

**DETERMINAÇÃO DE FATORES DE CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS DE NEUTRONS,
BASEADO NA TÉCNICA DE ALBEDO, PELA UTILIZAÇÃO DO ESPECTRÔMETRO
DE BONNER**

Luiz Alexandre Schuch

Departamento de Física, Centro de Ciências Naturais e Exatas. UFSM.
Santa Maria, RS.

Dagmar Carneiro da Cunha Reis

Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, RJ.

RESUMO

O presente trabalho visa a determinação dos fatores de calibração de Dosímetros de Albedo, para diversos espectros de neutrons, através da simulação de suas respostas, pela combinação conveniente de um determinado número de Esferas de Bonner, de diferentes diâmetros. Simulou-se também a função de conversão de fluência para dose equivalente, $d(E)$. A reprodutibilidade de cada dosímetro foi considerada satisfatória e verificou-se um comportamento aproximadamente linear da dose total absorvida em função do tempo de exposição, num intervalo de dose equivalente compreendido entre 10 mRem a 3000 mRem, tornando viável a sua utilização em monitoração de rotina pessoal ou de área.

SUMMARY

SCHUCH, L.A. and REIS, D.C.C., 1986. Determination of the calibration factors of Albedo Neutron Dosimeter by using the Bonner Spectrometer. *Ciência e Natura*, 8:25-42.

In this work, the calibration factors of Albedo Neutron Dosimeters were determined for several neutron spectra, by simulation of their responses, using a convenient combination of a number of Bonner Spheres, with different diameters. The fluence to dose equivalent conversion function, $d(E)$, was also simulated.

The satisfactory reproducibility obtained for each dosimeter and the linear behaviour of the total absorbed dose in function of the exposure time, observed for equivalent doses between 10 mRem to 3000 mRem, make the use of albedo Neutron Dosimeters possible for personal or area routine monitoration.

INTRODUÇÃO

Ao se expor o corpo humano a neutrons, alguns são refletidos, criando um fluxo de várias energias deixando o corpo e sendo chamados neutrons de albedo.

Um dosímetro destinado a medir este fluxo refletido é chamado como Dosímetro de Albedo¹⁻⁷. Tais dosímetros são usualmente

projetados para detetar neutrons t ermicos e, quando c admio ou boro s ao empregados como blindagem, sua resposta   maior aos neutrons t ermicos que retornam do corpo. Tais dosímetros são sendo utilizados para substituir as Emulsões Fotográficas de Traços Nucleares, que tem se mostrado insatisfatórias na medida de dose de neutrons de baixa energia⁸⁻¹⁰. Duas das maiores deficiências são o rápido desvanecimento da imagem latente quando a umidade   elevada e a energia mínima detetável em utilizações de rotina estar acima de 400/500 KeV^{11,12}.

Estas e muitas outras restrições fizeram com que muitas organizações pensassem em sua substituição, pois, através de blindagens espessas em áreas controladas de reatores e aceleradores, a percentagem de dose equivalente de neutrons com energia abaixo de 100 KeV pode alcançar até 80%, energia na qual as emulsões nucleares são totalmente insensíveis. Por estes motivos, a substituição de Emulsões Nucleares pelo Dosímetro de Albedo é bastante recomend vel¹³.

DESCRIÇÃO DO DOSÍMETRO

Como elementos detetores de neutrons t ermicos de albedo são empregados Dosímetros Termoluminescentes, TLDs, sendo o mais recomendado para medida de fluência de neutrons o Fluoreto de Lítio, ^6LiF ativado com magnésio, por apresentar ótimas propriedades termoluminescentes e possuir alta sensibilidade para neutrons de baixa energia. Por ser o ^6LiF sensível tanto   radiação gama quanto a neutrons, é usado normalmente em conjunto com o ^7LiF o qual é sensível somente   radiação gama, para a faixa de energia de interesse.

