

BR 9127054

INIS - BR -- 2615

**AVALIAÇÃO DO LIMITE SUPERIOR DA PROBA-
BILIDADE DE ACIDENTE EM UM REATOR NU-
CLEAR NO BRASIL**

Luiz Pinguelli Rosa

COPPE e I. FÍSICA - UFRJ

Março / 1979

A ser publicado no Bol. da Sociedade Brasileira de Física.

É fora de dúvida que o desempenho dos reatores nucleares de potência tem sido bom do ponto de vista da segurança, inclusive o dos PWR adotados no Brasil. O sistema de desligamento de emergência desses reatores tem funcionado satisfatoriamente e, embora casos quase críticos tenham ocorrido com perigo real de acidentes graves, estes jamais se concretizaram*.

Por outro lado, nenhum acidente de perda de refrigerante ocorreu a ponto de o sistema de refrigeração de emergência ter que atuar^{1**}. Estaremos restritos aqui ao conjunto dos reatores a água leve, pela dupla razão de ter sido objeto de estudos mais detalhados e de incluir os reatores brasileiros.

Esse quadro geral qualitativamente positivo foi traduzido em termos quantitativos no Relatório Rasmussen², no qual a probabilidade de acidente grave para os reatores a água leve (LWR=PWR+BWR) foi avaliada em 5×10^{-9} por reator-ano. Tal acidente seria a fusão do núcleo e o rompimento do prédio de contenção, liberando toneladas de material radioativo no meio ambiente, nas piores condições meteorológicas e atingindo uma grande população. Isso seria capaz de causar milhares de mortes, de casos de câncer e de defeitos genéticos em uma população de alguns milhões de habitantes residentes dentro de um raio de 500

* Este trabalho foi feito antes do acidente com o reator de Three Mile Island. Como o seu objetivo é chamar a atenção para o quão grande pode ser a probabilidade de acidente na hipótese mais pessimista, em confronto com as predições otimistas, ele permanece atual.

** O sistema de refrigeração de emergência entrou em operação no acidente de Three Mile Island mas não foi eficaz.

milhas do local do acidente³.

O resultado obtido por Rasmussen é o produto de quatro fatores

$$P = P_1 P_2 P_3 P_4$$

sendo

$$p_1 = 5 \times 10^{-5} / \text{reator ano}$$

a probabilidade de fusão do núcleo de reator acarretando rompimento do prédio de contenção;

$$P_2 = 10^{-1}$$

a probabilidade de haver grande liberação de material radioativo no acidente;

$$P_3 = 10^{-1}$$

a probabilidade das condições meteorológicas serem desfavoráveis

$$P_4 = 10^{-2}$$

a probabilidade de uma grande população ser exposta à radiação.

Para determinar a probabilidade de acidente são imaginados os possíveis eventos iniciadores de acidentes e verificadas as diversas sequências de eventos encadeados a partir daqueles, levando em conta os mecanismos que são chamados a intervir e cujas falhas poderão determinar o acidente. Para permitir um cálculo tão complexo é usada a técnica de árvores de probabilidades, descrita de forma simplificada, com alguns exemplos, na referência ¹. Essas árvores são de dois tipos: de eventos e de falhas. As árvores de eventos são usadas para calcular a proba

bilidade de que um acidente ocorra a partir de uma dada causa ou evento iniciador. As árvores de falhas servem, inversamente, para explicar quais as possíveis causas de uma dada falha. Em ambos os casos são construídas árvores de eventos sequenciais de cada nó saindo dois ramos: um deles corresponde à falha do dispositivo solicitado naquele nó e outro corresponde ao seu êxito. A probabilidade de êxito, por hipótese, é sempre muito próxima de 1. A probabilidade de falha em cada um dos inúmeros nós que compõem as árvores, deve ser avaliada com base na experiência de operação com reatores nucleares e no desempenho de dispositivos idênticos em máquinas convencionais. Construída uma árvore é possível identificar os caminhos críticos através dela. Dado um caminho e conhecidas as probabilidades de cada ramo que o compõem calculamos a probabilidade associada a esse caminho.

Essa metodologia e algumas hipóteses usadas na estimativa de probabilidades de eventos de baixa estatística foram criticadas em uma publicação da American Physical Society⁴. Nessa mesma linha, outro relatório realizado às expensas da Fundação Ford³ chegou a um limite superior para a probabilidade do pior acidente.

$$p \leq p = 5 \times 10^{-5}$$

por reator-ano. Esse valor foi obtido introduzindo todas as incertezas da forma mais desfavorável no cálculo do relatório Rasmussen, podendo ser expresso por uma fórmula

$$p = P_{12} P_{34}$$

sendo

$$p_{12} = 10^{-3} / \text{reator-ano}$$

o limite da probabilidade de fusão do núcleo com rompimento da contenção e liberação de radiação;

$$p_{34} = 5 \times 10^{-2}$$

o limite da probabilidade de condições meteorológicas desfavoráveis e de grande população atingida.

