

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO DESLIGAMENTO RÁPIDO ("SCRAM") DO REATOR IEA-R1 MODIFICADO PARA OPERAÇÃO A 5 MW

Patrícia Pagetti de Oliveira* e Francisco Corrêa**

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. IPEN/CNEN-SP
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
05422-970. São Paulo, Brasil

**Professor Associado ao IPEN/CNEN-SP pelo CNPq

RESUMO

Neste trabalho são ressaltados alguns resultados da análise de confiabilidade da função de desligamento rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1 modificado para operação a 5 MW. Utilizou-se a metodologia de Árvore de Falhas, sendo que os dados de falha de componentes, adotados como entrada para este modelo, foram obtidos de bases de dados genéricos. Através da quantificação do modelo de confiabilidade proposto e considerando duas condições acidentais distintas que podem exigir o desligamento rápido do Reator, são apresentadas e comentadas as estimativas da não-confiabilidade para um ciclo de 120 horas de operação, o que equivale à probabilidade de falha em demanda da função de "SCRAM" do Reator.

I. INTRODUÇÃO

Neste trabalho são apresentados resultados parciais e preliminares da Análise de Confiabilidade da Função de Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1m, a qual pode ser considerada uma das funções vitais para a segurança do reator, pois sua atuação se faz necessária sempre que hajam indícios de instabilidade na potência gerada ou outras situações anormais ou de falha, com perigo de vazamento de produtos de fissão para o ambiente externo. A análise descrita neste trabalho é importante como suporte à Análise de Segurança do Reator IEA-R1m, contida no Relatório de Análise de Segurança [1] requerido pela CNEN para obtenção da licença para operação a 5 MW.

Na etapa principal da análise de confiabilidade do desligamento rápido do Reator IEA-R1m, foi desenvolvido o modelo de Árvore de Falhas considerando duas condições acidentais com o potencial de causar a demanda desta função de proteção. A primeira condição corresponde à ocorrência de um evento capaz de inserir no núcleo do reator uma reatividade maior do que 763 pcm e a segunda condição avaliada é a ocorrência de um evento de perda de refrigerante primário (LOCA). Na quantificação da Árvore de Falhas, foram adotados como parâmetros de entrada, dados de confiabilidade de componentes obtidos em bases de dados genéricos como as compiladas na referência [2].

Finalmente, através da quantificação do modelo proposto, são apresentadas e comentadas as estimativas da não-confiabilidade do desligamento rápido do Reator IEA-R1m.

II. DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS RESPONSÁVEIS PELO "SCRAM" DO REATOR IEA-R1m

A função de desligamento do Reator IEA-R1m consiste em levar o reator à subcriticalidade, com uma reatividade negativa de pelo menos 1\$ (~ 763 pcm). Mais especificamente, o "SCRAM" do reator consiste no desligamento rápido do reator, realizado através da inserção das barras de controle e segurança no núcleo. Sabe-se que, para a operação a 5 MW, o reator é desligado se pelo menos 3 (três) das 4 (quatro) barras absorvedoras forem inseridas no interior do núcleo. O desligamento rápido do Reator IEA-R1m requer o funcionamento dos sistemas descritos a seguir (Figura 1).

Sistema de Proteção do Reator (SPR). O SPR tem a função de acionar o sistema que introduz reatividade negativa no núcleo, quando alguma condição de segurança for violada. O SPR engloba parte do Subsistema de Instrumentação Nuclear (SsIN), o qual mede e transmite um sinal indicando uma condição anormal de período ou potência, e o Circuito de Desligamento do Reator (CDR), o qual reúne as informações do SsIN e de outras condições de segurança e aciona o Sistema de Controle de Reatividade (SCR), encarregado da inserção de reatividade negativa no núcleo do reator.

Fazem parte do SPR todos os instrumentos que monitoram parâmetros relacionados com a segurança da instalação, e que permitem identificar situações em que deve ser providenciado o desligamento do reator. Dentre estes instrumentos, estão considerados os canais nucleares.

que fazem parte do SsIN, que realizam a monitoração da potência e do período do reator. Dos canais de instrumentação envolvidos no desligamento, 3 (três) operam na faixa de potência superior a 10% da potência nominal (canais de segurança 1, 2 e 3). Estes canais são calibrados para acionar o SCR quando um nível anormal de potência (105% do valor nominal), numa lógica 2 de 3, for atingido.