A resposta a neutrons rápido do ^6LiF e do ^7LiF , com 100% de ^6Li e ^7Li respectivamente, foram calculadas e obtidas experimentalmente por Furuta e Tanaka¹⁴ de acordo com a Figura (1). Observa-se pela figura que a sensibilidade do ^7LiF para energias abaixo de 15 MeV atinge um valor máximo de 20% da sensibilidade do ^6LiF . Assim, no Dosímetro de Albedo a resposta do ^7LiF a neutrons pode ser desprezada, pois a maior parte da resposta do sistema se deve ao fluxo térmico refletido.

Quando o par é exposto a um campo misto e depois avaliado em um equipamento convencional, obt m-se

$$G_6 = G_6(\gamma) + G_6(n) \quad (1)$$

e

$$G_7 = G_7(\gamma) + G_7(n), \quad (2)$$

onde,

G_6 e G_7 são os valores integrais de luminescência do ^6LiF e ^7LiF no campo misto.

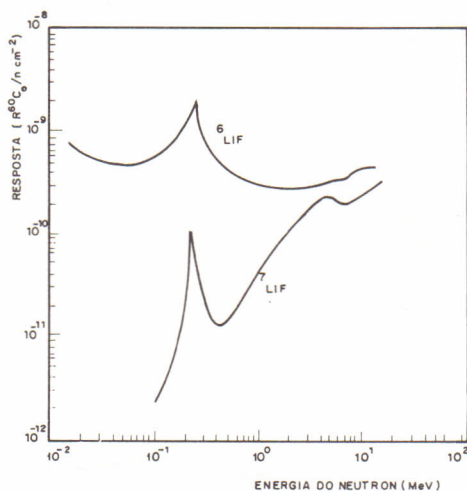


FIGURA 1 - Resposta dos TLDs ${}^7\text{LiF}$ e ${}^6\text{LiF}$ a neutrons

$G_6(\gamma)$ e $G_7(\gamma)$ são as contribuições gama ao valor integral de luminescência do ${}^6\text{LiF}$ e ${}^7\text{LiF}$ e
 $G_6(n)$ e $G_7(n)$ são as contribuições de neutrons ao valor integral de luminescência do ${}^6\text{LiF}$ e ${}^7\text{LiF}$.

A diferença será

$$\Delta G = G_6(n) - G_7(n) \quad (3)$$

pois pares de TLDs com a mesma sensibilidade gama podem ser selecionados.

Os valores de G são, em geral, expressos em unidades Roentgen (R), a partir de calibrações efetuadas com radiação gama de uma fonte de ${}^{60}\text{Co}$.

Pode haver modificações substanciais na resposta original do albedo devido a estrutura física do dosímetro como: forma, material e posicionamento que são escolhidos de acordo com a finalidade para a qual o dosímetro é projetado.

Com relação a blindagem aos neutrons térmicos incidentes, são escolhidos materiais com seção de choque do tipo limiar ou do tipo $1/v$.

O mais utilizado, no primeiro caso, é o cádmio, com corte efetivo em torno de 0,5 eV e uma seção de choque térmica (n, γ) de 2450 barns, suprimindo assim a sensibilidade do sistema a neutrons térmicos.

Como absorvedores $1/v$, o mais utilizado é o boro natural,

possuindo uma seção de choque de 759 barns para a reação térmica $^{10}\text{B}(n, \alpha) ^7\text{Li}$. Na Figura (2) estão representados estes valores de seção de choque.

