

**METODOLOGIA DE ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS  
APLICADA A INCÊNDIOS**

Antonio Souza Vieira Neto

Centro de Engenharia Nuclear (CEN)  
IPEN-CNEN/SP

Resumo

Este artigo mostra como a análise quantitativa de riscos pode ser utilizada para avaliar o risco de danos no núcleo do reator de centrais nucleoeletricas provocados por incêndios. Além disso, também é apresentado, como a análise quantitativa de riscos pode ser usada para avaliar o risco ao qual os ocupantes de uma edificação estão sujeitos em condições de incêndio.

Abstract

This paper shows how quantitative risk analysis methods may be used to evaluate the risk of fire and its contributors to core damage in nuclear power plants. Besides, this paper demonstrates how quantitative risk analysis may be used to evaluate the risk to which the occupants of a building may be subjected if a fire breaks out.

## INTRODUÇÃO

Métodos probabilísticos para determinação de riscos de incêndios têm sido aplicados em centrais nucleoeletricas, desde meados da década de 1980, em países como Estados Unidos, Alemanha, África do Sul, Finlândia, Espanha e Suíça. A frequência de danos no núcleo do reator devido a incêndio, baseado nos resultados das análises envolvendo cerca de 30 centrais nucleoeletricas, varia de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$  por reator-ano.

Nos últimos anos, esta metodologia também tem sido aplicada em algumas edificações públicas tais como hospitais e escolas. Uma estudo feito em 1997, pelo Departamento de Engenharia de Segurança de Incêndio da Universidade de Lund, Suécia, mostrou a utilidade da metodologia, na fase de projeto de uma das alas da enfermaria de um hospital, ao identificar que a introdução de um sistema de *sprinkler* ao projeto original, representaria uma diminuição do risco de  $2,2 \times 10^{-3}$  mortos por incêndio por ano para  $2,7 \times 10^{-4}$ .

Métodos probabilísticos para determinação de riscos de incêndios representam uma abordagem mais completa que os métodos de análise de riscos determinísticos, os quais identificam apenas os piores perigos e quantificam suas conseqüências, ou métodos semiquantitativos tal como o método Gretener. A Análise Quantitativa de Riscos, como chamada pela indústria química ou petroquímica ou, ainda, Análise Probabilística de Segurança, como conhecida na área de centrais nucleoeletricas, tem como objetivo identificar todas as possíveis seqüências de eventos decorrentes da propagação de um evento iniciador de incêndio (ex: fogo em uma bomba). Cada uma destas seqüências acidentais é avaliada tanto na magnitude de suas conseqüências quanto na sua probabilidade de ocorrência.

Uma vez que não existe consenso sobre o critério probabilístico para o risco provocado por incêndio, até o momento, a aplicação deste método tem se restringido a apoiar a tomada de decisão na escolha de projetos que resultem no menor risco humano e material.

## ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS APLICADA A INCÊNDIOS

A Análise Quantitativa de Riscos aplicada a incêndio pode ser dividida em nove etapas:

**1. Coleta de Informações:** Esta atividade geralmente é a que consome mais tempo e que se desenvolve durante todo o período da análise. Exemplos de informações que devem ser coletadas são: rota dos cabos, ações humanas, etc.

**2. Definição dos Compartimentos de Incêndio:** Todos os compartimentos capazes de evitar o espalhamento dos efeitos do fogo para áreas adjacentes da instalação devem ser identificados.

**3. Identificação das Fontes de Incêndio em cada Compartimento:** Todas as substâncias inflamáveis e equipamentos elétricos presentes nos compartimentos devem ser levantadas.

**4. Seleção dos Compartimentos Críticos:** Os compartimentos críticos são identificados pela aplicação de critérios qualitativos (ex: carga de incêndio superior a um determinado valor), e/ou por critérios quantitativos (ex: probabilidade de fogo no compartimento superior a um determinado valor).

**5. Identificação dos Eventos Iniciadores de Incêndio:** Para cada compartimento crítico são identificados os eventos iniciadores que podem dar origem a uma seqüência de acontecimentos que podem resultar em alguma condição indesejável para a instalação. Exemplos de eventos iniciadores são: fogo em cabos elétricos, fogo em bombas, fogo em substâncias inflamáveis, etc.

**6. Identificação das Seqüências Acidentais:** Para cada evento iniciador de incêndio, localizado em um dado compartimento crítico, deve-se identificar todas as possíveis seqüências acidentais resultantes de sua propagação. O estudo desta propagação dá-se em termos de todas as possíveis combinações envolvendo o sucesso e falha dos sistemas de salvaguarda à propagação do fogo (ex: sistemas de detecção, sistemas de supressão, barreiras contra o fogo, etc).

