

# RALLY-M: UM PROGRAMA PARA A ANALISE DE CONFIABILIDADE DE INSTALACOES NUCLEARES

por

A. S. VIEIRA NETO

RESUMO -- O programa computacional RALLY-M, elaborado para efetuar a análise de confiabilidade de instalações nucleares, é descrito. As principais avaliações realizadas pelo programa e um resumo descritivo da metodologia empregada na análise também são apresentados. Uma aplicação do programa RALLY-M, como ferramenta para a análise de confiabilidade, e efetuada para um sistema de segurança de um reator de pesquisa.

## INTRODUCAO

A partir da emissão do relatório WASH-1400, em 1975, a técnica de Análise de Árvores de Falhas vem se constituindo na principal ferramenta na análise de confiabilidade de instalações nucleares.

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

Embora existam inúmeros programas computacionais dedicados a análise de confiabilidade, 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 invalidem sua utilização. Além disso, em geral, são específicos para efetuar um determinado tipo de avaliação de confiabilidade e são elaborados para computadores de grande porte, o que, evidentemente, limita sua utilização a centros de pesquisa ou grandes empresas. A tendência atual é de se eliminar estes problemas com o uso de microcomputador e de se usar ao invés de programas isolados, sistemas computacionais que reúnem diversos programas computacionais, interligados entre si, e que efetuam múltiplas avaliações.

Dentro desta filosofia foi elaborado o sistema computacional de análise de confiabilidade denominado RALLY-M que possui grande flexibilidade, efetua um bom número de avaliações e tem boa documentação, além de ser elaborado para ser usado em microcomputadores.

A base para a elaboração do programa RALLY-M foi o sistema computacional de análise de confiabilidade RALLY e o programa MOCUS, especialmente elaborados para serem processados em computadores de grande porte.

## ESTRUTURACAO DO PROGRAMA RALLY-M

O programa RALLY-M é usado na análise de árvores de falha para avaliar características de confiabilidade de sistemas coerentes ou não.

O programa RALLY-M é formado por 5 módulos computacionais: TREBIL-M, MOCUSN, CRESSC-M, CRESSEX-M e STREUSL-M. O módulo TREBIL-M tem a função de gerenciar os dados de entrada do programa e organiza-los para serem usados pelos demais módulos. Os módulos CRESSC-M e MOCUSN determinam os cortes mínimos da árvore de falhas. Os módulos STREUSL-M e CRESSEX-M determinam medidas da confiabilidade do sistema. O módulo STREUSL-M é capaz ainda, de efetuar uma análise da propagação da incerteza dos dados de falha dos componentes, sobre a indisponibilidade média do sistema. O fluxo de informações entre os módulos do programa RALLY-M é mostrado na Figura 1.

## CARACTERISTICAS DO PROGRAMA

O programa RALLY-M é capaz de efetuar medidas de confiabilidade de sistemas de engenharia com as seguintes características:

a) Árvores de falhas que possuam 4 classes de eventos primários:

Não-Reparáveis: eventos que ocorrem no tempo segundo uma distribuição exponencial e que após terem ocorrido não podem ser eliminados durante o tempo de análise.

Testados: eventos reparáveis (eventos que podem ser eliminados após terem ocorrido), que ocorrem no tempo segundo uma distribuição exponencial, cuja constatação de sua ocorrência é feita através de testes periódicos.

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

Demandas: eventos primários que ocorrem na demanda, e que na hipótese de terem ocorrido não podem ser eliminados durante o tempo de análise do sistema ( $T_{max}$ ).

b) Árvore de falhas com portões lógicos do tipo "AND", "OR" ou "NOT", portões que representem lógicas de votação K de N (2 de 3, 2 de 4, 3 de 4 ou 3 de 6) e árvores com eventos de acionamento ("house events").

c) Grupos de eventos primários com mesmo período entre testes, mas que são testados sequencialmente. Para um grupo com "n" eventos, por exemplo, o i-ésimo evento do grupo será testado a cada:

