

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO K-EFETIVO PARA COMPOSTOS DE URÂNIO NO TRANSPORTE DE MATERIAIS FÍSSEIS

Teresinha de Moraes da Silva e Gian-Maria A. A. Sordi

Instituto de Pesquisa Energética e Nuclear (IPEN/CNEN/SP)
Avenida Professor Lineu Prestes, 2242
05508-900 São Paulo, SP
tmsilva@ipen.br

RESUMO

Os materiais utilizados para elemento combustível em reatores de potência ou de pesquisa são compostos de urânio. Estes compostos de urânio são físséis tendo os isótopos ^{233}U e ^{235}U . Os reatores de potência trabalham com enriquecimentos de até 5%, e os reatores de pesquisa possuem um enriquecimento de até 20%. Considerando os compostos de UO_2 , U_3O_8 e U_3Si_2 realizou-se um estudo do comportamento do k-efetivo, conhecido como fator de multiplicação de nêutrons para diferentes arranjos de embalados. Para grupos de embalados que compõem diferentes arranjos, tais como, 2x2, 3x3, 4x4, 5x5 tanto em meio ar como em meio água, o comportamento do k-efetivo foi analisado para diferentes distâncias entre os embalados. O estudo comparou para cada arranjo considerado e no determinado meio (ar, água), o valor do k-efetivo para distâncias a partir de 10 centímetros até 6 metros. Sabendo-se que todo transporte de materiais físséis deve ser subcrítico, os resultados mostraram que a distância de 6 metros referenciada em normas nacional e internacional é por deveras rigorosa. Este trabalho ora realizado terá continuação efetuando uma análise crítica da massa segura e dos índices de transporte e de segurança de criticalidade para os compostos de urânio mencionados acima.

1. INTRODUÇÃO

O combustível de um reator nuclear de pesquisa ou de um reator de potência para produção de energia elétrica pode ser obtido partindo-se de uma unidade de reconversão até a produção de pastilhas ou de placas do elemento combustível seguindo a fase de montagem do conjunto de varetas, placas que formam o elemento combustível. Em cada fase do processo, deve ser dada atenção quanto à segurança em relação à criticalidade, desde o dimensionamento dos equipamentos, a distribuição destes, o manuseio dos compostos de urânio em processamento até a fase de estocagem e transporte do material físsil, tanto na instalação como fora dela. Define-se como criticalidade o processo de fissão auto-sustentado. Avalia-se a criticalidade por um fator de multiplicação de nêutrons. Para sistemas infinitos usa-se k-infinito enquanto, para sistemas finitos é utilizado o k-efetivo. Os fatores que influenciam o fator de multiplicação infinito podem ser representados pela fórmula dos quatro fatores

$$k\text{-infinito} = \epsilon \cdot p \cdot \eta \cdot f \quad [3] \quad (1)$$

ϵ - para nêutrons rápidos existe uma certa probabilidade que eles causarão a fissão nuclear. Esta probabilidade é representada na fórmula dos quatro fatores, pelo fator de fissão rápido;

p - probabilidade de escape da ressonância representada pela letra p . Uma parte dos nêutrons criados pela fissão nuclear é perdida durante o processo de desaceleração dos nêutrons em virtude da ressonância de absorção. A probabilidade de que um nêutron possa escapar da ressonância de absorção é chamada de probabilidade de escape da ressonância;

η - Nem todo nêutron absorvido nos materiais fissionáveis conduz a uma fissão nuclear. Enquanto que, ν nêutrons na média são emitidos por fissão nuclear existem menos por nêutron absorvido no material. O número médio de nêutrons por fissão liberados por nêutron absorvido no material é designado por η na fórmula dos quatro fatores;

f - apenas uma parte dos nêutrons que se tornam térmicos são absorvidos no material fissionável, o restante é perdido por absorção em outros nuclídeos. A probabilidade que um nêutron térmico seja absorvido no material fissionável é chamada de utilização térmica, representado pela letra f na fórmula dos quatro fatores que influenciam o k - infinito.