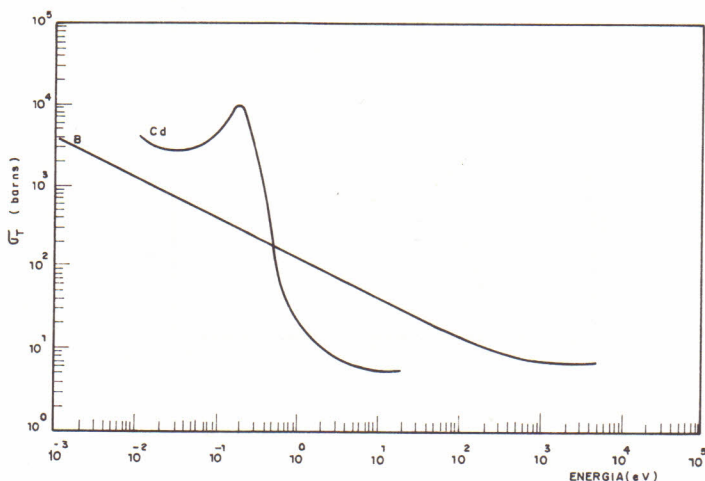


FIGURA 2 - Seção de choque total do boro e cádmio

Devido ao formato de sua curva de seção de choque, o boro absorve mais neutrons onde o sistema é mais sensível e menos onde a sensibilidade é menor. Deste modo, torna-se possível a supressão de neutrons de baixa energia, favorecendo a detecção de neutrons rápidos ou a obtenção de uma resposta mais ou menos plana com relação a fluência em toda a região de energia abaixo de algumas dezenas de KeV.

Como a blindagem atenua sensivelmente a resposta do sistema, introduz-se um corpo moderador para compensar esta perda de sensibilidade^{1,6,7}. Hankins¹ estudou detalhadamente a influência do polietileno como corpo moderador na resposta final do dosímetro, utilizando-o em várias espessuras.

O efeito do moderador a um detetor colocado na superfície de um simulador do corpo humano é semelhante ao seu deslocamento para dentro do simulador, onde o detetor verá um fluxo mais elevado.

A resposta do sistema aos neutrons incidentes não será afetada se a quantidade de moderador for pequena.

Baseando-se nestas rápidas considerações, foi desenvolvido um protótipo de Dosímetro de Albedo¹⁵ no GSF (Munich) e IRD (Rio).

RESPOSTA DO DOSÍMETRO

Na determinação da forma da curva de resposta do protótipo construído¹⁵, foram efetuadas várias experiências usando-se:

a. Neutrons monoenergéticos a partir de 120 KeV, produzidos por um

acelerador tipo Van der Graff de 3 MeV, no GSF,

- b. Neutrons t ermicos obtidos dos reatores de pesquisa Triga do GSF e Argonauta do IEN e
- c. Neutrons emitidos por uma fonte de Am - Be, com a finalidade de se determinar a resposta do dosímetro a um espectro contínuo de neutrons.

Os valores de sensibilidade do dosímetro, para neutrons com energia entre 0,025 eV e 120 KeV, foram considerados como sendo os valores teóricos obtidos por Alsmiller⁶. Estes valores são calculados em função da fluência de neutrons e da dose equivalente

$$FC = \frac{\Delta G}{\phi} \quad e \quad (4)$$

$$FC = \frac{\Delta G}{D}, \quad (5)$$

onde,

FC é o fator de calibração do dosímetro,

ϕ é a fluência de neutrons

D   a dose equivalente calculada a partir de recomendações do ICRU e

ΔG é calculado de acordo com a equação (3).

Visando a utilização operacional deste tipo de dosímetro em áreas controladas de reatores e aceleradores, com diferentes espectros, é conveniente dividir o local em diversas regiões e determinar-se um fator de calibração específico para cada região. Para os TLDs registrarem uma dose sensível, o sistema Dosímetro de Albedo - Simulador deveria ficar diversos dias ou semanas sendo irradiado e, juntamente com a dose total no local obtida por um "Rem-Counter" durante este período de irradiação, considerando que não exista variações de espectro, o fator de calibração daquela região é obtido.

Este procedimento, entretanto, é bastante trabalhoso, pois depende do número de regiões nas quais a Central Nuclear é considerada e requer muito tempo de irradiação.

Um modo mais fácil e rápido de se obter estes fatores de calibração pode ser feito utilizando-se Esferas de Bonner de diferentes diâmetros. Pode-se simular a resposta do Dosímetro de Albedo através da combinação conveniente de um determinado número de esferas e juntamente com a leitura fornecida por um "Rem-Counter", o fator de calibração é obtido segundo a equação,

$$FC = \frac{\sum_{i=1}^n a_i C_i}{R} \quad (6)$$

onde,

a_i   o fator peso para a leitura da Esfera de Bonner de diâmetro i,

C_i é a leitura da Esfera de Bonner i e

R é a leitura fornecida pelo "Rem-Counter".