Fazem parte do SPR, também, os sensores / dispositivos de campo que monitoram as demais variáveis de processo ligadas à segurança do reator, os dispositivos de sinalização e alarme e os dispositivos de acionamento manual do sistema. Dentre os sensores / dispositivos de campo, pode-se citar, por exemplo, a instrumentação de monitoração do nível da piscina do reator, considerada mais adiante na análise da confiabilidade do desligamento do reator na condição de um acidente de perda de refrigerante primário.

O CDR é constituído, principalmente, por relés eletromecânicos que implementam a lógica do SPR.

Sistema de Controle de Reatividade (SCR). O SCR tem a função de manter o reator dentro de limites operacionais pré-fixados, bem com desligá-lo quando necessário. A parte do SCR responsável pelo desligamento do reator é constituída por elementos absorvedores de nêutrons (barras de controle e segurança), que ocupam 4 (quatro) posições definidas no núcleo do reator. Um destes elementos possui a função de controle e os outros 3 (três) possuem a função de segurança. O Reator IEA-R1m não possui nenhum outro sistema redundante de controle de reatividade além do sistema contendo os 4 (quatro) absorvedores (com as duas funções distintas).

A geração do sinal para desligamento do reator é feita através da interrupção da corrente elétrica (para abrir os contatos dos relés do CDR) que energiza os magnetos que acoplam as barras de controle e segurança aos respectivos mecanismos de movimentação.

Uma descrição mais detalhada dos sistemas envolvidos pode ser encontrada em [1] e [3].

Na Figura 1 é apresentado o Diagrama de Blocos Funcional do Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1m.

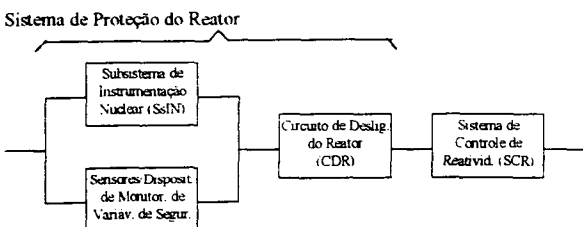
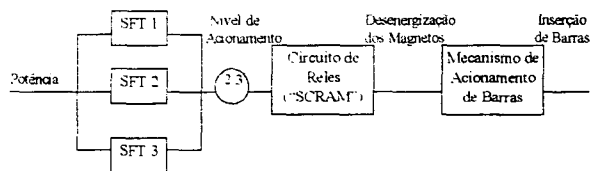


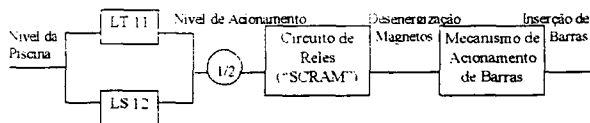
Figura 1. Diagrama de Blocos Funcional do Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1m

As Figuras 2 e 3 detalham o diagrama da Figura 1, considerando o "SCRAM" do Reator IEA-R1m para as duas condições acidentais tratadas neste estudo.



FT : Canal de Segurança

Figura 2. Diagrama de Blocos Funcional para a Condição Acidental de Excesso de Reatividade na Operação em Potência > 10% Potência Nominal.