Cada seqüência acidental está associada a uma determinada conseqüência final e a uma determinada probabilidade de ocorrência. Para estruturar todas as possíveis seqüências resultantes de um evento iniciador de incêndio, a técnica de análise por árvore de eventos é comumente utilizada. Um exemplo de árvore de eventos é apresentada na Figura 1.

As seqüências acidentais podem ser representada por três variáveis ( $s_i$ ,  $p_i$ ,  $c_i$ ), onde:  $i$  pode valer de 1 a  $n$  e  $n$  é o número de seqüências acidentais, isto é, o número de ramos da árvore de eventos. O risco total é calculado a partir do conjunto de todas as triplas  $R = (s_i, p_i, c_i)$  para as seqüências acidentais.

O termo  $s_i$  representa a  $i$ -ésima seqüência acidental iniciada por um determinado evento iniciador e  $p_i$  e  $c_i$  descrevem, respectivamente, a probabilidade e a conseqüência da seqüência acidental. As conseqüências podem ser representadas por número de feridos, mortes ou pessoas que tiveram suas rotas de escape bloqueadas. Este número pode ser obtido pela comparação do tempo disponível para escape e o tempo estimado que as pessoas levarão para escapar. Quando o tempo disponível não for suficiente, algumas pessoas não serão capazes de escapar com segurança resultando, portanto, num evento indesejável.

**7. Determinação da Conseqüência Final de cada Seqüência Acidental:** A magnitude da conseqüência  $c_i$  de uma seqüência acidental  $s_i$ , é derivada da equação de estado para cada seqüência comparando o tempo disponível de escape com o tempo de escape. Outra maneira de se avaliar a conseqüência é através da análise da vulnerabilidade das pessoas com relação aos efeitos de fogo.

**8. Determinação da Probabilidade Final de cada Seqüência Acidental:** A probabilidade  $p_i$  é obtida pela multiplicação da probabilidade de ocorrência do evento iniciador e probabilidade de ocorrência de cada segmento existente na seqüência acidental  $i$  (ex: alarme, *sprinkler*, porta).

**9. Determinação do Risco de Incêndio:** O risco de cada seqüência é dado pelo produto  $c_i \times p_i$ ; o risco de cada evento iniciador será o somatório do risco de suas respectivas seqüências acidentais. O risco de um compartimento devido a incêndio é dado pela soma de todos os riscos resultantes de cada evento iniciador de acidente. Finalmente o risco global da instalação é dado pela somatória dos riscos de cada compartimento.

EVENTO INICIADOR	ALARME	SISTEMA DE <i>SPRINKLER</i>	PORTA DE EMERGÊNCIA	SEQÜÊNCIA
Evento Iniciador $j$	Sucesso	Sucesso	Sucesso	$(s_1, p_1, c_1)$
			Fracasso	$(s_2, p_2, c_2)$
		Fracasso	Sucesso	$(s_3, p_3, c_3)$
			Fracasso	$(s_4, p_4, c_4)$
	Fracasso	Sucesso	Sucesso	$(s_5, p_5, c_5)$
			Fracasso	$(s_6, p_6, c_6)$
		Fracasso	Sucesso	$(s_7, p_7, c_7)$
			Fracasso	$(s_8, p_8, c_8)$

Figura 1 Exemplo de árvore de eventos para o evento iniciador de incêndio  $j$

### PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS DA ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS PARA INCÊNDIO EM CENTRAIS NUCLEARES

A experiência adquirida em cerca de 30 análises de riscos de danos no núcleo do reator provocados por incêndio permite que sejam retiradas as seguintes conclusões e ensinamentos.

- a) O fogo é um importante contribuidor para a frequência de danos do núcleo do reator pois pode influenciar no desempenho de equipamentos de segurança, eliminar as redundâncias destes equipamentos e influenciar no desempenho do operador;
- b) a ação do operador é fundamental para a diminuição do risco;
- c) fogo, sem a ocorrência de falhas em dispositivos mitigadores e de proteção ao fogo, não é capaz de isoladamente conduzir danos no núcleo do reator.

**Principais Fontes de Incêndio:** São usados dados genéricos de incêndios em equipamentos de centrais nucleoeletricas com atualização bayesiana destes dados a partir da experiência adquirida na planta considerada. As principais bases de dados genéricas são apresentadas a seguir.

a) EPRI TR-100370 “Fire Induced Vulnerability Evaluation (Five)” - Electric Power Research Institute- EPRI, 1993, estima que a frequência média de incêndio / ano em usinas nucleoeletricas seja 3,6 a cada dez anos.

b) Dados de incêndio obtidos até 1992. PLG Inc. Database for Probabilistic Assessment of Light Water Nuclear Power Plants – Fire Data, PLG-0500 vol. 8. A Tabela 1 apresenta as frequências de ocorrências das principais fontes de incêndio de centrais nucleoeletricas.