O valor de dose fornecida pelo "Rem-Counter" também pode ser obtido através da combinação de leituras de um determinado número de esferas. Neste caso, o fator de calibração seria obtido de acordo com a seguinte equação:

$$FC = \frac{\sum_{i=1}^n a_i C_i}{\sum_{j=1}^n a_j C_j} \quad (7)$$

Os valores de sensibilidade do Dosímetro de Albedo^{6,15} foram obtidos considerando-se um simulador de PVC havendo, deste modo, uma absorção do fluxo de albedo devido ao cloro.

Quando considera-se um simulador de polietileno, onde não existe tal absorção, os valores de sensibilidade seriam 49% maiores.

Na Figura (3), observa-se a semelhança da resposta do Dosímetro de Albedo com a função de conversão de fluência para dose equivalente¹⁶, $d(E)$. A resposta do "Rem-Counter" é bastante próxima desta função $d(E)$.

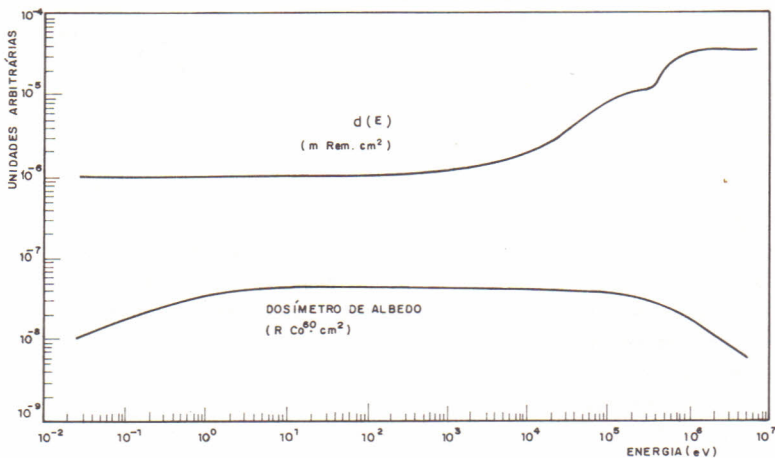


FIGURA 3 - Comparação da forma da curva de resposta do Dosímetro de Albedo com a função $d(E)$.

Devido a dependência energética do dosímetro, é necessária a utilização de fatores de calibração dependentes do espectro em cada local de medida. Estes fatores de calibração efetivos, em determinadas áreas de uma Central Nuclear para a qual o Dosímetro de Albedo é projetado, seriam dados pela equação (5).

SIMULAÇÃO DA RESPOSTA DO DOSÍMETRO E FATOR $d(E)$

Método de Simulação

As considerações seguintes¹⁶ são válidas para a análise de dados de qualquer sistema de medida que tem como base funções respostas independentes na determinação de quantidades integrais.

A densidade espectral do fluxo de neutrons $\bar{\epsilon}$ é definida por

$$\phi_E(E) = \frac{d \phi(E)}{dE}$$

A taxa de quantidade integral correspondente $\bar{I}$

$$\bar{I} = \int f(E) \phi_E(E) dE \quad (8)$$

sendo $f(E)$ alguma função arbitrária definida em todo intervalo de energia de interesse.

É possível aproximar a função resposta desejada $f(E)$ por uma combinação linear de diferentes funções respostas $\epsilon_j(E)$:

$$\sum_{j=1}^n a_j \epsilon_j(E) = S(E) \approx f(E), \quad (9)$$

onde, j é o número da função resposta,

a_j são os fatores de peso e
 n é o número de funções respostas.

