

MODELO PARA DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE DA ÁGUA EM REATORES DE PISCINA COM CIRCULAÇÃO ASCENDENTE NO NÚCLEO

GRACIETE S. ANDRADE E SILVA^(*) e SÉRGIO DE Q. BOGADO LEITE^(**)
 (*) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP
 Travessa R, 400 - Cid. Universitária - São Paulo-SP, 05508-900
 (**) Coordenadoria Para Projetos Especiais - COPESP
 Av. Lineu Prestes, 2242 - USP - São Paulo-SP, 05598-900

RESUMO

Em reatores tipo piscina, com circulação ascendente no núcleo, o mecanismo de contaminação da água da piscina dá-se, geralmente, através de uma interligação entre o primário e a piscina e pode ser descrito por um conjunto de equações diferenciais acopladas, relacionando os radionuclídeos no combustível, circuito do núcleo e piscina. Neste trabalho, um modelo para as atividades dos produtos de fissão liberados na água de um reator de teste de materiais com circulação ascendente é apresentado e soluções analíticas são obtidas, como funções da taxa de escape do combustível e da capacidade de retenção do sistema de purificação.

INTRODUÇÃO

A determinação precisa do termo fonte na água de reatores de piscina é importante para o conhecimento dos níveis de radiação em locais como a superfície da piscina e sistema de purificação.

A atividade específica da água do circuito primário de um reator em qualquer instante provém, basicamente: i) da atividade induzida no refrigerante (intrínseca), ii) de produtos de corrosão e impurezas ativadas e iii) dos produtos de fissão liberados para a água, oriundos da impregnação superficial do combustível ou que escapam em caso de falhas do revestimento.

No presente trabalho, apresenta-se um modelo matemático para o cálculo da atividade específica dos produtos de fissão na água do circuito primário e da piscina, para um reator tipo piscina com circulação ascendente de água no núcleo, semelhante ao reator OSIRIS [1], com potência térmica de 70Mw e combustível tipo placa, com pastilhas de UO₂ compartimentadas, revestidas por Zircaloy (combustível caramelo).

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Hipóteses. Para o estudo das concentrações dos produtos de fissão na água do circuito primário e piscina, as seguintes hipóteses foram assumidas:

- 1) A liberação de produtos de fissão do combustível dá-se de duas formas:
 - i) liberação contínua devido a irradiação do U-235 que fica impregnado externamente às placas combustíveis quando de sua fabricação, a qual ocorre desde o instante $t=0$;
 - ii) liberação contínua através de uma falha no revestimento do combustível ocorrida a partir de um instante t_0 qualquer.
- 2) Os produtos liberados são homogeneamente e instantaneamente misturados no circuito, produtos voláteis e não voláteis sendo tratados indistintamente.

- 3) A cadeia de radionuclídeos é descrita por quatro termos, isto é, admite-se 4 tipos de nuclídeos com forma de decaimento do k-ésimo para o k-ésimo+1.
- 4) O modo de escoamento do reator é como indicado na Figura 1, onde q_{cp} , q_p , $q_e (=q_p + q_{sp})$ e q_{sp} são vazões (cm³/s) dos circuitos primário, piscina, de equilíbrio e sistema de purificação, respectivamente e N_k e P_k representam o número total de átomos do k-ésimo isótopo, no instante t , no circuito primário e na piscina. A vazão de equilíbrio, que desce pela chaminé do reator e soma-se à vazão q_{cp} na tubulação de saída do núcleo, é estabelecida para evitar a ascensão de produtos ativados à superfície da piscina e é responsável pelo acoplamento das equações que descrevem os produtos de fissão nos dois circuitos.

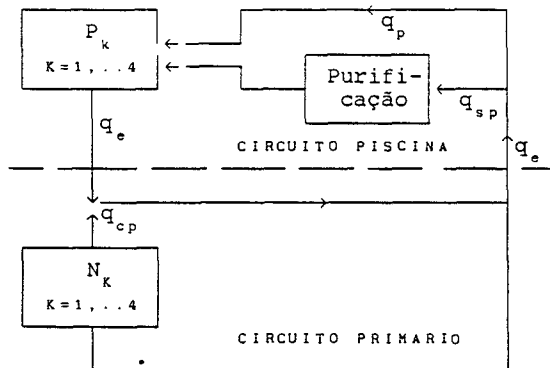


Figura 1 Esquema do modelo de reator

Modelo Matemático. Utilizando-se as hipóteses descritas anteriormente, as equações que governam o comportamento dos produtos de fissão no combustível e na água do primário e da piscina são dadas por:

$$\frac{dn_1}{dt} + (\lambda_1 + \alpha_1)n_1 = Y_1 K \quad (1)$$

$$\frac{dn_k}{dt} + (\lambda_k + \alpha_k)n_k = Y_k K + \delta_{k-1} \lambda_{k-1} n_{k-1} \quad (2)$$

(k=2, 3, 4)

$$\frac{dN_1}{dt} + \left(\lambda_1 + \frac{q_e}{V_N}\right)N_1 = \alpha_1 n_1 + P_1 \frac{q_e}{V_P} + Y_1 Z \quad (3)$$

$$\frac{dN_k}{dt} + \left(\lambda_k + \frac{q_e}{V_N}\right)N_k = \alpha_k n_k + P_k \frac{q_e}{V_P} + \delta_{k-1} \lambda_{k-1} N_{k-1} + Y_k Z \quad (4)$$

