IX ENFIR - Caxambu, MG (Outubro 1993)

CÁLCULOS DE TRANSPORTE PARA DEFINIÇAO DA CONFIGURAÇÃO DOS TUBOS DE IRRADIAÇÃO PARA UM REATOR DE PESQUISA E APLICAÇÕES MÉDICAS

Miriam Medeiros da Silva^{*}, José Rubens Maiorino^{**}

COORDENADORIA PARA PROJETOS ESPECIAIS - COPESP Caixa Postal 11.253 - 05422-970 - São Paulo - SP INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - CNEN/SP Caixa Postal 11.049 - 05422-970 - São Paulo - SP

RESUMO

Neste trabalho são realizados cálculos de transporte com o código unidimensional ANISN-PC (CCC-0514/02) utilizando dados nucleares da biblioteca IRAN.LIB, para avaliar as configurações dos tubos de irradiação térmico e epitérmico de um reator de pesquisa e aplicações médicas, onde tumores cerebrais serão tratados por captura de nêutrons. Utilizamos alumínio e água pesada para moderar o feixe de nêutrons provenientes do reator, sendo que no tubo epitérmico o melhor resultado foi obtido com camadas alternadas de D20 e Al na proporção volumétrica 25:75. Bismuto e fluoreto de lítio foram utilizados respectivamente para a remoção de raios gama e nêutrons térmicos do feixe do reator.

INTRODUÇÃO

O tratamento de tumores cerebrais por captura de nêutrons, técnica denominada BNCT (Boron-Neutron Capture Therapy), baseia-se na alta seção de choque de captura de nêutrons térmicos pelo isótopo ¹⁰B (3800 barns), cuja reação é esquematizada a seguir,

 ${}^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n \begin{cases} {}^{7}\text{Li} + \alpha + 2,79 \text{ MeV} \qquad (6,1\%) \\ {}^{7}\text{Li}^{*} + \alpha + \gamma + 2,31 \text{ MeV} \qquad (93,9\%) \\ & & \downarrow \qquad 7^{7}\text{Li} + \gamma + 0,48 \text{ MeV} \end{cases}$

O fragmento de fissão ⁷Li e a partícula α possuem alcance no tecido da ordem do diâmetro de uma célula de mamífero, de modo que o efeito destrutivo destas partículas fica limitado às vizinhanças imediatas do local onde ocorre a reação. Injetando-se no paciente um composto adequado de boro que concentre-se preferencialmente na região do tumor, haverá mais interação dos nêutrons térmicos com o tecido tumoral do que com o tecido normal, pois em comparação à seção de choque do ¹⁰B, os principais elementos que compõem o tecido possuem seção de choque baixa para a captura de nêutrons térmicos.

O estudo conceitual de um reator de pesquisa de 1 MW para aplicacões médicas com ênfase no tratamento de tumores cerebrais por captura de nêutrons [1], prevê a existência de dois portos de irradiação: um que apresente um espectro predominantemente térmico para o tratamento de tumores superficiais e outro que possua um espectro basicamente epitérmico para o tratamento de tumores profundos, pois a intensidade de um feixe de nêutrons térmicos decai pela metade após penetrar cerca de 1,8 cm no tecido [2]. No tratamento de tumores profundos o procedimento de rotina consiste na intervenção cirúrgica para expor o tumor o máximo possível a um feixe de nêutrons térmicos, o que debilita ainda mais o quadro clínico do paciente e impede a utilização de doses fracionadas, que diminuíriam os danos ao tecido normal.

DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Baseando-se no núcleo proposto pelo trabalho [3] e nas configurações apresentadas pela referência [4] para os portos de irradiação térmico e epitérmico do reator TRIGA-ACPR, foi realizado um estudo visando definir uma primeira configuração para os portos de irradiação do REPAM (REator de Pesquisa e Aplicações Médicas). Utilizou-se o código de transporte unidimensional ANISN-PC com a biblioteca de seções de choque IRAN3.LIB (7 grupos de nêutrons e 18 grupos de gamas) [5] e aproximações P-3 e S-12. A estrutura de grupos de energia utilizada para os nêutrons encontra-se na Tabela 1.