LT : Transmissor de Nível ; LS : Chave de Nível

Figura 3. Diagrama de Blocos Funcional para a Condição Acidental de Perda de Refrigerante Primário

III. CONSIDERAÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE

Utilizou-se, neste estudo, a metodologia de Árvore de Falhas, a qual está fundamentada num modelo gráfico para a determinação da lógica de propagação de falhas de componentes de um sistema ou de uma função de segurança. O evento topo da árvore de falhas foi definido como sendo: "Falha no Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1m dado que uma determinada condição de segurança da instalação foi violada". A árvore de falhas foi construída a partir dos detalhes dos sistemas do Reator IEA-R1m apresentados em [1] e [3]. Foram considerados os principais componentes eletrônicos, elétricos e mecânicos, pertencentes aos sistemas descritos anteriormente, capazes de interferir no sucesso do "SCRAM" do reator. Além disso, o modelo elaborado inclui eventos que representam falhas independentes e eventos que correspondem a falhas múltiplas originadas por causa comum. Foram apontadas possíveis falhas humanas na calibração de canais de instrumentação e no reconhecimento da necessidade do acionamento do "SCRAM" manual. Falhas no Sistema Elétrico não foram consideradas, pois implicam na atuação automática do desligamento, sendo portanto falhas seguras.

A Árvore de Falhas desenvolvida é apresentada na Figura 4 do APÊNDICE.

Suposições Básicas da Análise. Para proceder à análise quantitativa da árvore de falhas, foram estabelecidos os seguintes pressupostos funcionais:

- Durante a operação normal do reator, em potências superiores a 10% da potência nominal, os canais de

segurança encontram-se energizados, monitorando continuamente a potência do reator. Também encontram-se energizados os relés do CDR e os magnetos que acoplam as barras de controle e segurança aos respectivos mecanismos de movimentação.

- Para a operação a 5 MW, está previsto que o Reator IEA-R1m opere em ciclos de 120 horas contínuas.
- Na estrutura da árvore de falhas foram inseridos dois eventos de acionamento para definir as condições de acidente sob as quais a não-confiabilidade do desligamento é calculada. O primeiro evento indica condições anormais de potência, e o segundo, nível anormal da piscina do reator. Calculou-se a não-confiabilidade do desligamento rápido do reator em uma missão de 120 horas, considerando ora uma condição acidental de inserção de excesso de reatividade, ora uma condição de perda de refrigerante primário. Para tanto, estes eventos de acionamento assumem os valores 0 (zero) ou 1 (um), dependendo do acidente que se deseja avaliar. Cabe citar que, as probabilidades de ocorrência dos eventos iniciadores de acidentes analisados neste trabalho não são conhecidas e não faz parte do escopo deste estudo estimá-las.
- Eventos que representam falhas de causa comum foram tratados, também, através de eventos de acionamento. Assim, o evento de acionamento permite que a falha de causa comum seja incluída ou não do cálculo da não-confiabilidade associada ao evento topo.
- Para o acionamento manual do sistema, o operador aciona a alavanca de "SCRAM" ("SCRAM BAR"), localizada no painel central da mesa de comando, abrindo, assim, as chaves de todas as barras de controle e segurança simultaneamente (cada barra possui uma chave do tipo "push-bottom" que provoca a queda imediata da mesma).
- Considerou-se que operações de manutenção, tais como inspeções, testes, reparos, calibrações, etc. são realizadas com o reator desligado.

Hipóteses de Natureza Estatística. São as seguintes as hipóteses estatísticas adotadas nos cálculos efetuados:

- Existe independência entre os eventos primários da árvore de falhas.
- A não-confiabilidade dos vários componentes está baseada no modelo exponencial, para um tempo de missão de 120 horas. Considera-se, portanto, que a cada missão, isto é, a cada nova operação os componentes encontram-se "tão bons quanto novos". Além disso, supõe-se que todas as falhas podem ser detectadas imediatamente.
- Os componentes dos sistemas responsáveis pelo desligamento rápido do reator não sofreram degradação durante estes anos de operação do Reator IEA-R1m. Esta hipótese está fundamentada no fato de que os diversos instrumentos que compõem os sistemas de controle e proteção operam num ambiente de laboratório, no qual as condições ambientais são devidamente controladas, o que ajuda a minimizar a sua degradação.
- Foi adotado o valor 1 (um) como probabilidade de falha do operador em acionar manualmente o desligamento rápido do reator, procurando com isto assumir uma posição conservativa em contraposição à adoção de valores mais

"realistas", por falta de informações detalhadas que a suportem.