(k=2, 3, 4)

$$\frac{dP_1}{dt} + \left(\lambda_1 + \frac{q_e}{V_P}\right)P_1 = N_1 \left[1 - \beta_1\right] \frac{q_{sp}}{V_N} + N_1 \frac{q_p}{V_N} \quad (5)$$

$$\frac{dP_k}{dt} + \left(\lambda_k + \frac{q_e}{V_P}\right)P_k = \frac{N_k}{V_N} \left[q_p + q_{sp} (1 - \beta_k)\right] + \delta_{k-1} \lambda_{k-1} P_{k-1} \quad (6)$$

(k=2, 3, 4)

sujeitas às seguintes condições:

- a) $n_k(0) = N_k(0) = P_k(0) = 0, \forall k,$
- b) $\alpha_k = 0$ para $t < t_0,$
- c) $n_k(t_0) = n_k(t_0^-); N_k(t_0) = N_k(t_0^-); P_k(t_0) = P_k(t_0^-), \forall k.$

e onde:

- n_k = número de átomos do k-ésimo isótopo no combustível,
- N_k = número de átomos do k-ésimo isótopo no circuito primário,
- P_k = número de átomos do k-ésimo isótopo no circuito piscina,
- λ_k = constante de decaimento (s^{-1}),
- α_k = taxa de escape do k-ésimo isótopo (s^{-1}), ($\alpha = 0$ para $0 \leq t < t_0$),
- Y_k = rendimento de fissão do k-ésimo isótopo (átomos/fissão),
- K = taxa de fissão no combustível (fissões/s),
- Z = taxa de fissão na superfície externa do combustível (fissões/s),
- δ_k = fração do k-ésimo isótopo que decai para o k-ésimo+1,
- β_k = percentual de purificação para o k-ésimo isótopo durante a operação,
- V_P = volume da piscina + circuito de equilíbrio + sistema de purificação = volume da piscina (cm^3),
- V_N = volume do circuito primário (cm^3).

SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

As equações (1) e (2) são lineares de primeira ordem e são facilmente solucionadas utilizando-se o método do fator integrante.

A solução das demais equações pode ser encontrada isolando-se e derivando-se N_k das expressões (5) e (6), e substituindo-o nas equações (3) e (4), respectivamente. Com isto chega-se a um conjunto de equações diferenciais lineares não homogêneas de segunda ordem com coeficientes constantes, para os produtos de fissão na água da piscina, do tipo:

$$\frac{d^2 P_k}{dt^2} + r_k \frac{dP_k}{dt} + s_k P_k = R(t), \quad (7)$$

onde $R(t)$ contém termos de acoplamento com o k-ésimo-1 isótopo.

Para cada k a partir de $k=1$, $P_k(t)$ é obtido e substituído nas equações (5) ou (6), com as condições iniciais adequadas, para a obtenção de $N_k(t)$. As soluções finais podem ser escritas na seguinte forma:

A) Intervalo $0 \leq t < t_0$ (anterior à falha do revestimento):

$$n_k(t) = A_k^n + \sum_{i=1}^k C_{k,i}^n e^{-h_i t} \quad (8)$$

$$N_k(t) = A_k^N + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^2 B_{k,i,j}^N e^{m_{i,j} t} \quad (9)$$

$$P_k(t) = A_k^P + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^2 B_{k,i,j}^P e^{m_{i,j} t} \quad (10)$$

B) Intervalo $t \geq t_0$:

$$n_k(t) = A_k^n + \sum_{i=1}^k C_{k,i}^n e^{-h_i (t-t_0)} \quad (11)$$

$$N_k(t) = A_k^N + \sum_{i=1}^k \left[\sum_{j=1}^2 B_{k,i,j}^N e^{m_{i,j} (t-t_0)} + C_{k,i}^N e^{-h_i (t-t_0)} \right] \quad (12)$$

$$P_k(t) = A_k^P + \sum_{i=1}^k \left[\sum_{j=1}^2 B_{k,i,j}^P e^{m_{i,j} (t-t_0)} + C_{k,i}^P e^{-h_i (t-t_0)} \right] \quad (13)$$

onde:

$$A_k^n = \begin{cases} \frac{Y_1 K}{h_1}, & k=1 \\ \frac{Y_k K + \delta_{k-1} \lambda_{k-1} A_{k-1}^n}{h_k}, & k \neq 1 \end{cases} \quad (14)$$

$$C_{ki}^n = \frac{\delta_{k-1} \lambda_{k-1} C_{k-1,i}^n}{(h_k - h_i)}, \quad k \neq i \quad (15)$$

$$C_{kk}^n = n_k^0 - \left(A_k^n + \sum_{i=1}^{k-1} C_{ki}^n \right) \quad (k > 1) \quad (16)$$

$$A_k^p = \frac{1}{s_k} \left[\gamma_k \left(Y_k Z + \alpha_k A_k^n \right) + \delta_{k-1} \lambda_{k-1} \left(g_k A_{k-1}^p + \gamma_k A_{k-1}^n \right) \right] \quad (17)$$

$$A_k^n = \frac{1}{\gamma_k} \left(f_k A_k^p - \delta_{k-1} \lambda_{k-1} A_{k-1}^p \right) \quad (18)$$

$$B_{kij}^p = \frac{\delta_{k-1} \lambda_{k-1} \left[(m_{1j} + g_k) B_{k-1,ij}^p + \gamma_k B_{k-1,ij}^n \right]}{(m_{1j} - m_{k1}) (m_{1j} - m_{k2})} \quad (k \neq i) \quad (19)$$

$$B_{kij}^n = \frac{1}{\gamma_k} \left[(m_{1j} + f_k) B_{kij}^p - \delta_{k-1} \lambda_{k-1} B_{k-1,ij}^p \right] \quad (k \neq i) \quad (20)$$

