

BR9023019

ISSN 0101-3084



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

REJEITOS DA CONVERSÃO DO URÂNIO

Roberto VICENTE e José Claudio DELLAMANO

IPEN - PUB - 284 .

PUBLICAÇÃO IPEN 284

DEZEMBRO/1989

SÃO PAULO

REJEITOS DA CONVERSÃO DO URÂNIO

Roberto VICENTE e José Claudio DELLAMANO

DEPARTAMENTO DE CICLO DO COMBUSTÍVEL

**CNEN
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO - BRASIL**

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

E51.00

**CONVERSION
RADIOACTIVE EFFLUENTS
RADIOACTIVE WASTES
REFINING**

IPEN - Doc - 3496

Publicação aprovada pela CNEN em 13/09/89.

Nota: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade do(s) autor(es).

REJEITOS DA CONVERSÃO DO URÂNIO

Roberto VICENTE e José Claudio DELLAMANO

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05499 - São Paulo - BRASIL

RESUMO

Um conjunto de equações matemáticas foi desenvolvido e usado para estimar a significância radiológica de cada radionuclídeo potencialmente presente nos efluentes da conversão. As equações descrevem a evolução das atividades no tempo desde a mineração até a conversão, passando pelo concentrado de urânio. Alguns radionuclídeos que não são monitorados usualmente nos efluentes da conversão (p.ex. Pa-231 e Ac-227) mostram-se potencialmente relevantes do ponto de vista radiossanitário. Esses radionuclídeos são certamente relevantes na indústria de mineração de urânio, pelo menos em alguns fluxos.

URANIUM CONVERSION WASTES

Roberto VICENTE & José Claudio DELLAMANO

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05499 - São Paulo - BRASIL

ABSTRACT

A set of mathematical equations was developed and used to estimate the radiological significance of each radionuclide potentially present in the uranium refining industry effluents. The equations describe the evolution in time of the radionuclides activities in the uranium fuel cycle, from mining and milling, through the yellowcake, till the conversion effluents. Some radionuclides that are not usually monitored in conversion effluents (e.g. Pa-231 and Ac-227) were found to be potentially relevant from the radiological point of view in conversion facilities, and are certainly relevant in mining and milling industry, at least in a few waste streams.

1. INTRODUÇÃO

A atividade dos radionuclídeos (RN) liberados nos efluentes radioativos das instalações de conversão (purificação de urânio e fabricação de UF₆) é considerada pequena quando comparada com a de outras instalações do ciclo do combustível [UN 82] não obstante os volumes gerados se constituírem em uma fração importante dos rejeitos de todo o ciclo. Esses RN pertencem às cadeias naturais de decaimento do urânio e do tório e são provenientes do minério de urânio. Atravessam o processo de beneficiamento, se constituem em impurezas do concentrado de urânio (*), e são encontrados na sua totalidade nos efluentes da conversão.

Alguns destes RN apresentam limites de liberação bastante baixos, o que os torna particularmente importantes do ponto de vista radiossanitário e para a gerência de rejeitos radioativos.

Uma planta modelo de conversão apresenta uma liberação anual de RN da ordem dos valores apresentados na tabela 1.

Estes resultados são típicos da escassa literatura existente sobre rejeitos da conversão. Nela são omitidas informações referentes a vários RN que podem estar presentes em quantidades significativas do ponto de vista radiossanitário. É interessante notar também que a atividade de alguns destes RN aumenta após sua liberação devido ao decaimento dos RN precursores. Este fato justifica a avaliação das atividades em função do tempo para se determinar quando o impacto radiológico decorrente da descarga é máximo.

O controle rotineiro das descargas é prejudicado pela dificuldade de se determinar quantitativamente as concentrações da maioria desses RN. Estas dificuldades são: (1) a concentração em massa é extremamente baixa; (2) o inventário radioquímico pode conter até 36 RN; (3) a espectrometria gama que é usualmente empregada para o controle de efluentes é prejudicada pela baixa frequência de emissão gama da maioria dos RN e além disso os fótons são de baixa energia e há interferência entre os distintos emissores.

Este trabalho visa, dentro deste contexto, criar condições para a determinação do inventário radioquímico dos rejeitos da conversão contribuindo para a eficácia dos métodos de gerência dos rejeitos e para o aprimoramento dos programas de monitoração ambiental e de efluentes radioativos em instalações de conversão.

(*) No presente texto os termos 'concentrado de urânio', 'yellowcake' e 'concentrado' são usados como sinônimos.

O meio que se utilizou para alcançar estes objetivos foi a elaboração de um modelo matemático que descrevesse a evolução das atividades ao longo do tempo, tendo em vista que grande parte dos RN presentes tem meia-vida ($T_{1/2}$) da mesma ordem de grandeza que os tempos envolvidos na dispersão dos efluentes da conversão no ambiente.

O conhecimento desta evolução é essencial para que se possa adotar medidas práticas de gerência de rejeitos, tais como: limitação de descarga; adoção de técnicas alternativas baseadas em análise custo-eficácia; e, para se poder estimar o impacto radiológico das práticas adotadas.

2. MODELO E MÉTODO

Uma fração significativa da atividade do rejeito da conversão está associada aos RN oriundos do minério. Portanto a concentração destes RN no minério, os rendimentos dos processos de extração no beneficiamento e na conversão, a idade do concentrado de urânio que alimenta a instalação de conversão e o tempo em que é feita a avaliação da atividade, influem todos no inventário radioquímico do rejeito.

Um modelo matemático foi desenvolvido para exprimir o inventário radioquímico como o produto de matrizes que representam cada um dos fatores: concentrações no minério (M_k), rendimentos de processos químicos (B_{ik} , P_{ik}) e decaimento radioativo (Y_{ik} , R_{ik}).

Os elementos da matriz resultado (l_k) representam o inventário radioquímico do rejeito:

$$l_k = M_k \times B_{ik} \times Y_{ik} \times P_{ik} \times R_{ik} \quad \text{Eq. 1}$$

onde as variáveis utilizadas estão definidas na tabela 2.

Com exceção da matriz M_k (matriz linha), as demais são matrizes diagonais. O produto destas matrizes resulta na matriz linha l_k , cujos elementos são a solução da equação diferencial:

$$d N_i(t)/dt = - \lambda_i \cdot N_i(t) + \lambda_{i-1} \cdot N_{i-1}(t) \quad \text{Eq. 2}$$

com a condição de que as concentrações para $t = 0$ não são todas nulas.

A solução de Bateman [Ka 78] não foi utilizada porque descreve as atividades dos RN filhos das cadeias de decaimento com a condição inicial

$$A_i(t) = 0 \text{ para } t = 0 \quad \text{Eq. 3}$$

Está condição impõe que as atividades dos filhos sejam nulas no instante inicial, o que não é válido, tendo em vista que alguns RN presentes no minério em equilíbrio com seus precursores, atravessam os processos químicos do ciclo do combustível com rendimento de extração não nulo, estando presentes nos rejeitos da conversão no instante em que são gerados.

Também não se usou as soluções exatas das equações diferenciais porque o ganho na exatidão dos resultados é pequeno comparado com o excesso de complexidade das equações resultantes. Como se verá na análise da exatidão do modelo, alcançou-se uma exatidão aceitável para fins práticos, com equações simplificadas.

Para simplificar o modelo, desprezou-se os termos que contribuíam com um valor arbitrariamente pequeno para a atividade de cada RN dentro dos intervalos de tempo de interesse.

Contudo, não se fez 'a priori', qualquer tentativa de simplificação do trabalho pela redução do número de RN envolvidos. Embora muitos sejam de T_{1/2} curta ou tenham significância radiossanitária baixa, optou-se por manter a cadeia completa com excesso daqueles resultantes de processos de decaimento com probabilidade de ocorrência baixa. O RN desprezado com maior probabilidade de ocorrência tem uma frequência na cadeia de 1,2 %.

Para se poder acompanhar a evolução das atividades ao longo do tempo e passando pelos processos do ciclo do urânio foram elaboradas equações para cada uma das fases (etapas) da vida dos RN: minério, concentrado de urânio e rejeito da conversão. Nestas equações a fase é denotada pelo subscrito j , sendo $j = 1$ para a fase minério, $j = 2$ para a fase concentrado de urânio e $j = 3$ para a fase rejeito da conversão.

É necessário notar que com este modelo se estima a atividade total dos rejeitos da conversão e não propriamente as concentrações, porquanto não se leva em consideração nem os volumes envolvidos, nem o estado físico do rejeito, nem se considera os múltiplos fluxos independentes de efluentes de uma planta de conversão. Determinar as concentrações de cada fluxo em particular será objeto de futuros trabalhos.

Tres grandezas, massa, atividade e número de átomos de cada RN são avaliados no modelo. Estas grandezas são normalizadas de forma distinta em cada fase. Na fase minério os resultados estão normalizados em relação à massa de minério; na fase concentrado de urânio, em relação à massa de yellowcake; e, na fase rejeito da conversão, em relação à massa de UF₆ produzida pela planta. Nas duas primeiras fases as grandezas calculadas podem ser interpretadas como concentrações.

Para efeito de redução do tempo de computação, em cada grupo de RN que tem equação idêntica, a grandeza que é calculada em primeiro lugar é a que apresenta a expressão mais simples, com o menor número de fatores. As outras duas grandezas são calculadas em função desta primeira. Como regra geral, os grupos de RN em que sobrevive somente o termo correspondente à fração que passa pelo processo químico, tem como primeira equação aquela do cálculo da massa; no outro extremo, para aqueles RN em que o termo relevante é o do decaimento do precursor, a primeira equação é a da atividade; e, para os demais, RN com T_{1/2} entre 1 dia e 21 anos, a primeira grandeza calculada é o número de átomos. Uma quarta equação é incluída em cada grupo, para cálculo da atividade em Curies para possibilitar uma comparação imediata entre os valores obtidos e valores de referência expressos nesta unidade.

2.1 - Modelo para a fase minério

Na fase minério, considera-se que há equilíbrio secular entre os RN de cada cadeia e, tendo em vista que a T_{1/2} do urânio e do tório são muito maiores que os tempos considerados no modelo, as concentrações são independentes do tempo. Esta hipótese implica em que o urânio é minerado de uma ocorrência onde a influência dos processos geoquímicos que perturbam aquele equilíbrio já não se fazem mais sentir. Também, a emanação de radônio é suficientemente lenta para que o equilíbrio dos RN descendentes de T_{1/2} significativas (Pb-210, Bi-210 e Po-210) não seja quebrado. As concentrações são avaliadas com base no conhecimento dos teores de urânio e tório no minério.