Fazendo

$$\bar{I}^* = \int S(E) \phi_E(E) dE \quad (10)$$

e combinando-se as equações (9) e (10), obtêm-se

$$\bar{I}^* = \int \sum_{j=1}^n a_j \epsilon_j(E) \phi_E(E) dE,$$

ou

$$\bar{I}^* = \sum_{j=1}^n a_j \int \epsilon_j(E) \phi_E(E) dE. \quad (11)$$

Como a integral na equação (11) representa a taxa da quantidade medida, C_j , de cada sistema com função resposta $\epsilon_j(E)$, a função desejada seria

$$\bar{I} \approx \bar{I}^* = \sum_{j=1}^n a_j C_j \quad (12)$$

Os fatores de peso a_j são determinados através de uma aproximação ótima de $S(E)$ e $f(E)$, com ajuste por mínimos quadrados, levando a um sistema de equações lineares para a determinação de a_p .

$$\frac{d}{da_p} \left\{ \int \left[f(E) - \sum_{j=1}^n a_j \epsilon_j(E) \right]^2 dE \right\} = 0 \quad (13)$$

$$p = 1, 2, \dots, n$$

O Espectrômetro de Esferas de Bonner é, evidentemente, um dispositivo com respostas múltiplas, consistindo de um detector de neutrons térmicos que está situado no centro de esferas de polietileno de diferentes diâmetros. Cada uma das esferas fornece uma curva de resposta característica, sendo o conjunto destas curvas chamadas de Matriz Resposta.

A qualidade da aproximação dada pela equação (9) depende da escolha dos diâmetros das esferas, dos fatores de peso a_j e da escolha da Matriz Resposta, obtida por Bramblett¹⁷ (M60) ou Awschalom¹⁸ (M65).

Certamente existe um desvio na função a ser simulada em virtude da incerteza na Matriz Resposta a empregar. Experimentalmente comprova-se que para um mesmo conjunto de esferas e utilizando-se as matrizes M60 e M65, obtêm-se dois resultados diferentes, porém com a mesma probabilidade de estar correto.

A média de tais valores representa, evidentemente, um resultado mais razoável e, os melhores valores, para um dado conjunto de esferas, está baseado nestas matrizes. O procedimento de aproximação é desenvolvido de tal modo que se baseia nas duas matrizes, simultaneamente. Isto leva a um conjunto ótimo de esferas e coeficientes correspondentes que fornecem a média diretamente. Então, a equação (13) torna-se

$$\frac{d}{da_p} \left\{ \int \left[\left(f(E) - \sum_{j=1}^n a_j \epsilon_j^{(1)}(E) \right)^2 + \left(f(E) - \sum_{j=1}^n a_j \epsilon_j^{(2)}(E) \right)^2 \right] dE \right\} = 0, \quad (14)$$

onde, $\epsilon_j^{(1)}(E)$ é a função resposta pertencente a M60 e

$\epsilon_j^{(2)}(E)$ é a função resposta pertencente a M65.

Casos Considerados

A função arbitrária $f(E)$ foi considerada como: Função Resposta do Dosímetro de Albedo e Função de Conversão de Fluência para Dose Equivalente, $d(E)$.

Assim, segundo a equação (12), a resposta do Dosímetro de Albedo e a função $d(E)$ são simuladas por um conjunto de Esferas de Bonner, com taxas de contagem C_j multiplicadas por fatores de peso a_j .

Simulação da Resposta do Dosímetro de Albedo

No caso de $f(E)$ ser a função resposta do Dosímetro de Albedo, os fatores de peso a_j são calculados pela equação (14). Utilizou-se as esferas de 2", 3" e 5" por serem mais sensíveis a baixas energias obtendo-se 3 equações distintas.