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

onde IT é o instante de teste, TWART é o intervalo entre testes

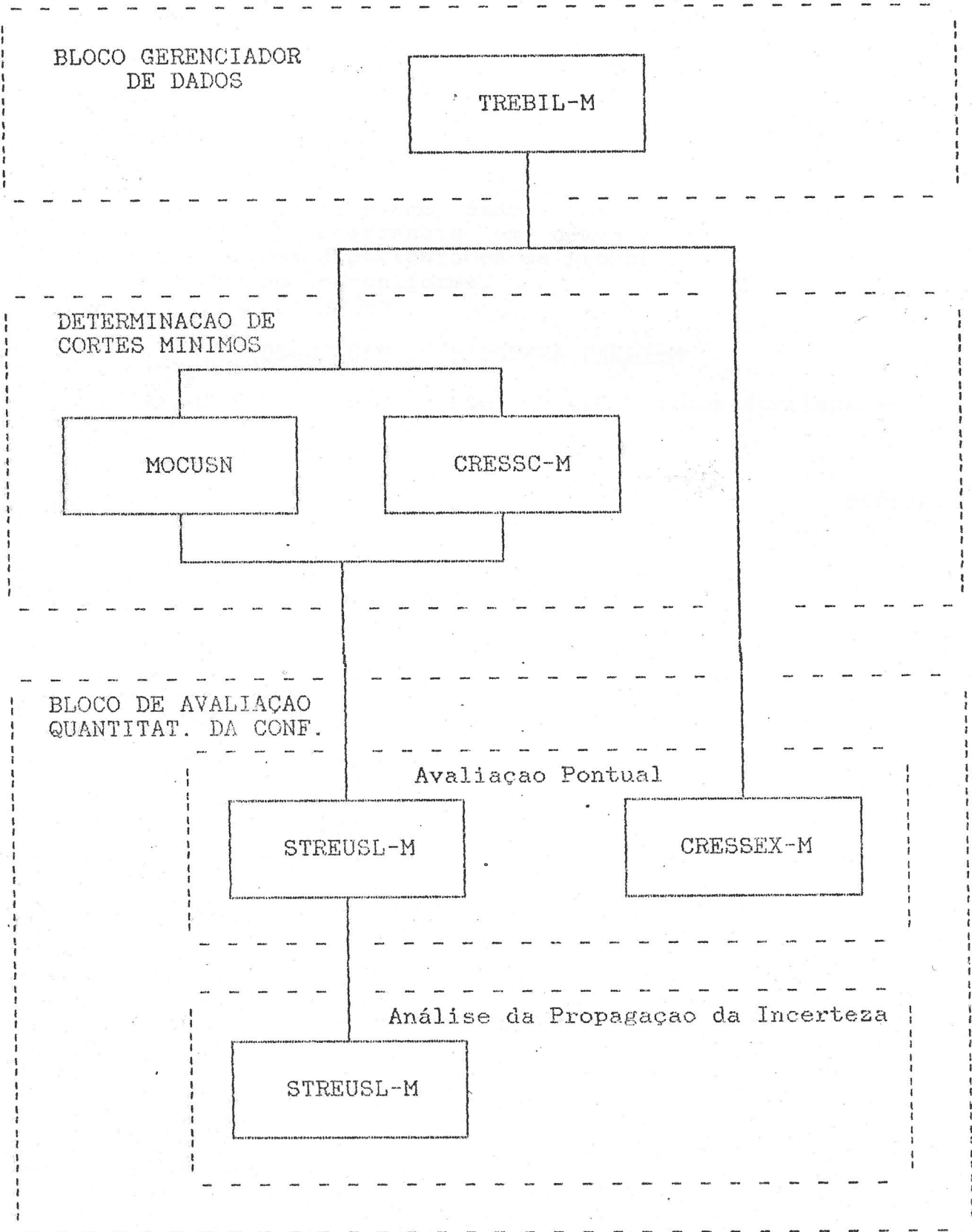


Figura 1 Fluxograma do Programa RALLY-M

dos eventos do grupo e "m" é o número do teste do i-ésimo evento.

Especificamente para a avaliação da propagação da incerteza o programa RALLY-M considera ainda:

a) Eventos acoplados, isto é, eventos com características similares (mesmo modo de falha, mesmo tipo de componente, mesmo regime de operação, etc).

b) Eventos primários com dados taxa de ocorrência ou a probabilidade de ocorrência em demanda representados pelos parâmetros das distribuições de probabilidade: normal, log-normal, uniforme ou log-uniforme.

### DESCRICAÇÃO DO PROGRAMA RALLY-M

O programa RALLY-M é composto por três blocos funcionais.