$$C_{ki}^p = \left\{ \gamma_k \alpha_k C_{ki}^n + \delta_{k-1} \lambda_{k-1} \left[(g_k - h_i) C_{k-1,i}^p + \gamma_k C_{k-1,i}^n \right] \right\} / (h_i + m_{k1}) (h_i + m_{k2}) \quad (k \neq i) \quad (21)$$

$$C_{ki}^n = \frac{1}{\gamma_k} \left[(f_k - h_i) C_{ki}^p - \delta_{k-1} \lambda_{k-1} C_{k-1,i}^p \right] \quad (k \neq i) \quad (22)$$

$$B_{kk1}^p = \left[\gamma_k N_k^0 - (m_{k2} + f_k) P_k^0 + \delta_{k-1} \lambda_{k-1} P_{k-1}^0 + m_{k2} A_k^p + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^2 (m_{k2} - m_{1j}) B_{kij}^p + \sum_{i=1}^k (m_{k2} + h_i) C_{ki}^p \right] / (m_{k1} - m_{k2}) \quad (23)$$

$$B_{kk2}^p = - \left[\gamma_k N_k^0 - (m_{k1} + f_k) P_k^0 + \delta_{k-1} \lambda_{k-1} P_{k-1}^0 + m_{k1} A_k^p + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^2 (m_{k1} - m_{1j}) B_{kij}^p + \sum_{i=1}^k (m_{k1} + h_i) C_{ki}^p \right] / (m_{k1} - m_{k2}) \quad (24)$$

$$B_{kkj}^n = \frac{1}{\gamma_k} (m_{kj} + f_k) B_{kkj}^p, \quad j=1, 2 \quad (25)$$

$$C_{kk}^p = \frac{\gamma_k \alpha_k C_{kk}^n}{(h_k + m_{k1}) (h_k + m_{k2})} \quad (26)$$

$$C_{kk}^n = \frac{(f_k - h_k) C_{kk}^p}{\gamma_k} \quad (27)$$

e onde:

$$g_k = \lambda_k + \frac{q_e}{V_N} \quad (28)$$

$$f_k = \lambda_k + \frac{q_e}{V_P} \quad (29)$$

$$\gamma_k = \frac{(q_e - \beta_k q_{sp})}{V_N} \quad (30)$$

$$r_k = f_k + g_k \quad (31)$$

$$s_k = g_k f_k - \frac{q_e \gamma_k}{V_P} = m_{k1} m_{k2} \quad (32)$$

$$m_{k1} = \frac{-r_k + \sqrt{r_k^2 - 4s_k}}{2} \quad (33)$$

$$m_{k2} = \frac{-r_k - \sqrt{r_k^2 - 4s_k}}{2} \quad (34)$$

$$h_k = \begin{cases} \lambda_k, & \text{se } 0 \leq t < t_0 \\ \lambda_k + \alpha_k, & \text{se } t \geq t_0 \end{cases} \quad (35)$$

$$n_k^0 = \begin{cases} 0, & \text{se } 0 \leq t < t_0 \\ n_k(t_0^-), & \text{se } t \geq t_0 \end{cases} \quad (36)$$

$$N_k^0 = \begin{cases} 0, & \text{se } 0 \leq t < t_0 \\ N_k(t_0^-), & \text{se } t \geq t_0 \end{cases} \quad (37)$$

$$P_k^0 = \begin{cases} 0, & \text{se } 0 \leq t < t_0 \\ P_k(t_0^-), & \text{se } t \geq t_0 \end{cases} \quad (38)$$

CASO EXEMPLO

Os valores das constantes que definem o modo de escoamento do reator (vide Figura 1) foram escolhidos iguais aos do reator OSIRIS [1], a saber: $q_p = 44,65 \text{ Kg/s}$, $q_{sp} = 10,65 \text{ Kg/s}$, $q_e = 55,30 \text{ Kg/s}$, $V_N \approx 1,718 \times 10^8 \text{ cm}^3$ e $V_p \approx 5,363 \times 10^8 \text{ cm}^3$.

A taxa de fissão no combustível (K), para o reator operando a 70 Mw , como no OSIRIS, é da ordem de $2,118 \times 10^{18}$ fissões/s.

Para o cálculo da taxa de fissão proveniente do UO_2 impregnado externamente nas placas combustíveis quando de sua fabricação, admitiu-se que $10 \mu\text{g}$ de UO_2 ficam impregnados na superfície de cada placa. Como no reator OSIRIS existem 38 elementos combustíveis padrão, contendo 17 placas cada um e 6 elementos de controle com 14 placas cada, tem-se um total de $7,3 \text{ mg}$ de UO_2 a gerarem produtos de fissão na água do primário e da piscina. Levando-se em conta que, à potência de 70 Mw do OSIRIS corresponde uma massa total de $4,2 \times 10^5 \text{ g}$ de UO_2 , com taxa de fissão equivalente a $2,188 \times 10^{18}$ fissões/s, a taxa de fissão devido a impregnação (Z) é da ordem de $3,802 \times 10^{10}$ fissões/s valendo-se da mesma proporcionalidade. Dos produtos de fissão produzidos nas superfícies impregnadas, estima-se que apenas metade é liberada para a água, o restante ficando retido no revestimento [2,3].

As taxas de escape admitidas neste caso exemplo, variam desde valores encontrados em PWR, como os da Tabela 1 para o reator Chalk River [4], até 10^{-3} e 10^{-5} vezes esses valores, para aferirmos a sensibilidade dos níveis de atividade alcançados.

O percentual de purificação para cada radionuclídeo considerado está indicado na Tabela 2, para um sistema típico de resinas catiônicas e de leito misto [5].

