

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

GRUPO	ENERGIA (MeV)		INTENSIDADE (n/cm ² ·s)
	SUPERIOR	INFERIOR	
1	1,00E+01	8,21E-01	1,12467x10 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 3. Corrente líquida incidente nos portos de irradiação em 7 grupos

GRUPO	ENERGIA (MeV)		INTENSIDADE (n/cm ² ·s)
	SUPERIOR	INFERIOR	
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	1,23135x10 ¹⁰
6	9,1188E-03	5,3156E-07	1,88317x10 ¹¹
7	5,3156E-07	0,0000	3,07957x10 ¹¹
TOTAL			7,463199x10 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 3,2x10⁸ n/cm²·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 D₂O 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 e alumínio numa razão 15:85 mostrou-se 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.

A 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 3,2x10⁸ n/cm²·s. Como podíamos diminuir a intensidade do feixe sem prejudicar a terapia, introduzimos uma camada inicial de D₂O no tubo de irradiação e aumentamos a proporção de D₂O nas lâminas de D₂O+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 D₂O 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 3,2x10⁸ 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

$$FM = \frac{D_T}{\sum_{G=1}^6 D_G} \quad (1)$$

Tabela 4. Configurações para o porto de irradiação térmico

CONFIGURAÇÃO	CAMADA INICIAL DE D ₂ O	LÂMINAS DE D ₂ O+AL	2 ^a CAMADA DE D ₂ O
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 5. Fluxo de nêutrons a 2 cm de profundidade no tecido para várias configurações

GRUPO DE NÊUTRONS	FATOR DE CONVERSÃO (rem/hr)/(#/cm ² ·s)	FLUXO DE NÊUTRONS (n/cm ² ·s)						
		T-1	T-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

A Tabela 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 nêutrons térmicos que vão

interagir com o ¹⁰B 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

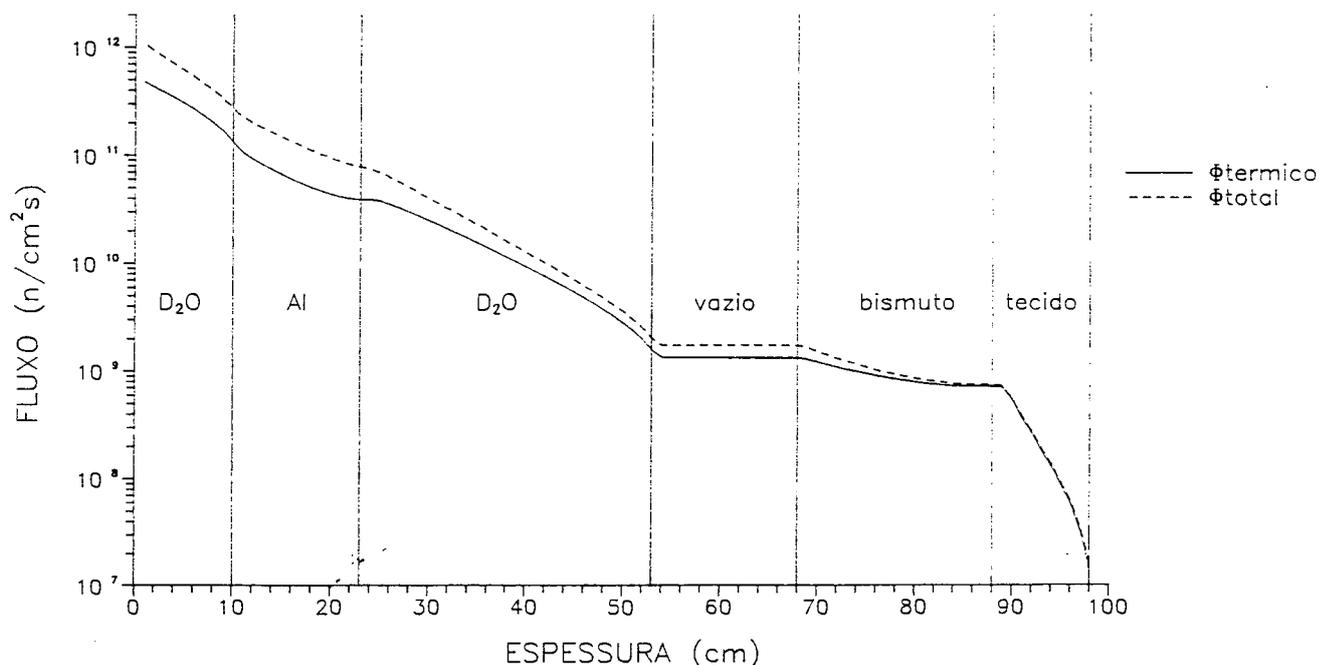


Figura 1. Distribuição do fluxo total e térmico no tubo de irradiação térmico para o arranjo T-7

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.

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 D₂O 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 3.2×10^8 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.