- Seguindo a aproximação simplificada proposta no Relatório WASH-1400 [4], a avaliação da contribuição das falhas de causa comum é feita através de eventos especiais cuja probabilidade de ocorrência é dada por uma distribuição de incerteza do tipo Log-Uniforme, onde a cota inferior representa o caso mais otimista ou de independência total dos eventos.
- Os dados de falha de componentes compilados no documento da Agência Internacional de Energia Atômica [2] serviram de base na quantificação dos eventos primários da árvore de falhas.

Quantificação da Árvore de Falhas. A Tabela 1 contém os dados de entrada utilizados na quantificação da Árvore de Falhas do Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1m. Os valores apresentados na coluna referente à taxa/probabilidade de falha do componente correspondem à média da distribuição de incerteza encontrada na base de dados [2].

Na Tabela 2 encontram-se os principais resultados dos cálculos efetuados neste estudo. Neste caso, a não-confiabilidade do desligamento do Reator equivale à probabilidade de falha em demanda desta função e foi calculada em função da não-confiabilidade dos vários itens envolvidos, considerando um ciclo de operação de 120 horas contínuas.

Esses valores preliminares permitem verificar que a probabilidade de falha do "SCRAM" do Reator IEA-R1m está satisfatória e é compatível com a de sistemas típicos de desligamento, como referenciado em [2]. Além disso, como uma primeira aproximação, as falhas de causa comum, que nesta análise referem-se a falha humana na calibração dos canais de segurança e falha mecânica na inserção das barras de controle e segurança, não aumentam significativamente a probabilidade de falha no desligamento.

IV. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi apresentado o estudo de confiabilidade da Função de Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1m. Os resultados obtidos são preliminares pois são totalmente dependentes da qualidade dos dados de entrada do modelo. No entanto, este fato não compromete a análise, no sentido de permitir uma compreensão crítica dos mecanismos de falhas envolvidos no desligamento do reator. Está previsto, para as etapas subsequentes desta análise, o levantamento e análise dos dados de falha da instrumentação de segurança, encontrados nos registros de operação e manutenção mantidos como histórico do Reator IEA-R1m. Este trabalho, juntamente com a publicação, que deve ser feita em breve pela AIEA, de uma base de dados de confiabilidade de componentes específica para reatores de pesquisa, devem trazer resultados bem mais realistas do ponto de vista de análise de segurança do Reator IEA-R1m.

TABELA 1. Dados de Entrada do Modelo de Árvore de Falhas do Desligamento Rápido do Reator IEA-R1m ([2] e [4])

Componente	Modo de Falha	Eventos Primários ^a	Taxa / Probabilidade de Falha ^b	Não-Confabilidade em t=120 horas
Barras de Controle e Segurança	Falha na inserção - emperramento mecânico	BS1EM; BS2EM; BS3EM; BCEM;	$1,2 \times 10^{-4}$ /d	$1,2 \times 10^{-4}$
	Falha mecânica de causa comum impede a inserção de pelo menos 2 barras	BCSEM;	$1,7 \times 10^{-5}$ /d	$1,7 \times 10^{-5}$
Magneto de Acoplamento	Curto-circuito do magneto p/ fonte	MAGBS1CC; MAGBS2CC; MAGBS3CC; MAGBCCC	$2,7 \times 10^{-9}$ /h	$3,2 \times 10^{-9}$
Canais de Segurança	Mudança do valor calibrado	SFT1MVC; SFT2MVC; SFT3MVC;	$8,0 \times 10^{-3}$ /h	$9,6 \times 10^{-3}$
	Falha durante a operação	SFT1FO; SFT2FO; SFT3FO;	$2,7 \times 10^{-9}$ /h	$3,2 \times 10^{-9}$
	Erro do operador na calibração	SFT1EHC; SFT2EHC; SFT3EHC;	$1,2 \times 10^{-3}$ /d	$1,2 \times 10^{-3}$
	Falha de causa comum - erro do operador na calibração dos 3 canais	CSNEC	$9,0 \times 10^{-5}$ /d	$9,0 \times 10^{-5}$
Relés eletromecânicos / contatos de relés	Curto-circuito da bobina do relé p/ fonte	K27CC; K28CC; K29CC; RILT11CC; K3CC; K7CC	$2,7 \times 10^{-9}$ /h	$3,2 \times 10^{-9}$
	Contato não abre - falha fechado	A5K27FF; A5K28FF; A5K29FF; CRILT11FF; 1K3FF; 1K7FF;	$5,3 \times 10^{-7}$ /d	$5,3 \times 10^{-7}$
Contato do discriminador do canal de segurança	Contato não abre - falha fechado	CDSFT1FF; CDSFT2FF; CDSFT3FF;	$5,3 \times 10^{-7}$ /d	$5,3 \times 10^{-7}$
Transmissor de nível	Falha em funcionar	LT11F;	$1,4 \times 10^{-9}$ /h	$1,7 \times 10^{-9}$
Chave de Nível	Falha em funcionar	LS12F;	$3,0 \times 10^{-8}$ /d	$3,0 \times 10^{-8}$
Chave manual (tipo "push bottom")	Falha de causa comum-emperra/to mecân. das 4 chaves	MANSCREM;	$3,5 \times 10^{-7}$ /d	$3,5 \times 10^{-7}$