Tabela 1 Coeficientes de Taxas de Escape

ISÓTOPOS	TAXA DE ESCAPE (s^{-1})
Cs, I, Xe, Kr, Rb, Br	$1,3 \times 10^{-08}$
Sr, Ba	$1,0 \times 10^{-11}$
Zr, Ce, outras terras raras	$1,6 \times 10^{-12}$
Te	$1,0 \times 10^{-09}$
Mo	$2,0 \times 10^{-09}$

Tabela 2 Percentual de Purificação

ISÓTOPOS	FRAÇÃO DE REMOÇÃO		β
	LEITO MISTO	RESINA CATIONICA	
(Kr e Xe)	0	0	0
(Br e I)	0,99	0	0,99
(Rb e Cs)	0,5	0,9	0,95
demais nuclídeos	0,98	0,9	0,998

As demais constantes nucleares para o cálculo das concentrações de produtos de fissão na água do circuito primário e da piscina são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 Constantes Nucleares Consideradas

k	NUCLÍDEO	λ [seg^{-1}]	RENDIMENTO DE FISSÃO	δ_k
1	Se-83m	$9,902 \times 10^{-03}$	$4,84 \times 10^{-03}$	1
2	Se-83	$5,134 \times 10^{-04}$	$4,83 \times 10^{-04}$	1
3	Br-83	$8,056 \times 10^{-05}$	$3,71 \times 10^{-05}$	1
4	Kr-83m	$1,052 \times 10^{-04}$	$3,99 \times 10^{-08}$	1
1	Se-84	$3,501 \times 10^{-03}$	$9,55 \times 10^{-03}$	1
2	Br-84	$3,633 \times 10^{-04}$	$1,80 \times 10^{-04}$	1
1	Br-85	$4,030 \times 10^{-03}$	$1,30 \times 10^{-02}$	1
2	Kr-85m	$4,297 \times 10^{-05}$	$1,37 \times 10^{-04}$	0,2110
3	Kr-85	$2,049 \times 10^{-09}$	$2,28 \times 10^{-05}$	0
1	Br-87	$1,242 \times 10^{-02}$	$2,19 \times 10^{-02}$	1
2	Kr-87	$1,514 \times 10^{-04}$	$3,42 \times 10^{-03}$	1
1	Br-88	$4,252 \times 10^{-02}$	$2,50 \times 10^{-02}$	1
2	Kr-88	$6,782 \times 10^{-05}$	$1,09 \times 10^{-02}$	1
3	Rb-88	$6,490 \times 10^{-04}$	$3,20 \times 10^{-04}$	1
1	Br-89	$1,540 \times 10^{-01}$	$1,89 \times 10^{-02}$	1
2	Kr-89	$3,644 \times 10^{-03}$	$2,74 \times 10^{-02}$	1
3	Rb-89	$7,600 \times 10^{-04}$	$1,70 \times 10^{-03}$	1
4	Sr-89	$1,589 \times 10^{-07}$	$2,58 \times 10^{-04}$	1
1	Kr-90	$2,145 \times 10^{-02}$	$4,72 \times 10^{-02}$	1
2	Rb-90	$4,530 \times 10^{-03}$	$6,76 \times 10^{-03}$	1
3	Sr-90	$7,542 \times 10^{-10}$	$2,82 \times 10^{-04}$	1
4	Y-90	$3,008 \times 10^{-06}$	$2,30 \times 10^{-06}$	1
1	Rb-91	$1,191 \times 10^{-02}$	$5,64 \times 10^{-02}$	1
2	Sr-91	$2,027 \times 10^{-05}$	$2,29 \times 10^{-03}$	0,5800
3	Y-91m	$2,324 \times 10^{-04}$	$2,72 \times 10^{-06}$	1
4	Y-91	$1,371 \times 10^{-07}$	$6,24 \times 10^{-06}$	1
1	Rb-92	$3,767 \times 10^{-01}$	$1,49 \times 10^{-02}$	1
2	Rb-92	$1,547 \times 10^{-01}$	$3,26 \times 10^{-02}$	1
3	Sr-92	$7,105 \times 10^{-05}$	$1,18 \times 10^{-02}$	1
4	Y-92	$5,441 \times 10^{-05}$	$9,81 \times 10^{-05}$	1
1	Kr-93	$5,458 \times 10^{-01}$	$5,05 \times 10^{-03}$	1
2	Rb-93	$1,195 \times 10^{-01}$	$3,03 \times 10^{-02}$	1
3	Sr-93	$1,540 \times 10^{-03}$	$2,70 \times 10^{-02}$	1
4	Y-93	$1,906 \times 10^{-05}$	$9,81 \times 10^{-04}$	1
1	Kr-94	$3,301 \times 10^{-00}$	$2,27 \times 10^{-03}$	1
2	Rb-94	$2,577 \times 10^{-01}$	$1,55 \times 10^{-02}$	1
3	Sr-94	$9,169 \times 10^{-03}$	$4,25 \times 10^{-02}$	1
4	Y-94	$6,048 \times 10^{-04}$	$3,52 \times 10^{-03}$	1
1	Y-95	$1,100 \times 10^{-03}$	$6,42 \times 10^{-02}$	1
2	Zr-95	$1,254 \times 10^{-07}$	$2,95 \times 10^{-04}$	1
3	Nb-95m	$2,223 \times 10^{-06}$	$1,29 \times 10^{-06}$	0,0100
4	Nb-95	$2,282 \times 10^{-07}$	$1,72 \times 10^{-07}$	1
1	Y-97	$6,245 \times 10^{-01}$	$5,06 \times 10^{-02}$	1
2	Zr-97	$1,139 \times 10^{-05}$	$8,74 \times 10^{-03}$	0,9463
3	Nb-97m	$1,155 \times 10^{-02}$	$8,74 \times 10^{-03}$	1
4	Nb-97	$1,602 \times 10^{-04}$	$1,68 \times 10^{-04}$	1

