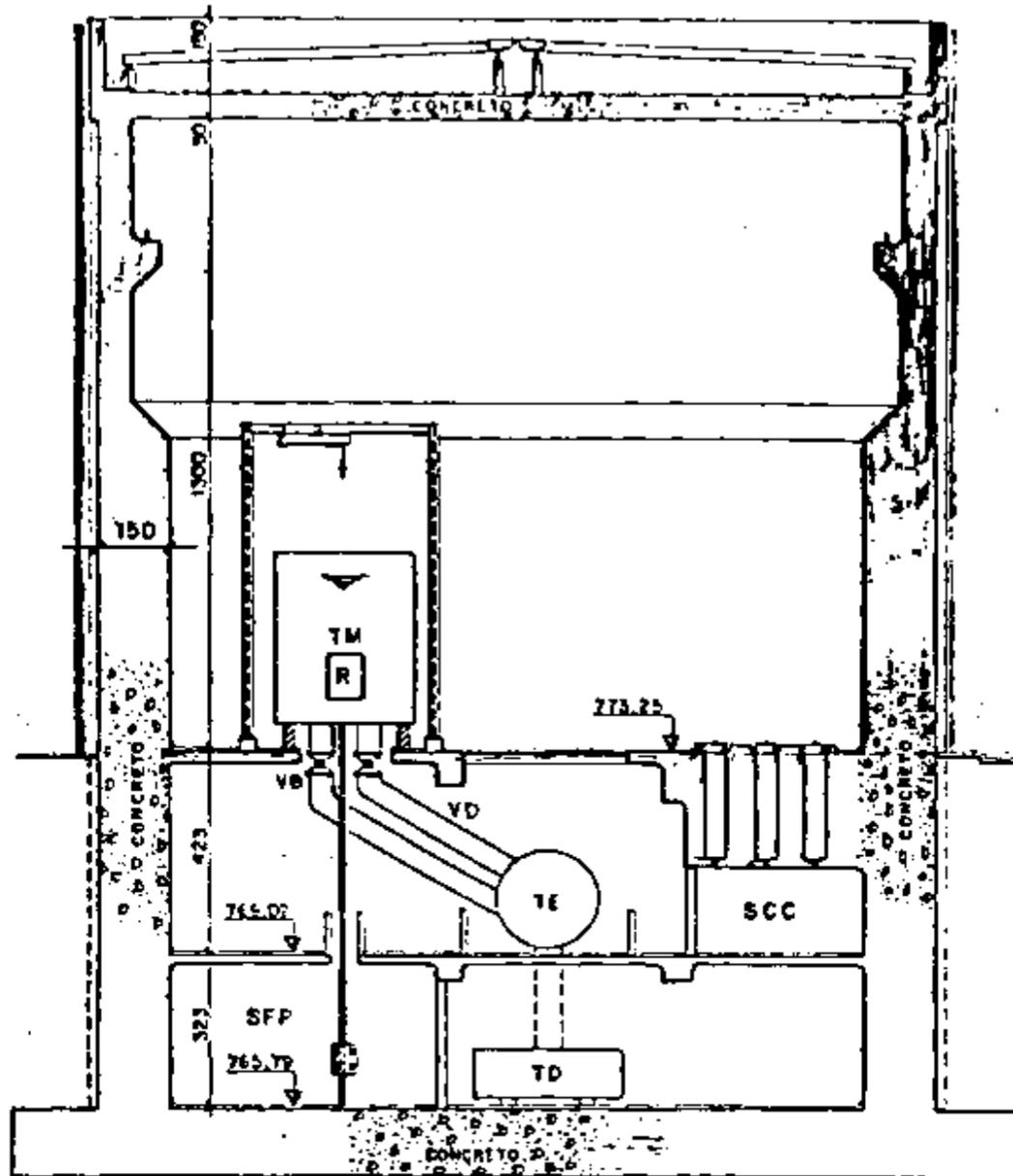
Onde, EI2 é o evento iniciador de acidente: retirada incontrolada de um elemento de controle, "F2" é a frequência de ocorrência do evento iniciador "IE2", "PeC" é a rede de canais de período, "PoC" é a rede de canais de potência, "RIM" é o Sistema de Proteção, "MDS" é o Sistema de Esvaziamento Rápido do Tanque Moderador e, finalmente, "V1" é a via de drenagem "1" (1 = 1,2).

simplificada da análise efetuada na referência [15], mas que atende ao objetivo aqui proposto.

9.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE Esvaziamento Rápido do Tanque Moderador (SERTM)

A Unidade Crítica é constituída por um conjunto crítico, imerso em um tanque de água, sendo projetada para operar a potências inferiores a 100 W. Um dos métodos usados no desligamento do conjunto crítico consiste no escoamento da água do tanque do moderador através do Sistema de Esvaziamento Rápido do Tanque Moderador (SERTM). O SERTM é constituído por dois tanques cilíndricos, denominados: Tanque do Moderador e Tanque de Estocagem, sendo que o Tanque do Moderador contém o conjunto crítico e está posicionado em uma cota superior. Estes tanques estão interligados por duas vias de drenagem, cada qual composta por um tubo de drenagem e por uma válvula borboleta operada por ar comprimido, acionada por uma válvula solenóide. A FIGURA 9.2-1 mostra um corte na célula crítica contendo o SERTM.

Cabe salientar que, diferentemente da análise detalhada realizada na referência [15], considerou-se, na presente análise, que as vias de drenagem não sejam redundantes.



Legenda:

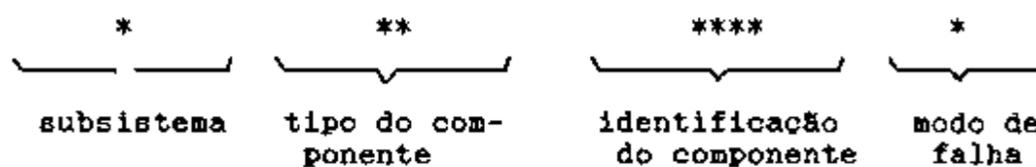
TM - Tanque do Moderador	R - Conjunto Crítico
SFP - Sala Fonte de Partida	VD - Vias de Drenagem
TD - Tanque de Decaimento	VB - Válvula Borboleta
TE - Tanque de Estocagem	

FIGURA 9.2-1 Corte Típico da Célula Crítica

9.3 DESCRIÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS

A árvore de falhas para o SERTM foi construída com base em documentações dos projetos dos sistemas envolvidos no desligamento do conjunto crítico, em consultas aos projetistas e ao pessoal responsável pela operação e nos resultados da análise de modos de falha e efeitos (AMFE)[15]. O evento topo da árvore de falhas foi definido como sendo: "SERTM não desliga o conjunto crítico após ter sido acionado pelo Sistema de Proteção". Abaixo do evento topo existem 6 eventos primários e 6 portões lógicos do tipo "OR". A FIGURA 9.3-1 apresenta a árvore de falhas do SERTM.

Cada evento primário da árvore é identificado por um código de 8 caracteres contendo as seguintes informações:



Os mneumônicos utilizados para representar sistemas/subsistemas, tipos de componentes e modos de falha, encontram-se na TABELA 9.3-1.

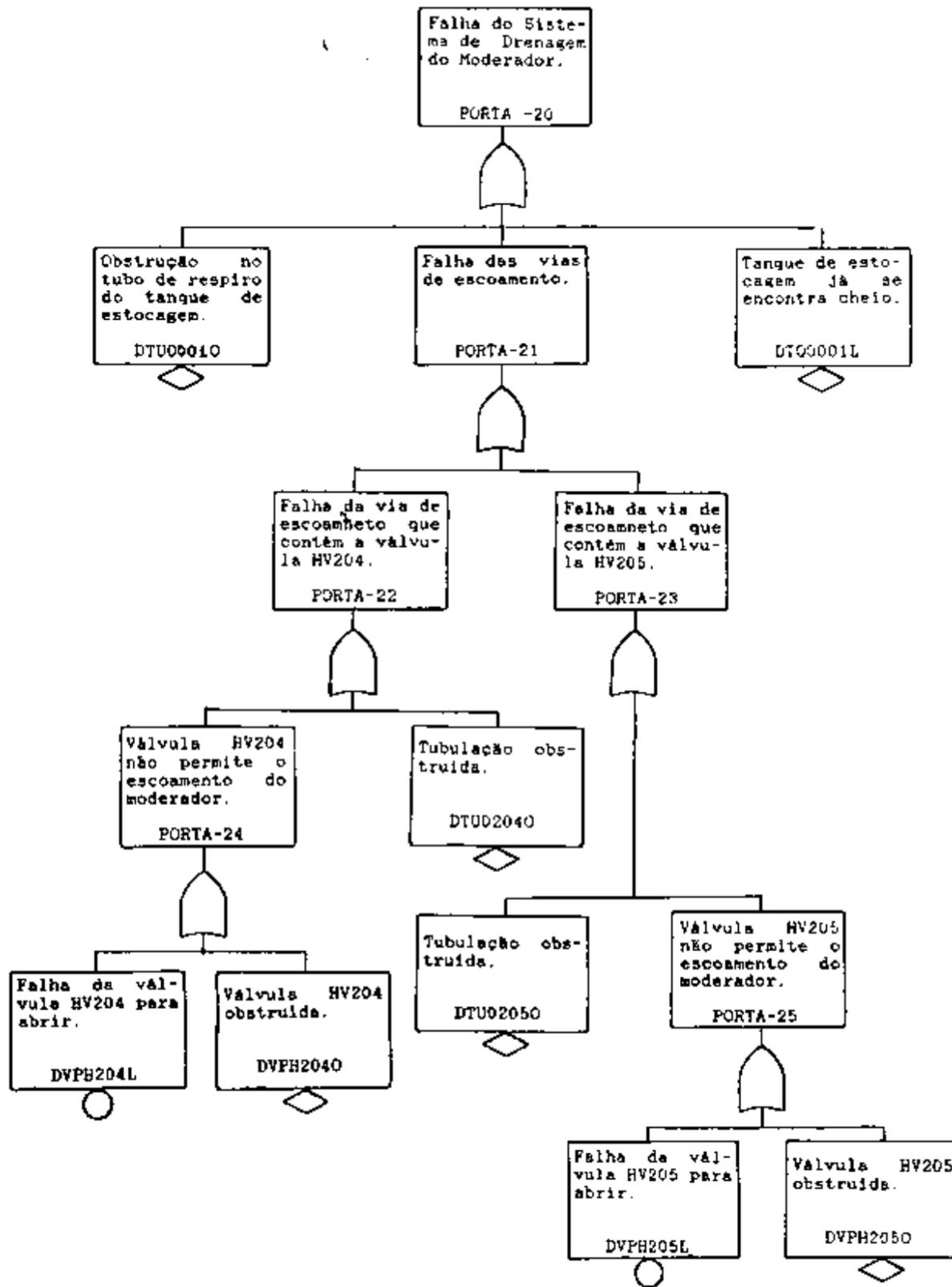


FIGURA 9.3-1 Árvore de Falhas do Sistema de Esvaziamento do Tanque Moderador

TABELA 9.3-1 Codificação dos Eventos Primários

ITENS	CÓDIGO
Sistema	
Esvaziamento Rápido do tanque Moderador	D
Tipo de Componente	
Tanque	TQ
Tubo	TU
Válvula Acionada a Ar Comprimido	VP
Modos de Falha	
Falha para Abrir	L
Obstrução	O

9.4 SUPOSIÇÕES ESTABELECIDAS NA ANÁLISE

Para efeito de análise de confiabilidade foram estabelecidos os seguintes pressupostos funcionais:

- a) A Unidade Crítica operará, em média, 8 horas por dia, de segunda à sexta-feira.
- b) Operações de manutenção tais como, inspeções, testes, reparos, calibrações, etc, são realizadas com o conjunto crítico desligado.

Além disso, foram adotadas as seguintes hipóteses de natureza estocástica:

- a) os componentes do SERTM não sofrem degradação durante os períodos de inatividade do conjunto crítico;
- b) independência entre os eventos primários da árvore de falhas;

9.5 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EFETUADA PELO PROGRAMA RALLY-M

9.5.1 Dados de Entrada para o Programa RALLY-M

Fixou-se, na análise, um tempo de observação de 1920 horas de operação, não incluindo os períodos inativos, o que corresponde a aproximadamente 1 ano de vida da instalação. A base de dados existente no apêndice III do relatório WASH-1400 [6] foi tomada como referência na

quantificação dos eventos primários da árvore de falhas. As principais informações sobre os dados de falha dos componentes do SERTM e de sua política de manutenção são apresentados na TABELA 9.5.1-1.

9.5.2 Estratégia de Uso do Programa RALLY-M

Optou-se pela execução dos módulos TREBIL-M, MOCUS-M, CRESSEX-M e STREUSL-M. A execução do módulo CRESSC-M pode ser omitida devido à simplicidade da árvore analisada o que permite ao módulo MOCUS-M determinar todos os seus cortes mínimos em cerca de 1 segundo.

9.5.3 Análise Efetuada pelo Bloco de Gerenciamento de Dados

O módulo TREBIL-M efetua a análise de consistência dos dados de entrada do programa RALLY-M. A FIGURA 9.5.3-1 apresenta o equivalente lógico da árvore de falhas incorporado pelo módulo TREBIL-M à sub-rotina LOGIDR. Esta sub-rotina é, posteriormente, "linkeditada" ao módulo CRESSEX, sendo utilizada nos testes de ocorrência do evento topo.