O fator de multiplicação efetivo K -efetivo representa sistemas finitos. Pode ser representado pela fórmula [3]:

$$k\text{-efetivo} = k\text{-infinito} \cdot U = \epsilon \cdot p \cdot \eta \cdot f \cdot U \quad (2)$$

sendo U a fração de nêutrons que permanece no sistema. Um sistema finito é designado como crítico quando o k -efetivo = 1. Para sistemas com k -efetivo < 1 significa que o sistema é subcrítico; k -efetivo > 1 significa que um sistema é supercrítico, isto é, a população de nêutrons no sistema está aumentando. Comparando-se dois sistemas em relação ao respectivo k -efetivo, será mais reativo aquele com maior valor de k -efetivo. Portanto, a reatividade representa o quanto k -efetivo é maior do que 1.

A manipulação de materiais nucleares que contém elementos físséis, que não se encontram no caroço de reatores, merece cuidados especiais no sentido de garantir que a condição de criticalidade ou supercriticalidade nuclear não sejam atingidas, para evitar a ocorrência de acidentes que possam ocasionar doses elevadas de radiação e a liberação de produtos radioativos para o meio ambiente. Todo material físsil deverá ser transportado obedecendo o critério de subcriticalidade [2,4,5,6], isto representa um k -efetivo menor que 1.

Os cálculos de criticalidade são conservativos, isto é, são realizados para a condição de razão de moderação ótima de nêutrons (proporção de átomos de hidrogênio para átomos de ^{235}U que resulta na máxima reatividade nuclear) e reflexão completa de nêutrons por um refletor de 30 cm de água (a reflexão completa de nêutrons por água considera, em si, um acidente muito improvável ou seja, a inundação completa do sistema [3,4,5]).

Esse trabalho tem por objetivo determinar o comportamento do k -efetivo médio de compostos de urânio em diferentes enriquecimentos para diferentes arranjos no meio ar e água e saber a partir de qual distância, o valor do k -efetivo de um arranjo torna-se constante até 6 m.. Para os reatores de potência a faixa de urânio enriquecido usada é 3%, 4% e 5%, enquanto que para reatores de pesquisa usa-se enriquecimento na faixa de 20 %.

2. MÉTODOS

Usaram-se os programas de computação conhecidos por Gamtec II, Citation e Keno IV [1,7]. Cada programa tem sua finalidade, a saber: “Gamtec II “determina a razão de moderação ótima do sistema, fornecendo o máximo k-infinito da solução do composto de urânio em estudo para determinado enriquecimento”. O valor do k-infinito máximo corresponde ao ponto mais reativo do sistema. ”Citation” permite calcular o raio crítico de um cilindro infinito. “Keno IV” fornece o k-efetivo médio do arranjo em estudo no enriquecimento considerado. Para o estudo do k-efetivo considerou-se 500 gerações de nêutrons com formação de $15 \cdot 10^3$ nêutrons por geração, para um tempo de contagem de 600 minutos. Esses dados fazem parte dos dados de entrada do programa keno IV.

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Valor do k-efetivo para um cilindro isolado, refletido por 30 cm de água, no meio ar e água para os compostos de urânio. Dióxido de urânio UO_2 nos enriquecimentos 3%, 4% e 5% e compostos de octóxido de urânio U_3O_8 e siliceto de urânio U_3Si_2 no enriquecimento de 20%. Os valores encontrados são apresentados na tabela 3.1 e 3.2 respectivamente.

Tabela 3.1 Para um cilindro isolado com reflexão total 30 cm de água

Composto de urânio	Enriquecimento	Meio Ar k-efetivo médio	Meio Água k-efetivo médio
UO_2	3%	$0,68215 \pm 0,00027$	$0,80047 \pm 0,00179$
UO_2	4%	$0,64627 \pm 0,00027$	$0,78552 \pm 0,00027$
UO_2	5%	$0,65118 \pm 0,00029$	$0,79271 \pm 0,00029$

Tabela 3.2 Para um cilindro isolado com reflexão total 30 cm de água

Composto de urânio	Enriquecimento	Meio Ar k-efetivo médio	Meio Água k-efetivo médio
U_3O_8	20%	$0,62841 \pm 0,00031$	$0,81497 \pm 0,00030$
U_3Si_2	20%	$0,59613 \pm 0,00031$	$0,79368 \pm 0,00032$

Os arranjos 2 2 1, 3 3 1, 4 4 1 e 5 5 1, representam as disposições dos embalados nas coordenadas x,y e z. Apresentam-se os resultados para UO_2 enriquecido a 3% nos arranjos 2 2 1, 3 3 1, 4 4 1 e 5 5 1 em diferentes distâncias, meio água e meio ar. As distâncias foram de 10 cm em 10 cm até 1 m, de 1 m em 1 m até 6 m, conforme apresentadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 Valores do k-efetivo médio para diferentes arranjos e diferentes distâncias. Composto de urânio UO₂ a 3% de enriquecimento.