Tabela	1.	Estrutura	de	grupos	de	energia
			dos	nêutro	ns	

GRUPO	ENERGI	A (MeV)
	SUPERIOR	INFERIOR
1	1,7333E+01	5,2205E+00
2	5,2205E+00	1,0026E+00
3	1,0026E+00	4,9787E-01
4	4,9787E-01	9,8037E-02
5	9,8037E-02	9,1188E-03
6	9,1188E-03	5,3156E-07
7	5,3156E-07	0,0000

O espectro e a intensidade da corrente líquida de nêutrons na direção dos portos de irradiação em 4 grupos de energia foram fornecidos pela referência [3] e encontram-se na Tabela 2. Como a estrutura de grupos de energia utilizada neste trabalho difere da apresentada pela referência [3], fizemos uma correlação entre os valores fornecidos e a nossa estrutura de grupos a partir do espectro de fissão do U-235 em 7 grupos de energia, obtido utilizando o espectro de WATT. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.

GRUPO	ENERGI	INTENSĮDADE	
	SUPERIOR	INFERIOR	(n/cm ^² ⋅s)
1	1,00E+01	8,21E-01	1,12467×10 ¹¹
2	8,21E-01	5,53E-03	1,37579x10 ¹¹
3	5,53E-03	6,25E-07	1,88317x10 ¹¹
4	6,25E-07	1,00E-11	3,07957x10 ¹¹
TOTAL			7,46320x10 ¹¹

Tabela 2. Corrente líquida incidente nos portos de irradiação [3]

Tabela	з.	Corrente	líquida	incide	ent	e nos
•		portos de	: irradia	ção em	7	grupos

GRUPO	ENERGIA	A (MeV)	INTENSĮDADE
	SUPERIOR	INFERIOR	(n/cm [*] ·s)
1	1,7333E+01	5,2205E+00	2,24934x10 ¹⁰
2	5,2205E+00	1,0026E+00	8,99736x10 ¹⁰
3	1,0026E+00	4,9787E-01	6,98959x10 ¹⁰
4	4,9787E-01	9,8037E-02	5,53695x10 ¹⁰
5	9,8037E-02	9,1188E-03	1,23135×10 ¹⁰
6	9,1188E-03	5,3156E-07	1,88317x10 ¹¹
7	5,3156E-07	0,0000	3,07957x10 ¹¹
TOTAL		•	7,463199×10 ¹¹

Na saída de cada porto de irradiação estudado, foi acrescido 10 cm de tecido para que a atenuação do fluxo neutrônico na cabeça do paciente pudesse ser avaliada. Uma exigência de projeto adotada é que a intensidade do fluxo térmico no tecido seja maior que $3,2\times10^{n}/cm^2$ ·s [6] a 2 cm de profundidade para o tratamento de tumores superficiais (porto de irradiação térmico) e a 7 cm de profundidade para o tratamento de tumores profundos (porto de irradiação epitérmico).

Porto de Irradiação Térmico. A coluna térmica proposta pela referência [4] para o reator tipo TRIGA-ACPR seria um tubo cilíndrico com 20 cm de diâmetro contendo: i) uma camada inicial vazia com 20cm, ii) lâminas alternadas de D20 e Al na proporção de 15% e 85% com um comprimento 'total de 15 cm, iii) uma camada com 30 cm de D2O, iv) uma camada vazia de 15 cm e v) uma blindagem de bismuto de 20 cm. A mistura de água pesada alumínio numa razão 15:85 mostrou-se e eficiente para diminuir o número de nêutrons rápidos sem atenuar os nêutrons epitérmicos do reator TRIGA. O bismuto é um bom material para a blindagem de raios gama devido a sua alta densidade e baixa seção de choque de absorção para nêutrons.

À primeira configuração estudada neste trabalho foi igual à sugerida pela referência [4], quando o valor obtido para o fluxo térmico a 2 cm de profundidade no tecido foi cerca de três vezes superior ao valor estabelecido de 3,2×10[°]n/cm²·s. Como podíamos diminuir a intensidade do feixe sem prejudicar a terapia, introduzimos uma camada inicial de D20 no tubo de irradiação e aumentamos a proporção de D20 nas lâminas de D20+Al para tentar moderar mais o feixe de nêutrons incidentes, de modo a melhorar o espectro de nêutrons a ser utilizado no tratamento. Além disso, várias espessuras de D20 e de Al foram testadas. A camada de ar com 15 cm e os 20 cm de bismuto foram mantidos. A Tabela 4 apresenta as configurações testadas nas quais o fluxo térmico está em torno de 3,2×10[®]n/cm²·s a 2 cm de profundidade no tecido.