a. Estes códigos correspondem aos eventos da Árvore de Falhas apresentada na Figura 4 do APÊNDICE.

b. valores médios dados por demanda (/d) ou por hora (/h).

TABELA 2. Resultados da Análise de Confiabilidade do Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1m.

	Não-Confabilidade da Função de "SCRAM" em 120 horas	Considerações de Falha de Causa Comum
Acidente de Inserção de Excesso de Reatividade	$4,8 \times 10^{-4}$	SIM
	$3,7 \times 10^{-4}$	NAO
Acidente de Perda de Refrigerante Primário	$3,0 \times 10^{-5}$	SIM
	$1,3 \times 10^{-5}$	NAO

De qualquer forma, os atuais sistemas responsáveis pela implementação da função de desligamento rápido do Reator IEA-R1m tem operado de forma integrada desde 1976, tendo, durante todos estes anos, demonstrado eficiência e confiabilidade na função de proteção do Reator. Este fato confirma a tendência dos resultados obtidos nesta análise, efetuada já considerando a operação a 5 MW.

Finalmente, são feitas algumas outras sugestões para melhoria dos sistemas analisados e para obtenção de

resultados mais precisos em futuros estudos de risco do Reator IEA-R1m :

- As falhas de causa comum devem ser melhor investigadas e devem ser adotados, nos cálculos de probabilidade destas falhas, modelos mais consistentes já disponíveis na literatura [5].
- Deve ser elaborada uma base de dados de falhas humanas específica para reatores de pesquisa.
- Devem ser realizados estudos de envelhecimento dos itens do Reator IEA-R1m, para que estes modelos sejam incorporados aos cálculos de confiabilidade dos sistemas.
- Deve-se ressaltar a importância de atividades rotineiras de garantia da qualidade referentes a manutenção, calibração, testes, inspeções, etc. na melhoria da segurança da instalação.

REFERÊNCIAS

- [1] IPEN/CNEN-SP. **Relatório de Análise de Segurança do Reator IEA-R1m**, Setembro, 1996.
- [2] IAEA-TECDOC-478. **Component Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessment**, Vienna, 1988.