Este modelo contempla também a hipótese da ocorrência de minerais refratários associados com aqueles beneficiáveis, bastando adotar valores adequados de concentração e de rendimentos de extração no beneficiamento.

As equações que se seguem descrevem o modelo elaborado para esta fase. As propriedades fundamentais e a ordenação dos RN estão indicadas na tabela 3.

concentrações no minério

Eq. 4

$$j = 1$$

$$i = 1, 15, 26$$

$$m(i, j) = 1000 \times \text{TEOR}(i) \times \text{AB}(i)$$

$$N(i, j) = m(i, j) \times \text{NO} / M(i)$$

$$A(i, j) = N(i, j) \times \lambda(i)$$

$$\text{AC}(i, j) = A(i, j) / \text{AO}$$

$$\begin{aligned}
 J &= 1 \\
 i &= 2, 3, \dots, 14, 16, \dots, 25, 27, \dots, 37 \\
 A(i, J) &= A(i-1, J) \\
 N(i, J) &= A(i, J) / \lambda(i) \\
 m(i, J) &= N(i, J) * M(i) / NO \\
 AC(i, J) &= A(i, J) / AO
 \end{aligned}$$

2.2 - Modelo para a fase concentrado

Na elaboração do modelo para esta fase foram desprezados os termos que contribuem com um valor arbitrariamente pequeno para a atividade de cada RN. Esta simplificação é válida somente para intervalos de tempo limitados. O intervalo adotado arbitrariamente para esta fase foi entre 1 E06 e 1 E08 segundos, o que corresponde grosseiramente a um intervalo entre 10 dias e 3 anos.

O concentrado é acondicionado para estocagem e transporte em tambores metálicos selados, o que impede o escape de radônio. Pode-se com isso considerar que há tendência de restabelecimento dos equilíbrios radioativos.

A eliminação de mais ou menos parcelas que contribuem para a solução exata da equação 3 tem um impacto maior ou menor dependendo da razão entre o tempo considerado e a T1/2 do RN. Para T1/2 menores que 1 dia foram desprezados todos os termos com exceção da contribuição do decaimento dos precursores. Para RN com T1/2 superior a 21 anos só foi utilizado o termo correspondente à fração do RN que passou pelo processo de beneficiamento. As equações que descrevem as concentrações dos RN com T1/2 intermediária apresentam todos os termos. Estes RN podem ser agrupados em 3 categorias, em função das T1/2 dos RN precursores. Na primeira o precursor considerado estável é o pai; na segunda é o precursor de segunda geração; e, na terceira é o precursor de terceira geração.

As equações que se seguem estão agrupadas por categoria de RN e descrevem o modelo elaborado para esta fase.

concentrações no yellowcake

Eq. 5

$$\begin{aligned}
 J &= 2 \\
 i &= 1, 4, 5, 6, 12, 15, 17, 18, 26 \\
 m(i, J) &= m(i, J-1) * TEORY * F(i, J) / TEOR(1) \\
 N(i, J) &= m(i, J) * NO / M(i) \\
 A(i, J) &= N(i, J) * \lambda(i) \\
 AC(i, J) &= A(i, J) / AO
 \end{aligned}$$

$$j = 2$$

$$i = 2, 7, 13, 19, 27$$

$$N(i, j) = A(i-1, j) * (1 - \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j))) / \lambda(i) +$$

$$+ N(i, j-1) * F(i, j) * \text{TEORY} * \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j)) / \text{TEOR}(i)$$

$$m(i, j) = N(i, j) * H(i) / \text{NO}$$

$$A(i, j) = N(i, j) * \lambda(i)$$

$$\text{AC}(i, j) = A(i, j) / \text{AO}$$

$$j = 2$$

$$i = 14, 20, 29$$

$$N(i, j) = N(i, j-1) * F(i, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(i) -$$

$$- (N(i-1, j-1) * \lambda(i-1) * F(i-1, j) * \text{TEORY} /$$

$$/ \text{TEOR}(i) - A(i-2, j)) / (\lambda(i) - \lambda(i-1)) -$$

$$- A(i-2, j) / \lambda(i) * \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j)) +$$

$$+ ((N(i-1, j-1) * \lambda(i-1) * F(i-1, j) * \text{TEORY} /$$

$$/ \text{TEOR}(i) - A(i-2, j)) / (\lambda(i) - \lambda(i-1))) * \text{EXP}(-\lambda(i-1) * T(j)) + A(i-2, j) / \lambda(i)$$

$$m(i, j) = N(i, j) * H(i) / \text{NO}$$

$$A(i, j) = N(i, j) * \lambda(i)$$

$$\text{AC}(i, j) = A(i, j) / \text{AO}$$

$$j = 2$$

$$i = 30$$

$$N(i, j) = (\text{ALFA4} / \lambda(i-1) - \text{ALFA1} / (\lambda(i) - \lambda(i-1)) -$$

$$- \text{ALFA2} / (\lambda(i) - \lambda(i-2)) - \text{ALFA3} / \lambda(i)) * \lambda(i-1) * \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j)) + (\lambda(i-1) * \lambda(i-1) * \text{ALFA1} / (\lambda(i) - \lambda(i-1))) * \text{EXP}(-\lambda(i-1) * T(j)) + (\lambda(i-1) * \text{ALFA2} / (\lambda(i) - \lambda(i-2))) * \text{EXP}(-\lambda(i-2) * T(j)) + \lambda(i-1) * \text{ALFA3} / \lambda(i)$$

$$m(i, j) = N(i, j) * H(i) / \text{NO}$$

$$A(i, j) = N(i, j) * \lambda(i)$$

$$\text{AC}(i, j) = A(i, j) / \text{AO}$$

$$\text{ALFA1} = N(i-1, j-1) * F(i-1, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(i) - \text{ALFA2} - \text{ALFA3}$$

$$\text{ALFA2} = (N(i-2, j-1) * \lambda(i-2) * F(i-2, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(i) - A(i-3, j)) / (\lambda(i-1) - \lambda(i-2))$$

$$\text{ALFA3} = A(i-2, j) / \lambda(i-1)$$

$$\text{ALFA4} = N(i, j-1) * F(i, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(i)$$

$$j = 2$$

$$i = 3, 8, \dots, 11, 16, 21, \dots, 25, 28, 31, \dots, 37$$

$$A(i, j) = A(i-1, j)$$

$$N(i, j) = A(i, j) / \lambda(i)$$

$$m(i, j) = N(i, j) * H(i) / \text{NO}$$

$$\text{AC}(i, j) = A(i, j) / \text{AO}$$

2.3 - Modelo para a fase rejeito da conversão

As equações que descrevem as grandezas na fase rejeito da conversão são análogas às da fase anterior.

Deve-se ressaltar que nesta fase não são calculadas concentrações mas sim atividades pois não se levou em conta o volume dos efluentes. Contudo, os resultados estão normalizados em relação à quantidade de UF₆ produzida pela planta. O período de tempo considerado nesta fase é também o intervalo 1 E06 a 1 E08 segundos.

Nesta fase os rendimentos de extração de processos químicos são os da purificação e conversão do urânio e não mais os do beneficiamento.

As equações que se seguem descrevem o modelo elaborado para esta fase, estando agrupadas por categoria de RN, conforme foi explicitado anteriormente.

quantidades nos rejeitos da conversão

Eq. 6

$$J = 3$$

$$i = 1, 4, 5, 6, 12, 15, 17, 18, 26$$

$$m(i, J) = m(i, J-1) * F(i, J) * B / TEORY$$

$$N(i, J) = m(i, J) * NO / H(i)$$

$$A(i, J) = N(i, J) * \lambda(i)$$

$$AC(i, J) = A(i, J) / AO$$

$$J = 3$$

$$i = 2, 7$$

$$N(i, J) = A(i-1, J) * (1 - \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j))) / \lambda(i) +$$

$$+ (N(i, J-1) * F(i, J) * B/TEORY) * \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j))$$

$$m(i, J) = N(i, J) * H(i) / NO$$

$$A(i, J) = N(i, J) * \lambda(i)$$

$$AC(i, J) = A(i, J) / AO$$

$$J = 3$$

$$i = 13, 19, 27$$

$$N(i, J) = (A(i-1, J-1) * (1 - \text{EXP}(-\lambda(i) * (T(j-1) + T(j)))) / \lambda(i) + N(i, J-2) * F(i, J-1) *$$

$$* TEORY * \text{EXP}(-\lambda(i) * (T(j-1) + T(j))) /$$

$$/ TEOR(i)) * B / TEORY$$

$$m(i, J) = N(i, J) * H(i) / NO$$

$$A(i, J) = N(i, J) * \lambda(i)$$

$$AC(i, J) = A(i, J) / AO$$

$$j = 3$$

$$i = 14, 20, 29$$

$$N(i,j) = ((N(i,j-2) * F(i,j-1) * THEORY/TEOR(i) -$$

$$- ALFA5 - A(i-2,j-1) / \lambda(i) * EXP(-\lambda(i) *$$

$$* (T(j-1) + T(j))) + ALFA5 * EXP(-\lambda(i-1) *$$

$$* (T(j-1) + T(j))) + A(i-2,j-1) / \lambda(i)) *$$

$$* B/TEORY$$

$$m(i,j) = N(i,j) * M(i) / NO$$

$$A(i,j) = N(i,j) * \lambda(i)$$

$$AC(i,j) = A(i,j) / AO$$

$$ALFA5 = (N(i-1,j-2) * \lambda(i-1) * F(i-1,j-1) * THEORY /$$

$$TEOR(i) - A(i-1,j-1)) / (\lambda(i) - \lambda(i-1))$$

$$j = 3$$

$$i = 30$$

$$N(i,j) = (ALFA4 / \lambda(i-1) - ALFA1 / (\lambda(i) - \lambda(i-1)) -$$

$$- ALFA2 / (\lambda(i) - \lambda(i-2)) - ALFA3 / \lambda(i)) *$$

$$* \lambda(i-1) * EXP(-\lambda(i) * (T(j-1) + T(j)) +$$

$$+ (\lambda(i-1) * ALFA1 / (\lambda(i) - \lambda(i-1))) *$$

$$* EXP(-\lambda(i-1) * T(j-1)+T(j))) + (\lambda(i-1) *$$

$$* ALFA2 / (\lambda(i) - \lambda(i-2))) * EXP(-\lambda(i-2) *$$

$$* T(j-1) + T(j))) + \lambda(i-1) * ALFA3 / \lambda(i)$$

$$m(i,j) = N(i,j) * M(i) / NO$$

$$A(i,j) = N(i,j) * \lambda(i)$$

$$AC(i,j) = A(i,j) / AO$$

$$j = 3$$

$$i = 3, 8, \dots, 11, 16, 21, \dots, 25, 28, 31, \dots, 37$$

$$A(i,j) = A(i-1,j)$$

$$N(i,j) = A(i,j) / \lambda(i)$$

$$m(i,j) = N(i,j) * M(i) / NO$$

$$AC(i,j) = A(i,j) / AO$$

3. ANÁLISE DA EXATIDÃO DO MODELO

Uma vez que foi utilizada uma aproximação da solução exata, o modelo tem aplicação dentro de um certo intervalo de tempo e com um desvio mensurável. O intervalo de tempo de validade foi prestabelecido, de forma que os erros foram minimizados.