#### Bloco Gerenciador de Dados

O módulo TREBIL-M é o gerenciador de dados do programa RALLY-M, executando as seguintes operações:

- a) lê as informações de entrada do programa RALLY-M;
- b) prepara as informações lidas para serem introduzidas nos demais módulos;
- c) analisa a consistência dos dados tendo em vista a compatibilidade de memória;
- d) examina a existência de possíveis erros na lógica da árvore;
- e) constrói a expressão da função de estrutura da árvore de falhas.

#### Bloco de determinação de cortes mínimos

O programa RALLY-M possui dois módulos capazes de determinar na RALLY-M cortes mínimos. O módulo CRESSC-M que determina cortes mínimos através de um método simulatório e o módulo MOCUSN capaz de determinar, além dos cortes mínimos, os "prime implicants" da árvore de falhas.

Os cortes mínimos de uma árvore de falhas são todos os possíveis conjuntos formados pelo menor número de eventos primários cuja ocorrência simultânea implica na ocorrência do evento topo. Para estruturas não coerentes entanto, os cortes mínimos não são capazes de representar todas as circunstâncias que implicam na ocorrência do evento topo da árvore de falhas, sendo nestes casos necessária a determinação dos "prime implicants".

Método usado pelo CRESSC-M -- O procedimento utilizado pelo módulo CRESSC-M para a determinação de cortes da árvore de falhas pode ser resumido nas 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:

$$\frac{\text{RND}}{q} < \text{ALFA}, \quad (2)$$

onde "q" é a indisponibilidade média ou probabilidade de falha em demanda provocada pela ocorrência do evento primário e ALFA é um parametro cujo valor inicial é 1,0 e sofre sucessivos ajustes a cada 100 jogos, visando acelerar o processo de determinação de cortes.

3) Verificação da ocorrência do evento topo, a partir do estado dos componentes definidos na segunda etapa. Caso se verifique a ocorrência do evento topo, os eventos primários que satisfazem a expressão (2) compõem um corte e são armazenados para serem usados na quarta etapa. Caso contrário retorna-se a primeira etapa para uma nova tentativa de determinação de um corte.

4) Determinação de cortes mínimos a partir do corte obtido na terceira etapa.

O método de determinação de cortes mínimos, usado na quarta etapa, 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". 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.

Metodo usado pelo modulo MOCUSN -- A determinação de "prime implicants" 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"). O desenvolvimento deste algoritmo envolve uma série de procedimentos sobre portões lógicos do tipo "AND", "OR", "NOT", "NAND" e "NOR" da árvore de falhas em uma matriz indicadora de "prime implicants" (matriz ICS). Os procedimentos sobre 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 de eventos primários.

O algoritmo "top down" é iniciado ao se estabelecer que ICS(1,1) representa o portão "P" localizado imediatamente abaixo o evento que se deseja avaliar. A seguir, um dos algoritmos definidos na Tabela 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 até

Tabela 1 Algoritmos Aplicados aos Portões Lógicos

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

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.

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 "prime implicants" da árvore de falhas. Este processo é intercalado por procedimentos de redução da matriz ICS, baseados nas leis de Boole e de De Morgan. A determinação dos caminhos mínimos, caso sejam desejados, é feita da mesma maneira, sobre a representação dual da árvore de falhas.

#### Bloco de análise pontual da confiabilidade

O programa RALLY-M efetua medidas de confiabilidade pelos módulos CRESSEX-M e STREUSL-M.

Metodo usado pelo modulo CRESSEX-M -- O método de análise empregado pelo módulo CRESSEX-M baseia-se na execução de um determinado número de jogos, que simulam o estado ("presente" ou "ausente") dos eventos primários da árvore de falhas ao longo de um intervalo de tempo pré-estabelecido (tempo desejado para a análise do sistema). Na simulação do estado 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).

Durante cada jogo a influência das mudanças de estado (ocorrência ou não-ocorrência) dos eventos primários sobre o estado do evento topo é verificada sendo desta forma possível determinar em cada jogo, os instantes de ocorrência do evento topo e os períodos de indisponibilidade do sistema.