Ainda assim, o número que se tem é pequeno, mas não é desprezível, podendo conduzir a valores significativos para o limite superior da probabilidade de acidente em um longo período de tempo, quando se tiver um grande número de reatores-ano a cumulados.

Tomemos esse limite superior e o apliquemos ao caso brasileiro para uma avaliação, ainda que imperfeita, do risco de acidentes em reatores aqui. Devemos estar cientes de que os resultados nos darão valores extremos pois são calculados no caso mais desfavorável e pessimista.

Cumprindo-se o Programa Nuclear, o Brasil terá até 1990 nove reatores em funcionamento. O reator Angra I (de cerca de 600 Mw) deverá operar ainda em 1979. Os oito reatores do Acordo com a Alemanha (de 1300 Mw cada um) deverão entrar em operação até 1990, a base de, aproximadamente, um por ano a partir de 1983, segundo o cronograma original. Essa é apenas a primeira fase do programa, a ser executada dentro dos 15 anos estipulados no Acordo. A Nuclebrás deverá continuar construindo reatores em escala industrial a uma razão de algumas unidades

por ano, atingindo um total de dezenas de reatores nos primeiros anos do próximo século. A atual previsão oficial para a expansão da geração núcleo-elétrica dá um total de 75.000 Mw para o ano 2.000⁵. Os nove primeiros reatores (1 x 600 Mw + 8 x 1.300 Mw) totalizarão 11.000 Mw em 1990. Portanto, além desses, deverão estar operando até 2.000, mais de cerca de 50 reatores de 1.300 Mw (KWU-Nuclebrás). Esse número deverá continuar a crescer nos anos seguintes, de acordo com as estimativas do programa.

É possível que venha a ocorrer mudança desse plano, havendo já um retardamento do cronograma da primeira fase. Todavia, vamos calcular o número de reatores-ano acumulados para os primeiros nove reatores e, depois, repetiremos o cálculo para incluir os demais reatores.

A vida útil de um reator é 30 anos, logo os 9 reatores da primeira fase acumularão um número de reatores-ano

$$A = 270$$

entre 1979, quando Angra I inicia sua operação, e 2020, quando o último reator da série sairá de operação.

Supondo que apenas a primeira fase do programa seja executada, cessando a construção de reatores em 1990, a probabilidade de ocorrer o pior acidente entre 1979 e 2020 será limitada por

$$PA = 1,35 \times 10^{-2}$$

ou seja 1%. Essa probabilidade ainda é baixa, levando em conta que se refere a um período de 41 anos, mas já não é total

mente desprezível.

A evolução do número de reatores-ano acumulados com o tempo é mostrada na figura 1.

Incluindo agora a segunda fase do programa, totalizando 59 reatores até o ano 2.000, o número de reatores-ano acumulados entre 1979 e 2030 será

$$A = 1.770$$

O limite superior da probabilidade de acidente nesse período será

$$PA = 8,85 \times 10^{-2}$$

ou seja, 8,85%. Esse valor, de cerca de 9% já é considerável, embora se aplique a um período muito grande - 51 anos. Entretanto, o programa nuclear previsto atualmente não se reduz tampouco aos 59 reatores considerados, devendo continuar a se ampliar após o ano 2.000. Portanto, o valor limite da probabilidade de acidente até 2.030 deverá ser maior que 9%, usando a mesma metodologia, porque outros reatores entrarão em operação.

Suponhamos que o número de reatores que entram em operação por ano é mantido constante e igual a α . Para possibilitar a expansão prevista de energia nuclear, entre 1990 e 2000, serão necessários 50 reatores em 10 anos, logo $\alpha = 5$. Essa é uma hipótese simplificadora, sendo a previsão publicada na referência ⁶ dada na Tabela 1.

Tomemos o mesmo valor α do ano 2000 em diante. A partir dos anos $t_1 = 1991$, $t_2 = 1992$, ... $t_{10} = 2000$, $t_{40} = 2030$,

$t_{41} = 2031$ entrarão em operação 5 reatores por ano. Uma aritmética trivial nos dá o número de reatores-ano acumulados na data t , sendo

$$t_n < t \leq t_{n+1}$$

$$A(t) = A_0(t) + \alpha \{n(t-t_1) - \frac{1}{2} [n(n-1) + k(k+1)]\}$$

onde k é dado pelo índice do ano $t_k = t_n - v$, desde que $t_n - v > t_1$, ou $k = 0$ se $t_n - v < t_1$; v é a vida útil do reator. $A_0(t)$ é a contribuição dos reatores existentes antes de t_1 , já computados anteriormente.