Distância (cm)	k-efetivo médio							
	Ar		Água		Ar		Água	
	2 2 1	2 2 1	3 3 1	3 3 1	4 4 1	4 4 1	5 5 1	5 5 1
10	0,70	0,80	0,72	0,81	0,73	0,81	0,73	0,81
20	0,69	0,79	0,70	0,80	0,70	0,80	0,71	0,80
30	0,69	0,79	0,69	0,79	0,69	0,79	0,70	0,80
40	0,68	0,79	0,68	0,79	0,69	0,79	0,69	0,80
50	0,68	0,79	0,68	0,79	0,69	0,79	0,69	0,79
60	0,68	0,80	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
70	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
80	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
90	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
100	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
200	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
300	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
400	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
500	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79
600	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79	0,68	0,79

Os resultados evidenciam que o valor do k-efetivo médio para os diferentes arranjos, em meio ar, é constante a partir de 60 cm. Consideraram-se três valores significativos, pois após o terceiro algarismo têm-se valores referentes às flutuações estatísticas. O erro está representado na quarta e quinta casa decimal.

O valor do k-efetivo para o transporte de material físsil deve ser subcrítico, inferior a 0,95, isto é, $k\text{-efetivo} + 3\sigma < 0,95$ [6].

Considerando-se o meio água com reflexão total, o valor do k-efetivo médio 0,79 é constante desde a distância 70 cm até 6m para todos os arranjos estudados.

Apresentam-se os gráficos dos valores do k-efetivo médio para UO₂ nos meios ar e água. O gráfico 1 representa o arranjo 3 3 1 com valor do k-efetivo médio 0,64 desde 90 cm até 6 m em meio ar.

O gráfico 2 representa o composto UO₂ a 4% de enriquecimento no arranjo 3 3 1 em meio água. O valor do k-efetivo 0,78 é constante desde 20 cm até 6 m, **no meio água**, tanto para o arranjo 3 3 1, como para todos os demais arranjos, isto é, 2 2 1, 4 4 1 e 5 5 1 estudados. Para o **meio ar** o estudo com UO₂ a 4% mostrou um k-efetivo no valor de 0,64 nas seguintes condições:

no arranjo 2 2 1 desde 60 cm até 6 m, para o arranjo 4 4 1 o valor do k-efetivo médio 0,64 é a partir de 1 m até 6 m, enquanto que, no arranjo 5 5 1 o valor do k-efetivo 0,64 é para distância de 2m permanecendo constante até 6 m.

O gráfico 3 representa os diferentes arranjos no meio ar para o composto UO₂ no enriquecimento de 5%. O valor encontrado para o k-efetivo do composto UO₂ a 5% no meio ar para todos os arranjos é de 0,65 desde 80 cm até 6 m.