A Tabela 5 apresenta o fluxo de nêutrons por grupo de energia a 2 cm de profundidade no tecido para cada configuração descrita na Tabela 4, bem como os fatores de conversão fluxo/taxa de dose obtidos da norma ANS 6.11.

A figura de mérito adotada para a avaliação das configurações propostas é diretamente proporcional ao valor da taxa de dose devido a nêutrons térmicos a 2 cm de profundidade no tecido e inversamente proporcional à somatória das taxas de dose devido a nêutrons epitérmicos e rápidos, de modo que

 $FM = \frac{D7}{6} .$ (1) $\sum_{c=1}^{6} Dc$

CONFIGURAÇÃO	CAMADA	INICIAL	DE D2O	LÂMINAS DE D20+AL 2 ^ª CAMADA DE D20
T-1		30 cm		15cm na proporção 20:80 5 cm
T-2		25 cm		15cm na proporção 20:80 10 cm
T-3		20 cm		15cm na proporção 20:80 15 cm
T-4		10 cm		15cm na proporção 20:80 25 cm
T- 5		30 cm		13 cm de Al 10 cm
T-6		20 cm		13 cm de Al 20 cm
T-7		10 cm		13 cm de Al 30 cm

Tabela 4. Configurações para o porto de irradiação térmico

GRUPO DE	FATOR DE CONVERSÃO	FLUXO DE NÊUTRONS (n/cm ² ·s)								
NEUTRONS	(rem/hr)/(#/cm~·s)	T-1	т-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7		
1	1,66E-04	1,63E+06	1,63E+06	1,63E+06	1,62E+06	1,16E+06	1,16E+06	1,15E+06		
2	1,34E-04	3,00E+06	2,84E+06	2,74E+06	2,64E+06	2,03E+06	1,89E+06	1,83E+06		
3	1,14E-04	1,48E+06	1,39E+06	1,34E+06	1,29E+06	1,00E+06	9,25E+05	8,95E+05		
4	5,81E-05	1,95E+06	1,84E+06	1,77E+06	1,70E+06	1,32E+06	1,22E+06	1,17E+06		
5	1,33E-05	1,87E+06	1,76E+06	1,70E+06	1,62E+06	1,26E+06	1,16E+06	1,12E+06		
6	3,58E-06	7,46E+06	7,15E+06	6,92E+06	6,60E+06	5,07E+06	4,73E+06	4,52E+06		
7	4,09E-06	4,52E+08	4,46E+08	4,50E+08	4,67E+08	3,47E+08	3,52E+08	3,64E+08		

Tabela 5. Fluxo de nêutrons a 2 cm de profundidade no tecido para várias configurações

A Tábela 6 a seguir apresenta os valores das figuras de mérito calculadas para as várias configurações propostas.

Entre as configurações propostas, a que apresenta o maior valor para a figura de mérito possui características melhores para o tratamento de tumores cerebrais, pois em relação às demais configurações, o número relativo de néutrons térmicos que vão interagir com o 10 B é maior que o número de nêutrons epitérmicos e rápidos -que vão danificar o tecido. Deste modo, entre as configurações analisadas, a configuração T-7 é a mais indicada para o tratamento de tumores cerebrais. A Figura 1 apresenta para a configuração T-7, a distribuição do fluxo total e do fluxo de nêutrons térmicos (grupo 7) em todo o tubo de irradiação.

Tabela 6. Valor da figura de mérito para as configurações propostas

CONFIGURAÇÃO	FIGURA DE MÉRITO
T-1	1,84
T-2	1,89
T-3	1,96
T-4	2,09
T-5	2,06
T-6	2,20
T- 7	2,34





189

ションの 教教院 レスピート

2+ /*

Porto de Irradiação Epitérmico. Devido à alta atenuação dos nêutrons térmicos no tecido, para o tratamento de tumores profundos é conveniente que a irradiação do paciente seja feita com nêutrons epitérmicos (entre 1 eV e 100 keV); que seriam atenuados pelo tecido até chegarem térmicos (em torno de 0,01 eV) no tumor.