Tabela 3 Continuação

k	NUCLÍDEO	λ [seg ⁻¹]	RENDIMENTO DE FISSÃO	δ_k
1	Nb-99	$4,847 \times 10^{-02}$	$5,92 \times 10^{-02}$	1
2	Mo-99	$2,917 \times 10^{-06}$	$2,87 \times 10^{-03}$	0,8755
3	Tc-99m	$3,199 \times 10^{-05}$	$3,34 \times 10^{-09}$	1
1	Ru-103	$2,042 \times 10^{-07}$	$3,15 \times 10^{-02}$	0,9006
2	Rh-103m	$2,059 \times 10^{-04}$	$1,05 \times 10^{-11}$	1
1	Mo-105	$1,284 \times 10^{-02}$	$9,34 \times 10^{-03}$	1
2	Ru-105	$4,338 \times 10^{-05}$	$2,34 \times 10^{-05}$	1
3	Rh-105m	$1,540 \times 10^{-02}$	$7,30 \times 10^{-09}$	1
4	Rh-105	$5,445 \times 10^{-06}$	$5,20 \times 10^{-05}$	1
1	Ru-106	$2,179 \times 10^{-08}$	$4,17 \times 10^{-03}$	1
2	Rh-106	$2,318 \times 10^{-02}$	$3,96 \times 10^{-09}$	0
1	Sn-127	$9,169 \times 10^{-05}$	$1,01 \times 10^{-03}$	1
2	Sb-127	$2,084 \times 10^{-06}$	$7,46 \times 10^{-05}$	0,1390
3	Te-127m	$7,360 \times 10^{-08}$	$8,93 \times 10^{-07}$	0,9760
4	Te-127	$2,059 \times 10^{-05}$	$5,45 \times 10^{-07}$	1
1	Sb-129	$4,458 \times 10^{-05}$	$6,87 \times 10^{-03}$	0,1307
2	Te-129m	$2,388 \times 10^{-07}$	$1,20 \times 10^{-04}$	0,6500
3	Te-129	$1,660 \times 10^{-04}$	$1,48 \times 10^{-04}$	1
1	Te-131m	$6,418 \times 10^{-06}$	$2,76 \times 10^{-02}$	0,8500
2	Te-131	$4,621 \times 10^{-04}$	$1,19 \times 10^{-03}$	1
3	I-131	$9,978 \times 10^{-07}$	$4,15 \times 10^{-05}$	0,0100
4	Xe-131m	$6,743 \times 10^{-07}$	$1,04 \times 10^{-08}$	1
1	Sn-132	$1,733 \times 10^{-02}$	$5,93 \times 10^{-03}$	1
2	Sb-132	$4,126 \times 10^{-03}$	$1,08 \times 10^{-02}$	1
3	Te-132	$2,462 \times 10^{-06}$	$1,54 \times 10^{-02}$	1
4	I-132	$8,371 \times 10^{-05}$	$2,06 \times 10^{-04}$	1
1	Te-133	$9,279 \times 10^{-04}$	$3,57 \times 10^{-02}$	1
2	I-133	$9,257 \times 10^{-06}$	$1,65 \times 10^{-03}$	0,0288
3	Xe-133m	$3,664 \times 10^{-06}$	$2,67 \times 10^{-05}$	1
4	Xe-133	$1,529 \times 10^{-06}$	$8,79 \times 10^{-06}$	0
1	Sb-134	$6,301 \times 10^{-02}$	$2,70 \times 10^{-03}$	1
2	Te-134	$2,764 \times 10^{-04}$	$6,18 \times 10^{-02}$	1
3	I-134	$2,196 \times 10^{-04}$	$4,57 \times 10^{-03}$	1
1	Te-135	$3,610 \times 10^{-02}$	$3,31 \times 10^{-02}$	1
2	I-135	$2,912 \times 10^{-05}$	$2,98 \times 10^{-02}$	0,1540
3	Xe-135m	$7,556 \times 10^{-04}$	$1,70 \times 10^{-03}$	1
4	Xe-135	$2,118 \times 10^{-05}$	$9,78 \times 10^{-04}$	1
1	I-136	$8,351 \times 10^{-03}$	$3,07 \times 10^{-02}$	0
2	Cs-136	$6,123 \times 10^{-07}$	$1,30 \times 10^{-04}$	0
1	I-137	$2,818 \times 10^{-02}$	$3,26 \times 10^{-02}$	0,9400
2	Xe-137	$3,016 \times 10^{-03}$	$2,87 \times 10^{-02}$	1
3	Cs-137	$7,322 \times 10^{-10}$	$1,25 \times 10^{-03}$	0,9460
4	Ba-137m	$4,527 \times 10^{-03}$	$2,58 \times 10^{-06}$	1
1	I-138	$1,083 \times 10^{-01}$	$1,66 \times 10^{-02}$	1
2	Xe-138	$8,153 \times 10^{-04}$	$4,56 \times 10^{-02}$	1
3	Cs-138	$3,588 \times 10^{-04}$	$3,01 \times 10^{-03}$	1
1	I-139	$2,888 \times 10^{-01}$	$7,36 \times 10^{-03}$	1
2	Xe-139	$1,755 \times 10^{-02}$	$4,35 \times 10^{-02}$	1
3	Cs-139	$1,229 \times 10^{-03}$	$1,31 \times 10^{-02}$	1
4	Ba-139	$1,397 \times 10^{-04}$	$6,71 \times 10^{-04}$	1
1	Xe-140	$5,097 \times 10^{-02}$	$3,62 \times 10^{-02}$	1
2	Cs-140	$1,086 \times 10^{-02}$	$2,23 \times 10^{-02}$	1
3	Ba-140	$6,273 \times 10^{-07}$	$4,29 \times 10^{-03}$	1
4	La-140	$4,787 \times 10^{-06}$	$6,04 \times 10^{-05}$	1
1	Xe-141	$4,030 \times 10^{-01}$	$1,18 \times 10^{-02}$	1
2	Ba-141	$6,324 \times 10^{-04}$	$1,46 \times 10^{-02}$	1
3	La-141	$4,899 \times 10^{-05}$	$1,94 \times 10^{-04}$	1
4	Cs-141	$2,468 \times 10^{-07}$	$2,43 \times 10^{-07}$	1
1	Cs-142	$4,077 \times 10^{-01}$	$2,84 \times 10^{-02}$	1
2	Ba-142	$1,080 \times 10^{-03}$	$2,93 \times 10^{-02}$	1
3	La-142	$1,246 \times 10^{-04}$	$1,00 \times 10^{-03}$	1