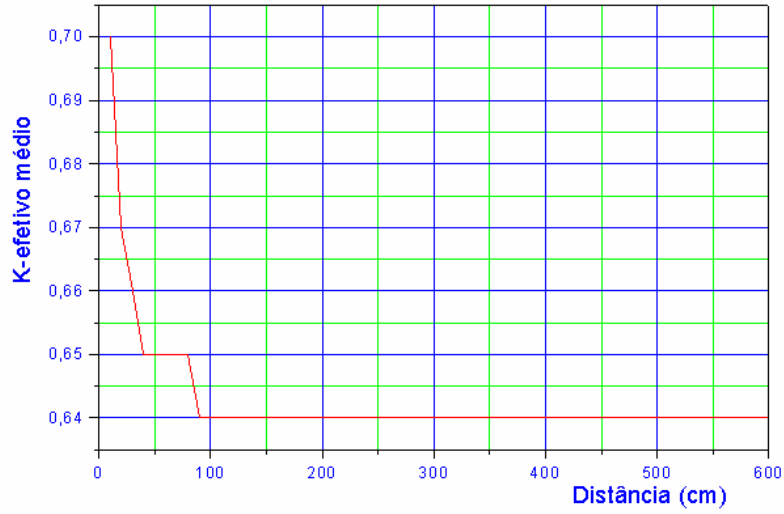


Gráfico 1: UO₂ a 4%, meio ar, arranjo 3 3 1

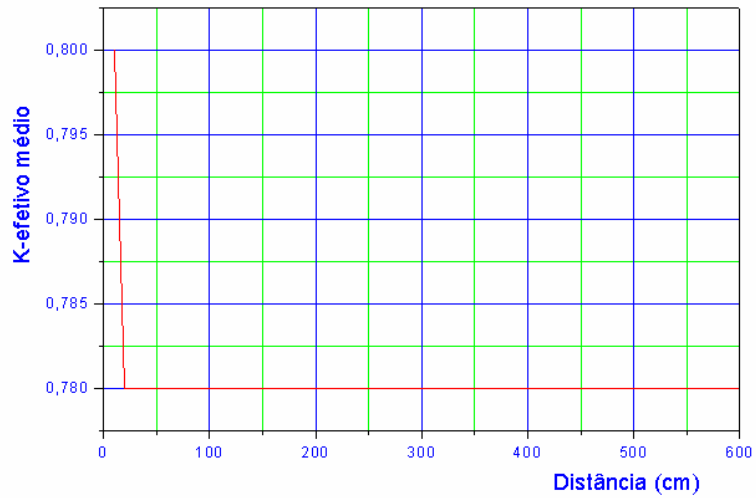


Gráfico 2: UO₂ a 4%, meio água, arranjo 3 3 1

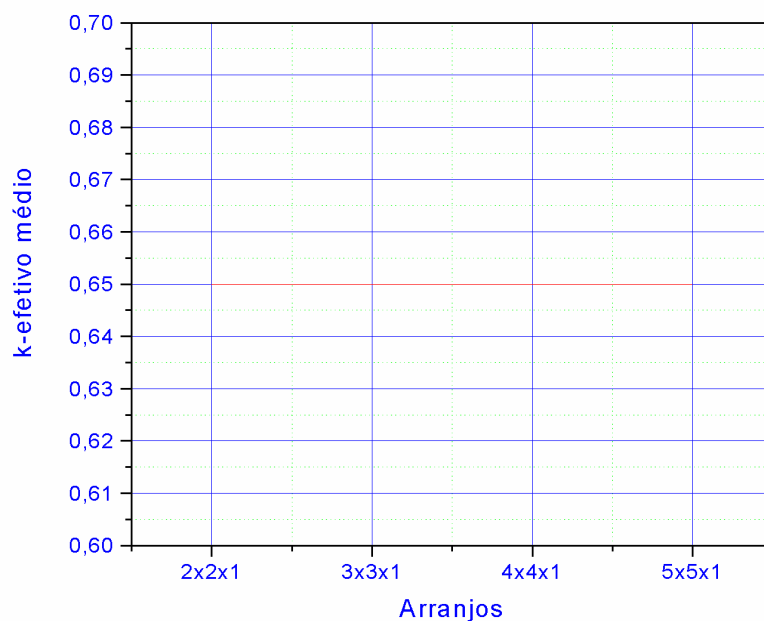


Gráfico 3: UO₂, E=5%, meio ar, distância 80 cm até 6 m, diferentes arranjos

Para os compostos de U₃O₈ e U₃Si₂ os reatores de pesquisa utilizam enriquecimentos em torno de 20%. Os estudos realizados evidenciaram que para o meio ar, o composto U₃Si₂ na distância 70 cm apresenta um k-efetivo médio no valor de 0,60 para os diferentes arranjos 2 2 1, 3 3 1, 4 4 1 e 5 5 1. Para a distância de 2 m até 6 m o valor do k-efetivo médio é 0,59 em todos os arranjos, conforme apresentado no gráfico 4. Isto evidencia que a distância de 6m entre arranjos mencionada em normas internacionais e nacionais é bastante conservativa, uma vez que $k\text{-efetivo} + 3\sigma < 0,95$ [6].