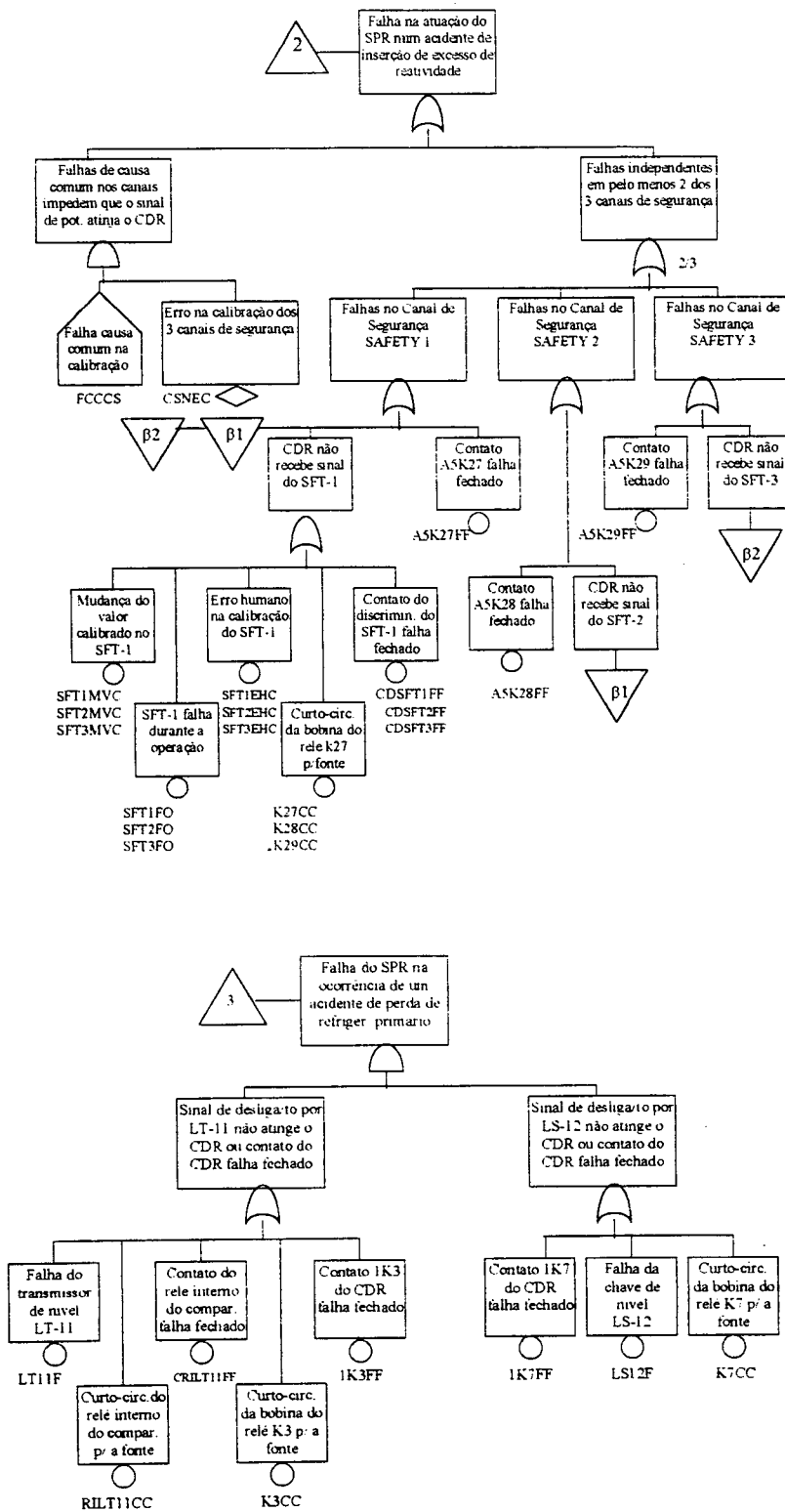


Figura 4. Árvore de Falhas do Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1 (continuação)

[3] GENERAL ATOMIC. E-115-403 **Instrumentation System Operation and Maintenance Manual**. March. 1975.

[4] U.S.NRC. **Reactor Safety Study : an Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Plants**. WASH-1400 (NUREG-75/014). 1975.

[5] MOSLEH.A., FLEMING.K., PARRY.G., PAULA.H., WORLEDGE.D., and RASMUSON.D., **Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies - Procedural Framework and Examples**, NUREG/CR-4780, EPRI NP-5613, PLG-0547, Vol.1. January. 1988.

ABSTRACT

This paper aims to present the reliability of IEA-R1m Reactor shutdown protection function. The fault-tree methodology has been utilized and primary event reliability data is based on generic information obtained from data bases. The unreliability of the systems involved in the shutdown protection function of IEA-R1m Reactor is quantified for a 120 hours period of continuous operation, considering two different accident scenarios. The unreliability of the IEA-R1m Reactor shutdown protection function is expressed as the probability of failure on demand.