O módulo TREBIL-M também imprime diversas tabelas contendo informações que facilitam a detecção de eventuais erros na lógica da árvore de falhas, são elas:

- Tabela de Dados dos Eventos Primários (por ordem alfabética);
- Tabela de Dados dos Eventos Primário (por ordem índice);

TABELA 9.5.1-1 Informações Relacionadas com os Eventos Primários

Eventos	Dados de Ocorrência		Deteccão		
	Taxa (1)	Probab. (2)	Tipo	Reparabil.	IET (3)
DTU0001O	8.48 E-09	---	Testada	Reparável	1920
DTU0204O	8.48 E-10	---	Testada	Reparável	1920
DTU0205O	8.48 E-10	---	Testada	Reparável	1920
DVPH204L	---	3.75 E-04	Em demanda	Nao-reparáv.	---
DVPH205L	---	3.75 E-04	Em demanda	Nao-reparáv.	---
DTQ0001L	---	---	Testada	Reparável	1920

Notas:

(1) e (2) media da distribuicao log-normal associada a taxa de falhas e probabilidade de falhas em demanda, respectivamente.

(3) IET significa intervalo entre testes.

TABELA 8.5.3-1 EQUIVALENTE BOOLEANO DA ARVORE DE FALHAS (SUB-ROTINA LOGIDR)

```
SUBROUTINE LOGIDR
LOGICAL TOP,A(1000),X(1000),B(100)
COMMON/TREE/X,A,B,TOP
A( 1) = X( 1).OR.X( 2)
A( 2) = X( 3).OR.X( 4)
A( 3) = A( 2).OR.A( 1)
A( 4) = A( 3)
*      .OR.X( 5)
TOP = A( 4)
RETURN
END
```

- Tabela Indicadora de Entrada de Eventos Primários em Portões Conectores;
- Tabela Indicadora de Portões Conectores e seus Respective Eventos de Entrada;
- Tabela Indicadora de Portões Posicionados na Entrada de Portões Conectores;

A TABELA 9.5.3-2 apresenta a lista de dados dos eventos primários ordenados alfabeticamente.

9.5.4 Análise Efetuada pelo Bloco de Determinação de Cortes Mínimos

O módulo MOCUS-M obteve todos os cortes mínimos e caminhos mínimos da árvore de falhas. As TABELAS 9.5.4-1 e 9.5.4-2 apresentam os resultados das avaliações efetuadas pelo módulo MOCUS-M.

9.5.5 Análise Efetuada pelo Bloco de Análise Quantitativa

9.5.5.1 Análise Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M

Os resultados obtidos pelo módulo CRESSEX-M basearam-se nos resultados obtidos de 478.000 simulações do comportamento do sistema em 1920 horas (tempo de observação). A TABELA 9.5.5.1-1 apresenta as principais informações obtidas das simulações que serviram de base para a análise de confiabilidade. As principais avaliações de confiabilidade efetuadas para o SERTM encontram-se na TABELA 9.5.5.1-2.

A nível de eventos, o módulo CRESSEX-M efetua, baseado nos dados obtidos das simulações, uma análise da

TABELA 9.5.3-2 Dados de Ocorrência dos Eventos Primários

COMPONENTE	INDICE	TAXA/PROBAB. DE FALHA			TEMPO MEDIO DE REPARO (EM HORAS)			DETECCAO DE FALHA	INTERVALO ENTRE TESTES
		LOCACAO	DISPERS.	DISTRIB.	LOCACAO	DISPERS.	DISTRIB.		
DTU00010	5	1.00E-09	30.0	LOGNORM.	1.0			TESTADA	1920.0
DTU02040	3	1.00E-10	30.0	LOGNORM.	1.0			TESTADA	1920.0
DTU02050	1	1.00E-10	30.0	LOGNORM.	1.0			TESTADA	1920.0
DVPH204L	4	3.00E-04	3.0	LOGNORM.	0.0			PROBAB.	
DVPR205L	2	3.00E-04	3.0	LOGNORM.	0.0			PROBAB.	

COMENTARIOS:
 =====

PARAMETROS USADOS PARA REPRESENTAR A TAXA/PROBAB. DE FALHA

DISTRIBUICAO	PARAMETRO	
	LOCACAO	DISPERSAO
NORMAL	MEDIA OU MEDIANA	DESVIO PADRAO
LOG-NORMAL	MEDIANA	FATOR DE ERRO
UNIFORME	MEDIA OU MEDIANA	FATOR DE ESPALHAM.
LOG-UNIFORME	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR

TABELA 9.5.4-1 Cortes Mínimos Obtidos pelo Módulo MOCUS-M

CORTES MINIMOS COM 1 COMPONENTE	
=====	=====
1)	DTU02040
2)	DTU00010
3)	DTU02050
4)	DVPH204L
5)	DVPH205L

NUMERO TOTAL DE CORTES ENCONTRADOS = 5
TODOS OS CORTES MINIMOS FORAM DETERMINADOS.

TABELA 9.5.4-2 Caminhos Mínimos Obtidos pelo Módulo MOCUS-M

CAMINHOS MINIMOS COM 5 COMPONENTES					
=====	=====	=====	=====	=====	
1)	DTU02040	DTU00010	DTU02050	DVPH204L	DVPH205L

NUMERO TOTAL DE CAMINHOS ENCONTRADOS = 1
TODOS OS CAMINHOS MINIMOS FORAM DETERMINADOS.

TABELA 9.5.5.1-1 Principais Informações Obtidas
pelo Processo de Simulações

TEMPO DE PROCESSAMENTO UTILIZADO (SEG) -----	79.69
COEFIC. DE VARIACAO DA NAO-CONFIAB. OBTIDO (%) ---	4.99
NUMERO DE JOGOS EFETUADOS -----	478000
NUMERO DE FALHAS DO SISTEMA -----	402
NUMERO DE JOGOS FALHOS -----	402
SOMATORIA DOS TEMPOS MORTOS (HORAS) -----	768149.
TEMPO MORTO MEDIO (HORAS) -----	1911.
TEMPO MEDIO ENTRE FALHAS (HORAS) -----	2281073.

OBSERVACOES :
=====

- 1) UM JOGO E DEFINIDO COMO SENDO UMA SIMULACAO DO COM-
PORTAMENTO DO SISTEMA DURANTE UM DETERMINADO TEMPO
DE INTERESSE DENOMINADO TEMPO DE OBSERVACAO.
- 2) CADA JOGO SE BASEIA NAS SIMULACOES DOS INSTANTES DE
FALHAS DOS COMPONENTES E NOS TEMPOS DE REPARO PARA
SIMULAR O COMPORTAMENTO DO SISTEMA. DURANTE UM JOGO
O SISTEMA PODE VIR A FALHAR E APOS SER REPARADO FA-
LHAR NOVAMENTE.
- 3) O TEMPO MORTO DO SISTEMA E DADO PELO PERIODO EM QUE
O SISTEMA SE ENCONTRA INDISPONIVEL.
- 4) A SIMULACAO DE DADOS E ENCERRADA QUANDO UM DOS CRI-
TERIOS ABAIXO FOR ATINGIDO :
 - A) TEMPO DE PROCESSAMENTO FOR MAIOR QUE O TEMPO
MAXIMO ESCOLHIDO;
 - B) COEFICIENTE DE VARIACAO DA NAO-CONFIABILIDA-
DE (DESVIO PADRAO / MEDIA) FOR MENOR QUE
UM VALOR PRE-FIXADO PELO USUARIO. ESTE TESTE
E FEITO A CADA 1000 JOGOS.

TABELA 9.5.5.1-2 Resultados da Análise de Confiabilidade Efetuada pelo Módulo CRESSEX-M

```

*****
INDISPONIBILIDADE MEDIA ----- 8.3698E-04          DESVIO PADRAO ----- 4.1788E-05 ( 5.0%)
NAO-CONFIABILIDADE EM TMAX ----- 8.4100E-04          DESVIO PADRAO ----- 4.1928E-05 ( 5.0%)
FREQUENCIA DE FALHAS ----- 8.4100E-04
*****

```

OBSERVACAO : OS VALORES ENTRE PARENTESSES SITUADOS A DIREITA DOS DESVIOS PADROES REPRESENTAM, RESPECTIVAMENTE, O VALOR PERCENTUAL DO COEFICIENTE DE VARIACAO DA INDISPONIBILIDADE E NAO-CONFIABILIDADE DO SISTEMA (DESVIO PADRAO / MEDIA).

COMENTARIOS :

$$\begin{aligned} \text{TEMPO MEDIO ENTRE FALHAS} &= \frac{(N \times TMAX) - STM}{NF} \\ \text{INDISPONIBILIDADE MEDIA} &= \frac{STM}{(N \times TMAX)} \\ \text{NAO-CONFIABILID. EM TMAX} &= \frac{NJF}{N} \\ \text{FREQUENCIA DE FALHAS} &= \frac{NF}{N} \end{aligned}$$

ONDE :

TMAX ----- TEMPO DE OBSERVACAO
STM ----- SOMA DOS TEMPOS MORTOS DO SISTEMA
N ----- NUMERO TOTAL DE JOGOS
NF ----- NUMERO TOTAL DE FALHAS DO SISTEMA
NJF ----- NUMERO DE JOGOS COM FALHA DO SISTEMA

contribuição percentual de cada evento para a não-confiabilidade e indisponibilidade média do sistema. A TABELA 9.5.5.1-3 apresenta os resultados desta análise.

9.5.5.2 Análise Efetuada pelo Módulo STREUSL-M

Avaliação Pontual

O módulo STREUSL-M efetua a análise de confiabilidade, através dos cortes mínimos fornecidos pelo módulo MOCUS-M. Dos cortes mínimos fornecidos, todos foram considerados na análise, pois a eliminação de qualquer um deles provocaria um erro percentual no valor da indisponibilidade superior a 0,01%, conforme estipulado na entrada de dados. A lista de cortes mínimos ordenados pelo módulo STREUSL-M é apresentada na TABELA 9.5.5.2-1.

As estimativas: pessimista, realista e otimista da indisponibilidade média do sistema e o instante em que o seu valor médio atinge seu valor máximo encontram-se reunidos na TABELA 9.5.5.2-2.

A indisponibilidade do SERTM é dominada pela probabilidade de ocorrência de eventos não-reparáveis que ocorrem em demanda, fazendo com que a indisponibilidade permaneça praticamente constante ao longo do tempo, como pode ser observado na TABELA 9.5.5.2-3.

Análise da Propagação da Incerteza

A incerteza associada aos dados de ocorrência

TABELA 9.5.5.1-3 Análise da Contribuição dos Eventos Primários para a Não-Confiabilidade e Indisponibilidade do SERTM

- (1) NUMERO DE OCORRENCIAS EM QUE O COMPONENTE SE ENCONTROU INDISPONIVEL NOS INSTANTES DE FALHA SIMULADOS PARA O SISTEMA.
- (2) NUMERO DE OCORRENCIAS EM QUE O COMPONENTE, ALEM DE SE ENCONTRAR INDISPONIVEL NO INSTANTE DE FALHA DO SISTEMA, FEZ PARTE DE UM CORTE MINIMO.
- (3) RELACAO ENTRE O NUMERO OBTIDO NO ITEM (2) E O NUMERO TOTAL DE FALHAS DO SISTEMA.
- (4) RAZAO ENTRE A SOMA DOS TEMPOS MORTOS DO SISTEMA (QUANDO A COMPONENTE SE ENCONTROU INDISPONIVEL NO INSTANTE DE FALHA DO SISTEMA) E O PRODUTO : (NUMERO TOTAL DE JOGOS * TEMPO DE OBSERVACAO).
- (5) ANALOGO A (4), ACRESCENTANDO-SE APENAS QUE O COMPONENTE DEVE PERTENCER AO CORTE MINIMO.
- (6) RELACAO ENTRE O VALOR OBTIDO NO ITEM (5) E O VALOR DA INDISPONIBILIDADE MEDIA DO SISTEMA.

INFORMACOES RELACIONADAS COM A NAO-CONFIABILIDADE
 =====

EVENTO	(1)	(2)	(3)
=====	=	=	=
DVPH204L	200	200	4.98E-01
DVPH205L	197	197	4.90E-01
DTU00010	4	4	9.95E-03
DTU02050	1	1	2.49E-03

INFORMACOES RELACIONADAS COM A INDISPONIBILIDADE MEDIA
 =====

EVENTO	(4)	(5)	(6)
=====	=	=	=
DVPH204L	4.18E-04	4.18E-04	5.00E-01
DVPH205L	4.12E-04	4.12E-04	4.92E-01
DTU00010	6.13E-06	6.13E-06	7.33E-03
DTU02050	3.31E-07	3.31E-07	3.95E-04

TABELA 9.5.5.2-1 Indisponibilidade dos Cortes Minimos Fornecidos pelos Módulo MOCUS-M

NUMERO	COLO- CACAO	INDISPONIBILIDADE DO CORTE	COMPONENTES DOS CORTES
1)	1	3.75E-04	DVPH204L
2)	1	3.75E-04	DVPH205L
3)	3	8.14E-06	DTU00010
4)	4	8.14E-07	DTU02040
5)	4	8.14E-07	DTU02050

OBSERVACAO :
=====

TODOS OS CORTES MINIMOS APRESENTADOS NA TABELA ACIMA FO-
RAM CONSIDERADOS, PELO MODULO STREUSL, NOS CALCULOS DE
CARACTERISTICAS DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA.