Apos o encerramento do ultimo jogo os dados de falha do sistema, obtidos durante a simulação, são usados para a determinação da não-confiabilidade  $F(T_{max})$ , indisponibilidade média  $Q(T_{max})$  e frequência de falhas do sistema  $Fr(T_{max})$ .

$$F(T_{max}) = \frac{\text{Numero de jogos de falha do sistema no intervalo } (0, T_{max})}{\text{Numero total de jogos}} \quad (3)$$

$$Q(T_{max}) = \frac{\text{Soma dos períodos em que o sistema se encontrou indisponível no intervalo } (0, T_{max})}{\text{Tempo de observação * número total de jogos}} \quad (4)$$

$$Fr(T_{max}) = \frac{\text{Número de falhas do sistema no intervalo } (0, T_{max})}{\text{Número total de jogos}} \quad (5)$$

Metodologia utilizada pelo modulo STREUSL-M -- A metodologia utilizada pelo módulo STREUSL-M no cálculo da indisponibilidade média provocada pelo evento analisado é baseada no método de cortes mínimos.

A indisponibilidade média do sistema  $Q(T_{max})$  é calculada

por:

$$Q_s(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^n Q_{c_i}(t) dt \quad (6)$$

$$Q_{c_i}(t) = \prod_{j \in c_i} Q_j(t) \quad (7)$$

onde  $Q_s(t)$ ,  $Q_{c_i}(t)$  e  $Q_j(t)$  representaam , respectivamente a indisponibilidade do sistema ,do cortes minimo  $C_i$  e do componente  $j$  no instante  $t$ .

#### Bloco de analise da propagacao da incerteza

O módulo STREUSL-M faz uma analise da influencia da propagação das incertezas associadas as taxas de ocorrência e probabilidade de ocorrência em demanda dos eventos primários sobre a indisponibilidade media do sistema.

Metodo usado pelo STREUSL-M -- A analise e efetuada atraves de repetidas determinações da indisponibilidade media do sistema a partir de valores simulados para os dados de falha dos componentes.

#### RESUMO DAS AVALIACOES EFETUADAS PELO PROGRAMA RALLY-M

A Tabela 2 a presenta as principais características dos modulos do programa RALLY-M. As avaliações efetuadas pelo programa RALLY-M com a indicação dos módulos que as efetuam são apresentadas a seguir:

##### Avaliações Qualitativas

- "prime implicants" (MOCUSN);
- cortes mínimos (MOCUSN, CRESSC-M, CRESSEX-M);
- caminhos mínimos (MOCUSN).

##### Avaliações Quantitativas a Nível 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);
- 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

Tabela 2 Características Principais do Programa RALLY-M

CARACTERÍSTICA	MOJUN	CRESSC-M	CRESSX-M	STREUSL-M
PRINCIPAIS AVALIAÇÕES QUALITATIVAS	- "Prime applicants"; - Cortes mínimos.	- Cortes mínimos	- Cortes mínimos.	---
PRINCIPAIS AVALIAÇÕES QUANTITATIVAS	---	- Produto da indisponibilidade média dos componentes dos cortes mínimos.	- Não-confiabilidade do sistema no instante final de observação (Teax) - Indisponibilidade média; - Medidas de importância dos eventos primários; - Frequência de falhas do sistema analisado.	- Indisponibilidade pontual; - Indisponibilidade média; - Distribuição da incerteza da indisponibilidade média; - Valor máximo da indisponibilidade e instante em que ela ocorre.
EVENTOS CUJA AVALIAÇÃO PODE SER EFETUADA	- Evento topo e 100 eventos intermediários.	- Evento topo.	- Evento topo (cortes mínimos); - Evento topo e 50 eventos intermediários (confiabilidade e indisponibilidade).	- Evento topo e 100 eventos intermediários.

média do sistema;

- valores da distribuição de probabilidade obtida nos percentis 5, 10, 15, ... , 95%;
- gráficos da função de distribuição de probabilidade e função de densidade da distribuição da indisponibilidade média e das obtidas por aproximações pela normal e log-normal;
- teste de Kolmogorov análise da aderência.

#### Avaliações de Confiabilidade a Nível 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).

#### EXEMPLO DE APLICACAO

Como exemplo de aplicação do programa RALLY-M apresentamos um resumo da análise de confiabilidade efetuada para o Sistema de Esvaziamento Rápido do Tanque Moderador (SERTM) da Unidade Crítica do IPEN-CNEN/SP.

#### Descrição do sistema

O Sistema de Esvaziamento Rápido do Tanque Moderador (SERTM) é constituído por dois tanques cilíndricos, denominados Tanque do Moderador e Tanque de Estocagem, sendo que o Tanque do Moderador está posicionado em uma cota superior e contém o Conjunto Crítico. Estes tanques estão interligados entre si por duas vias de drenagem, cada qual composta por um tubo de drenagem e por uma válvula borboleta operada a ar comprimido e acionada por uma válvula solenoide. A Figura 2 mostra um corte da Celula Crítica contendo o SERTM.