Tabela 3 Continuação

k	NUCLÍDEO	λ [seg ⁻¹]	RENDIMENTO DE FISSÃO	δ_k
1	Ba-143	$5,097 \times 10^{-02}$	$5,30 \times 10^{-02}$	1
2	La-143	$8,252 \times 10^{-04}$	$6,01 \times 10^{-03}$	1
3	Ce-143	$5,835 \times 10^{-06}$	$2,85 \times 10^{-04}$	1
4	Pr-143	$5,914 \times 10^{-07}$	$2,95 \times 10^{-08}$	1
1	Ba-144	$6,301 \times 10^{-02}$	$4,25 \times 10^{-02}$	1
2	La-144	$1,733 \times 10^{-02}$	$1,11 \times 10^{-02}$	1
3	Ce-144	$2,822 \times 10^{-08}$	$6,09 \times 10^{-04}$	1
4	Pr-144	$6,684 \times 10^{-04}$	$8,25 \times 10^{-07}$	1
1	Ba-145	$1,118 \times 10^{-01}$	$1,99 \times 10^{-02}$	1
2	La-145	$2,390 \times 10^{-02}$	$1,69 \times 10^{-02}$	1
3	Ce-145	$3,851 \times 10^{-03}$	$2,30 \times 10^{-03}$	1
4	Pr-145	$3,219 \times 10^{-05}$	$9,32 \times 10^{-06}$	1
1	Nd-147	$7,254 \times 10^{-07}$	$2,28 \times 10^{-02}$	1
2	Pm-147	$8,372 \times 10^{-09}$	$2,73 \times 10^{-09}$	1
1	Nd-149	$1,113 \times 10^{-04}$	$1,09 \times 10^{-05}$	1
2	Pm-149	$3,627 \times 10^{-06}$	$3,12 \times 10^{-06}$	1
1	Nd-151	$9,316 \times 10^{-04}$	$4,20 \times 10^{-03}$	1
2	Pm-151	$6,782 \times 10^{-06}$	$1,77 \times 10^{-05}$	1
3	Sm-151	$2,441 \times 10^{-10}$	$3,80 \times 10^{-08}$	0

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Com a solução analítica das equações diferenciais que regem o comportamento dos produtos de fissão no combustível e na água do primário e da piscina para reatores com circulação ascendente no núcleo, foi gerado um programa computacional no CDC-CYBER 180/830 da COPESP, em linguagem FORTRAN e dupla precisão. O programa fornece a atividade específica (Bq/cm³) e total para cada isótopo considerado, bem como a somatória dos mesmos.

Os valores das atividades específicas apresentados nas figuras abaixo, foram obtidos multiplicando-se o número de átomos de cada isótopo da Tabela 3 pela respectiva constante de decaimento, somando-se sobre todos os k de todos os radionuclídeos considerados e depois dividindo-se pelos volumes correspondentes (combustível, água do primário ou da piscina).

Na Figura 2 tem-se a atividade específica dos produtos de fissão no combustível, água do primário e da piscina para o reator operando, durante um ciclo de 28 dias, sem e com escape de produtos de fissão desde o instante t=0; no caso considerou-se as taxas de escape da Tabela 1.

As Figuras 3 e 4 apresentam os valores das atividades específicas da água do circuito primário e da piscina, respectivamente, em função do tempo e com falha do revestimento ocorrida em t=0, levando-se em conta as várias taxas de escape adotadas neste trabalho.

Já as Figuras 5 e 6 representam o comportamento dos produtos de fissão na água do primário e da piscina, respectivamente, mediante uma falha no revestimento do combustível ocorrida nos instantes t=0, 14 e 27 dias e segundo as taxas de escape da Tabela 1.

Com os resultados apresentados podemos observar que, enquanto as variações percentuais nas concentrações dos produtos de fissão no circuito primário e na piscina são dramáticas, no combustível a concentração

praticamente não se altera, com as taxas de escape escolhidas. Comparando-se os patamares de atividade específica da água com e sem escape ilustrado, por exemplo, na Figura 5, podemos identificar aplicações imediatas deste estudo: i) na avaliação da dose por produtos de fissão e sua evolução em seguida a uma falha do revestimento e ii) no estabelecimento de relações entre doses, taxas de escape e eficiência do sistema de purificação na retenção dos produtos de fissão.