A distribuição dos erros entre os distintos grupos não é uniforme nem homogênea ao longo do tempo. Os desvios são máximos nos extremos do intervalo de validade. As estimativas obtidas tendem a superestimar as atividades. Na tabela 4 estão mostrados os desvios máximos para os RN com desvio não nulo.

Estes erros estão relacionados intrinsecamente com o modelo, e não com os valores adotados para as grandezas utilizadas na computação do inventário.

4. ENSAIO DO MODELO

É interessante verificar, por meio de um exercício com valores hipotéticos, a aplicação do modelo para a determinação do inventário radioquímico dos rejeitos da conversão. Tal exercício permite uma avaliação preliminar da importância radiossanitária de cada RN ao longo do tempo.

A maioria das grandezas utilizadas no modelo têm seus valores já tabelados. Dentre elas podemos citar as massas atômicas (M_i), as constantes de decaimento (λ_i), e as abundâncias isotópicas (AB_i). Os valores de outras grandezas, entretanto, são raramente apresentados. É o caso dos valores do rendimento de extração no beneficiamento (F_{ij} , para $j = 2$). Para a maioria dos RN é dada pouca importância para esta fração que passa para o yellowcake, com exceção do Th-230 e do Ra-226. Os valores são geralmente omitidos em virtude de serem relativamente pequenos. Na tabela 5 estão apresentados valores encontrados na literatura ou derivados dos resultados apresentados por alguns autores. A variabilidade observada nestes valores é, talvez, decorrente de diferenças inerentes aos distintos processos empregados em diferentes instalações de beneficiamento. Os valores são apresentados para alguns RN particulares mas podem ser empregados para os demais isótopos do mesmo elemento, embora esta prática deva ser evitada por causa de diferenças na mineralogia do urânio e do tório [R1B2].

Além dos RN listados na tabela 5, é necessário definir valores dos rendimentos de extração para o Pa-231 e Ac-227 que não são mencionados na literatura. É difícil estimar os rendimentos de extração para estes dois RN, uma vez que, segundo Phillips et al. [Ph73], "o comportamento do protactínio em solução é imprevisível" e "não há métodos químicos analíticos convencionais para o actínio".

Para os isótopos de radônio, foi adotado um rendimento de extração nulo nos processos químicos. No estudo detalhado de cada fluxo de efluentes da conversão, estes RN deverão ser considerados.

Os rendimentos de extração na conversão (F_{ij} , para $j = 3$) podem ser assumidos como sendo todos iguais à unidade. São exceções o urânio, para o qual valores típicos de 0,1% [US74], 0,03 [Fo 85], 0,5 [Wy 79] podem ser adotados e os isótopos de radônio que têm rendimento nulo. Isso significa que todas as impurezas existentes no yellowcake são separadas do urânio nesta fase, indo para o rejeito.

Os rendimentos de extração dos demais RN, no beneficiamento e na conversão são indefinidos para o modelo desenvolvido. A exceção é o Bi-210 para o qual um valor qualquer de rendimento de extração que seja adotado terá influência somente no primeiro mes de vida do concentrado, não influenciando significativamente no inventário do rejeito.

Os teores de urânio e tório no minério e no concentrado (TEOR_i, TEOR_y) são também grandezas cujos valores apresentam grande variabilidade. A escolha de valores para estas grandezas depende da origem e das especificações do concentrado. Contudo, os valores típicos apresentados na literatura são os mostrados na tabela 6.

A título de exemplo, aplicou-se o modelo aos dados apresentados na tabela 7. Estes dados são típicos daqueles resumidos da literatura e no caso do Pa-231, do Ac-227 e do Bi-210 foram adotados valores de F_{ij} iguais aos do Ra-226.

A tabela 8 mostra o inventário nas fases minério, concentrado de urânio e rejeitos da conversão para um minério com alto teor de tório; um concentrado purificado após um ano do beneficiamento; e, para um rejeito com cerca de 10 dias de vida. Este inventário é apresentado em termos de concentrações normalizadas de massa, atividade e número de átomos.

A figura 1 mostra a evolução da atividade ao longo do tempo nas tres fases e para as condições já citadas.

Os resultados mostrados na figura 1 estão apresentados também em termos de risco relativo de cada RN nas figuras 2, 3, 4 e 5. Nas figuras 2, 3 e 4 o índice de risco relativo é a razão entre a atividade e o limite de incorporação anual (LIA) dos RN de cada cadeia. Na figura 5 o índice de risco relativo é a razão entre a atividade e o limite de descarga diário (LDD) dos RN das tres cadeias.

Embora os valores de LIA tenham sido definidos para a limitação de doses em indivíduos ocupacionalmente expostos, foram aqui utilizados como parâmetro para cálculo do índice de risco relativo para indivíduos do público.

Na tabela 3 apresenta-se os valores de LIA e LDD usados nos cálculos, observando-se que são os menores entre os valores tabelados para cada RN, para compostos solúveis e insolúveis do elemento. Na fase concentrado de urânio o índice de risco está normalizado por unidade de massa de concentrado e na fase rejeito da conversão está normalizado por unidade de massa de UF₆ produzido.

5. DISCUSSÃO

O modelo desenvolvido permite avaliar o inventário radioquímico dos rejeitos da conversão, partindo de informações sobre o concentrado de urânio. É possível, também, em princípio, pela determinação de alguns poucos RN por espectrometria gama, inferir todo o inventário. A exatidão dos resultados depende do conhecimento dos rendimentos de extração e teores iniciais. Estes resultados podem ser úteis para quem faz o controle de descarga dos efluentes e a gerência dos rejeitos da conversão.

Deve-se reconhecer que a aplicação prática destes resultados depende ainda de se determinar de que maneira os RN se distribuem nos diferentes fluxos de rejeito numa instalação. O estudo desta distribuição é a continuação natural do presente trabalho.

Os resultados obtidos permitiram também visualizar a importância relativa de cada RN do ponto de vista radiossanitário e portanto do ponto de vista do controle de efluentes. A importância de cada um depende da atividade presente e do grau de risco que representa a sua ingestão.

Para os RN das cadeias naturais, em equilíbrio com os precursores U-238, U-235 e Th-232, a ordem de importância é dada na tabela 9. Deve-se notar que a ordem de importância dos RN das famílias do U-238 e do U-235 pode ser estabelecida 'a priori'. A inclusão do Th-232 na mesma relação depende, contudo, de se estabelecer previamente os teores de U e Th, pois a ordem de importância depende das, e varia com as quantidades relativas de um e de outro.

Além disto, a ordem de importância dos RN nos rejeitos da mineração e da conversão é também afetada pela quebra do equilíbrio secular, pois os processos químicos envolvidos nestas duas etapas, distribuem os elementos químicos diferentemente em cada fluxo resultante. Particularmente no beneficiamento, ela depende drasticamente dos rendimentos do processo e pode ser alterada substancialmente.

A importância radiossanitária de cada RN serviu, e serve como elemento de decisão nos programas de monitoração das descargas de efluentes e na gerência de rejeitos radioativos nas instalações de beneficiamento de minério e de conversão. Ocorre que os valores do LIA de vários RN de interesse foram substancialmente modificados. Para fins de comparação, apresenta-se na tabela 10 os valores recomendados pela IAEA em sua publicação número 9 [IA 67], que foram derivados das concentrações máximas permissíveis dadas pelo ICRP, e os valores atuais recomendados pelo ICRP em sua publicação número 30 [IC 78]

Estes resultados explicam porque os programas de monitoração ambiental e de efluentes priorizavam o controle de U-238, Th-230, Ra-226 e Pb-210 nos efluentes líquidos e nos rejeitos sólidos do beneficiamento e da conversão [US 73, US 74, US 79, Mo 79, Fo 80, IA 81]. Fontes de referência recentes mantêm, contudo, a omissão de RN relevantes, seja na descrição dos ambientes de mineração, seja nos efluentes da conversão [Ri 82, Yu 82, Se 83, Fo 85, IC 85 Fe 88].

Um exemplo disto é o caso do Pa-231. Como já foi citado anteriormente, as referências a este RN na literatura que trata de rejeitos da conversão e do beneficiamento do urânio são escassas. A totalidade dos trabalhos consultados ignora a contribuição do Pa-231 às consequências radio sanitárias dos rejeitos. Este RN, contudo, ocorre na natureza aproximadamente na mesma quantidade que o Ra-226 [Le73] e tem um LIA dez vezes inferior ao do próprio Ra-226. Isto o torna tão importante quanto aquele e por isso merecedor de maior atenção. Nos rejeitos da conversão a sua importância pode eventualmente ser até superior à do Ra-226 tendo em vista que os rendimentos de extração no beneficiamento podem ser até ordens de grandeza diferentes. O Ac-227 é um caso similar. Quando se compara a sua atividade e seu LIA com os do Pb-210, verifica-se que a importância radio sanitária de ambos é da mesma ordem de grandeza, embora somente o Pb-210 mereça atenção na literatura pertinente.

Por meio de análise de concentrados de urânio poderão ser confirmadas ou rejeitadas as hipóteses sobre a relevância dos RN listados como importantes, em especial o Pa-231 e o Ac-227.

Em todo o caso, já está estabelecida a importância destes RN nos rejeitos da mineração e beneficiamento de urânio.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Dra. ELIZA TOMIDA pelas discussões durante a elaboração do trabalho e pela avaliação de alguns dados utilizados no ensaio do modelo.

Agradecemos a EMÍLIA K. NAKAMURA o trabalho de compilação do modelo matemático em linguagem VS Fortran e aplicação do programa SAS Graph aos dados do ensaio do modelo.