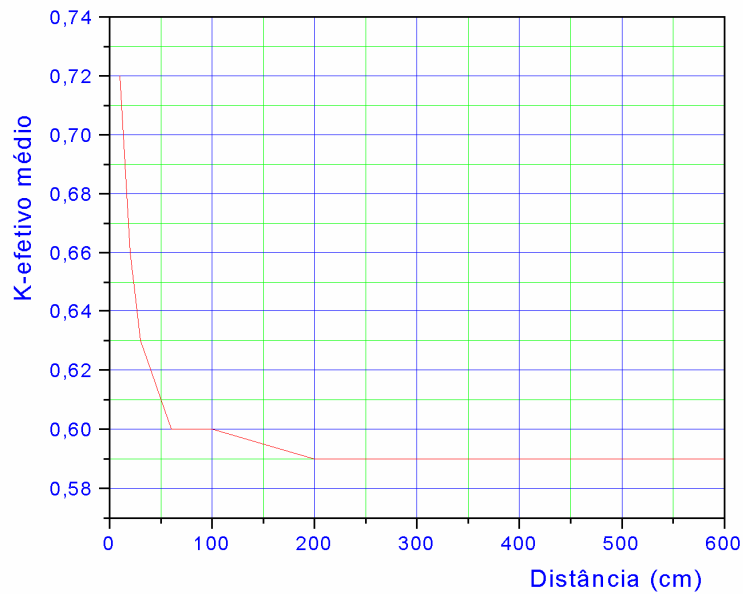


Gráfico 4: U_3Si_2 , $E = 20\%$, meio ar, arranjo 5 5 1, diferentes distâncias

O mesmo tipo de comportamento observou-se para o composto U_3O_8 a 20%, conforme apresentado no gráfico 5.

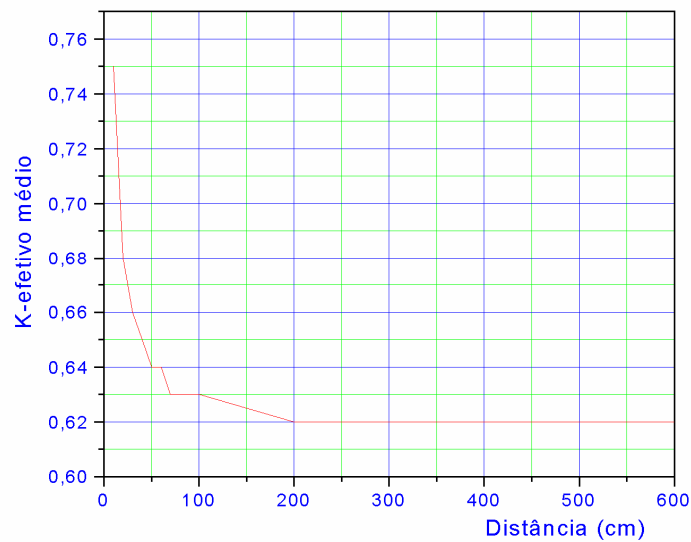


Gráfico 5: U_3O_8 , $E=20\%$, meio ar, arranjo 5 5 1

REFERÊNCIAS

1. CARTER, LL; RICHEY, C.R; HUGHEY, C.E. GAMTEC-II calculations. Richland, Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1965.(BNWL-35) . *A code for generating consistent multigroup constants utilized in diffusion and transport theory*
2. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Transporte de Materiais Radioativos* (CNEN -5.0.1),1988.
3. HANDBOOK CRITICALITY AND NUCLEAR SAFETY PART I. Tennessee.Oak Ridge, 1980
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, 1996 Edition (Revised), Safety Standards Series No.TR-R-1(ST-1,Revised), IAEA, Vienna(2000).
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advisory Material for the IAEA Regulations for Safe Transport of Radioactive Material* (1996 Edition), Safety Standards Series No TS-G-1.1, I A E A, Vienna (2002).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Safe Transport of Radioactive Material*, third edition, Training Course Series, Vienna (2002).
7. PETRIE, L.M& CROSS, N.F KENO IV- *An improved Monte Carlo criticality program*. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, Nov.1975 (ORNL -4938).