2

A coluna epitérmica proposta pela referência [4] para o reator tipo TRIGA-ACPR teria o diâmetro igual ao da coluna térmica, 20 cm, contendo: i) uma camada inicial vazia com 20 cm, ii) lâminas alternadas de D20 e Al na proporção volumétrica de 15% e 85% com um comprimento total de 70 cm, iii) 10 cm de Al, iv) 0.5 cm de LiF, que é eficaz na absorção de nêutrons térmicos sem produzir muitos raios γ secundários, e v) 15 cm de Bi.

A configuração acima descrita apresentou um fluxo térmico menor que 3.2×10⁸ n/cm²·s a 7 cm de profundidade no tecido. Então, outras configurações foram avaliadas, onde somente a camada final de bismuto não teve sua espessura modificada. A Tabela 7 apresenta as configurações nas quais o fluxo térmico está em torno de 3.2×10^8 n/cm²·s a 7 cm de profundidade no tecido.

Calculando-se a figura de mérito a 7 cm de profundidade no tecido, de acordo com a equação 1, verificamos que todas as configurações avaliadas fornecem praticamente o mesmo valor.

Para avaliar qual configuração é mais adequada para o porto de irradiação epitérmico, utilizou-se a informação de que um espectro de nêutrons conveniente para o tratamento de tumores profundos pela técnica BNCT consiste basicamente de nêutrons epitérmicos com energia abaixo de 10 keV [7]. Então, quanto maior o número relativo de nêutrons no grupo 6, melhor o espectro neutrônico. A Tabela 8 apresenta para todas as configurações propostas, a razão entre o fluxo neutrônico nos grupos 2 e 3 e no grupo 6, bem como o valor do fluxo neutrônico no grupo 6 logo após a blindagem de bismuto.

Tabe:	la	7.	Configurações	para	0	porto	de	irradiação	epitérmico
-------	----	----	---------------	------	---	-------	----	------------	------------

CONFIGURAÇÃO	LÂMINAS ALTERNADAS D20+A1	PROPORÇÃO D20:Al	CAMADA DE Al (cm)	CAMADA DE Lif (cm)
E-1	40 cm Al	0:100	-	0.5
E-2	3x(10cm Al + 1cm D2O) + 10cm Al	7:93	-	0.5
E-3	3x(8cm A1 + 2cm D2O) + 8cm A1	16:84	-	0.5
E-4	3x(7cm A1 + 3cm D2O) + 7cm A1	24:76	-	0.5
E-5	3x(5cm Al + 2cm D2O) + 5cm Al	23:77	15	0.5
E-6	3x(5cm A1 + 2cm D2O) + 5cm A1	23:77	10	0.5
E-7	3x(5cm Al + 2.5cm D2O) + 5cm Al	27:73	10	0.5
E-8	3x(5cm A1 + 3cm D2O) + 5cm A1	38:62	10	0.5
E-9	$7x(4cm Al + 1cm D_{2}O) + 4cm Al$	10:90	-	0.5
E-10	7x(3cm Al + 1.5cm D2O) + 3cm Al	25:75	-	0.5
E-11	7x(3cm Al + 1.5cm D2O) + 3cm Al	25:75	-	1.0

Tabela 8. Características das configurações para o porto de irradiação epitérmico

CONFIGURAÇÃO	$\phi_6 (n/cm^2 \cdot s)$	\$\$2/\$\$_6	$\phi_{3/\phi_{6}}$
E-1	3.53×10 ⁸	0.407	0.325
E-2	2.19×10^{8}	0.359	0.256
E-3	3.03×10 ⁸	0.355	0.236
E-4	2.85×10 ⁸	0.340	0.213
E-5	2.28×10 ⁸	0.349	0.240
E-6	3.72×10 ⁸	0.368	0.250
E-7	2.97×10 ⁸	0.351	0.233
E-8	2.38×10 ⁸	0.338	0.219
E-9	2.56×10 ⁸	0.342	0.220
E-10	3.30×10 ⁸	0.337	0.203
E-11	2.86×10 ⁸	0.361	0.220

Entre as configurações propostas, a que apresenta menor número relativo de nêutrons rápidos em relação ao número de nêutrons epitérmicos é a E-10. A Figura 2 apresenta para a configuração E-10 a distribuição do fluxo de nêutrons térmico (grupo 7), epitérmico (grupo 6) e rápido (grupos 2 e 3) em todo o tubo de irradiação.