Agradecemos a ROBSON FERREIRA DE JESUS a execução das figuras em nanquin.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [Ab 87] ABRXO, A. Experience in yellowcake refining and its conversion to uranium tetrafluoride at IPEN-CNEN/SP. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Advances in uranium refining and conversion. IAEA, Vienna, 1987. (IAEA-TECDOC-420).
- [Ba 79] BARBOSA, E.M.S. Análise do comportamento da usina piloto de purificação de urânio considerando-se a introdução da coluna de extração 2 no fluxo-grama do processo. Recife, 1979. (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco).
- [Ca 70] CALMON COSTA, E.; BATISTA, H.F.; CASTRO, L.O.; OLIVEIRA, A.G. Processing a molybdenum-uranium ore from the Poços de Caldas Plateau. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. The recovery of uranium: proceedings of a symposium on ... held at São Paulo, Aug. 17-21, 1970. IAEA, Vienna, 1970. p. 67-78. (IAEA-SM-135/20).
- [Cl 74] CLARK, D.A. State-of-the-art: uranium mining, milling, and refining industry. Robert S. Kerr Environ. Res. Lab. Oklahoma, 1974. (PB-235.557).
- [CN 85] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas. Nov. 1985 (Norma CNEN-NE-6.05).
- [CN 86] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes básicas de radioproteção. 1986. (Projeto de Norma Experimental CNEN-NE-3.01).
- [Co 75] COSTELLO, J.M. Wastes and waste management in the uranium fuel cycle for light water reactors. 1975. (AAEC/E-364).
- [Fe 88] FERREIRA, E.G. Criteria for requesting specific radionuclide analysis through gross alpha and beta concentration measurements in environmental samples. In: CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. Proteção radiológica e controle ambiental: proceedings of a seminar on ... held at Belo Horizonte, 8-12 agosto 1988. Nuclebrás, 1988. p. 90-101.
- [FJ 74] FLOH, B.; ABRXO, A.; COSTA, E.C. Separação de urânio e molibdênio em meio sulfúrico por extração com amina 336. In: COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Minérios brasileiros de urânio: anais da 1ª reunião sobre ... realizada no Rio de Janeiro, 25-28 de junho, 1974. Rio de Janeiro, 1974. p. 277-85.

- [Fo 80] FORT, C.W.. Radioactive emissions from yellowcake processing stacks at uranium mills. US Environmental Protection Agency Technical Note, 1980. (ORP/LV-80-3) apud LING, R.J. & LEVINS, D.M. Radionuclides in process and wastes streams at operating uranium mill. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of wastes from uranium mining and milling: proceedings of a symposium on ... held at Albuquerque, 10-14 May, 1982. IAEA, Vienna, 1982. p. 247-61.
- [Fo 85] FORSBERG, C.W. Flow-sheets and source-terms for radioactive projections. March, 1985. (ORNL-TM-8462).
- [Hu 81] HUBELE, N.D. The distribution of radium, thorium and polonium during uranium milling operations. In: AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. Students conference for the western states: proceedings. La Grange Park, 1981. p.37-41. (DOE/IR/02420--1).
- [IA 67] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Basic safety standards for radiation protection. IAEA, Vienna, 1967. (Safety Series no. 9).
- [IA 81] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of wastes from the refining and conversion of uranium ore concentrates to uranium hexafluoride. Vienna, 1981. (IAEA-TECDOC-241).
- [IC 78] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Limits for intake of radionuclides by workers. Oxford, Pergamon, 1978. (ICRP-PUB No. 30).
- [IC 81] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Limits for inhalation of radon daughters by workers. Oxford, Pergamon, 1981. (ICRP-PUB No. 32).
- [IC 83] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Radionuclides transformations. Oxford, Pergamon, 1983. (ICRP Publication 38).
- [IC 85] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Radiation protection of workers in mines. Oxford, Pergamon, 1985. (ICRP Publication 47)
- [Ka 78] KAPLAN, I. Física nuclear. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1978.
- [Le 73] LEE, J.A. & MARPLES, J.A.C. The elements. In: BAILAR JR., J.C.; EMELEUS, H.J.; NYHOLM, R.; TROTMAN-DICKENSON, A.F., eds. Comprehensive inorganic chemistry. Vol.5 Actinides. Oxford, Pergamon, 1973. p. 5-73.

- [Le 78] LEDERER, C.M.; SHIRLEY, V.S., eds. Table of isotopes 7. ed. New York, John Wiley, 1978.
- [Mo 79] MOFFETT, D. Characterization and disposal of radioactive effluents from uranium mining. CIM Bull. June 1979. p. 152-6.
- [O] 74] OLIVEIRA, A.G. Mineralização de urânio e molibdênio no Planalto de Poços de Caldas, MG. In: COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Minérios brasileiros de urânio: análise da 1ª Reunião sobre ... realizada no Rio de Janeiro, 25-28 junho, 1974. Rio de Janeiro, 1974. p. 15-48.
- [Ph 73] PHILLIPS, G. & MILNER, G.W.C. Analytical chemistry. In: BAILLAR Jr., J.C.; EMELEUS, H.J.; NYHOLM, R.; TROTMAN-DICKENSON, A.F., eds. Comprehensive inorganic chemistry. vol.5, Actinides. Oxford, Pergamon, 1973. p. 75-102.
- [R] 82] RING, R.J. & LEVINS, D.M. Radionuclides in process and waste streams at operating uranium mill. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of wastes from uranium mining and milling. Proceedings of a symposium on ... held at Albuquerque, 10-14 May, 1982. IAEA, Vienna, 1982. p. 247-61.
- [Se 81] SEELMAN-EGGEBERT, W.; PFENNIG, G.; MUNZEL, H.; KLEWE-NEBENIUS, H. Chart of the nuclides. Kernforschungszentrum Karlsruhe, 5th. ed., 1981.
- [Se 83] SEARS, M.B.; ETNIER, E.L. Correlation of radioactive waste treatment costs and the environmental impact of waste effluents in the nuclear fuel cycle- Part 2: The solvent extraction-fluorination process. Oak Ridge, 1983. (ORNL-TM-8602).
- [UN 82] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS. Ionizing radiation: sources and biological effects. United Nations, New York, 1982. p.255
- [US 70] UNITED STATES DEPARTMENT OF HEALTH, EDUCATION AND WELFARE Radiological health handbook. 1970.
- [US 73] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Environmental analysis of the uranium fuel cycle. Part 1 - fuel supply. Washington, USEPA, 1973. (EPA-520-9-73-3-B).
- [US 74] UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION. Environmental survey of the uranium fuel cycle. Washington, 1974. (WASH-1248).

- (US 79) UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
Radiological impact caused by emissions of radionuclides into air in United States. 1979. (EPA-520/7-79-6).
- (US 80) UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION.
Radiological effluents and environmental monitoring at uranium mills. Washington, 1980. (Regulatory Guide 4.14).
- (US 88) UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION.
Standards for protection against radiation. Washington, Sept. 1988. (10 CFR 20, App. B).
- (We 73) WEAST, R.C. ed. Handbook of chemistry and physics. 54. ed. Ohio, Chemical Rubber Publishing. 1973.
- (Wy 79) WYMER, R.G. Technology of the light water reactor fuel cycle. Tennessee, 1979. (CONF-790332-1).
- (Yu 82) YUAN, Y.C. & ROBERTS, C.J. Comparative assessment of radiological impact from uranium and thorium mining and milling. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of wastes from uranium mining and milling. Proceedings of a symposium on ... held at Albuquerque, 10 - 14 May, 1982. IAEA, Vienna, 1982. p. 247-61.

Tabela 1 - Atividades típicas dos RN liberados nos efluentes da Conversão.

RN	Atividade (Ci/ano)		
	(US 79)	(US 74)	(US 73)
U-238	8,3 E-02	1,2 E 00 (1) 4,0 E 03 (g)	2,0 E 00 (1) 2,0 E-02 (g1) 8,0 E-03 (gs)
U-234	8,3 E-02	-	-
U-235	2,0 E-03	-	-
Th-234	8,2 E-02	-	-
Pa-234	8,2 E-02	-	-
Th-230	9,3 E-04	4,0 E-02	6,0 E-04
Ra-226	6,7 E-05	9,4 E-02	6,0 E-03
Rn-222	9,2 E 00	-	-

(1) efluente líquido;

(g) efluente gasoso;

(g1) efluente gasoso, composto insolúvel;

(gs) efluente gasoso, composto solúvel.

Tabela 2 - Definição das variáveis empregadas no texto.

Símbolo	Definição
A_i(t)	Atividade do RN _i em função do tempo;
A_(i,j)	Atividade normalizada do RN _i na fase _j do ciclo do combustível, expressa em Bq/ton;
AC_(i,j)	Atividade normalizada do RN _i na fase _j do ciclo do combustível, expressa em Ci/ton;
AB_(i)	Abundância isotópica natural do RN _i ;
ALFAs	Variáveis auxiliares, com _s variando de 1 a 5;
AD	Constante de transformação de unidades de Bq para Ci; cujo valor é 3,7 E+10 Bq/Ci;
B	Razão entre a massa de urânio no UF ₆ e a massa deste composto, cujo valor é 0,69;
B_{ik}	Matriz cujos elementos são os rendimentos de extração de cada RN _i ou _k no beneficiamento do minério;
F_(i,j)	Rendimento de processo. Indica a fração da massa do RN _i que passa da fase _{j-1} para a fase _j ;
i, k	Índices que determinam o RN; i, k = 1...37;
J	Índice que determina a fase do ciclo; J = 1, 2, 3;
M_(i)	Massa atômica do RN _i ;
m_(i,j)	Massa normalizada do RN _i na fase _j do ciclo do combustível, expressa em kg/ton;
M_k	Vetor cujos elementos são as concentrações dos RN _k no minério;

(cont.)