Tabela 7. Configurações para o porto de irradiação epitérmico

CONFIGURAÇÃO	LÂMINAS ALTERNADAS D ₂ O+Al	PROPORÇÃO D ₂ O:Al	CAMADA DE Al (cm)	CAMADA DE LiF (cm)
E-1	40 cm Al	0:100	-	0.5
E-2	3x(10cm Al + 1cm D ₂ O) + 10cm Al	7:93	-	0.5
E-3	3x(8cm Al + 2cm D ₂ O) + 8cm Al	16:84	-	0.5
E-4	3x(7cm Al + 3cm D ₂ O) + 7cm Al	24:76	-	0.5
E-5	3x(5cm Al + 2cm D ₂ O) + 5cm Al	23:77	15	0.5
E-6	3x(5cm Al + 2cm D ₂ O) + 5cm Al	23:77	10	0.5
E-7	3x(5cm Al + 2.5cm D ₂ O) + 5cm Al	27:73	10	0.5
E-8	3x(5cm Al + 3cm D ₂ O) + 5cm Al	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 D ₂ O) + 3cm Al	25:75	-	0.5
E-11	7x(3cm Al + 1.5cm D ₂ O) + 3cm Al	25:75	-	1.0

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

CONFIGURAÇÃO	ϕ_6 (n/cm ² ·s)	ϕ_2/ϕ_6	ϕ_3/ϕ_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.

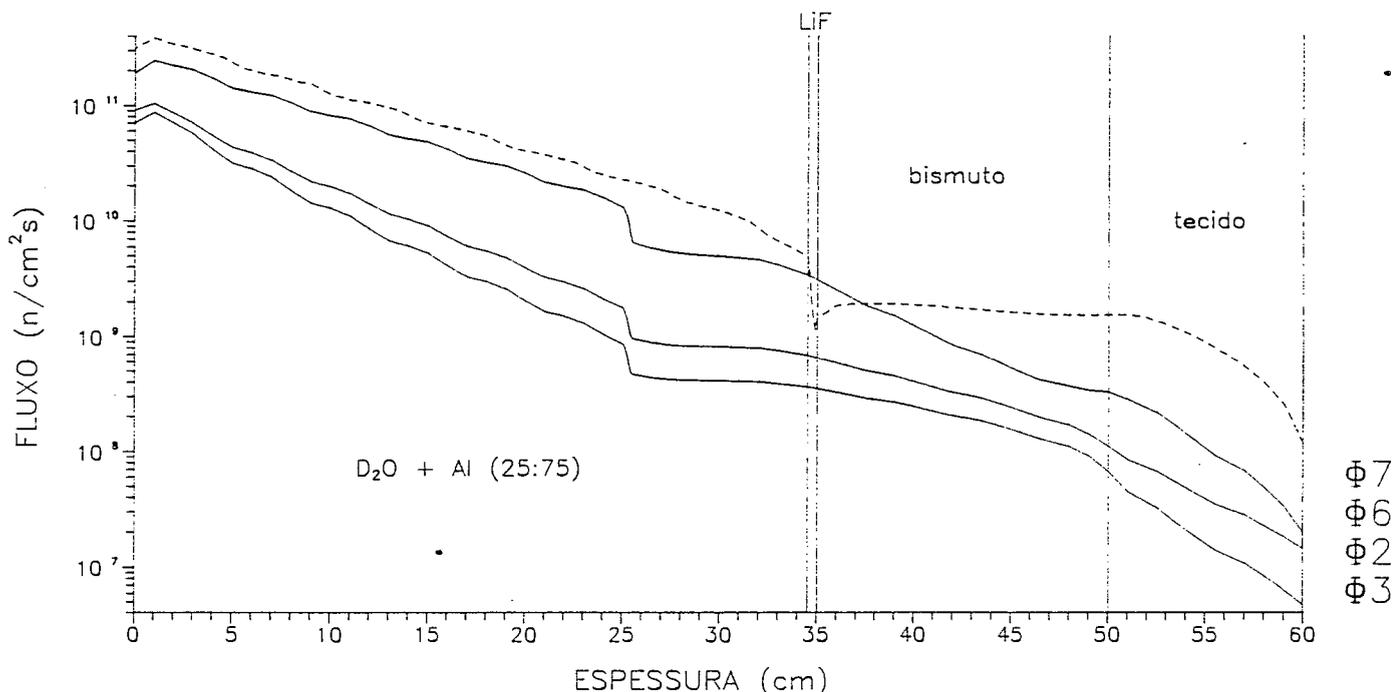


Figura 2. Distribuição do fluxo térmico, epitérmico e rápido no tubo de irradiação epitérmico para a configuração E-10

DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

Analisando o tubo de irradiação térmico (Tabelas 4 e 6) verificamos que quando a camada mais espessa de D₂O 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 D₂O, 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, E-3 e E-4 (Tabela 7) para o tubo de irradiação epitérmico, que diferem basicamente na quantidade de água pesada 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 a 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.

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 (Improved Range of ANISN/PC LIBRARY): 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.
- [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

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 D₂O 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.