TABELA 9.5.5.2-2 Estimativas da Indisponibilidade Média
Obtidas pelo Módulo STREUSL-M

Tipo de Avaliação	Parâm. Utilizado ¹	Resultado
Indisponibilidade Média	Percentil 5 %	2,00 E-04
	Média	7,60 E-04
	Percentil 95 %	1,83 E-03
Indispon. Pontual Máxima	Média	7,69 E-04

Nota: (1) refere-se ao parâmetro da distribuição de incerteza da taxa de ocorrência e probabilidade de ocorrência em demanda, dos eventos primários, utilizado na avaliação da indisponibilidade média do sistema. Os resultados obtidos a partir dos percentis 5 % e 95 % fornecem, respectivamente, estimativas otimistas e pessimistas da indisponibilidade média do sistema.

TABELA 9.5.5.2-3 Indisponibilidade Pontual do Sistema

INSTANTE =====	INDISPONIB. =====	INSTANTE =====	INDISPONIB. =====	INSTANTE =====	INDISPONIB. =====	INSTANTE =====	INDISPONIB. =====
0.0	7.50E-04						
19.2	7.50E-04	499.2	7.55E-04	979.2	7.60E-04	1459.2	7.65E-04
38.4	7.50E-04	519.4	7.55E-04	998.4	7.60E-04	1478.4	7.65E-04
57.6	7.50E-04	537.6	7.55E-04	1017.6	7.60E-04	1497.6	7.65E-04
76.8	7.51E-04	556.8	7.56E-04	1036.8	7.60E-04	1516.8	7.65E-04
96.0	7.51E-04	576.0	7.56E-04	1056.0	7.61E-04	1536.0	7.66E-04
115.2	7.51E-04	595.2	7.56E-04	1075.2	7.61E-04	1555.2	7.66E-04
134.4	7.51E-04	614.4	7.56E-04	1094.4	7.61E-04	1574.4	7.66E-04
153.6	7.51E-04	633.6	7.56E-04	1113.6	7.61E-04	1593.6	7.66E-04
172.8	7.52E-04	652.8	7.57E-04	1132.8	7.61E-04	1612.8	7.66E-04
192.0	7.52E-04	672.0	7.57E-04	1152.0	7.62E-04	1632.0	7.67E-04
211.2	7.52E-04	691.2	7.57E-04	1171.2	7.62E-04	1651.2	7.67E-04
230.4	7.52E-04	710.4	7.57E-04	1190.4	7.62E-04	1670.4	7.67E-04
249.6	7.52E-04	729.6	7.57E-04	1209.6	7.62E-04	1689.6	7.67E-04
268.8	7.53E-04	748.8	7.58E-04	1228.8	7.62E-04	1708.8	7.67E-04
288.0	7.53E-04	768.0	7.58E-04	1248.0	7.63E-04	1728.0	7.67E-04
307.2	7.53E-04	787.2	7.58E-04	1267.2	7.63E-04	1747.2	7.68E-04
326.4	7.53E-04	806.4	7.58E-04	1286.4	7.63E-04	1766.4	7.68E-04
345.6	7.53E-04	825.6	7.58E-04	1305.6	7.63E-04	1785.6	7.68E-04
364.8	7.54E-04	844.8	7.58E-04	1324.8	7.63E-04	1804.8	7.68E-04
384.0	7.54E-04	864.0	7.59E-04	1344.0	7.64E-04	1824.0	7.69E-04
403.2	7.54E-04	883.2	7.59E-04	1363.2	7.64E-04	1843.2	7.69E-04
422.4	7.54E-04	902.4	7.59E-04	1382.4	7.64E-04	1862.4	7.69E-04
441.6	7.54E-04	921.6	7.59E-04	1401.6	7.64E-04	1881.6	7.69E-04
460.8	7.55E-04	940.8	7.59E-04	1420.8	7.64E-04	1900.8	7.69E-04
480.0	7.55E-04	960.0	7.60E-04	1440.0	7.65E-04	1920.0	7.69E-04

dos eventos primários é analisada pelo módulo STREUSL-M, através de 500 simulações da indisponibilidade média do SERTM. A distribuição dos valores simulados da indisponibilidade média tem média igual a $7,43 \text{ E-}04$ e mediana igual a $5,77 \text{ E-}04$. A TABELA 9.5.5.2-4 apresenta a estimativa pontual dos percentis da distribuição da indisponibilidade.

Os resultados dos testes de aderência da distribuição obtida para uma distribuição log-normal encontram-se na TABELA 9.5.5.2-5. Os gráficos da função de densidade de probabilidade e da função de distribuição acumulada da log-normal ajustada são apresentados nas FIGURAS 9.5.5.2-1 e 9.5.5.2-2.

TABELA 9.5.5.2-4 Estimativa dos Percentis da Distribuição da Indisponibilidade Média Simulada

PERCENTIL (%)	ESTIMATIVA PONTUAL
5.00	2.07E-04
10.00	2.51E-04
15.00	2.90E-04
20.00	3.37E-04
25.00	3.82E-04
30.00	4.13E-04
35.00	4.40E-04
40.00	4.78E-04
45.00	5.34E-04
50.00	5.77E-04
55.00	6.43E-04
60.00	6.98E-04
65.00	7.43E-04
70.00	8.11E-04
75.00	8.81E-04
80.00	1.01E-03
85.00	1.19E-03
90.00	1.41E-03
95.00	2.00E-03

TABELA 9.5.5.2-5 Testes de Aderência da Distribuição da Indisponibilidade Média Obtida

MEDIA -----	7.37E-04	DESVIO PADRAO -----	5.49E-04	(DADOS ORIGINAIS)
VALOR MEDIO DO LOG -----	-7.43E+00	DESVIO PADRAO DO LOG -----	6.64E-01	(DADOS TRANSFORMADOS)
MEDIANA -----	5.92E-04	FATOR DE ERRO -----	2.88E+00	(VALORES APROXIMADOS)

PERCENTIS (%)	VALOR APROXIMADO
5.00	1.98E-04
10.00	2.53E-04
20.00	3.38E-04
30.00	4.18E-04
40.00	5.00E-04
50.00	5.92E-04
60.00	7.00E-04
70.00	8.38E-04
80.00	1.03E-03
90.00	1.39E-03
95.00	1.78E-03

TESTE DE KOLMOGOROV PARA QUALIDADE DE AJUSTAMENTO
 =====
 A HIPOTESE DE LOG-NORMALIDADE DEVE SER REJEITADA
 SE A PROBABILIDADE ACEITAVEL DE ERRO NESTA DECI-
 SAO FOR SUPERIOR A 71.6 % .

FIGURA 9.5.5.2-1 Gráfico da Função de Densidade de Probabilidade da Indisponibilidade Média

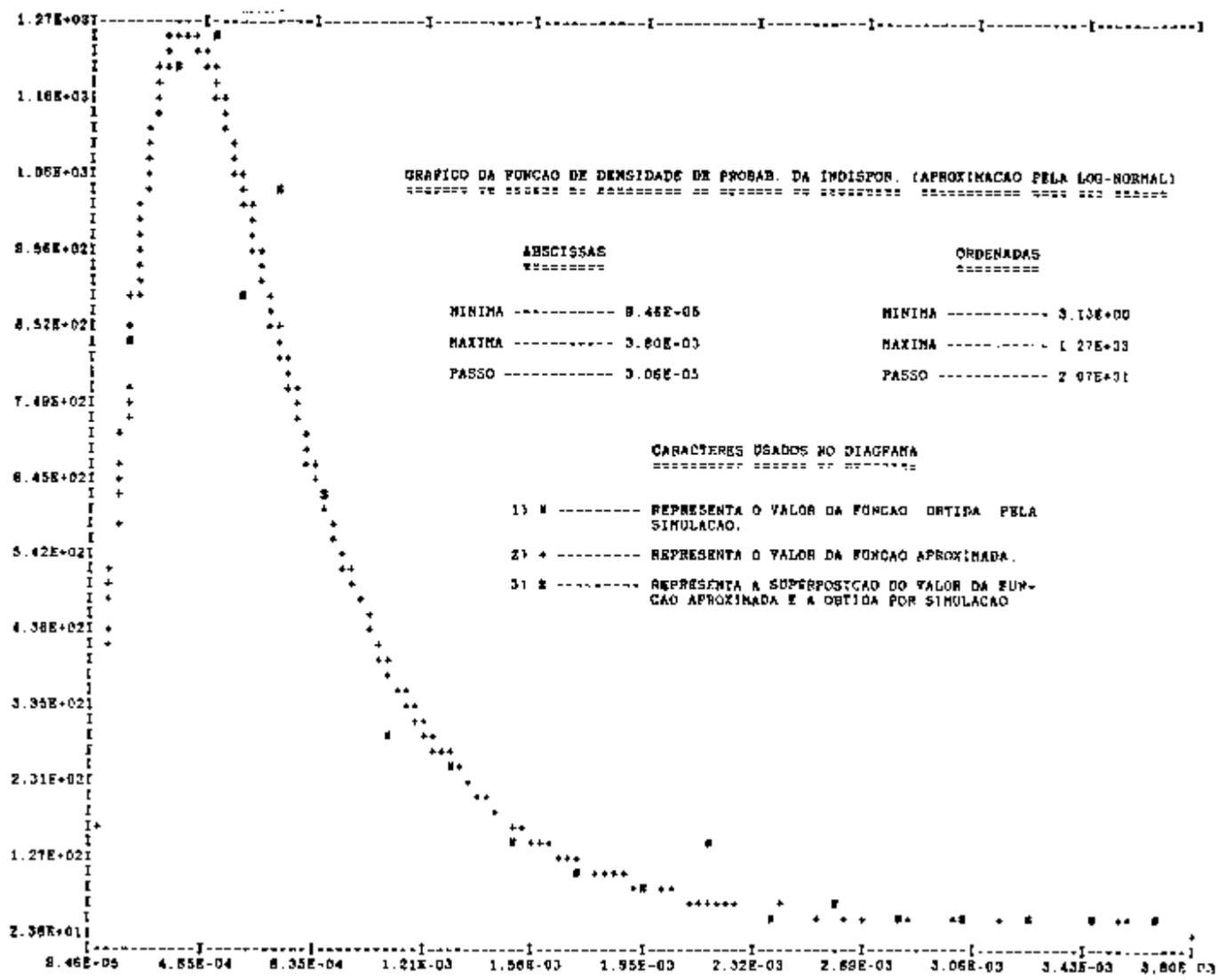


FIGURA 9.5.5.2-2 Gráfico da Função de Distribuição Acumulada da Indisponibilidade Média