Tabela 2 - (continuação)

Símbolo	Definição
$N(i, j)$	Número de átomos normalizado do RN i na fase j do ciclo do combustível, expresso em átomos/ton;
$N_i(t)$	Número de átomos do RN i em função do tempo;
N_0	Constante de Avogrado; $6,023 \text{ E}+23$;
P_{ik}	Matriz cujos elementos são os rendimentos de extração de cada RN i ou k na purificação do concentrado;
Q_k	Vetor cujos elementos são as quantidades de cada RN no rejeito da conversão;
R_{ik}	Matriz de transformação do inventário do rejeito de um instante inicial para um tempo qualquer;
t	Instante em que é definido o valor de uma variável dependente do tempo;
$T(j)$	Tempo decorrido desde o início da fase j ; expresso em s ;
$TEOR(i)$	Teor do elemento a que pertence o RN i no minério de U ; expresso em ton/ton de minério;
$TEORY$	Teor de urânio no concentrado; expresso em ton/ton de yellow-cake;
Y_{ik}	Matriz de transformação do inventário do concentrado de um instante inicial para um tempo qualquer;
$\lambda(i)$	Constante de decaimento do RN i ; expressa em $1/s$;

Tabela 3 - Ordenação e propriedades dos RN.

i	RN	T 1/2 [Se 81]	LDD (Ci) [US 88] [CN 85]	LIA (Bq) [IC 78] [CN 86]	radiação energia (MeV) abundância [Ue 73]
1	U-238	4,468 E+09 A	0,1	5 E+05	α : 4,20 (77%) 4,15 (23%) γ : 0,05 (23%)
2	Th-234	24,1 E 00 D	1000	1 E+07	β ⁻ : 0,20 (72%) 0,10 (21%) 0,06 (5%) + γ : 0,03 (4%) 0,09 (3%) 0,09 (3%)
3	Pa-234	1,2 E 00 H	-	-	β ⁻ : 2,29 (98%)
4	U-234	2,446 E+05 A	0,1	4 E+05	α : 4,77 (72%) 4,72 (28%)
5	Th-230	7,540 E+04 A	0,1	1 E+05	α : 4,68 (70%) 4,62 (24%)
6	Ra-226	1,6 E+03 A	0,1	7 E+04	α : 4,78 (94%) 4,60 (6%) * γ : 0,19 (4%)
7	Rn-222	3,825 E 00 D	0,1	4 E+08	α : 5,49(100%)
8	Po-218	3,05 E 00 H	-	-	α : 6,00(100%)
9	Pb-214	26,8 E 00 H	-	3 E+08	* β ⁻ : 0,65 (50%) 0,71 (40%) 0,98 (6%) * γ : 0,24 (4%) 0,30 (19%) 0,35 (36%)

A=ano, U=dia, H=hora, M=minuto, S=segundo

(cont.)

Tabela 3 - (Continuação)

i	RN	T 1/2 [Se 81]	LDD (Ci) [US 88] [CN 85]	LIA (Bq) [IC 78] [CN 86]	radiação energia (MeV) abundância [We 73]
10	Bi-214	19,9 E 00 M	-	6 E+08	β^- : 1,06 (8%) 1,14 (5%) 1,41 (8%) 1,50 (19%) 1,51 (19%) 1,88 (10%) 2,65 (5%) 3,26 (19%) γ : 0,61 (47%) 0,77 (5%) 1,12 (16%) 1,24 (6%) 1,76 (17%)
11	Po-214	164 E-06 S	-	-	α : 7,69(100%)
12	Pb-210	22,3 E 00 A	1,0	2 E+04	β^- : 0,02 (81%) 0,06 (19%) γ : 0,05 (4%)
13	Bi-210	5,013 E 00 D	10	3 E+07	β^- : 1,16 (99%)
14	Po-210	138,4 E 00 D	1,0	1 E+05	* α : 5,30(100%)
15	U-235	7,038 E+08 A	0,1	5 E+05	α : 4,60 (5%) 4,56 (4%) 4,42 (4%) 4,40 (57%) 4,37 (18%) 4,22 (6%) γ : 0,14 (11%) 0,16 (5%) 0,18 (54%) 0,20 (5%)
16	Th-231	25,5 E 00 H	1,0	1 E+08	β^- : 0,30 (39%) 0,22 (33%) 0,13 (20%) 0,09 (8%) γ : 0,06 (6%) 0,08 (13%) 0,08 (7%) 0,08(100%) 0,09 (15%) 0,10 (7%)

λ =ano, D=dia, H=hora, M=minuto, S=segundo

(cont.)

Tabela 3 - (Continuação)

I	RN	T 1/2 [Se 81]	LDD	LIA	radiação
			(Ci)	(Bq)	energia (MeV)
			[US 88]	[IC 78]	abundância
			[CN 85]	[CN 86]	[We 73]
17	Pa-231	3,276 E+04 A	0,1	7 E+03	α : 5,05 (11%) 5,02 (22%) 5,00 (25%) 4,94 (23%) 4,73 (8%) * γ : 0,29 (6%) 0,03 (6%)
18	Ac-227	21,77 E 00 A	0,1	7 E+03	β^- : 0,04 (99%)
19	Th-227	18,72 E 00 D	0,1	5 E+06	α : 6,04 (24%) 5,98 (23%) 5,75 (20%) 5,71 (8%) γ : 0,05 (10%) 0,24 (12%) 0,26 (6%)
20	Ra-223	11,43 E 00 D	0,1	2 E+05	α : 5,74 (9%) 5,71 (54%) 5,60 (26%) 5,54 (9%) γ : 0,15 (6%) 0,27 (10%) 0,33 (5%)
21	Rn-219	3,96 E 00 S	-	-	α : 6,82 (81%) 6,55 (12%) 6,42 (7%) γ : 0,27 (9%) 0,40 (6%)
22	Po-215	1,78 E-03 S	-	-	α : 7,38 (100%)
23	Pb-211	36,1 E 00 M	-	4 E+08	β^- : 0,53 (6%) 1,36 (92%) * γ : 0,40 (3%) 0,43 (2%) 0,83 (3%)
24	Bi-211	2,17 E 00 M	-	-	α : 6,28 (16%) 6,62 (84%) γ : 0,35 (16%)
25	Tl-207	4,77 E 00 M	-	-	β^- : 1,44 (100%)

A=ano, D=dia, H=hora, M=minuto, S=segundo

(cont.)

Tabela 3 - (Continuação)

i	RN	T 1/2 [Se 81]	LDD (Ci) [US 88] [CN 85]	LIA (Bq) [IC 78] [CN 86]	radiação energia (MeV) abundância [Ve 73]
26	Th-232	1,405 E+10 A	0,1	3 E+04	α : 3,99 (77%) 3,94 (23%)
27	Ra-228	5,75 E 00 A	1,0	9 E+04	β ⁻ : 0,02 (30%) 0,05 (70%)
28	Ac-228	6,13 E 00 H	1,0	9 E+07	β ⁻ : 0,45 (13%) 0,62 (6%) 1,18 (53%) 1,70 (7%) 1,76 (20%) 2,10 (13%) *γ : 0,34 (15%) 0,91 (25%) 0,96 (20%)
29	Th-228	1,913 E 00 A	0,1	2 E+05	α : 5,42 (71%) 5,34 (28%) γ : 0,08 (2%)
30	Ra-224	3,66 E 00 D	0,1	3 E+05	α : 5,68 (94%) 5,48 (6%) γ : 0,24 (4%)
31	Rn-220	55,6 E 00 S	0,1	# 6 E+08	α : 6,29(100%)
32	Po-216	0,15 E 00 S	-	-	α : 6,78(100%)
33	Pb-212	10,64 E 00 H	1,0	3 E+06	β ⁻ : 0,17 (5%) 0,35 (81%) 0,59 (14%) γ : 0,24 (47%) 0,30 (3%)
34	Bi-212A	60,60 E 00 H	1,0	2 E+08	β ⁻ : 0,67 (2%) 0,93 (1%) 1,55 (5%) 2,27 (54%) *γ : 0,04 (2%) 0,73 (7%) 1,62 (2%)
35	Bi-212B	25,00 E 00 H	1,0	2 E+08	α : 6,05 (25%) 6,09 (10%)
36	Po-212	0,3 E-06 S	-	-	α : 8,78(100%)

A=ano, D=dia, H=hora, M=minuto, S=segundo

(cont.)

Tabela 3 - (Continuação)

i	RN	T 1/2 [Se 81]	LDD (Ci) [US 88] [CN 85]	LIA (Bq) [IC 78] [CN 86]	radiação energia (MeV) abundância [We 73]
37	Tl-208	3,053 E 00 H	-	-	β^- : 1,04 (4%) 1,29 (74%) 1,52 (23%) 1,79 (49%) γ : 0,51 (23%) 0,58 (86%) 0,86 (12%) 2,61 (100%)

A=ano, D=dia, H=hora, M=minuto, S=segundo

⊕ = [Le 78]; * = [US 70]; # = [IC 81]; + = [IC 83]

Tabela 4 - Desvios máximos, no instante indicado, devido às aproximações do modelo.

RN	T(3) (s)	Emáx (%)	RN	T(3) (s)	Emáx (%)
6 Ra-226	1 E 08	0,18	16 Th-231	1 E 06	12,
7 Rn-222	1 E 08	0,18	18 Ac-227	1 E 08	12,
8 Po-218	1 E 08	0,18	19 Th-227	1 E 08	12,
9 Pb-214	1 E 08	0,18	20 Ra-223	1 E 08	12,
10 Bi-214	1 E 08	0,18	21 Rn-219	1 E 08	12,
11 Po-214	1 E 08	0,18	22 Po-215	1 E 08	12,
12 Pb-210	1 E 08	12,	23 Pb-211	1 E 08	12,
13 Bi-210	1 E 08	12,	24 Bi-211	1 E 08	12,
14 Po-210	1 E 08	12,	24 Tl-207	1 E 08	12,

Tabela 5 - Rendimentos de extração anotados da literatura

=====

F(1,j), j = 2, (%)

Autor	U-238	Th-230	Ra-226	Pb-210	Po-210
Co 75	-	-	0,1	-	-
US 74	-	2,0	0,2	-	-
Ri 82	-	0,14	0,005	0,002	0,0005
Fo 80 *	-	0,14 1,0	0,0005 0,04	0,005 0,04	-
Se 83 *	-	1,0 5,0	0,007 0,6	-	-
IA 81 *	-	1,0 3,3	0,007 0,14	-	-
Yu 82	93	-	-	-	-
Hu 81	-	-	0,1 0,2	-	0,0006
Cl 74	-	-	0,05 0,1	-	-

* Os valores indicam a faixa de variação da grandeza.

Tabela 6 - Teores de urânio e tório no minério e no concentrado, anotados da literatura.

Autor	TEOR(1) # (%)	TEOR(26) (%)	TEORY (%)	TeorY 26 * (%)
Ol 74	0,15	0,01 - 0,03	-	-
Fl 74	0,19	-	-	-
US 79	-	-	75	2
UN 82	0,08 - 2,5	0,2	-	-
Co 75	0,1	-	76	-
Ab 87	-	-	-	0,26 - 7,0
Ri 82	2,4	-	-	-
Yu 82	0,08	0,26	-	-
Ca 70	0,04 - 0,6	-	-	-
EI 79	-	-	67	2,6 - 7,0
IA 81	-	-	60 - 80	0,07
CI 74	0,22	-	-	-

TEOR(1) = TEOR(15)

* TeorY 26 significa os teores de Th-232 no yellowcake.