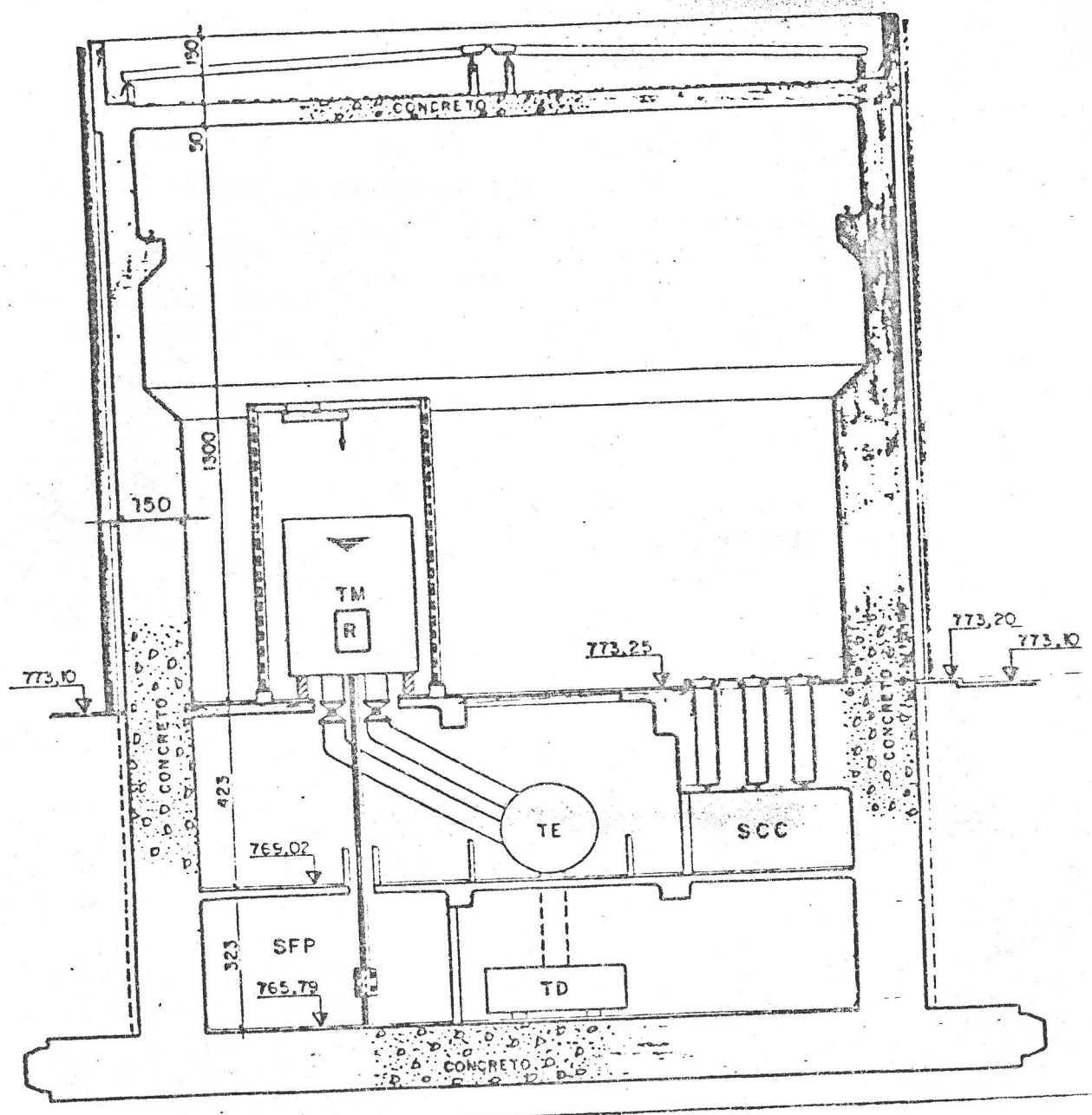
#### Descrição da árvore de falhas

A árvore de falhas para o SERTM é apresentada na Figura 3. O evento topo da árvore de falhas foi definido como sendo: Falha do SERTM para desligar o conjunto crítico após ter recebido tal ordem do Sistema de Proteção. Cada evento primário é identificado por um código de 8 caracteres que representam as seguintes informações:

*	**	****	*
sistema	tipo do componente	identificação do componente	modo de falha

Os mneumonicos utilizados para representar o sistema, tipos de sistemas componentes e modos de falha, encontram-se na Tabela 3.