PROXIMOS PASSOS

O passo seguinte será acrescentar, ao cálculo da atividade específica da água do primário e da piscina, a contribuição devido à ativação da própria água (denominada intrínseca) e de suas impurezas (produtos de corrosão).

No caso das impurezas da água, a referência [6] leva em consideração dois tipos de fontes: i) isótopos radioativos formados no revestimento dos elementos combustíveis, refletor e internos do reator, que se desprenderam para o refrigerante primário, e ii) isótopos radioativos formados de isótopos não radioativos que se desprenderam para o refrigerante e se ativaram ao passarem pelo núcleo. As equações que regem tal comportamento são do tipo das equações (4) e (6) com metodologia de solução análoga à utilizada neste trabalho.

Para a determinação da atividade induzida no refrigerante deverá ser analisado e, eventualmente adaptado, o modelo de circuito fechado, típico de reator PWR [7].

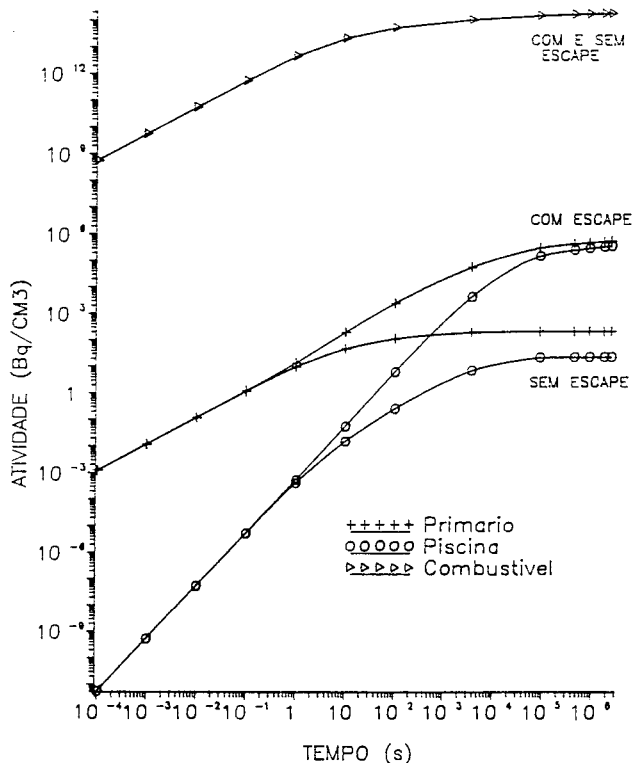


Figura 2 Atividade específica para um ciclo de 28 dias sem e com escape de produtos de fissão devido a uma falha no combustível

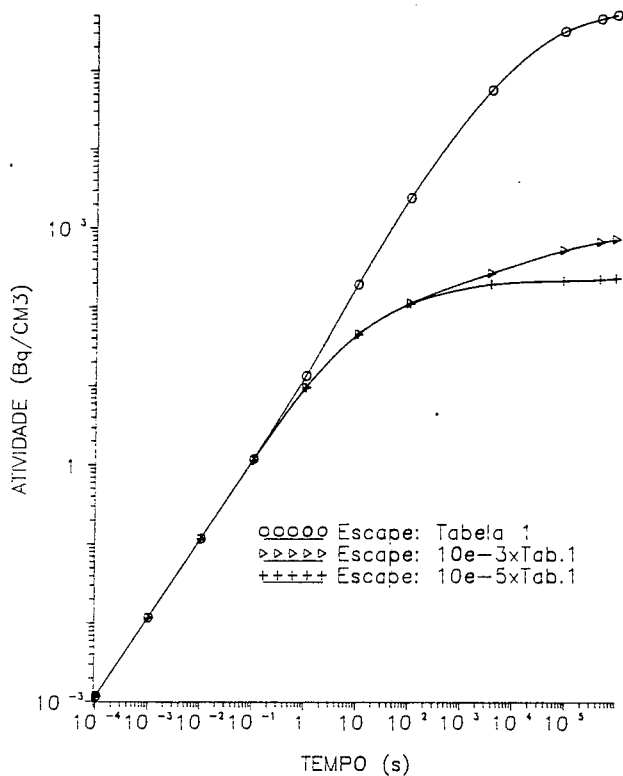


Figura 3 Atividade da água do primário considerando varias taxas de escape devido a uma falha no combustível

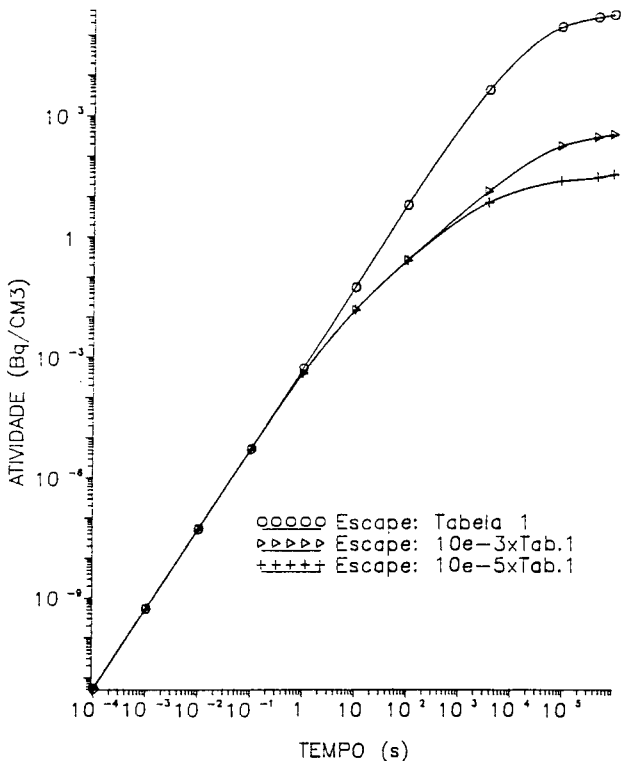


Figura 4 Atividade da água da piscina considerando varias taxas de escape devido a uma falha no combustível