Tabela 7 - Dados de entrada para o ensaio do modelo.

i	RN	λ (s ⁻¹)	M (kg)	F(i,j) j=2	F(i,j) j=3
1	U-238	4,918 E-18	0,238	0,95	0,002
2	Th-234	3,329 E-07	0,234	0,02	1,0
3	Pa-234	9,874 E-03	0,234	-	-
4	U-234	8,986 E-14	0,234	0,95	0,002
5	Th-230	2,915 E-13	0,230	0,02	1,0
6	Ra-226	1,374 E-11	0,226	0,002	1,0
7	Rn-222	2,097 E-06	0,222	0,0	0,0
8	Po-218	3,788 E-03	0,218	-	-
9	Pb-214	4,311 E-04	0,214	-	-
10	Bi-214	5,804 E-04	0,214	-	-
11	Po-214	4,227 E+03	0,214	-	-
12	Pb-210	9,856 E-10	0,210	0,001	1,0
13	Bi-210	1,600 E-06	0,210	0,001	1,0
14	Po-210	5,797 E-08	0,210	0,001	1,0
15	U-235	3,123 E-17	0,235	0,95	0,002
16	Th-231	7,551 E-06	0,231	0,02	1,0
17	Pa-231	6,709 E-13	0,231	0,002	1,0
18	Ac-227	1,010 E-09	0,227	0,002	1,0
19	Th-227	4,286 E-07	0,227	0,02	1,0
20	Ra-223	7,019 E-07	0,223	0,002	1,0
21	Rn-219	1,750 E-01	0,219	0,0	0,0
22	Po-215	3,894 E+02	0,215	-	-
23	Pb-211	3,200 E-04	0,211	-	-
24	Bi-211	5,324 E-03	0,211	-	-
25	Tl-207	2,422 E-03	0,207	-	-
26	Th-232	1,564 E-18	0,232	0,02	1,0
27	Ra-228	3,823 E-09	0,228	0,002	1,0
28	Ac-228	3,141 E-05	0,228	0,002	1,0
29	Th-228	1,149 E-08	0,228	0,02	1,0
30	Ra-224	2,192 E-06	0,224	0,002	1,0
31	Rn-220	1,247 E-02	0,220	0,0	0,0
32	Po-216	4,621 E 00	0,216	-	-
33	Pb-212	1,810 E-05	0,212	-	-
34	Bi-212A	1,906 E-04	0,212	-	-
35	Bi-212B	4,621 E-04	0,212	-	-
36	Po-212	2,310 E+06	0,212	-	-
37	Tl-208	3,727 E-03	0,208	-	-

TEOR(1) = TEOR(15) = 0,002; TEOR(26) = 0,002; TEOR(37) = 0,75
 AB(1) = 0,9928; AB(15) = 0,0072; AB(26) = 1,0

Tabela 8 - Inventário radioquímico das fases minério, concentrado e rejeito da conversão.

FABRICAÇÃO	ATIVIDADE (Bq/TON)			ATIVIDADE (Ci/TON)			CONCENTRAÇÃO Nº DE ÁTOMOS POR TONELADA			CONCENTRAÇÃO DE MASSA (Kg/TON)		
	MINERIO	CONCENTR	UF6	MINERIO	CONCENTR	UF6	MINERIO	CONCENTR	UF6	MINERIO	CONCENTR	UF6
1 U-238	2.47E+07	8.80E+09	1.42E+07	6.68E-04	2.38E-01	4.38E-04	5.02E+24	1.79E+27	3.29E+24	1.49E+00	7.37E+02	1.30E+00
2 TH-234	2.47E+07	8.80E+09	5.08E+09	6.68E-04	2.38E-01	1.84E-01	7.42E+13	2.64E+16	1.83E+16	2.88E-11	1.03E-08	7.09E-09
3 PA-234	2.47E+07	8.80E+09	8.08E+09	6.68E-04	2.38E-01	1.84E-01	2.50E+19	8.42E+11	6.16E+11	9.72E-16	3.46E-13	2.39E-13
4 U-234	2.47E+07	8.80E+09	1.62E+07	6.68E-04	2.38E-01	4.38E-04	2.75E+20	9.80E+22	1.80E+20	1.07E-04	3.81E-02	7.00E-05
5 TH-230	2.47E+07	1.85E+08	1.71E+04	6.68E-04	5.01E-04	4.61E-03	2.48E+19	6.36E+20	5.85E+20	3.24E-05	2.43E-04	2.23E-04
6 RA-226	2.47E+07	1.85E+07	1.71E+07	6.68E-04	5.01E-04	4.61E-04	1.80E+18	1.35E+18	1.24E+18	6.75E-07	5.06E-07	4.66E-07
7 RN-222	2.47E+07	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	1.18E+13	8.84E+12	6.80E+12	4.34E-12	3.26E-12	2.51E-12
8 PO-214	2.47E+07	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	6.52E+09	4.89E+09	3.77E+09	2.36E-15	1.77E-15	1.36E-15
9 PU-214	2.47E+07	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	5.73E+10	4.30E+10	3.21E+10	2.04E-14	1.53E-14	1.18E-14
10 BI-214	2.47E+07	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	4.26E+10	3.19E+10	2.46E+10	1.51E-14	1.13E-14	8.73E-15
11 PO-214	2.47E+07	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	4.85E+03	4.38E+03	3.37E+03	2.08E-21	1.56E-21	1.20E-21
12 PU-210	2.47E+06	9.27E+06	3.53E+06	6.68E-04	2.50E-04	2.30E-04	2.51E+16	9.43E+15	8.65E+15	8.74E-09	3.28E-04	3.02E-09
13 BI-210	2.47E+07	9.27E+06	3.53E+06	6.68E-04	2.50E-04	2.30E-04	1.54E+13	5.79E+12	5.33E+12	5.39E-12	2.02E-12	1.86E-12
14 PO-210	2.47E+07	9.27E+06	3.53E+06	6.68E-04	2.50E-04	2.30E-04	4.26E+14	1.69E+14	1.47E+14	1.49E-10	5.97E-11	5.13E-11
15 U-235	1.15E+06	4.11E+08	7.56E+05	3.12E-05	1.11E-02	2.34E-05	3.69E+22	1.31E+25	2.42E+22	1.44E-02	5.13E+00	9.44E-03
16 TH-231	1.15E+06	4.11E+08	7.56E+05	3.12E-05	1.11E-02	2.04E-05	1.53E+11	5.44E+13	1.03E+11	5.85E-14	2.09E-11	3.84E-14
17 PA-231	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	1.72E+18	1.29E+18	1.19E+18	6.59E-07	4.94E-07	4.55E-07
18 AC-227	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	1.14E+15	8.56E+14	7.87E+14	4.30E-10	3.23E-10	2.97E-10
19 TH-227	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	2.69E+12	2.02E+12	1.86E+12	1.01E-12	7.60E-13	6.99E-13
20 RA-223	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	1.64E+12	1.23E+12	1.13E+12	6.08E-13	4.56E-13	4.20E-13
21 RN-219	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	6.59E+06	4.94E+06	4.54E+06	2.39E-18	1.80E-18	1.65E-18
22 PO-215	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	2.76E+03	2.22E+03	2.04E+03	1.06E-21	7.92E-22	7.29E-22
23 PU-211	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	3.60E+09	2.73E+09	2.49E+09	1.26E-15	9.44E-16	8.71E-16
24 BI-211	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	2.16E+08	1.62E+08	1.49E+08	7.58E-17	5.69E-17	5.23E-17
25 TL-207	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	4.76E+08	3.57E+08	3.28E+08	1.64E-16	1.23E-16	1.13E-16
26 TH-232	8.12E+06	6.09E+07	5.60E+07	2.19E-04	1.65E-04	1.51E-03	5.19E+24	3.89E+25	3.58E+25	2.00E+00	1.50E+01	1.38E+01
27 RA-228	8.12E+06	1.22E+07	1.14E+07	2.19E-04	3.31E-04	3.08E-04	1.12E+15	3.20E+15	2.98E+15	8.04E-10	1.21E-09	1.13E-09
28 AC-223	8.12E+06	1.22E+07	1.14E+07	2.19E-04	3.31E-04	3.08E-04	2.59E+11	3.90E+11	3.63E+11	9.79E-14	1.47E-13	1.37E-13
29 TH-229	8.12E+06	4.63E+07	4.23E+07	2.19E-04	1.29E-03	1.14E-03	7.07E+14	4.03E+15	3.68E+15	2.68E-10	1.52E-09	1.39E-09
30 RA-224	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	3.79E+12	2.12E+13	2.10E+13	1.38E-12	7.88E-12	7.82E-12
31 RN-220	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	6.51E+08	3.73E+09	3.70E+09	2.38E-16	1.36E-15	1.35E-15
32 PO-216	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	1.76E+06	1.01E+07	9.58E+06	6.30E-19	3.61E-18	3.58E-18
33 PU-212	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	4.49E+11	2.57E+12	2.55E+12	1.58E-13	9.03E-13	8.97E-13
34 BI-212A	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	4.26E+10	2.44E+11	2.42E+11	1.50E-14	9.58E-14	8.52E-14
35 BI-212B	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	1.76E+10	1.01E+11	9.58E+10	6.14E-15	3.54E-14	3.51E-14
36 PU-212	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	3.52E+00	2.01E+01	2.00E+01	1.24E-24	7.08E-24	7.03E-24
37 TL-203	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	2.18E+09	1.25E+10	1.24E+10	7.52E-16	4.30E-15	4.27E-15
SOMA	4.56E+08	3.69E+10	1.30E+10	1.23E-02	3.97E-11	3.51E-01						

* VALORES NORMALIZADOS PARA 1 TONELADA DE UF6 PRODUZIDO

Tabela 9 - Importância radiossanitária dos radionuclídeos das cadeias naturais do urânio e do tório.