Tabela 1 Principais fontes de incêndio em centrais nucleoeletricas

Início do Fogo	Freq. por Reator-Ano
Gerador-Diesel	$5,9 \times 10^{-2}$
Cabine lógica	$2,9 \times 10^{-2}$
Transformador > 4kV	$2,8 \times 10^{-2}$
Bombas	$2,4 \times 10^{-2}$
Erros humanos	$2,4 \times 10^{-2}$
cabos	$2,3 \times 10^{-2}$

PLG Inc. PLG-0500, vol 8

**Principais Compartimentos Críticos de Centrais Nucleoeletricas:** Sala de Controle, Centro de Distribuição de Cabos, Painéis de Controle e Painéis Elétricos.

**Análise de Conseqüências:** As conseqüências do incêndio são geralmente avaliadas pelo software COMPBRN. Alguns estudos, contudo, preferem assumir suposições conservadoras (conseqüências reconhecidamente piores).

OBS: A modelagem do comportamento do fogo nas Salas de Controle é fundamental, pois a fumaça provocada pelo fogo pode obrigar o abandono do pessoal de operação.

**Sistemas de Detecção e de Supressão de Fogo:** Os dados da confiabilidade dos sistemas de detecção e de supressão de fogo são geralmente obtidos das próprias indústrias que os

fabricam. A probabilidade de falha de sistemas de supressão de fogo localizados na Sala de Controle é de 1 a 3 %, enquanto que para as demais partes da planta está entre 2 e 5 %.

OBS: a) Modelos de análise das conseqüências do fogo indicam que danos catastróficos em componentes críticos para a segurança do reator ocorrem geralmente em muito menos que 30 minutos após seu início.

b) Na análise do risco de acidente nuclear provocado por fogo deve-se considerar a possibilidade da brigada involuntariamente vir a danificar algum equipamento importante para a segurança ainda não danificada pelo fogo. Somente nos casos em que, conservadoramente, se considera que todos os equipamentos no compartimento seriam danificados pelo fogo é que se pode negligenciar a ação da brigada.

**Barreiras contra o fogo:** Para períodos de uma a três horas sofrendo a ação do fogo as barreiras passivas são geralmente consideradas 100 % confiáveis.

**Seqüência dominante:** Fogo em um painel vital localizado na Sala de Controle, provocando a evacuação da sala e falha do operador na utilização do painel de desligamento alternativo.

**Frequência de danos no núcleo do reator provocado por incêndio:** varia de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$  por reator-ano.

## REFERÊNCIAS

- [1] FRANTZICH, H. Risk analysis and fire safety engineering. **Fire Safety Journal**. 31 (1998) 313-329
- [2] BERG, H. P.; BREILING, G.; HOFFMANN, H. H. Procedures and applications to enlarge the level 1+ PSA to internal fires in german nuclear power plants. **Reliability Engineering and System Safety**. 58 (1997) 109-117
- [3] GROBBELARR, J. F.; FOSTER, N. <sup>a</sup> S. ; LUSSE, L. J. Probabilistic fire risk assessment for Koerberg Nuclear Power Station Unit 1. **International Journal Pres. Ves. & Piping**. 61 (1995) 571-578
- [4] KAZARIANS, M. Some insights from fire risk analysis of US nuclear power plants. In: **Upgrading of Fire Safety in Nuclear Power Plants. Proceedings of an International Symposium**. Viena, 18-21 nov. 1997.

IPEN/CNEN-SP  
BIBLIOTECA  
"TEREZINE ARANTES FERRAZ"

Parte 3.1  
resumo  
TC  
C  
OK

Formulário de envio de trabalhos produzidos pelos pesquisadores do IPEN para inclusão na Produção Técnico Científica

AUTOR(ES) DO TRABALHO:

VIEIRA NETO, Antonio Souza

LOTAÇÃO: RMS

RAMAL: 9438

TIPO DE REGISTRO:

art. periód.:  
cap. de livro

  

Publ. IPEN  
Art. conf

  

resumo  
outros

  

(folheto, relatório, etc...)

TITULO DO TRABALHO:

Metodologia de análise quantitativa de  
risco aplicada a incêndios

APRESENTADO EM: (informar os dados completos - no caso de artigos de conf. informar o título da conferência, local, data, organizador, etc...)

IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Incêndio (COBENI)  
organizador: Pacin Eventos. São Paulo, SP. 23 a 25 de agosto de 2000.

PALAVRAS CHAVES PARA IDENTIFICAR O TRABALHO:

Fire, Probabilistic Safety Analysis; Fire Analysis  
Quantitative Risk Analysis.

ASSINATURA:

Antonio Souza

DATA: 24/01/01

6828