Figura 2 ~~2~~ Célula Crítica



CORTE TÍPICO

LEGENDA.

- TM - TANQUE DO MODERADOR
- SFP - SALA FONTE DE PARTIDA
- TD - TANQUE DE DECAIMENTO
- TE - TANQUE DE ESTOCAGEM

- SCC - SALA DE COVAS PARA COMBUSTÍVEIS
- R - REATOR

Tabela 3 Codificação dos Eventos Primários

Itens	Codigo
Sistema	
Esvaziamento Rapido do Tanque Moderador	D
<u>Tipos de Componentes</u>	
Tanque	TQ
Tubo	TU
Valvula Acion. a Ar Comprimido	VP
<u>Modos de Falha</u>	
Falha para Abrir	O
Obstrução	L

### Considerações sobre a análise

Base de dados Utilizada -- A base de dados existente no apêndice III do relatório WASH-1400 foi utilizada como referência na quantificação dos eventos primários da árvore de falhas.

Dados de entrada do programa RALLY-M -- As principais informações sobre os dados de falha dos componentes do SERTM e de política de manutenção são apresentadas na Tabela 4.

Hipóteses Consideradas -- Para efeitos de análise foram estabelecidos os seguintes pressupostos funcionais:

- a Unidade Crítica operara em média 8 horas por dia de segunda a sexta-feira.
- Operações de manutenção tais como, de inspeções, testes, reparos, calibrações, etc, são realizadas com o Conjunto Crítico desligado.

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

- Os componentes do SERTM não sofrem degradação durante os períodos de inatividade do Conjunto Crítico;
- Independência entre os eventos primários da árvore de falhas.

Tempo de observação -- Fixou-se para a análise um período de 1920 horas de operação do SERTM, não incluindo os períodos em que o Conjunto Crítico encontra-se desligado, o que corresponde a aproximadamente 1 ano de vida da instalação.

### Análise de Confiabilidade

Determinação dos cortes mínimos-- Os cortes mínimos da árvore de falhas encontram-se na tabela 5.

Avaliação pontual da confiabilidade -- A avaliação pontual da confiabilidade do SERTM é efetuada pelos módulos CRESSEX-M e STREUSL-M. As principais avaliações efetuadas pelo módulo CRESSEX-M a partir das 478000 simulações do comportamento do sistema encontram-se na Tabela 6. As avaliações pontuais baseadas nos cortes mínimos, efetuada pelo módulo STREUSL-M, encontram-se na Tabela 7.

Vale ressaltar que a despeito do uso de metodologias diferentes os módulos CRESSEX-M e STREUSL-M forneceram valores muito próximos para a indisponibilidade média do sistema ( $8,37 \text{ E-}04$  para o CRESSEX-M e  $7,60 \text{ E-}04$  para o STREUSL-M).

Avaliação da influência da propagação da incerteza A incerteza associada aos dados de ocorrência dos eventos primários é analisada pelo módulo STREUSL-M através de 500 simulações da indisponibilidade média do SERTM. A média da distribuição obtida é  $7,43 \text{ E-}04$  com mediana igual a  $1,27 \text{ E-}03$ . Os valores obtidos na simulação em alguns percentis são apresentados na tabela 8.

Tabela 4 Dados dos Eventos Primarios

Eventos	Dados de Ocorrência		Detecção		
	Taxa (1)	Probab. (2)	Tipo	Reparabil.	IET (3)
DTU0001D	8,48 E-09	—	Testada	Reparavel	1920
DTU0204D	8,48 E-10	—	Testada	Reparavel	1920
DTU0205D	8,48 E-10	—	Testada	Reparavel	1920
DVPH204L	—	3,75 E-04	Em demanda	Nao-reparav.	—
DVPH205L	—	3,75 E-04	Em demanda	Nao-reparav.	—
DTQ0001L	—	—	Testada	Reparavel	1920

## Notas:

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

(3) IET significa intervalo entre testes.