Ordem imp.	Equilíbrio secular TEOR(1) = TEOR(26)		Rejeitos da conversão T(3) = 1 E 06s = 12 d	
	RN	Ativ. / LIA	RN	Ativ. / LIA
1º	Pb-210	1235	Th-232	1867
2º	Ra-226	353	Th-230	1710
3º	Th-232	270	Th-234	608
4º	Th-230	247	Pb-210	427
5º	Po-210	247	Ra-226	244
6º	Pa-231	164	Th-228	212
7º	Ac-227	164	Ra-224	154
8º	Ra-228	90	Ra-228	127
9º	U-234	62	Pa-231	114
10º	U-238	49	Ac-227	114

Tabela 10 - Limites anuais de incorporação por ingestão

RN	Bq/ano [IA 67]	RN	Bq/ano [IC 78]
Ra-226	3,6 E 02	Pa-231	7,0 E 03
Ra-228	8,1 E 02	Ac-227	7,0 E 03
Pb-210	3,6 E 03	Pb-210	2,0 E 04
Ac-227	5,6 E 03	Tn-232	3,0 E 04
U-238	1,7 E 04	Ra-226	7,0 E 04
Po-210	2,1 E 04	Ra-228	9,0 E 04
Ra-223	2,1 E 04	Th 230	1,0 E 05
Pa-231	2,6 E 04	Po-210	1,0 E 05
Th-232	4,4 E 04	Th-228	2,0 E 05
Th-230	5,2 E 04	Ra-223	2,0 E 05

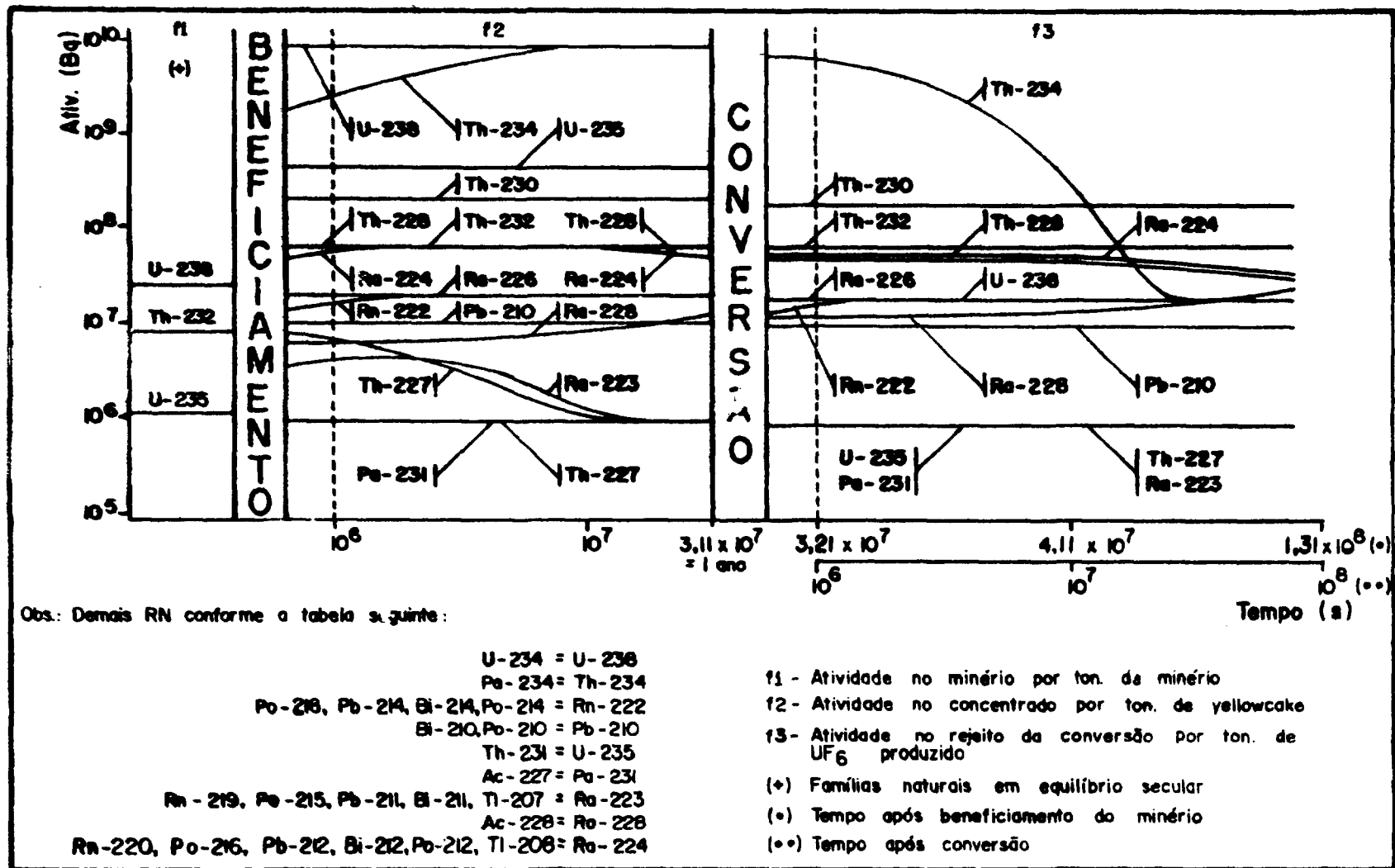


Fig.1 - Inventário radioquímico do concentrado de urânio e dos rejeitos da conversão em função do tempo.

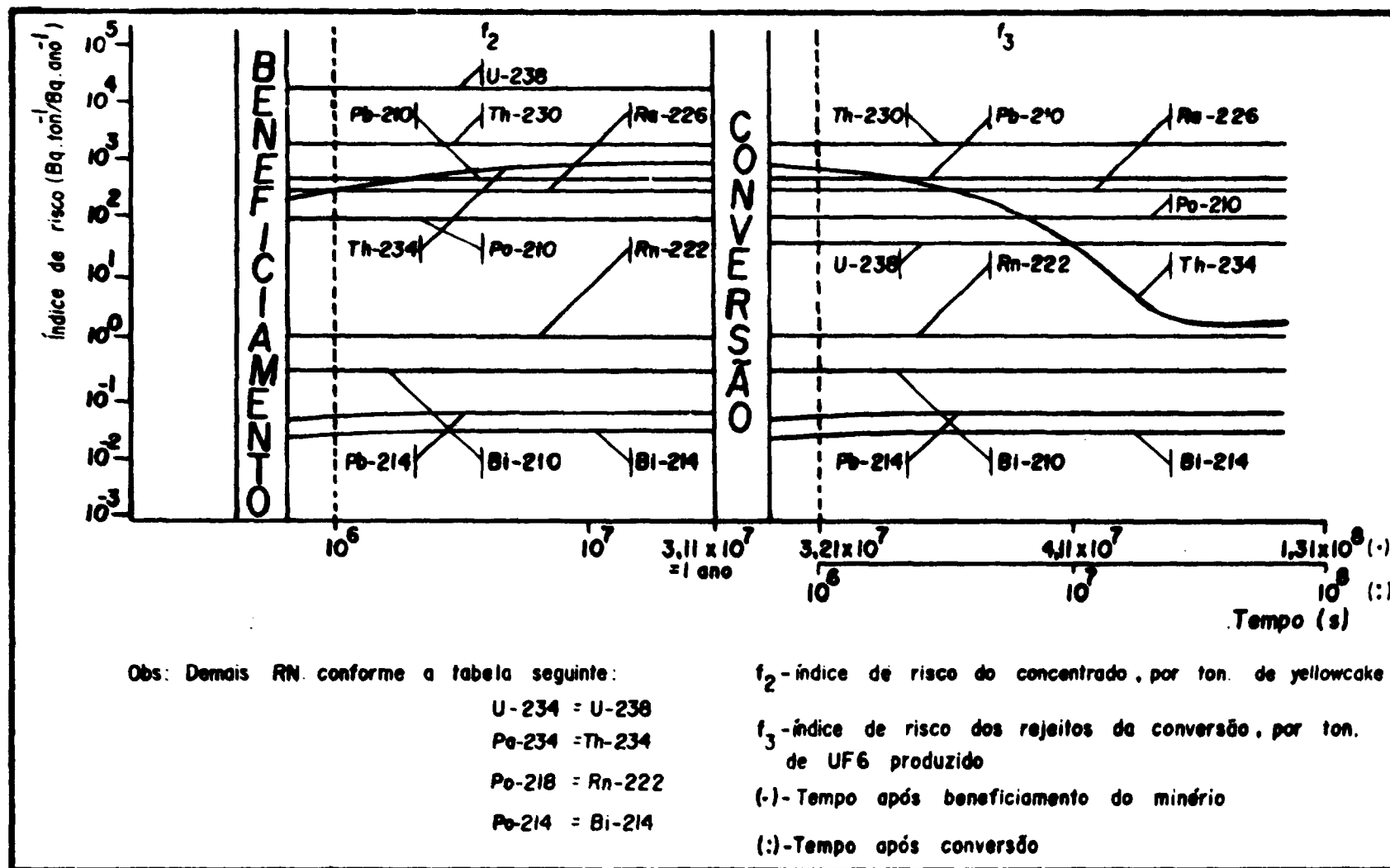


Fig. 2 - Índice de risco, relativo ao Limite de Incorporação Anual (LIA) do concentrado de Urânio e dos rejeitos da conversão em função do tempo. RN da família do U-238.