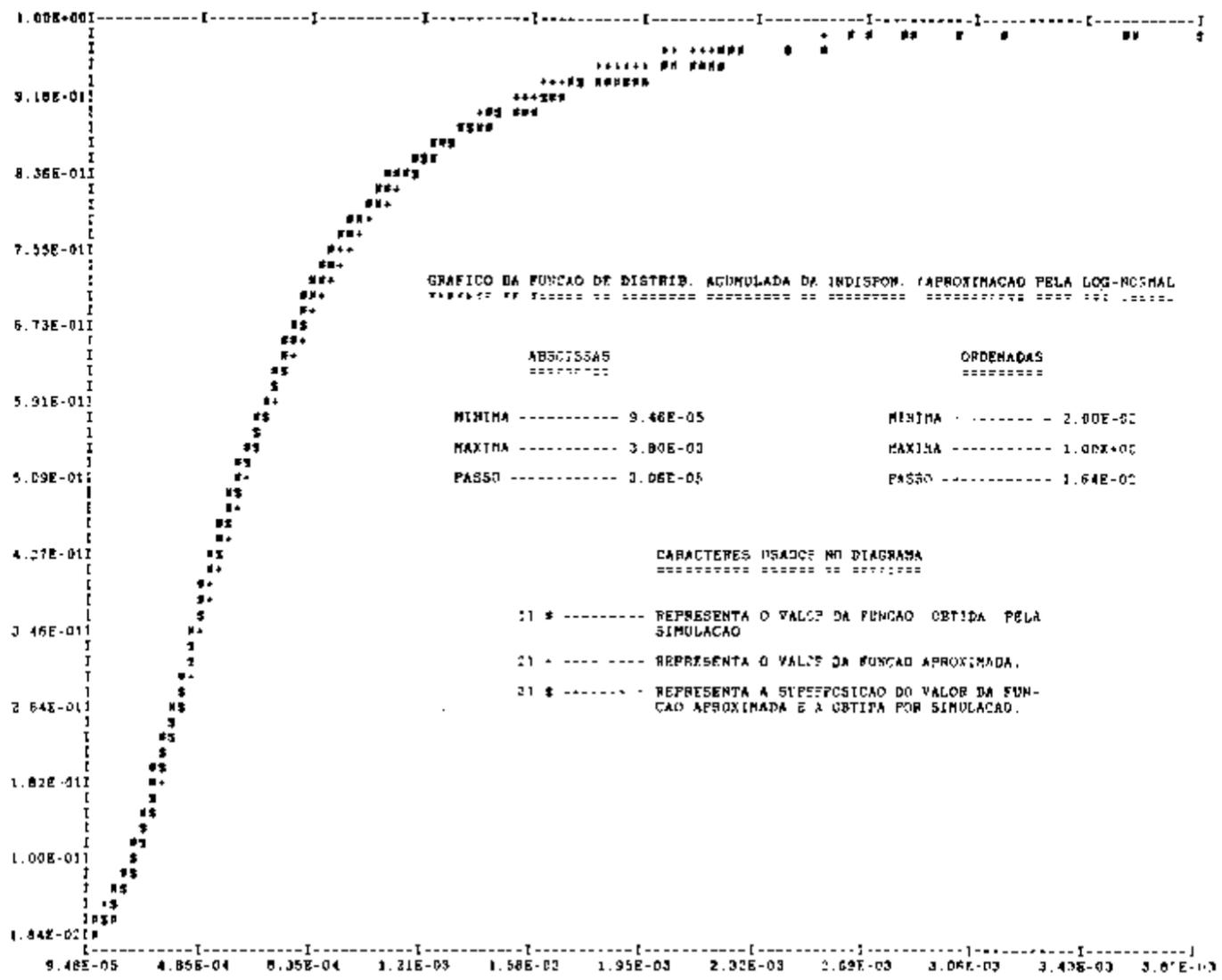


TABELA C.1-1 Tempos de Processamento do Segmento do Segmento de Simulação

CASO	Tempos do Segmento de Simulação (s)							
	TG1	TG2	T1	T2	T3	T4	Tm	TOTAL
1	0,000	0,064	0,119	0,02	0,03	0,02	--	0,26
2	0,724	2,427	2,622	0,97	15,12	15,87	--	37,73
3	1,355	4,797	3,380	3,80	10,72	7,99	--	32,04
4	1,700	4,900	17,222	22,08	58,90	44,00	--	148,86
5	1,945	4,855	2,980	4,46	12,12	21,34	--	47,70
6	1,853	5,317	0,239	0,07	1,69	1,87	--	11,04
7	2,501	7,139	1,346	0,49	9,58	0,44	--	21,50
8	5,160	14,380	2,607	1,00	19,30	0,89	--	43,34
9	2,750	7,230	1,191	0,50	9,71	0,50	--	21,86
10	2,496	7,114	1,330	0,49	9,13	5,45	--	26,01
11	0,460	6,270	9,912	12,44	39,05	545,9	--	614,03
12	9,110	26,251	--	--	--	--	1,85	37,21

Nomenclatura:

Tempo Consumido na Geração de Taxas de Ocorrência de Eventos Primários:

"TG1" é o tempo consumido na preparação de dados para a geração de números pseudo-aleatórios. "TG2" é o tempo de geração das taxas de ocorrência dos eventos primários.

Tempos Consumidos pela Sub-Rotina TIMUNA:

"T1" é o tempo consumido na preparação de dados na sub-rotina TIMUNA. "T2" é o tempo consumido na determinação dos tempos a serem considerados nas estimativas pontuais da indisponibilidade média dos eventos. "T3" é o tempo consumido na estimativa da indisponibilidade média dos eventos primários e, finalmente, "T4" é o tempo consumido na estimativa da indisponibilidade média dos cortes mínimos e do sistema.

"Tm" é o tempo consumido pela sub-rotina MEAUNA.

CAPÍTULO 10

10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTO FUTURO

10.1 CONCLUSÕES

O programa RALLY-M pode ser usado como uma importante ferramenta em trabalhos que envolvam a avaliação probabilística de risco ou de segurança de instalações nucleares. Alguns trabalhos neste sentido já foram efetuados com o programa RALLY-M e encontram-se documentados nas referências [14-15].

A documentação da metodologia de cálculo usada pelo programa RALLY-M, que está incorporada a esta dissertação, e o manual de utilização do programa [100], permitem ao usuário o uso completo do potencial do programa e possibilitam uma boa interpretação dos resultados obtidos.

Embora cada módulo do programa execute funções similares a outros programas, a interligação entre eles forma um sistema de análise de confiabilidade cuja abrangência pode ser comparada a poucos sistemas computacionais em uso atualmente.

A presente versão do RALLY-M apresenta muitos pontos de superioridade em relação ao programa RALLY inicialmente disponível na CNEN/RJ [98]. Esta superioridade inclui documentação, flexibilidade, precisão, velocidade

de, etc. Além disto a compreensão de sua construção cria facilidades para futuros ajustes e ampliações.

10.2 SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O programa RALLY-M poderá ser futuramente ampliado com a incorporação do programa COMCAM [46], para a análise de falhas provocadas por causas comuns, e do programa IMPORTANCE [63], para a avaliação de diversas definições de importância. Uma versão do COMCAM compatível com computadores C.D.C. encontra-se disponível no IPEN-CNEN/SP. O IMPORTANCE é documentado na referência [34] de onde poderá ser facilmente reproduzido.

10.2.1 Sugestões de Melhorias no Módulo MOCUS-M

10.2.1.1 Alteração no Algoritmo

Um novo algoritmo para o MOCUS-M poderá ser implementado em substituição ao atual, proporcionando uma diminuição do tempo de processamento e uma redução da área de memória.

O novo algoritmo baseia-se na idéia de se processar o maior tempo possível com um número reduzido de linhas (cortes mínimos) da matriz ICS (veja seção 4.3.2). Este procedimento fará com que não haja uma repetição desnecessária de operações em portões que existam em mais de uma linha.

Os principais passos de desenvolvimento deste

algoritmo são sugeridos a seguir:

- a) Define-se o portão que se quer obter os cortes mínimos.
- b) Processa-se indistintamente portões do tipo "AND" e "NOR" que possuam portões em suas entradas.
- c) Procede-se à compactação dos cortes através das leis de Boole.
- d) Processam-se os portões do tipo "NAND" e "OR" que possuem apenas eventos nas entradas e repete-se o passo (c) até que todos os cortes mínimos tenham sido obtidos.

O emprego de um algoritmo semelhante a este, restrito, contudo, a estruturas monótonas, encontra-se implementado computacionalmente no programa FATRAN [23], que exige menor área de memória e possui maior velocidade de processamento que o programa MOCUS [17].

A implementação deste algoritmo no MOCUS-M pode ser realizada facilmente, pois somente as sub-rotinas relacionadas com os algoritmos que operam a matriz ICS serão alteradas (sub-rotinas: GATES, CORTNU, COMPAC e SHRINK). As demais sub-rotinas, que representam cerca de 90% do esforço de construção computacional módulo, não seriam influenciadas pelo novo algoritmo. Estima-se que

cerca de 200 homens-hora de trabalho sejam suficientes para se efetuar esta modificação.

10.2.1.2 Inclusão de um Novo Critério de Encerramento

Na versão atual do módulo MOCUS-M, caso o tempo de processamento estipulado nos cartões J.C.L. ("job control language") não tenha sido suficiente para a determinação de todos os cortes mínimos de ordem igual ou inferior a um valor pré-estipulado pelo usuário, o programa é encerrado sem que os cortes/caminhos mínimos obtidos até então sejam impressos. Este problema se torna evidente quando se observa que a análise do modelo S5, realizada no capítulo 4, não foi capaz de imprimir nenhum corte mínimo quando se estipulou tempos de processamento menores que 60 minutos e ordem máxima dos cortes mínimos igual a 6. Para os cortes/caminhos mínimos que já tenham sido determinados sejam impressos, sugere-se que sejam feitas as seguintes alterações no módulo:

- 1) incluir na leitura de dados o valor do máximo tempo de processamento desejado pelo usuário;
- 2) incluir uma sub-rotina capaz de medir o tempo de processamento gasto (tal como a sub-rotina ZA02AS(IDUMMY) da Harwel usada pelos módulos CRESSC-M, CRESSEX-M e STREUSL-M);
- 3) construir uma nova sub-rotina, para ser executada quando o tempo de processamento definido

na entrada de dados for atingido. Esta sub-rotina deve localizar, separar e imprimir os cortes mínimos já obtidos na matriz ICS (calculada pela sub-rotina GATES).

A inclusão desta sub-rotina não exigirá um grande acréscimo na área de memória utilizada pelo módulo, pois os cortes mínimos obtidos podem ser separados dentro da própria matriz ICS.

Estima-se que o tempo necessário para que este critério seja implementado seja de aproximadamente 80 homens-hora.

10.2.2 Sugestões para Melhorias no Módulo CRESSC-M

Em alguns casos, o tempo de processamento usado pelo CRESSC-M pode ser sensivelmente reduzido se antes do início das simulações forem obtidos analiticamente todos os cortes mínimos de ordem 1 e posteriormente excluídos da lista de eventos primários.

10.3.3 Sugestões para Melhorias nos Módulos CRESSEX-M e STREUSL-M

Alguns pontos que restringem a utilização do programa RALLY-M são sugeridos para futuros desenvolvimentos.

- a) Implementar, nos módulos CRESSEX-M e STREUSL-M, um modelo que possibilite a avaliação de eventos

primários reparáveis que ocorram sob demanda.

- b) Capacitar o programa para efetuar análise de sistemas com mais de uma fase de missão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BELL TELEPHONE LABORATORIES. **Launch control safety study**, Section VII, vol 1, Murray Hill, N. J., 1961.
- [2] HAASL, D. F. **Advanced concepts in fault tree analysis**, **System Safety Symposium**, Boeing Company, Seattle, Jun. 8-9, 1965.
- [3] U. S. ATOMIC ENERGY COMMISSION. **Theoretical possibilities and consequences of major accident in large nuclear power plants**, Mar. 1957. (WASH-740).
- [4] FARMER, F. R. **Reactor safety and siting: a proposed risk criterion**, **Nuclear Safety**, vol 8(6), 1967.
- [5] OTWAY, H. & ERDMANN, R. **Reactor siting and design from a risk viewpoint**, **Nuclear Eng. Design**, vol 13:365, 1970.
- [6] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Reactor Safety study - an assessment of accident risk in U. S. commercial nuclear power plants**, Washington, D. C. Oct. 1975. (WASH-1400, NUREG-75/014).
- [7] KEMENY COMMISSION, **Report of the president's commission on the accident at Three Mile Island**, Oct. 1980.
- [8] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, **Regovin inquiry group, Three Mile Island, a report to commissioners and the public**, Jan. 1980. (EPRI-NP-1945).
- [9] HAASL, D. F. et alii. **Fault tree handbook**, Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. Office of Nuclear Regulatory Commission, Jan. 1981. (NUREG-0492).
- [10] BARSELL, A. W. et alii. **German risk study - main report: a study of the risk due to accidents in nuclear power plants**, Torrey Pines Technology, San Diego, CA(USA), Apr. 1981. (EPRI-NP-1804-SR).
- [11] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. **Sizewell-B probabilistic safety study**, Monroeville, 1982. (WCAP-9991).
- [12] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Reactor risk reference document**, Washington D.C. (USA), Office of Nuclear Regulatory Research, Feb. 1987. (NUREG-1150).

- [13] COMISSAO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Análise probabilística de segurança da Central Nuclear Almirante Alvaro Alberto - Unidade I.** Rio de Janeiro - RJ. Set. 1984.
- [14] VIEIRA Neto, A. S. & BORGES, W. S. **Reliability design of a critical facility: an application of PRA methods.** International and Topical Conference on Probabilistic Safety Assessment & Risk Management. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich. Aug. 30 - Sep. 4, 1987.
- [15] VIEIRA Neto, A. S.; BORGES, W. S. **Análise da frequência de falhas no desligamento do conjunto crítico da Unidade Crítica.** Departamento de Tecnologia de Reatores, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP). São Paulo -SP. 1987. (Relatório interno: R-611050025362).
- [16] GUELDNER, W.; POLKE, H.; SPINDLER, H.; ZIPF, G. **Programmsystem RALLY - zur probabilistischen Sicherheitsbeurteilung grosser technischer systeme.** Garching (Germany, F. R.), Gesellschaft fuer Reaktorsicherheit m. b. h. Mar. 1982. (GRS-44).
- [17] FUSSEL, J. B.; HENRY, E. B.; MARSHALL, N. H. **MOCUS - a computer program to obtain minimal sets fault trees.** Idaho Falls, Idaho, Aerojet Nuclear Company, Mar. 1974. (ANCR-1156).
- [18] APOSTOLAKIS, G. E.; SALEM, S. L.; WU, J. S. **CAT - a computer code for the automated construction of fault trees.** Electric Power Research Institute, Mar. 1978. (EPRI NP-705).
- [19] FUSSEL, J. B. **Computer aided fault tree construction for electrical systems.** in reliability and fault tree analysis, pag 37-56. Richard Barlow, Jerry Fussel and Nozer Singpurwalla editors. SIAM, 1975.
- [20] LAPP, S. A. & POWERS, G. J. **The synthesis of fault trees.** in nuclear systems reliability engineering and risk assessment, pag. 778-99. Fussel, J. B. & Burdick, R. G. editors. SIAM, 1977.
- [21] VESELY, W. E. & NARUM, R. E. **PREP and KITT computer for the automatic evaluation of a fault tree.** Idaho, Idaho Nuclear Corporation, 1970. (IN-1349).