Para a obtenção dos fatores de peso a_1 , a_2 e a_3 , quando forem utilizadas três esferas simultaneamente, deve-se resolver o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned}
 & a_1 \left[\int \epsilon_1^{(1)^2}(E) dE + \int \epsilon_1^{(2)^2}(E) dE \right] + a_2 \left[\int \epsilon_1^{(1)}(E) \epsilon_2^{(1)}(E) dE + \int \epsilon_1^{(2)}(E) \epsilon_2^{(2)}(E) dE \right] + \\
 & + a_3 \left[\int \epsilon_1^{(1)}(E) \epsilon_3^{(1)}(E) dE + \int \epsilon_1^{(2)}(E) \epsilon_3^{(2)}(E) dE \right] = \left[\int \epsilon_1^{(1)}(E) \epsilon_{ALB}(E) dE + \int \epsilon_1^{(2)}(E) \epsilon_{ALB}(E) dE \right] \\
 & a_1 \left[\int \epsilon_1^{(1)}(E) \epsilon_2^{(1)}(E) dE + \int \epsilon_1^{(2)}(E) \epsilon_2^{(2)}(E) dE \right] + a_2 \left[\int \epsilon_2^{(1)^2}(E) dE + \int \epsilon_2^{(2)^2}(E) dE \right] + \\
 & + a_3 \left[\int \epsilon_2^{(1)}(E) \epsilon_3^{(1)}(E) dE + \int \epsilon_2^{(2)}(E) \epsilon_3^{(2)}(E) dE \right] = \left[\int \epsilon_2^{(1)}(E) \epsilon_{ALB}(E) dE + \int \epsilon_2^{(2)}(E) \epsilon_{ALB}(E) dE \right] \\
 & a_1 \left[\int \epsilon_1^{(1)}(E) \epsilon_3^{(1)}(E) dE + \int \epsilon_1^{(2)}(E) \epsilon_3^{(2)}(E) dE \right] + a_2 \left[\int \epsilon_2^{(1)}(E) \epsilon_3^{(1)}(E) dE + \right. \\
 & \left. + \int \epsilon_2^{(2)}(E) \epsilon_3^{(2)}(E) dE \right] + a_3 \left[\int \epsilon_3^{(1)^2}(E) dE + \int \epsilon_3^{(2)^2}(E) dE \right] = \\
 & = \left[\int \epsilon_3^{(1)}(E) \epsilon_{ALB}(E) dE + \int \epsilon_3^{(2)}(E) \epsilon_{ALB}(E) dE \right]
 \end{aligned}$$

Este sistema de equação pode ser representado por,

$$\begin{aligned}
 Aa_1 + Ba_2 + Ca_3 &= D \\
 Ba_1 + Ea_2 + Fa_3 &= G \\
 Ca_1 + Fa_2 + Ha_3 &= I
 \end{aligned} \tag{15}$$

No caso de se considerar somente 2 esferas, teríamos de resolver o sistema de equação da forma,

$$\begin{aligned}
 Aa_1 + Ba_2 &= C \\
 Ba_1 + Da_2 &= E
 \end{aligned} \tag{16}$$

Os fatores de peso a_1 e a_2 para duas esferas e a_1 , a_2 e a_3 para três esferas são válidos para qualquer espectro de neutrons, já que servem apenas para aproximar a resposta do Dosímetro de Albedão.

Desta forma obtêm-se 3 equações da forma

$$R_{ALB} = a_1 C_1 + a_2 C_2 + a_3 C_3$$

$$R_{ALB} = a_1 C_1 + a_2 C_2 \quad e$$

$$R_{ALB} = a_2 C_2 + a_3 C_3,$$

onde,

R_{ALB} é o valor da simulação da leitura do Dosímetro de Albedo, a_1, a_2 e a_3 são os fatores de peso e C_1, C_2 e C_3 são as leituras das Esferas de Bonner.

Simulação do Fator $d(E)$

No caso de $f(E)$ ser o fator de conversão de fluência para dose equivalente, os fatores de peso a_j são calculados pela equação (13), utilizando-se a matriz M65 para as esferas de 2", 5" e 12".

Adotou-se esta opção em função dos resultados obtidos por outros autores¹⁶, onde a matriz M65 produz bons resultados para a combinação de esferas utilizadas.

Resolveu-se o seguinte sistema de equação:

$$a_1 f \epsilon_1^2(E) dE + a_2 f \epsilon_1(E) \epsilon_4(E) dE + a_3 f \epsilon_1(E) \epsilon_3(E) dE = f \epsilon_1(E) d(E) dE$$

$$a_1 f \epsilon_1(E) \epsilon_4(E) dE + a_2 f \epsilon_4^2(E) dE + a_3 f \epsilon_4(E) \epsilon_3(E) dE = f \epsilon_4(E) d(E) dE$$

$$a_1 f \epsilon_1(E) \epsilon_3(E) dE + a_2 f \epsilon_4(E) \epsilon_3(E) dE + a_3 f \epsilon_3^2(E) dE = f \epsilon_3(E) d(E) dE$$

recaindo no sistema de equações (15).