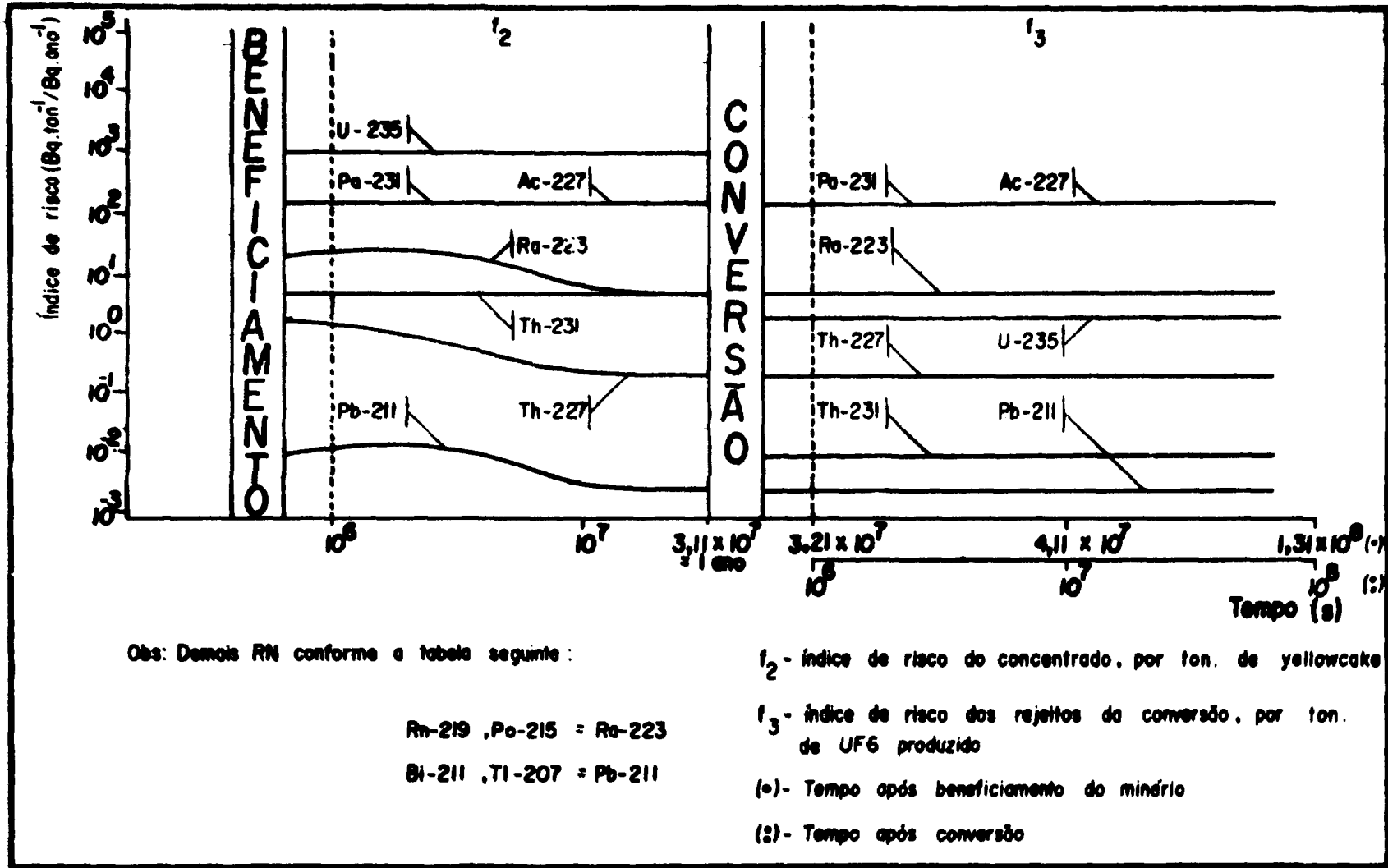


Fig. 3 - Índice de risco, relativo ao Limite de Incorporação Anual, (LIA) do concentrado de Urânio e dos rejeitos da conversão, em função do tempo. RN da família do U-235.

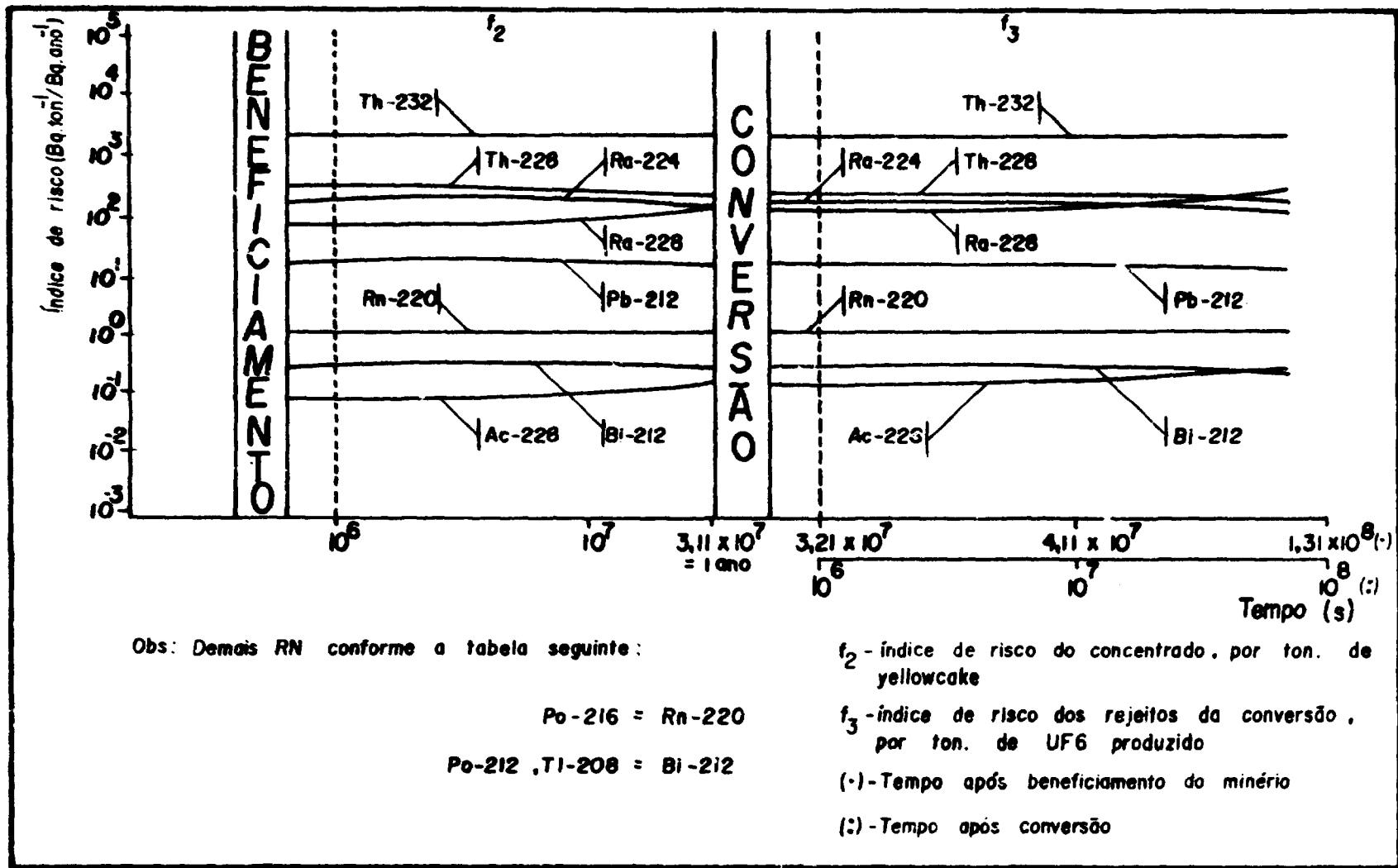


Fig. 4 - Índice de risco, relativo ao Limite de Incorporação Anual, (LIA) do concentrado de Urânio e dos rejeitos da conversão, em função do tempo. RN da família do Th-232.

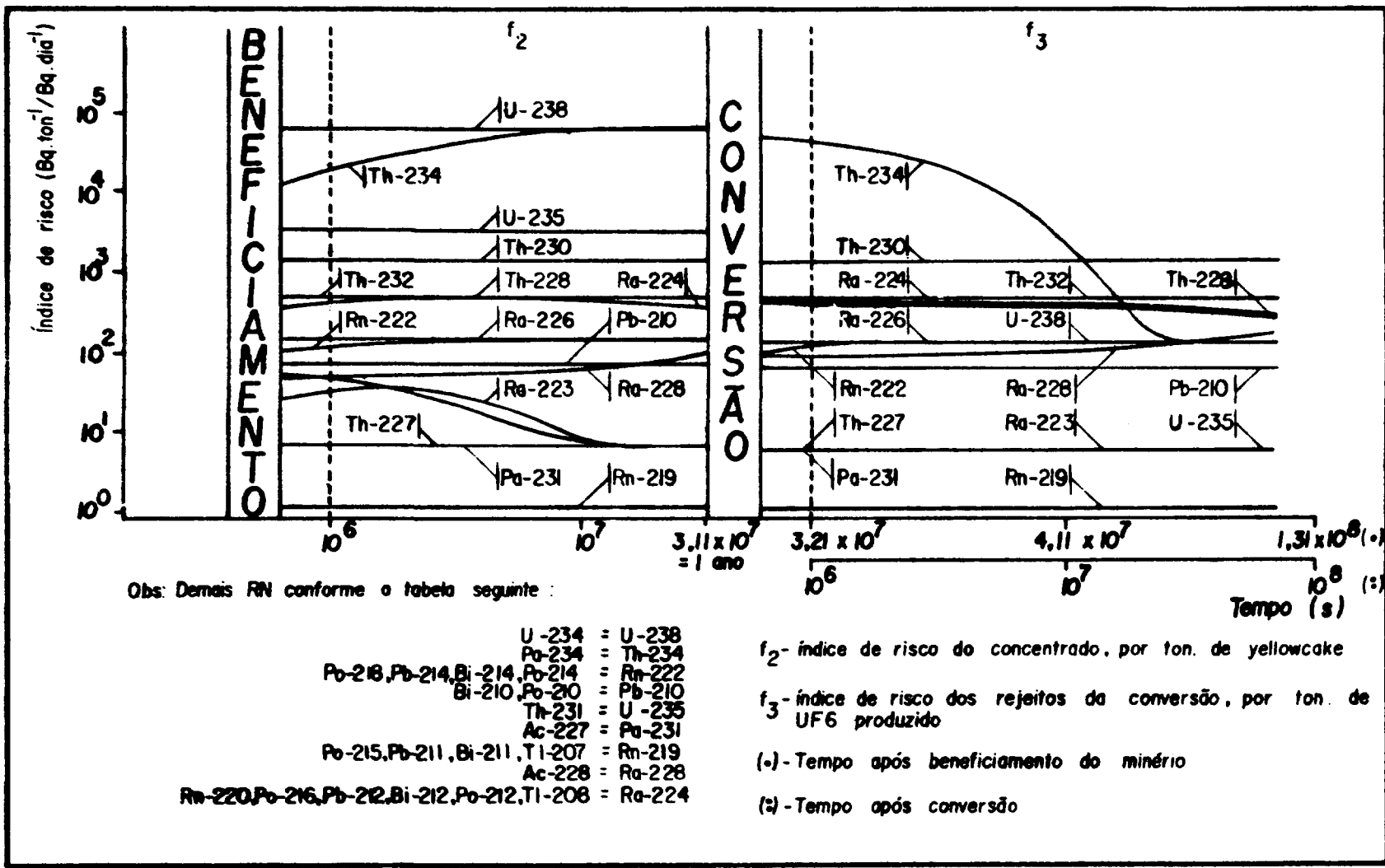


Fig. 5 — Índice de risco, relativo ao Limite Diário de Descarga, (LDD) do concentrado de Urânio e dos rejeitos da conversão, em função do tempo.