- [22] VAN SLYKE, W. J.; GRIFFING, D. E. ALLCUTS, a fast comprehensive fault tree analysis code. Richard, Wash., Atlantic Richfield Hanfort Company, Jul. 1975. (ARH-ST-112).
- [23] RASMUSON, D. M. & MARSHALL, N. H. FATRAM - a core efficient cut set algorithm. IEEE Trans. Reliability, vol NS-27: 250-3, Oct. 1978.
- [24] LOCKS, M. O. Fault trees, prime implicants and noncoherence; OGUNBIYI, E. I. "Author Reply # 1"; KUMAMOTO, E. J.; HENLEY, E. J., "Author Reply # 2"; LOCKS, M. O., "Rebuttal"; IEEE Trans. Reliability, vol R-29:130-5, Jun. 1980.
- [25] WORRELL, R. B. SET equation transformation system (SKT). Albuquerque, New Mexico, Sandia Laboratories, 1974. (SLA-73-0028A).
- [26] WORRELL, R. B. Using the set equation transformation system in fault tree analysis. in reliability and fault tree analysis, pag 165-185. Richard Barlow, Jerry Fussel and Nozer Singpurwalla editors. SIAM, 1975.
- [27] WORREL, R. E. & STACK, D. W. A SETS user's manual for the fault tree analyst. Sandia Laboratories, Nov. 1978. (SAND-77-2051).
- [28] NAKASHIMA, K. & HATTORI, Y. An efficient bottom-up algorithm for enumerating minimal cut sets of fault trees. IEEE Trans. on Reliability, vol R-28:353-7, Dec. 1979.
- [29] ISHIGAMI, T. et alii. User's manual for the FTA-J (fault tree analysis - JAERI) code system. 1983. (JAERI-M83-169).
- [30] PELTO, P. J. & PURCELL, W. L. MFAULT - a computer program for analysing fault trees. Battelle Pacific Northwest Laboratories, Nov. 1977. (BNWL-2145).
- [31] PANDE, P. K.; SPECTOR, M. E.; CHATTERJEE, P. Computerized fault tree analysis : TRILL and MICSOP. Berkeley, Calif., Operations Reserch Center, Univ. of California, Apr. 1975.
- [32] CHATTERJEE, P. Fault tree analysis : min cut set algorithms. Berkeley, Calif., Operations Research Center, University of California, Jan. 1974. (ORC 74-2).

- [33] NAKASHIMA, K. & HATTORI, Y. An efficient bottom-up algorithm for enumerating minimal cut sets of fault trees, *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28:353-7, Dec. 1979.
- [34] OLMOS, J. & WOLF, F. A modular approach to fault tree and reliability analysis. Department of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Aug. 1977. (MITNE-209).
- [35] OLMOS, J. & WOLF, F. A modular representation and analysis of fault trees. *Nuclear Engineering and Design*. 48:531-61. 1978.
- [36] ERDMANN, R.C.; LEVERENZ, F. L.; KIRCH, H. WAMCUT, a computer code for fault tree evaluation. Electric Power Research Institute, Jun. 1978. (EPRI-NP-803).
- [37] PUTNEY, B. F. & KIRCH, H. R. WAMCUT II - a fault tree evaluation program. Palo Alto, Calif., Science Applications, Inc., 1981. (SAI-SR-234-81-PA).
- [38] WILLIE, R. R. Computer-aided fault tree analysis : FTAP. Berkeley, Calif., Operations Research Center, University of California, Aug. 1978. (OC 78-14).
- [39] LYNCH, J. E. & ENZINNA, R. S. Computer automated fault tree construction and analysis system. ANS/ENS Topical Meeting on Probabilistic Risk Assessment, 1981.
- [40] WONG, P. Y. FAULTRAN - a fault tree analysis. Chalk River, Canada, Chalk River Nuclear Lab., 1975. (AECL-5182).
- [41] GARRIBBA, S. et alii. DICOMICS, an algorithm for direct computation of minimal cut sets of the fault trees. 1975. (EUR-5481e).
- [42] SEMANDERES, S. N. ELRAFT, a computer program for the efficient logic reduction analysis of fault trees. *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol NS-18: 481-7, Feb. 1971.
- [43] WADDINGTON, J. G. & WILD, A. The fault tree as a tool in safety analysis in nuclear power plants. Ottawa, Canada, Atomic Energy Control Board, 1981. (INFO-0036).
- [44] JOHNSTON, B. D. & MATTHEWS, R. H. Noncoherent structure theory: a review and its role in fault tree analysis, Safety and Reliability Directorate, Oct. 1983. (SRD R 245).

- [45] KUMAMOTO, H. & HENLEY, E. J. Top down algorithm for obtaining prime implicant sets of noncoherent fault trees. *IEEE Trans. on Reliability*, vol R-27:242-9, Oct. 1978.
- [46] BURDICK, G. R. COMCAN - a computer code for common-cause analysis, *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26 : 100-2, Jun. 1977.
- [47] BURDICK, G. R.; MARSHALL, N. H.; WILSON, J. R. COMCAM - a computer program for common cause failure analysis. Aerojet Nuclear Company, May 1976. (ANCR-1314).
- [48] CATE, C. L.; FUSSEL, J. B. BACFIRE - a computer program for common cause failure analysis. The University of Tennessee, 1977. (NERS-77-02).
- [49] ROONEY, J. J. & FUSSEL, J. B. BACFIRE II - a computer program for common cause failure analysis of complex systems. Knoxville, Department of Nuclear Engineering, University of Tennessee, 1978.
- [50] DAUGHERTY, R. & SCHLOSSER, L. CRESSEX - beschreibung eines zuverlässigkeitsrechenprogrammes zur ermittlung wichtiger kenngrößen von komplexen systemen. Laboratorium für reaktorregelung und anlagensicherung Garching, Sep. 1976. (MRR-P-23).
- [51] CROSETTI, P. Computer program for fault tree analysis. Douglas United, Inc. Richard, Wash. Apr. 1969. (DUN-5508).
- [52] KONGSOE, H. E. REXDIS, a computer program for system reliability analysis by direct simulation. Intern. Simp. Reliability of Nuclear Power Plants, Innsbruck, Austria, Apr. 14-18, 1975.
- [53] KONGSOE, H. E. RELY 4 : a Monte Carlo computer program for systems reliability analysis. Daman atomic Energy Commission, Jun. 1972. (RISO-M-1500).
- [54] GARRICK, B. J. Principles of unified system safety analysis, *Nuclear Engineering and Design*, vol 13:245-321, 1970.
- [55] MCKNIGHT, C. W. et alii. Automatic reliability mathematical mode. Downey, Calif., North American Aviation Inc., 1966. (NA 66-838).

- [56] CALDAROLA, L. & WICKENHAUSER, A. The Karlsruhe computer program for the evaluation of the availability and reliability of complex reparable systems, **Nuclear Engineering and Design**, vol 43:463-70, 1970.
- [57] PLATZ, O. & OLSEN, J. V. FAUNET - a program package for evaluation on fault trees and networks. Danish Atomic Energy Commission, Sep. 1976. (RISO-348).
- [58] MATSUOKA, T. FFTA - a fault tree analysis program, **Nuclear Engineering and Design**, vol 91 : 93-101, 1986.
- [59] VESELY, W. E. & GOLDBERG, F. F. FRANTIC - a computer code for time-dependent unavailability analysis. Oct. 1977. (NUREG-0193).
- [60] VESELEY, W. E. et alii. FRANTIC II - a computer code for time-dependent unavailability analysis. Washington, D. C., U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1981. (NUREG/CR-1924).
- [61] GATELEY, W. Y. & WILLIAMS, R. L. Go, methodology - system reliability assessment and computer code manual. Electric Power Research Institute, May 1978. (EPRI-NP-766).
- [62] LAMBERT, H. E. Fault trees for decision making in system analysis. Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Oct. 1976. (UCRL-51829).
- [63] CARNINO, A. Safety analysis using fault trees. in NATO advanced study institute on generic techniques in systems reliability assessment. HENLEY, E. J. & LYNN, J. W. editors. Nordhoff. 1973.
- [64] FEO, T. PAFT F77, program for the analysis of fault trees, **IEEE Trans. Reliability**, vol R-35(1):48-50, Apr. 1986.
- [65] BLIN, A.; CARLINE, A. et alii. PATREC, a computer code for fault tree calculations. in synthesis and analysis methods for safety and reliability studies. APOSTOLAKIS, G.; GARRIBA, S.; VOLTA, G. editors. Plenum. 1978.
- [66] FUSSEL, J. B. Phased-mission system reliability analysis. University of Tennessee, Department of Nuclear Engineering. Jul. 1981.

- [67] MINGXILANG, J. Theory and algorithm of the quantitative analysis of fault trees, *Reliability Engineering*, vol 12:241-57, 1985.
- [68] ASTOLFI, M.; CONTINI, S.; VAN DER MUYZENBERG, C. L.; VOLTA, G. Fault tree analysis by list-processing techniques. in synthesis and analysis methods for safety and reliability studies, pg 5-32. APOSTOLAKIS, G.; GARRIBA, S.; VOLTA, G. editors. Plenum. 1978.
- [69] SCHLOSSER, L. Theoretische Grundlagen zum Rechenprogramm STREUSL zur Ermittlung der Streuung in Zuverlässigkeitskenngrößen. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Jun. 1979. (GRS-1-313).
- [70] SCHLOSSER, L. STREUSL - ein Rechenprogramm zur Ermittlung der Streuung in Zuverlässigkeitskenngrößen aufgrund der Streuungen der Eingabedaten. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Dec. 1978. (GRS-A-183).
- [71] FUSSELL, J. B.; RASMUSON, D. M.; WAGNER, D. SUPER POCUS - a computer program for calculating system probabilistic reliability and safety characteristics. Knoxville, Tennessee, Nuclear Engineering Department, University of Tennessee, 1977. (NERS-77-01).
- [72] LEVERENZ, F. L. & KIRCH, H. User's guide for the WAM-BAM computer code. Palo Alto, Calif., Electric Power Research Institute, Jan. 1976. (EPRI 217-2-5).
- [73] ERDMANN, R. C.; KELLY, J. E.; KIRCH, F. L.; LEVERENZ, F. L.; RUMBLE, E. T. A method for quantifying logic models for safety analysis., em [21, pag. 732-54].
- [74] MANZUDAR, M. Importance sampling in reliability estimation. in reliability and fault tree analysis, pg 153-63. Richard Barlow, Jerry Fussell and Nozer Singpurwalla editors. SIAM. 1975.
- [75] BARLOW, R. E. & PROSCHAN, F. Statistical theory of reliability and life testing, probability models. TO BEGIN WITH. Silver Spring, M. D., 1981.
- [76] VESELY, W. E. Analysis of fault trees by kinetic tree theory. Idaho Falls, Idaho, Idaho Nuclear Corp., Oct 1969. (IN-1330).

- [77] VESELY, W. E. A time-dependent methodology for fault tree theory, *Nucl. Eng. and Design*, vol 13:337-60, Aug. 1970.
- [78] CALDAROLA, L. Fault tree analysis with multistate components. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany. (KEK 2761).
- [79] COLOMBO, A. G. & JAARSMA, R. J. A powerful numerical method to combine random variables, *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29(2): 126-9, 1980.
- [80] AHMED, S.; MELTCALF, D.R.; PERGRAM, J.W. Uncertainty propagation in PRA: a comparative study. *Nuclear Engineering and Design*. vol 68:1-3. 1981.
- [81] AHMED, S.; CLARK, R. E.; MELTCALF, D. R. A method for propagating uncertainty in PRA. *Nuclear Technology*. vol 59:238-45. 1982.
- [82] APOSTOLAKIS, G. & LEE, Y. T. Methods for the estimation of confidence bounds for the top event availability of fault tree, *Nuclear Eng. Design*, vol 41:411-9, 1977.
- [83] TAKARAGI, K.; SASAKI, R.; SHINGAI, S. An improved moment-matching algorithm for evaluating top-event probability bounds. *IEEE Trans. Reliab.* vol R-31(1). Apr. 1982
- [84] LEE, Y. T. & SALEM, S. L. Probabilistic intervals for the reliability of complex systems using Monte Carlo simulation. Dec. 1977. (UCLA-ENG-7758).
- [85] VESELEY, W. E. & GOLDBERG, F. F. **FRANTIC** - a computer code for time dependent unavailability analysis. Washington, D. C., U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1977. (NUREG-0193).
- [86] MATTHEWS, S. D. **MOCARS** - a Monte Carlo simulation code for determining the distribution and simulation limits. EG & G Idaho, Jul. 1977. (TREE-1138).
- [87] VARIO, J. K. **PROSA-2** - a probabilistic response surface analysis and simulation code. Argonne National Laboratory, 1981. (ANL-81-33).