Tabela 5 Cortes Mínimos do SERTM

Número	Corte Mínimo	Indispon. Média
1	DVPH204L	3,75 E-04
2	DVPH205L	3,75 E-04
3	DTU00010	8,14 E-06
4	DTU02040	8,14 E-06
5	DTU02050	8,14 E-07

Tabela 6 Medidas de desempenho do SERTM Obtidas Atraves do Metodo de Simulação

Tipo de Avaliação	Valor Obtido	Desvio Padrao	Coefic. de Var.
Indisp. Media	8,37 E-04	4,17 E-05	5,0 %
Nao-confiabil.	8,41 E-04	4,19 E-05	5,0 %
Freq. de Falhas	8,41 E-04	—	—
Tempo Medio entre Falhas	2,28 E+06	—	—

Tabela 7 Estimativa da Indisponibilidade Media Obtida Analiticamente

Tipo de Avaliação	Param. Utilizado (1)	Resultado
Indisponibilidade Media	Percentil 5%	2,00 E-04
	Media	7,60 E-04
	Percentil 95%	1,83 E-03
Indispon. Pontual Maxima	Media	4,69 E-04

Nota: (1) refere-se ao parametro da distribuicao de incerteza da taxa de ocorrencia e probabilidade de ocorrencia em demanda dos eventos primarios utilizado na avaliacao da indisponibilidade media do sistema. A adoção dos percentis 5% e 95% resultam em estimativas otimistas e pessimistas da indisponibilidade media do sistema.

Tabela 8 Estimativas dos Percentis da Distribuição da Indisponib.  
Media do SERTM

Percentil (%)	Indisponibilidade Media
5	2,89 E-04
10	1,72 E-04
15	8,14 E-04
20	1,29 E-03
25	1,50 E-04
30	5,44 E-04
35	3,14 E-04
40	5,56 E-04
45	2,03 E-03
50	1,27 E-03
55	1,21 E-03
60	4,47 E-04
65	2,48 E-04
70	5,89 E-04
75	5,50 E-04
80	1,84 E-04
85	9,11 E-04
90	5,04 E-04
95	2,13 E-03

## CONCLUSOES

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. A documentação da metodologia de cálculo usada pelo programa RALLY-M, e o manual de utilização do programa, 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.

## REFERENCIAS

- DAUGHERTY, R. SCHLOSSER, L.  
 CRESSEX - beschreibung eines  
 zuverlassigkeitsrechenprogrammes zur ermittlung  
 wichtiger kenngrößen von komplexen systemen.  
 Laboratorium für reaktorregelung und  
 Anlagensicherung Garching, Sep. 1976.  
 (MRR-P-23).
- 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).
- GESELLSCHAFT FÜR REAKTORSICHERHEIT. Deutsche  
 risikostudie kernkraftwerke. Verlag Tüv,   
 Rheinland, Federal Republic of Germany, 1978.
- 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).
- HAASL, D. F. et alli. Fault tree handbook. Nuclear  
 Regulatory Commission. Washington, D.C. Office of  
 Nuclear Regulatory Commission. Jan. 1981.  
 (NUREG-0492).
- HENLEY, E. J. KUMAMOTO, H. Reliability Engineering  
 and Risk Assessment. Prentice-Hall. Inc.,  
 Englewood Cliffs, N. J., 1981.
- 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).
- SCHLOSSER, L. Theoretische grundlagen zum

rechenprogramm STREUSL zur ermittlung der streuung in zuverlassigkeitskenngrossen. Gesellschaft fur Reaktorsicherheit (GRS) mbh, Jun. 1979. (GRS-1-313).

SCHLOSSER, L. STREUSL - ein rechenprogramm zur ermittlung der struung in zuverlassigkeitskenngrossen aufgrund der streuungen der eingabedaten. Gesellschaft fur Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Dec. 1978. (GRS-A-183).

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).

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.

VIEIRA Neto, A. S. Analise da frequencia de falhas no desligamento do conjunto critico da Unidade critica. Departamento de tecnologia de reatores, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP). São Paulo -SP. 1985. Relatório interno: R-211070016.

VIEIRA Neto, A. S. Análise e modificações do programa RALLY, usado na analise de confiabilidade de sistemas. Dissertação de mestrado a ser defendida em 1988, Instituto de Pesquisas energeticas e Nucleares, Sao Paulo.

VIEIRA Neto, A. S. BORGES, W. S. Reliability design of a critical facility: an application of PRA methods. International Topical Conference on Probabilistic Safety Assessment Risk Management, Swiss Federal Technology (ETH), Zurich. Sep. 1987.