APÊNDICE

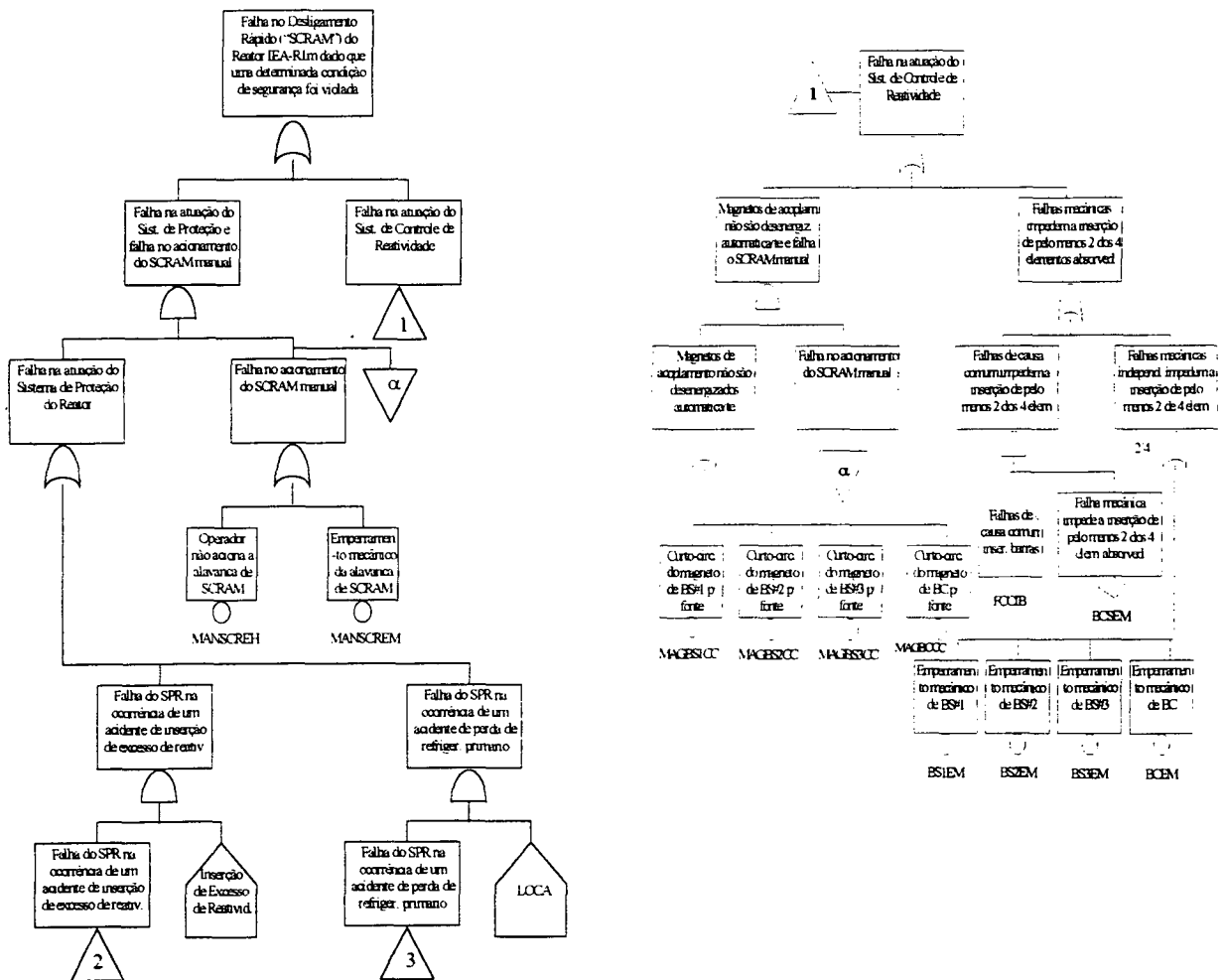


Figura 4. Árvore de Falhas do Desligamento Rápido ("SCRAM") do Reator IEA-R1