- [88] AHMED, S.; METCALF, D. R. et alii.
PUFD - a computer program for the propagation of
uncertainty through finite probability
distribution. Lynchburg, VA, Babcock & Wilcox,
1981. (NPGD-TM-583).
- [89] CARINS, J. J. & FLEMING, K. N. STADIC - a computer
code for combining probability distributions. 1977
- [90] ORVIS, D. D.; FRANK, M. V. et alii.
Guidebook for the reliability and maintainability
analysis of ONWI repository equipment.
Columbus, Ohio, Office of Nuclear Waste Isolation,
Battelle Memorial Institute, 1981. (ONWI-334).
- [91] KAPLAN, S. Discrete probability distribution
computer code (DPD). Pickard, Lowe and Garric,
Inc., 1981. (PL-F135).
- [92] FLEMING, P. V.; OLIVEIRA, L. F. S.; SENNA, V.;
SALLES, M. R. ADORAVA - um programa para somar
variáveis aleatórias. Rio de Janeiro,
COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Jun. 1985. (PEN-134).
- [93] LEE, Y. T. & APOSTOLAKIS, G. E. Probability
intervals for the top event unavailability of fault
trees. Los Angeles, University of California,
1976. (UCLA-ENG-7663).
- [94] DEZFULI, H.; MORRADES, M. Uncertainty analysis of
reactor safety systems with statistically
correlated failure data, *Reliability Engineering*,
vol 11:47-64, 1985.
- [95] LEVERENZ, F. L. SPASM, a computer code for Monte
Carlo system evaluation. Palo Alto, Calif.,
Electric Power Research Institute, 1981.
(EPRI NP-1665).
- [96] CHANG, S. H.; PARK, J. Y.; KIM, M. K. The Monte
Carlo method without sorting for uncertainty
propagation analysis in PRA, *Reliability
Engineering*, vol 10:233-43, 1985.
- [97] RASMUSON, D. M.; MARSHALL, N. H.; BURDICK, G. R.
User's guide for the reliability analysis system
(RAS). Idaho, Idaho National Engineering
Laboratory, Sep. 1977. (TREE- 1168)

- [98] FERNANDES FILHO, T. L. Descrição dos programas TRKBIL, CRESSEX e STREUSL, componentes do pacote de códigos RALLY para a análise da confiabilidade de sistemas. Rio de Janeiro, Departamento de Reatores, Comissão Nacional de Energia Nuclear / RJ. Nov., 1982. (DR-114/82).
- [99] HENLEY, E. J. & KUMAMOTO, H. Reliability Engineering and Risk Assessment. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1981.
- [100] VIEIRA NETO, A. S. Guia do usuário para a análise de confiabilidade pelo programa RALLY-M. Departamento de Tecnologia de Reatores, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), 1986.
- [101] ROSENTHAL, A. Approaches to comparing cut-set enumeration algorithms, IEEE Trans. Reliability, vol R-28(1):62-5, Apr. 1979.
- [102] VIEIRA Neto, A.S. & BORGES, W. S. Análise da confiabilidade do sistema de desligamento da Unidade Crítica. VI Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica. São José do Campos, SP. Dez. 3-5, 1986.

APÊNDICE A

A - DESCRIÇÃO DOS SÍMBOLOS USADOS NA ÁRVORE DE FALHAS

A árvore de falhas é constituída pela interligação de símbolos especiais que representam portões lógicos e eventos. A descrição destes símbolos é feita a seguir.

Portões Lógicos: Resumem uma relação de causa e efeito. Os eventos causa constituem as diferentes entradas do portão lógico, que tem como saída um único evento efeito (resultado da combinação lógica dos eventos de entrada). As definições dos principais portões lógicos usados em árvores de falhas encontram-se nas TABELAS A-1 e A-2.

Eventos: Os eventos são conectados por portões lógicos e representam situações operacionais ou estados de equipamentos ou componentes. Os símbolos de eventos mais usados em árvores de falhas são descritos na TABELA A-3. Note que os eventos: básico, não-desenvolvido, de acionamento e inibidores são limites de resolução da árvore e por este motivo chamados de eventos primários.

Além dos símbolos descritos acima existem símbolos especiais usados para a transferência de segmentos da árvore de falhas, cuja descrição é efetuada na TABELA A-4.

TABELA A-1 Descrição dos Portões Lógicos

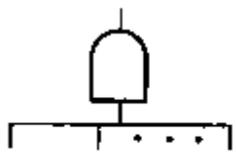
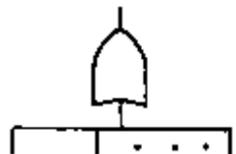
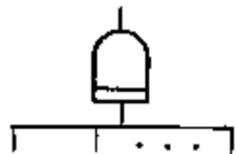
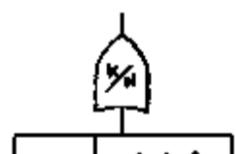
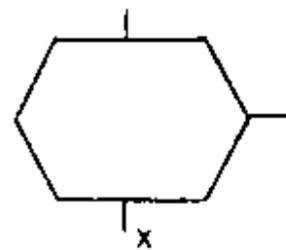
SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	PORTAO "AND" : Representa a operação lógica a qual o evento ligado à saída do portão, somente ocorre quando todos os eventos de entrada ocorrerem.
	PORTAO "OR" : Representa a operação lógica na qual define a ocorrência do evento ligado à saída do portão, quando pelo menos um dos seus eventos de entrada ocorrerem.
	PORTAO "AND PRIORITARIO" : O evento de saída ocorre se e somente se todos os eventos de entrada ocorrerem um a um, da esquerda para a direita.
	PORTAO "K de N" : O evento de saída ocorre se K das N entradas ocorrerem.
	PORTAO INIBIDOR : É um caso especial de portão lógico do tipo "AND", onde uma das entradas é um evento inibidor. O evento ligado a saída, somente ocorre quando o evento "x" satisfizer a condição imposta pelo evento inibidor.

TABELA A-2 Descrição dos Portões Lógicos

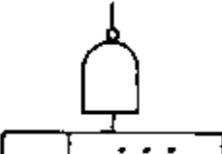
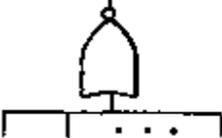
SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	PORTAO "NOT" : Inverte a lógica, isto é, a saída é o complemento da entrada.
	PORTAO "NAND" : Inverte a lógica do portão "AND", isto é, o evento de saída ocorre se e somente se pelo menos um evento de entrada não ocorrer.
	PORTAO "NOR" : Inverte a lógica do portão "OR", isto é, o evento de saída ocorre se e somente se nenhum dos eventos de entrada ocorrerem.

TABELA A-3 Descrição dos Eventos

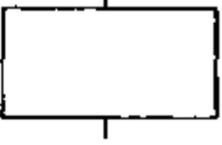
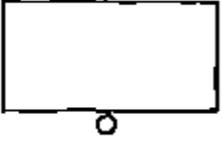
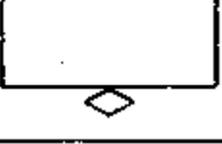
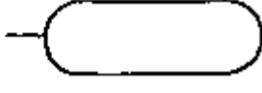
SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	EVENTO TOPO : Constitui o ponto inicial da árvore de falhas e representa o evento indesejado principal cujas causas são objeto da análise.
	EVENTO INTERMEDIÁRIO : Constitui um evento de ligação de portões lógicos e representa um evento causa ou efeito, respectivamente, ao portão em que dá entrada e saída.
	EVENTO BÁSICO : Constitui um ponto terminal numa árvore de falhas onde se atingiu o limite de resolução.
	EVENTO NÃO-DESENVOLVIDO : Constitui um ponto terminal numa árvore de falhas e representa um evento cujas causas não são de interesse ou não são possíveis de se avaliar.
	EVENTO DE ACIONAMENTO : O evento de acionamento ("house event") constitui um ponto terminal numa árvore de falhas e representa uma chave de acionamento de ramos da árvore.
	EVENTO INIBIDOR : Constitui um ponto terminal numa árvore de falhas e representa uma condição ou evento de restrição para a ocorrência de um terceiro evento. É usado como entrada de um portão inibidor.

TABELA A-4 Símbolos de Transferência

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	<p>TRANSFERIDORES : Utilizados em pares identificados por um determinado número ou letra, indicam que a continuação da árvore num triângulo de saída encontra-se no triângulo de entrada correspondente.</p>
	<p>TRANSFERIDORES POR SIMILARIDADE : Utilizados em pares identificados por um número ou letra, indicam que a continuação da árvore num triângulo de saída é semelhante (mas não idêntica) àquela localizada no triângulo de entrada correspondente.</p>

APÊNDICE B**B - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÓDULO MOCUS-M E O PROGRAMA WAMCUT**

Antes de sua utilização na análise de confiabilidade de sistemas e acoplamento ao programa RALLY-M, o módulo MOCUS-M passou por uma série de testes de qualificação para avaliar a consistência dos algoritmos introduzidos. As soluções obtidas pelo programa MOCUS-M foram comparadas com as obtidas por diferentes métodos, e em particular com as fornecidas por uma versão do programa WAMCUT [36], compatível com computadores IBM. Além das soluções, também foram comparados aspectos construtivos, metodológicos e o tempo de processamento destes programas.

B.1 Comparação de Aspectos Construtivos e Metodológicos

Tanto o programa WAMCUT quanto o módulo MOCUS-M usam métodos analíticos na determinação de cortes mínimos de árvores de falhas, caso estas representem estruturas monótonas, e os termos de uma forma disjuntiva normal, para árvores que representem estruturas não-monótonas. Seus algoritmos, entretanto, desenvolvem-se em sentidos contrários na árvore de falhas. No programa WAMCUT as avaliações são iniciadas na base e terminam no topo da árvore (algoritmo do tipo "bottom up", cujo desenvolvimento é apresentado na FIGURA B.1-1), enquanto que no módulo