Neste caso os fatores de peso também são válidos para qualquer espectro de neutrons,

$$\dot{D}E = a_1 C_1 + a_2 C_2 + a_3 C_3$$

sendo $\dot{D}E$ a taxa de dose obtida pela simulação.

Resolução dos Sistemas de Equações

Os valores de $\epsilon_1(1)$, $\epsilon_2(1)$, $\epsilon_3(1)$, $\epsilon_4(1)$, $\epsilon_1(2)$, $\epsilon_2(2)$, $\epsilon_3(2)$, $\epsilon_4(2)$, ϵ_{ALB} e $d(E)$ foram obtidos por ajuste pelo método de mínimos quadrados¹⁹ dos valores de sensibilidade das Esferas de Bonner, Dosímetro de Albedo e Função $d(E)$.

Desde que a variação da energia é da ordem de 10^{10} (10^{-2} eV a 10^8 eV), enquanto que a variação da sensibilidade atinge no máximo o valor de 10^1 para o Dosímetro de Albedo e 10^2 para $d(E)$, o referi do ajuste torna-se difícil pois existe um erro muito grande. A maneira encontrada para minimizar o erro foi a utilização de $\ln E$ e, para melhorar a precisão do ajuste, as curvas foram divididas em 2, 3 ou 4 partes, conforme a Tabela (1).

Na obtenção dos polinômios, foi arbitrado o grau máximo cinco e escolhido aquele cujo erro máximo percentual, com relação aos resíduos, fosse mínimo.

Após os ajustes efetuou-se o produto dos polinômios e as integrais foram resolvidas nos intervalos de integração próprios, de acordo com a divisão das curvas.

TABELA 1 - Polinômios obtidos pelo ajuste das respostas das Esferas de Bonner, Dosímetro de Albedo e função d(E) juntamente com o erro máximo percentual do ajuste em relação aos resultados.