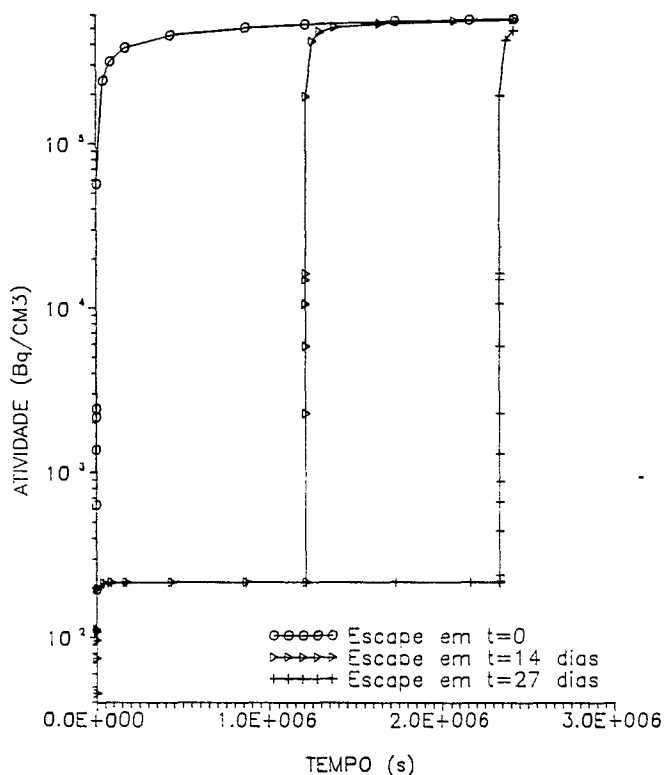


Figura 5 Atividade da água do primário considerando uma falha no combustível ocorrida em $t=0$, 14 ou 27 dias (taxa de escape da Tab.1)

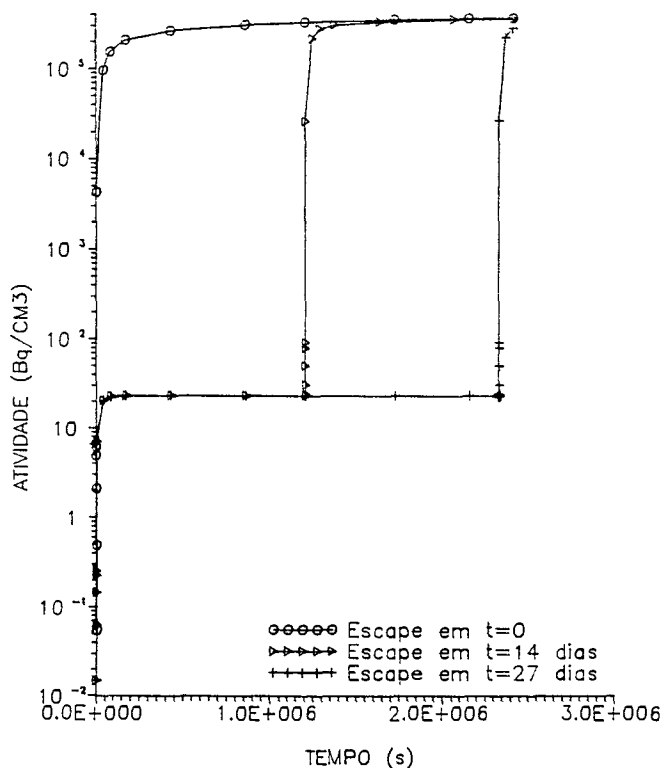


Figura 6 Atividade da água da piscina considerando uma falha no combustível ocorrida em $t=0$, 14 ou 27 dias (taxa de escape da Tab.1)

REFERÊNCIAS

- [1] Reacteur OSIRIS Rapport Descriptif. Avril 1970. (CEA-R-3984).
- [2] BADANINA, N. G.; KONOPLEV, K. A.; SAIKOV, YU.P. Surface contamination of VVR-M fuel elements by fissionable material and its contribution to the fragment activity of the coolant. Atomnaya Énergiya, 32 (4): 316-318, April 1972.
- [3] Progress Report Chemistry and Materials Division, Chalk River, Ontario, Jan. 1 to Mar. 31, 1971. (AECL-3900).
- [4] MONTGOMERY, D. W. The Effects of Fission Product Leakage on the NMSR Plant. May 1958. (BAW-1110).
- [5] American National Standard Radioactive Source Term for Normal Operation of Ligth Water Reactors. ANSI/ANS - 18.1. 1989
- [6] N M S R Project. Determination of the Purification Rate for Normal Operation. June 1958. (BAW-1015 Revised).
- [7] Rockwell, T. L. Reactor Shielding Design Manual. March 1956. (TID-7004).

ABSTRACT

Pool type reactors with ascending flow throught the core, have usually an equilibrium circuit which is responsible for the contamination of the pool and which can be described by a set of coupled differential equations relating the radioactive species in the fuel, core circuit and pool. In this work, a model for the activity due to fission products release to the water of a materials test reactor is presented and analytical solutions are obtained, as functions of the release rate from the fuel and the retention capacity of the reactor purification system.