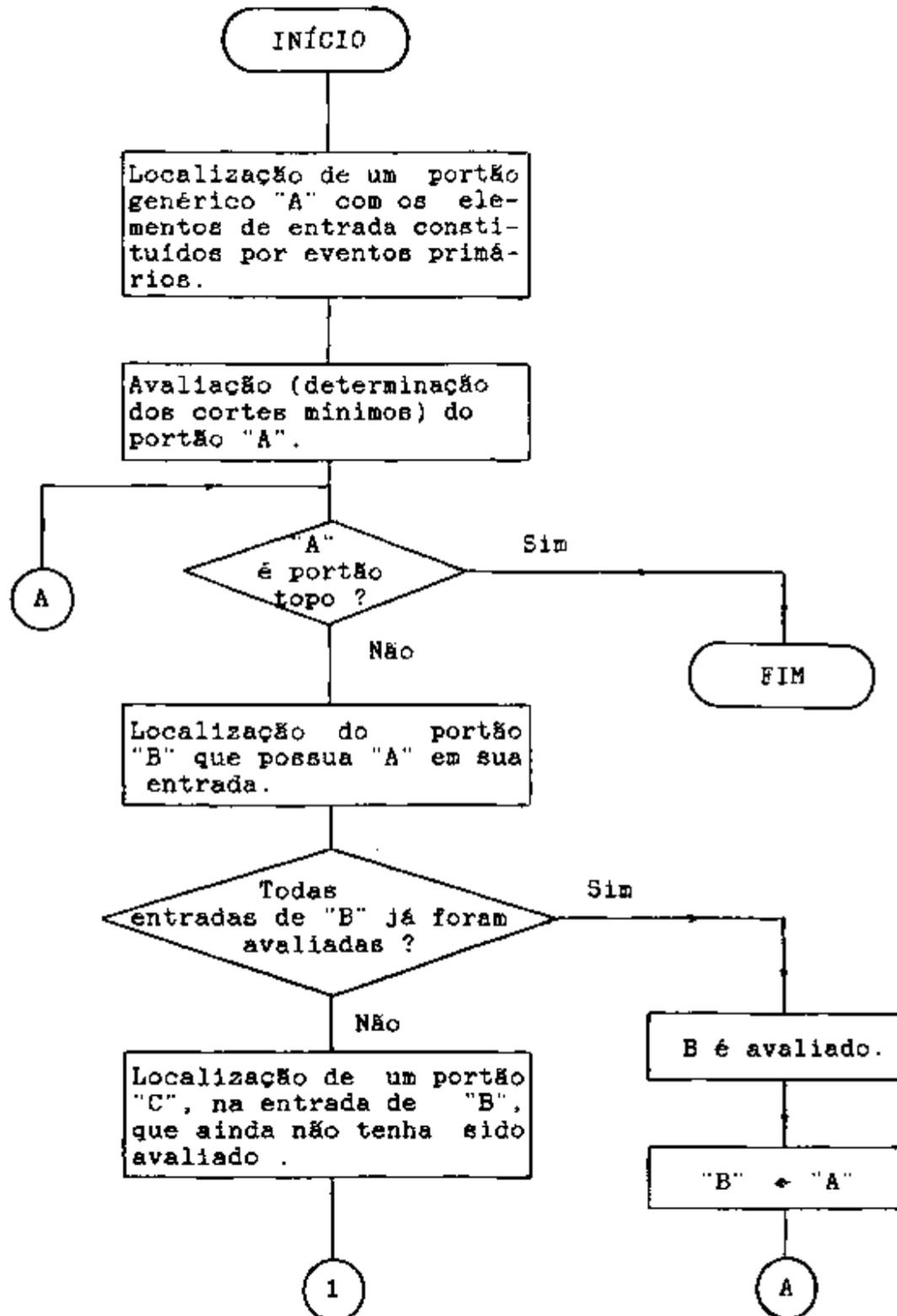


FIGURA B.1-1 Esquema do Algoritmo Usado pelo Programa WAMCUT

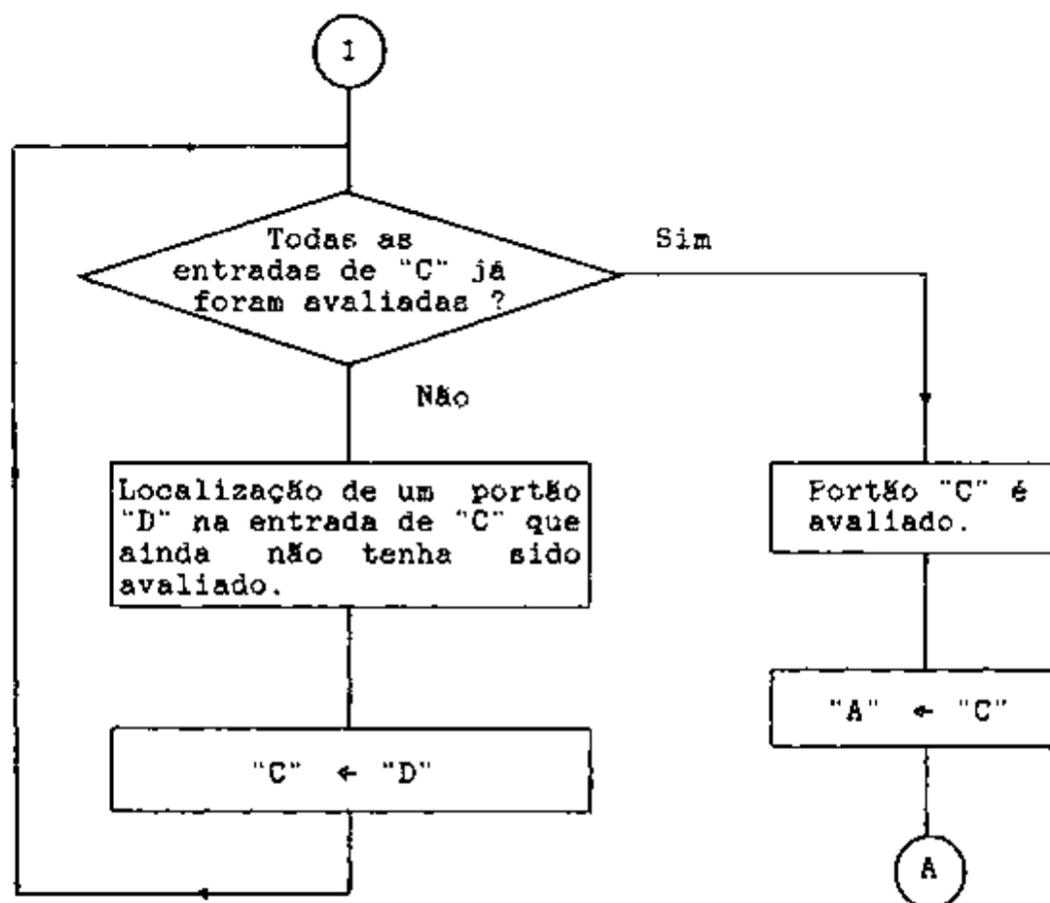


FIGURA B.1-1 Esquema do Algoritmo Usado pelo Programa WAMCUT (Continuação)

MOCUS-M são processadas em sentido inverso (algoritmo do tipo "top down"), conforme apresentado na FIGURA 4.3.2-1 do capítulo 4.

As diferenças entre os algoritmos dos dois programas permitem que sejam feitas as seguintes comparações:

- a) Cortes mínimos de eventos intermediários podem ser obtidos diretamente, pelo programa WAMCUT, enquanto que, o algoritmo do módulo MOCUS-M tem que ser reiniciado tantas vezes quantos forem os eventos intermediários a serem analisados.
- b) Caso se deseje, ramos da árvore podem ser facilmente ignorados pelo módulo MOCUS-M. Já o programa WAMCUT só poderá efetuar esta eliminação após a determinação dos cortes mínimos de cada evento intermediário deste ramo.

Os programas diferem, também, na maneira com que os cortes mínimos são armazenados. No programa WAMCUT o número de palavras ("NP"), em precisão simples, necessárias para o armazenamento dos cortes mínimos é dado pela expressão:

$$NP = NC \left(1 + \text{INT} \frac{n}{32} \right) \quad (\text{B.1-1})$$

onde, "NC" é o número de cortes mínimos, "INT" extrai o valor inteiro do termo que o sucede e "n" é o número de

eventos primários da árvore de falhas. Cada "bit" das "NP" palavras corresponde a um evento primário. Um "bit" com valor 1 indica que o evento primário associado faz parte de um corte e os de valor zero não.

No módulo MOCUS-M, cada componente de um corte ocupa a área de uma palavra.

As principais desvantagens computacionais da versão do programa WAMCUT analisado, em relação ao módulo MOCUS-M, estão relacionadas com a área de memória necessária, fixada em 1320 Kbytes, e com o dimensionamento interno que limita o programa a determinar no máximo 2000 cortes mínimos. O uso excessivo de memória pelo programa WAMCUT pode ser creditado a:

- a) problemas na adaptação do programa fonte para computadores IBM, uma vez que foi originalmente escrito para computadores CDC;
- b) número de avaliações já que o programa também reserva áreas de memória para efetuar estimativas aproximadas dos momentos de primeira e segunda ordem da indisponibilidade do sistema.

B.2 Comparação entre os Tempos de Processamento

B.2.1 Análise dos Tempos

Embora a análise efetuada por Rosenthal [101] tenha indicado que os algoritmos do tipo "botton up"

geralmente são mais velozes do que os do tipo "top down", existem fatores ligados à implementação computacional que podem alterar esta tendência. Em vista disto, duas séries de 5 modelos (árvores de falhas), série P e série S, foram avaliadas pelos dois programas com a finalidade de comparar os seus tempos de processamento. As principais características destes modelos são apresentadas nas TABELAS B.2.1-1 e B.2.1-2, respectivamente.

Numa primeira fase procurou-se comparar os tempos de processamento na determinação de todos os cortes mínimos de cada modelo. Nos modelos da série P, cujos tempos de processamento são apresentados na TABELA B.2.1-3, nota-se uma nítida vantagem do módulo MOCUS-M sobre o programa WAMCUT. Observa-se nestes casos que o tempo de processamento requerido pelo módulo MOCUS-M cresce linearmente com o tamanho da árvore (número de portões e eventos) enquanto que para o programa WAMCUT este tempo cresce exponencialmente.

Para os modelos da série S, o aumento exponencial do número de cortes mínimos e o crescimento de sua ordem máxima, de um modelo para outro, fizeram com que o tempo de processamento requerido pelo módulo MOCUS-M tivesse um comportamento semelhante ao do programa WAMCUT, também aumentando exponencialmente. Nestes casos, o aumento foi tão acentuado que 60 minutos de processamento do módulo MOCUS-M foram insuficientes para a obtenção dos

TABELA B.2.1-1 Características dos Modelos da Série P

CASO	NP	NE	NÚMERO DE CORTES MÍNIMOS					TOTAL GERAL
			ordem 1	ordem 2	ordem 3	ordem 4	ordem 5	
P1	20	41	2	87	16	0	0	105
P2	39	81	2	174	32	0	0	208
P3	58	120	3	261	48	0	0	312
P4	77	159	4	348	64	0	0	416
P5	96	158	5	435	80	0	0	520

Notas: "NP" é o número de partes lógicas e "NE" é o número de eventos primários dos modelos.

TABELA B.2.1-2 Características dos Modelos da Série S

CASO	NP	NE	NÚMERO DE CORTES MÍNIMOS					TOTAL GERAL
			ordem 1	ordem 2	ordem 3	ordem 4	ordem 5	
S1	20	41	2	87	16	0	0	105
S2	39	80	2	87	277	48	0	414
S3	58	119	2	87	277	831	144	1341
S4	77	158	2	87	277	831	2493	>4122
S5	96	197	2	87	277	831	4122	>4122

Notas: "NP" é o número de partes lógicas e "NE" é o número de eventos primários dos modelos.

TABELA B.2.1-3 Tempos para Obtenção de Todos os Cortes Mínimos dos Modelos da Série P

PROGRAMA	TEMPOS DE PROCESSAMENTO (s)				
	P1	P2	P3	P4	P5
WAMCUT	2,0	4,3	7,5	14,8	19,1
MOCUS-M	1,5	2,8	4,8	7,4	10,6

TABELA B.2.1-4 Tempos para Obtenção de Todos os Cortes Mínimos dos Modelos da Série S

PROGRAMA	TEMPOS DE PROCESSAMENTO (s)				
	S1	S2	S3	S4	S5
WAMCUT	2,0	6,6	63,0	-	-
MOCUS-M	1,5	10,1	48,0	720,0	>3600

cortes mínimos do modelo S5. Os tempos de processamento requeridos pelo programa WAMCUT limitaram-se aos modelos S1, S2 e S3, já que os modelos S4 e S5 possuem mais de 2000 cortes mínimos, limite máximo dimensionado para o programa. A TABELA B.2.1-4 apresenta os tempos de processamento obtidos para os modelos da série S.

Na segunda fase da análise, a mesma comparação foi feita introduzindo-se uma limitação na ordem dos cortes mínimos. Foram determinados os tempos de processamento para obter todos os cortes mínimos de ordem menor ou igual a j ($j = 1, 2, \dots, 5$) para cada um dos modelos da série S. Nestes casos o módulo MOCUS-M apresentou-se mais veloz que o programa WAMCUT apenas na determinação dos cortes mínimos de ordem 1 (vide TABELAS B.2.1-5 e B.2.1-6), indicando a forte dependência do programa MOCUS-M com a ordem máxima dos cortes mínimos da árvore.

B.2.2 Condições Usadas na Comparação

As análises comparativas dos tempos de processamento foram feitas sob as seguintes condições:

- a) Os tempos de obtidos referem-se apenas ao de execução dos programas em um computador IBM-4341, não incluindo os tempos de "compilação" e "linkedição".
- b) Não foi considerado que o programa WAMCUT tem condições de eliminar os cortes cujo produto da

TABELA B.2.1-5 Tempos de Processamento Requeridos pelo Módulo MOCUS-M

MAXIMA ORDEM CALCULADA	TEMPOS DE PROCESSAMENTO (s)				
	S1	S2	S3	S4	S5
1	1,3	1,8	3,0	3,7	4,4
2	2,2	5,4	7,9	8,5	9,4
3	2,2	10,7	49,4	67,5	68,4
4	-	40,7	77,0	437,0	648,7
5	-	-	77,2	711,0	>1273,0

TABELA B.2.1-6 Tempos de Processamento Requeridos pelo Programa WAMCUT

MAXIMA ORDEM CALCULADA	TEMPOS DE PROCESSAMENTO (s)				
	S1	S2	S3	S4	S5
1	1,6	2,6	3,8	5,1	6,8
2	2,0	3,6	5,4	8,0	11,6
3	2,0	5,9	14,7	28,4	43,4
4	-	6,6	51,2	109,0	224,0
5	-	-	63,0	250,0	594,0

indisponibilidade provocada por seus componentes for menor que um valor pré-estabelecido pelo usuário. Esta decisão foi tomada principalmente pela dificuldade de se estabelecer critérios para a comparação com o programa MOCUS-M.

B.3 Condições mais Adequadas de Uso do Módulo MOCUS-M

O programa MOCUS-M deve ser utilizado preferencialmente na avaliação de árvores de falhas que contenham cortes mínimos com ordem inferior a 5, já que, em geral, nestas condições o módulo MOCUS-M apresenta-se mais veloz que o programa WAMCUT.

APÊNDICE C

C - ANÁLISE DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO DO SEGMENTO DE SIMULAÇÃO DO MÓDULO STREUSL-M

C.1 INTRODUÇÃO

O tempo de processamento do Segmento de Simulação (TS) do módulo STREUSL-M prepondera sobre o dos demais segmentos. Para compreender melhor este fato, o Segmento de Simulação foi dividido em diversas etapas cujos tempos de processamento foram comparados com o tempo total de processamento do segmento.

Com base nos valores apresentados na TABELA C.1-1, para os 12 casos exemplo descritos na seção 7.4 do capítulo 7, foi possível, através de ajuste linear, obter expressões que permitem que se estime, "a priori", o tempo de processamento, em segundos, de diversas etapas do Segmento de Simulação. Vale dizer, entretanto, que o número limitado de exemplos e a simplicidade do ajuste não permitem que estas expressões forneçam valores precisos. Além disso, são obtidos a partir de um determinado tipo de computador, especificamente IBM-4341. Servem, entretanto, como uma boa indicação dos fatores que mais contribuem para o consumo de tempo de processamento do módulo STREUSL-M.