Figura 2. Distribuição do fluxo térmico, epitérmico e rápido no tubo de irradiação epitérmico para a configuração E-10

DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

Analisando o tubo de irradiação térmico (Tabelas 4 e 6) verificamos que quando a camada mais espessa de D20 se encontra após a lâmina de alumínio, a intensidade relativa do fluxo térmico aumenta. Isto porque o alumínio possui uma "janela" em sua seção de choque para nêutrons de 20 keV. Então, é melhor que os nêutrons provenientes do reator sejam filtrados antes de serem termalizados pela D20, caso contrário grande parte dos nêutrons termalizados antes da camada de Al seriam absorvidos e a intensidade do feixe de nêutrons térmicos diminuiria.

Comparando-se as configurações E-1, E-2, para o (Tabela E-3 е E-4 7) tubo de irradiação epitérmico, que diferem na quantidade de água pesada basicamente entre as lâminas de alumínio, verificamos que o número relativo de nêutrons epitérmicos (grupo 6) é maior em relação ao número de nêutrons rápidos (grupos 2 e 3) quanto mais água pesada existir entre as camadas de alumínio, dado a alta seção de choque de espalhamento da água pesada associada a uma

....

seção de choque de absorção baixa; contudo a intensidade do fluxo epitérmico diminui. Uma proporção em torno de 25:75 para o volume de D2O e Al mostrou-se conveniente. Mantendo-se esta proporção, acrescentamos um filtro de Al após as lâminas de D2O+Al, com o objetivo de aumentar a intensidade do feixe epitérmico, o que ocorreu quando utilizamos 10 cm de Al, contudo houve um aumento relativo do número de nêutrons rápidos em relação ao número de nêutrons epitérmicos. Utilizando ainda 10 cm de Al, aumentamos a proporção de D2O na camada de D2O+Al, mas não obtivemos progressos relevantes. Eliminando então а camada de Al, fragmentamos mais a camada de D2O+Al e encontramos a melhor relação entre o número de nêutrons epitérmicos e rápidos, mantendo ainda uma boa intensidade para o fluxo de nêutrons epitérmicos.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a colaboração de Arlindo Gilson Mendonça no processamento do código ANISN-PC e a Almir Fernandes pela ajuda com a edição do trabalho.

191

REFERÊNCIAS

- [1] MAIORINO, J. R. et alli. Estudos conceituais de um reator para pesquisas e aplicações médicas (REPAM). In: Anais do IV Congresso Geral de Energia Nuclear. (Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 5 a 9 de julho de 1992). p. 689-695.
- [2] FAIRCHILD, R. G. Development and dosimetry of an 'epithermal' neutron beam for possible use in neutron capture therapy. Phys. Med. Biol., 10 (4):491-504, 1965.
- [3] WOIBLET JR., P. F.; MAIORINO, J. R. Estudos neutrônicos de núcleo acoplado através de duas metades para um reator de pesquisa e aplicações médicas (REPAM). In: Proceedings of the IX Brazilian Meeting on Reactor Physics and Thermal Hydraulics. (Caxambu, MG, Brazil, October 25-29, 1993).
- [4] OKA, Y. et alli. A design study of the neutron irradiation facility for boron neutron capture therapy. Nucl. Tech., 55:642-655, 1981.
- [5] MARASHI, M. K. et alli. IRAN.LIB (<u>Improved Range of ANISN/PC LIB</u>rary): a P-3 coupled neutron-gamma

cross-section library in isotxs format to be used by ANISN/PC (CCC-0514/02). Ann. Nucl. Energy, 18 (10):597-602, 1992.

. . .

هاد واستدید احاد المردید الجورانو سر موارد و

- [6] AN, S. et alli. Development studies regarding the construction of epithermal-enriched neutron field for medical purposes at the University of Tokyo YAYOI fast reactor. Nucl. Tech., 48:204-215, 1980.
- [7] MILL, A. Tumours in the neutron trap. New Scientist, :56-59, 1989.

ABSTRACT

به المراد مترجدتها وم

. .. .

The thermal and epithermal configurations of the neutron columns for a medical and research reactor where brain tumours will be treated by neutron capture therapy have been analyzed by means of the unidimensional transport code ANISN-PC (CCC-0514/02) with nuclear data from IRAN.LIB. It has been used aluminum and heavy water to moderate the neutrons from the reactor. The best result for the epithermal column was obtained with a mixture of D20 and Al in a volume ratio of 25:75. Bismuth and lithium fluoride were used to remove gamma rays and thermal neutrons respectively from the reactor beam.