Estamos levando em conta, na fórmula acima, que, para $t > t_1 + v$ todos os reatores que entraram em operação antes do ano t_k

$$t_k \leq t - v < t_{k+1}$$

já saíram de operação. É presumível que esses reatores sejam compensados por um aumento do número α de reatores entrando em operação anualmente. Para manter o acréscimo anual de potência nuclear constante dever-se-á reajustar progressivamente α , o que equivale a manter α inalterado no cálculo e não abater os reatores que deixam de operar por velhice. Na fórmula dada, isso é obtido fazendo $k = 0$. Entretanto, não consideraremos essa hipótese aqui.

Ao fim do ano 2030 podemos calcular o número de reatores-ano usando $n = 40$, $k = 10$, $A_0 = 270$, $v = 30$, $\alpha = 5$ na fórmula

1a. O resultado é

$$A = 4095$$

o que eleva o limite superior da probabilidade de acidente nos próximos 51 anos para

$$PA = 20,475 \times 10^{-2}$$

Esse valor, 20%, é muito grande, significando uma chance em cinco. É claro que este é apenas um limite superior, que não é provavelmente alcançado, mesmo sendo válidas as hipóteses arbitradas, pois o valor mais provável deverá estar bem abaixo desse limite. Além disso, referimo-nos a um período de tempo de masiadamente longo. É de se esperar que o valor de P não permaneça o mesmo por tanto tempo. Vários fatores poderão fazê-lo de crescer nos próximos 50 anos. Entre eles estão o progresso técnico e normas mais severas de construção e funcionamento dos reatores. Por outro lado, o melhor conhecimento sobre o desempenho dos reatores e a maior experiência operacional poderão diminuir as atuais incertezas e estudos teóricos mais rigorosos poderão mostrar que o limite superior da probabilidade de acidente seja menor do que o usado aqui.

Quando outra razão não houver, o acúmulo de reatores-ano de operação em todo o mundo, A_M , terminará por fazer $PA_M > 1$, se P for mantido fixo indefinidamente, tornando obsoleto esse valor. Desde que não ocorram acidentes até lá, esse limite teórico estará superado pelo valor empírico

$$p' = \frac{1}{A_M} < P$$

Se tiverem ocorrido M acidentes, então

$$P' = \frac{M}{A_M}$$

motivando certamente uma reformulação da determinação teórica de P .

Para termos uma idéia da situação mundial, até o ano 2000 espera-se ter acumulado 5000 reatores-ano, o que corresponde a $PA_M = 0,25^3$. Nessa ocasião teremos no Brasil $A = 413$ ($A_0 = 138$, $n = 10$, $k = 0$) correspondendo a uma probabilidade de acidente de cerca de 2% ($PA = 2,065 \times 10^{-2}$).

Enfim, esperamos que o nosso limite seja demasiadamente pessimista. Entretanto, ele foi calculado à luz do conhecimento atual, com as hipóteses explícitas tomando o valor de P publicado no relatório da Fundação Ford³.

As conclusões a que chegamos são modestas, mas significativas. Se partimos de hipóteses otimistas temos os resultados que mostram ser ignoráveis os riscos dos reatores. Se somos pessimistas, não tanto quanto os ecologistas mais radicais, mas apenas usando o resultado do Relatório da Fundação Ford, chegamos a limites para a probabilidade de acidente tão grandes quanto 2% até 2000, 9% ou 20% até 2030, na pior hipótese.

Presume-se que a probabilidade de acidente nuclear no Brasil esteja abaixo desses limites extremos. Entretanto, é útil saber que existem essas predições teóricas pessimistas, em confronto com os resultados teóricos otimistas.

REFERÊNCIAS

- 1 - Relatório do Grupo de Trabalho sobre a Poluição Nuclear - Sociedade Brasileira de Física - 1977.
- 2 - N. Rasmussen et. al., Reactor Safety Study - WASH 1400, 1975.
- 3 - Nuclear Power - Issues and Choices - Fundação Ford - 1977.
- 4 - Rev. of Modern Physics vol 47, Sup., 1975.
- 5 - C. M. Dale, Anais do Simpósio de C. Nuclear - UFRJ, dezembro de 1975.
- 6 - L. C. Almeida Magalhães, O Problema Energético Brasileiro - Furnas, 1975.