A expressão (C.1-1) permite uma avaliação do

TABELA C.1-1 Tempos de Processamento do Segmento do Segmento de Simulação

CASO	Tempos do Segmento de Simulação (s)							TOTAL
	TG1	TG2	T1	T2	T3	T4	Ta	
1	0,000	0,064	0,119	0,02	0,03	0,02	--	0,26
2	0,724	2,427	2,822	0,97	15,12	15,87	--	37,93
3	1,355	4,797	3,380	3,80	10,72	7,99	--	32,04
4	1,705	4,900	17,222	22,08	58,80	44,00	--	142,86
5	1,945	4,855	2,890	4,46	12,12	21,34	--	47,30
6	1,853	5,317	0,339	0,07	1,69	1,87	--	11,04
7	2,501	7,139	1,345	0,49	9,59	0,44	--	21,50
8	5,180	14,380	2,807	1,00	19,30	0,89	--	43,34
9	2,760	7,230	1,191	0,50	9,71	0,50	--	21,86
10	2,495	7,114	1,330	0,49	9,13	5,45	--	26,01
11	6,460	6,270	9,912	12,44	39,05	545,9	--	614,00
12	8,110	26,251	--	--	--	--	1,85	37,21

Nomenclatura:

Tempo Consumido na Geração de Taxas de Ocorrência de Eventos Primários:

"TG1" é o tempo consumido na preparação de dados para a geração de números pseudo-aleatórios. "TG2" é o tempo de geração das taxas de ocorrência dos eventos primários.

Tempos Consumidos pela Sub-Rotina TIMENA

"T1" é o tempo consumido na preparação de dados na sub-rotina TIMENA. "T2" é o tempo consumido na determinação das taxas a serem consideradas nas estimativas pontuais de indisponibilidade média dos eventos. "T3" é o tempo consumido na estimativa de indisponibilidade média dos eventos primários e, finalmente, "T4" é o tempo consumido na estimativa de indisponibilidade média dos cortes mínimos e do sistema.

"Ta" é o tempo consumido pela sub-rotina MEADNA

tempo consumido no Segmento de Simulação (TS) em função do número de elementos de amostras simuladas (NJ) e das principais etapas que a compõem (Tg, Tp, Tm e Tt).

$$TS = NJ \{Tg + Tp + m [Tt + (m - 1) Tm]\} \quad (C.1-1)$$

onde :

$m =$ 1, quando existir pelo menos um evento testado;
0, caso contrário.

Tp tempo usado na preparação de dados para a simulação da taxa ou probabilidade de falhas;

Tg tempo usado na geração de números pseudo-aleatórios;

Tt tempo usado pela sub-rotina TIMUNA;

Tm tempo usado pelo pela sub-rotina MEAUNA.

A TABELA C.1-2 mostra a participação percentual das principais etapas do Segmento de Simulação (TS) para 8 casos-exemplo.

C.2 TEMPOS DE PROCESSAMENTO DAS PRINCIPAIS ETAPAS DO SEGMENTO DE SIMULAÇÃO

C.2.1 Tempo Consumido na Geração de Números Pseudo-Aleatórios (Tg)

Este tempo depende do número de eventos não-acoplados (NA), do número de grupos de eventos acoplados (GA) e do tipo de distribuição de probabilidade associada

TABELA C.1-2 Participação Percentual das Etapas do Segmento de Simulação em Relação ao seu Tempo Total de Processamento

CASO	GER. DE NUM. ALEATORIOS			SUB-ROTINA TIMUNA					TOTAL DA SIMUL. %
	TG1 %	TG2%	TOTAL %	T1 %	T2 %	T3 %	T4 %	TOTAL %	
2	1,9	6,3	8,3	6,9	2,6	40,1	42,1	91,7	100
3	4,2	15,0	19,2	10,5	11,9	33,4	24,9	80,8	100
4	1,1	3,3	4,4	11,6	14,6	39,6	23,6	95,6	100
5	4,1	10,2	14,3	6,2	9,3	25,4	44,7	85,7	100
6	16,8	48,2	65,0	2,2	0,6	15,3	16,8	35,0	100
7	11,6	33,2	44,8	6,2	2,3	44,6	2,1	55,2	100
10	9,6	27,3	36,9	5,1	1,9	35,1	20,9	63,1	100
11	0,1	1,0	1,1	1,6	2,0	6,3	88,9	98,9	100

Nomenclatura:

Tempo Consumido na Geração das Taxas de Ocorrência de Eventos Primários:

"TG1" é o tempo consumido na preparação de dados para a geração de números pseudo-aleatórios, "TG2" é o tempo de geração das taxas de ocorrência dos eventos primários.

Tempo Consumidos pela Sub-Rotina TIMUNA:

"T1" é o tempo consumido na preparação de dados na sub-rotina TIMUNA. "T2" é o tempo consumido na determinação dos tempos a serem considerados nas estimativas pontuais de indisponibilidade média dos eventos. "T3" é o tempo consumido na estimativa da indisponibilidade média dos eventos primários e, finalmente, "T4" é o tempo consumido na estimativa da indisponibilidade média dos cortes mínimos do sistema.

à taxa de ocorrência ou probabilidade de ocorrência em demanda dos eventos primários. A expressão (C.2.1-1) permite a estimativa deste tempo para distribuições log-normais.

$$T_g = (NA + GA) 6,0 E-04 \quad (C.2.1-1)$$

O tempo usado nesta etapa será dominante em relação ao tempo total do segmento de simulação nos casos em que existirem poucos intervalos de integração ou quando não existir dependência temporal da indisponibilidade do sistema.

C.2.2 Tempo Consumido na Preparação de Dados (T_p)

Este tempo depende dos mesmos parâmetros do tempo de geração de números pseudo-aleatórios (T_g) e podem ser estimado pela expressão:

$$T_p = (NA + GA) 1,8 E-04 \quad (C.2.2-1)$$

C.2.3 Tempo Consumido pela Sub-rotina TIMUNA (T_t)

O tempo consumido pela sub-rotina TIMUNA (T_t) é diretamente proporcional ao número de intervalos de integração (NII) e ao número de pontos usados pelo método de quadratura gaussiana (NG). A expressão (C.2.3-1) avalia T_t , em função destes parâmetros, dos tempos usados pela função UNAV (T_s , T_e e T_i) e do tempo gasto pelas demais

etapas da sub-rotina (Tp).

$$T_t = N_G N_{II} (T_s + T_e + T_i + T_p) \quad (C.2.3-1)$$

Estimativa de Ts: Ts é o tempo utilizado no cálculo do período compreendido entre o instante considerado pelo método de quadratura e o último teste de eventos ocorridos até então.

A expressão (C.2.3-2) estima o tempo consumido por esta etapa, em função do número de eventos testados sequencialmente (NS).

$$T_s = 3,985 E-05 NS + 2,021 E-04 \quad (C.2.3-2)$$

Em geral, Ts consome o menor tempo de processamento, em relação aos demais tempos incluídos na expressão (C.2.3-1).

Estimativa de Te: Te é o tempo consumido na estimativa da indisponibilidade pontual dos componentes devido a ocorrência de eventos primários. Este tempo depende do número de eventos testados (NT), monitorados (NM) e dos eventos não-reparáveis que ocorrem em demanda (NP). A expressão (C.2.3-3) permite uma avaliação aproximada de Te.

$$T_e = 9,180 E-05 NT + 2,759 E-05 NM + \\ + 1,090 E-05 NP + 2,042 E-04 \quad (C.2.3-3)$$

O tempo consumido no cálculo da indisponibilidade de um evento testado é cerca de nove vezes maior que o requerido por um evento não-reparável que ocorre em demanda e três vezes superior ao requerido por um evento monitorado. A TABELA C.2.3-1 ilustra este fato apresentando a elevação percentual de T_e ao se substituir eventos que ocorrem em demanda por testados.

Estimativa de T_i : O tempo consumido no cálculo da indisponibilidade pontual do sistema (T_i) depende do valor da ordem (i) e do número de cortes mínimos de cada ordem (NC_i). A expressão (C.2.3-4) permite uma avaliação de T_i .

$$T_i = \sum_{i=1}^{imax} [(i \cdot NC_i) \cdot 2,03157 \text{ E-}05] + \quad (C.2.3-4) \\ + 2,02854 \text{ E-}04,$$

onde $imax$ representa a máxima ordem obtida por um corte mínimo.

Em geral, T_i será dominante em relação aos demais tempos consumido na TIMUNA todas as vezes que o número de cortes mínimos ultrapassar a, aproximadamente, 2/3 do número de eventos primários. Este valor, depende, entretanto, do tipo de detecção de falha de cada componente.

TABELA C.2.3-1 Aumento do Tempo Consumido na Etapa de Determinação da Indisponibilidade Pontual dos Eventos Primários (Te) ao se Substituir Eventos que Ocorrem em Demanda (NP) por Eventos Testados (NT)

NT	NP	Te	PERCENT. %
1	99	1,4 E-03	14,6
10	90	2,1 E-03	22,4
20	80	2,9 E-03	31,0
30	70	3,7 E-03	39,6
40	60	4,5 E-03	48,3
50	50	5,3 E-03	56,9
60	40	6,1 E-03	65,5
70	30	6,9 E-03	74,1
80	20	7,8 E-03	82,7
90	10	8,6 E-03	91,4
100	0	9,4 E-03	100,0

Estimativa de T_p : O tempo consumido nas demais etapas da sub-rotina TIMUNA (T_p) e é dado por :

$$T_p = \frac{5,5427 \text{ E-04}}{NI \cdot NG} + \frac{2,3377 \text{ E-05}}{NG} + 6,1235 \text{ E-04} \quad (\text{C.2.3-5})$$

C.2.4 Tempo Consumido pela Sub-rotina MEAUNA (T_m)

O tempo gasto pela MEAUNA depende do número (NC_i) e da ordem (i) dos cortes mínimos considerados na aplicação. A expressão (C.2.4-1) é usada para estimar T_m .

$$T_m = \sum_{i=1}^{imax} (i \cdot NC_i \cdot 2,3709 \text{ E-05}) + 2,9629 \text{ E-04} \quad (\text{C.2.4-1})$$

A simplicidade do modelo implementado na sub-rotina MEAUNA faz com que seu tempo de processamento seja sensivelmente inferior ao usado pela sub-rotina TIMUNA. As TABELAS C.2.4-1 e C.2.4-2 comparam os tempos usados por estas sub-rotinas.

TABELA C.2.4-1 Tabela Comparativa entre os Tempos Usados pelas Sub-Rotinas TIMUNA (Tt) e MEAUNA (Tm) ao se Variar o Número de Eventos Primários (NE)

NC . I	NE	Tm (s)	Tt (s)	Tt/Tm
40	40	1,24 E-03	3,16 E-03	2,54
	80	1,24 E-03	3,06 E-03	2,90
	120	1,24 E-03	4,04 E-03	3,26
80	40	2,19 E-03	3,94 E-03	1,82
	80	2,19 E-03	4,42 E-03	2,02
	120	2,19 E-03	4,85 E-03	2,21
120	40	3,14 E-03	4,79 E-03	1,52
	80	3,14 E-03	5,23 E-03	1,66
	120	3,14 E-03	5,67 E-03	1,37
160	40	4,09 E-03	5,61 E-03	1,37
	80	4,09 E-03	6,04 E-03	1,48
	120	4,09 E-03	6,48 E-03	1,58
200	40	5,04 E-03	6,42 E-03	1,27
	80	5,04 E-03	6,85 E-03	1,36
	120	5,04 E-03	7,29 E-03	1,45

Onde, "NC" é o número de cortes mínimos, "I" é a ordem dos cortes mínimos e "NE" é o número de eventos primários.

Comentários: Os tempos foram obtidos na execução de 1 jogo (simulação da indisponibilidade média do sistema) envolvendo o caso-exemplo com apenas um intervalo de integração. Os tempos consumidos pela sub-rotina MEAUNA referem-se a caso-exemplo contendo apenas eventos não-reparáveis que ocorrem em demanda. Para a sub-rotina TIMUNA os tempos consumidos referem-se a caso-exemplo contendo um evento testado e os demais não-reparáveis que ocorrem em demanda.

TABELA C.2.4-2 Tabela Comparativa entre os Tempos Usados pelas Sub-Rotinas TIMUNA (Tt) e MEAUNA (Tm) ao se Variar o Número de Intervalos de Integração (NII)

NC . I	NII	Tm (s)	Tt (s)	Tt/Tm
40	40	1,24 E-03	1,05 E-01	84,7
	80	1,24 E-03	2,08 E-01	168,5
	120	1,24 E-03	3,14 E-01	253,2
80	40	2,19 E-03	1,38 E-01	63,0
	80	2,19 E-03	2,75 E-01	125,6
	120	2,19 E-03	4,11 E-01	187,7
120	40	3,14 E-03	1,70 E-01	54,1
	80	3,14 E-03	3,39 E-01	107,9
	120	3,14 E-03	5,09 E-01	162,1
160	40	4,09 E-03	2,03 E-01	49,6
	80	4,09 E-03	4,05 E-01	99,0
	120	4,09 E-03	6,07 E-01	148,5
200	40	5,04 E-03	2,35 E-01	46,6
	80	5,04 E-03	4,70 E-01	93,2
	120	5,04 E-03	7,04 E-01	139,7

Onde, "NC" é o número de cortes mínimos, "I" é a ordem dos cortes mínimos e "NII" é o n.ºm. de interv. de integração.

Comentários: Os tempos foram obtidos na execução de 1 jogo (simulação da indisponibilidade média do sistema) envolvendo casos-exemplo com 40 eventos primários. Os tempos consumidos pela sub-rotina MEAUNA referem-se a casos-exemplo contendo apenas eventos não-reparáveis que ocorrem em demanda. Para a sub-rotina TIMUNA os tempos consumidos referem-se a casos-exemplo contendo um evento testado e 39 não-reparáveis que ocorrem em demanda.