TABELA 1**PROGRAMA NUCLEAR - ESTIMATIVA PARA****O PERÍODO 1990 - 2000⁵**

ANO	NÚMERO DE REATORES	
	ENTRANDO EM OPERAÇÃO	TOTAL
Até 1990	9	9
91	2	11
92	2	13
93	3	16
94	3	19
95	5	24
96	6	30
97	6	36
98	6	42
99	9	51
2000	10	61

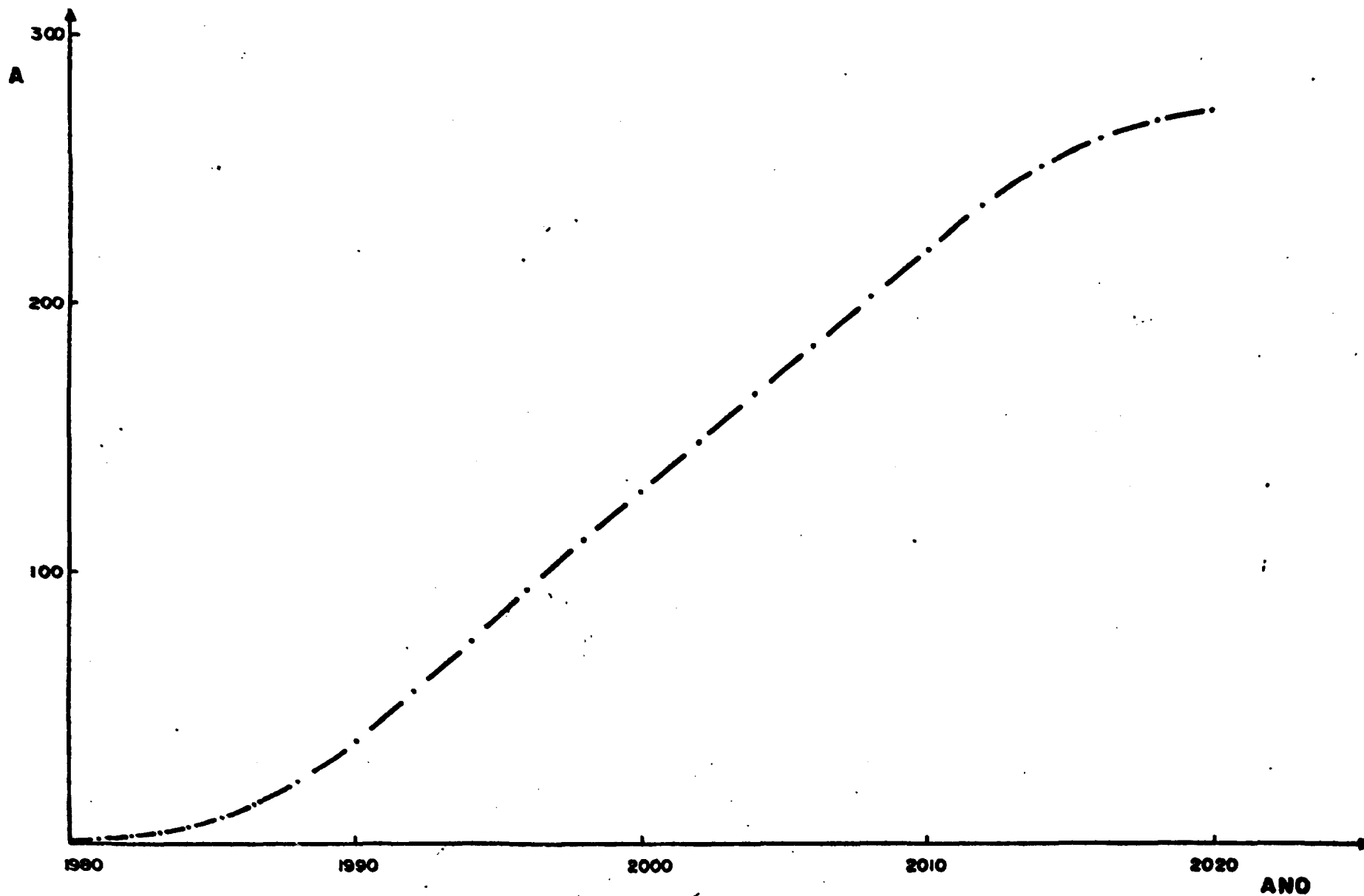


FIGURA 1.- Evolução do Número de Reactores - Ano Acumulados na 1ª Fase de Programa Nuclear