RESPOSTA	ENERGIA (eV)	COEFICIENTES DOS POLINÔMIOS	E.M.P. (%)
M60 - 2"	2,5.10 ⁻² a 1,0.10 ⁺⁰	0,51498.10 ⁻¹ -0,27284.10 ⁻¹ -0,12683.10 ⁺⁰ -0,58511.10 ⁻¹ -0,16249.10 ⁻¹ -0,14867.10 ⁻²	0,12
	1,0.10 ⁺⁰ a 1,5.10 ⁺⁷	0,51607.10 ⁻¹ -0,26590.10 ⁻² -0,12900.10 ⁺⁰ -0,18672.10 ⁻¹ -0,11917.10 ⁻² -0,28139.10 ⁻⁴	2,72
	2,5.10 ⁻² a 4,0.10 ⁺²	0,54911.10 ⁻¹ -0,43290.10 ⁺⁰ -0,24573.10 ⁻² -0,13321.10 ⁻² -0,24549.10 ⁻³ -0,12953.10 ⁻³	0,16
	4,0.10 ⁺² a 1,5.10 ⁺⁷	0,11519.10 ⁺² -0,22633.10 ⁺¹ -0,47101.10 ⁺⁰ -0,40226.10 ⁻¹ -0,10574.10 ⁻²	7,13
	2,5.10 ⁻² a 4,0.10 ⁺⁵	0,38455.10 ⁻¹ -0,45613.10 ⁺⁰ -0,37541.10 ⁻² -0,95817.10 ⁻³ -0,31059.10 ⁻³ -0,17132.10 ⁻⁴	0,97
	4,0.10 ⁺⁵ a 1,6.10 ⁺⁶	0,47828.10 ⁻¹ -0,23181.10 ⁺¹ -0,64405.10 ⁻¹ -0,75825.10 ⁻² -0,65575.10 ⁻³ -0,26444.10 ⁻⁴	8,96
	1,6.10 ⁺⁶ a 1,5.10 ⁺⁷	0,11643.10 ⁺³ -0,14394.10 ⁺² -0,62393.10 ⁺⁰ -0,14397.10 ⁻¹ -0,23482.10 ⁻³	5,86
	2,5.10 ⁻² a 1,0.10 ⁺⁰	0,25598.10 ⁻¹ -0,18676.10 ⁺⁰ -0,50657.10 ⁺⁰ -0,15173.10 ⁺⁰ -0,13629.10 ⁻¹	0,62
	1,0.10 ⁺⁰ a 1,5.10 ⁺⁷	0,25625.10 ⁻¹ -0,55091.10 ⁻¹ -0,81535.10 ⁻¹ -0,13093.10 ⁻¹ -0,83027.10 ⁻³ -0,19043.10 ⁻⁴	1,94
	2,5.10 ⁻² a 1,0.10 ⁺¹	0,27038.10 ⁻¹ -0,31371.10 ⁺⁰ -0,14352.10 ⁺⁰ -0,13485.10 ⁻¹ -0,10149.10 ⁻¹ -0,14686.10 ⁻²	2,85
	1,0.10 ⁺¹ a 1,5.10 ⁺⁷	0,36018.10 ⁻¹ -0,43528.10 ⁺⁰ -0,70413.10 ⁻¹ -0,64449.10 ⁻² -0,18085.10 ⁻³	6,12
	2,5.10 ⁻² a 4,0.10 ⁺⁵	0,15504.10 ⁻¹ -0,27530.10 ⁺⁰ -0,17787.10 ⁻¹ -0,35041.10 ⁻² -0,53125.10 ⁻³ -0,18734.10 ⁻⁴	2,84
DOSÍMETRO DE ALBEDO	4,0.10 ⁺⁵ a 1,0.10 ⁺⁶	0,26752.10 ⁻¹ -0,69718.10 ⁺⁰ -0,30211.10 ⁻¹ -0,30607.10 ⁻² -0,20169.10 ⁻³ -0,97051.10 ⁻⁵	11,67
	1,0.10 ⁺⁶ a 1,5.10 ⁺⁷	0,29589.10 ⁺² -0,35767.10 ⁺¹ -0,15204.10 ⁺⁰ -0,36823.10 ⁻² -0,67187.10 ⁻⁴	7,99
	12"		
	1,0.10 ⁻² a 1,6.10 ⁺⁴	0,68510.10 ⁻¹ -0,10467.10 ⁻¹	8,95
	1,6.10 ⁺⁴ a 4,0.10 ⁺⁶	0,32089.10 ⁻¹ -0,27272.10 ⁺⁰ -0,10614.10 ⁻¹ -0,22388.10 ⁻² -0,38855.10 ⁻³ -0,91268.10 ⁻⁵	12,56
	4,0.10 ⁺⁶ a 1,5.10 ⁺⁷	-0,43074.10 ⁺² -0,72832.10 ⁺¹ -0,39885.10 ⁺⁰ -0,16356.10 ⁻¹ -0,94053.10 ⁻³ -0,23871.10 ⁻⁴	5,70
	2,5.10 ⁻² a 1,0.10 ⁺¹	0,34060.10 ⁻¹ -0,71502.10 ⁺⁰ -0,48099.10 ⁻¹ -0,20921.10 ⁻¹	0,01
	1,0.10 ⁺¹ a 1,0.10 ⁺⁵	0,44493.10 ⁺¹ -0,54444.10 ⁻¹ -0,60950.10 ⁻² -0,77929.10 ⁻⁴	0,75
	1,0.10 ⁺⁵ a 1,5.10 ⁺⁷	0,12636.10 ⁺⁰ -0,28119.10 ⁺⁰ -0,20269.10 ⁺⁰ -0,84048.10 ⁻² -0,88596.10 ⁻³ -0,43351.10 ⁻⁴	5,58
	d(E)		
	2,5.10 ⁻² a 5,0.10 ⁺²	0,14492.10 ⁺¹ -0,55877.10 ⁻¹ -0,14926.10 ⁻¹	0,01
	5,0.10 ⁺² a 1,2.10 ⁺⁶	-0,58844.10 ⁻¹ -0,36442.10 ⁺¹ -0,20695.10 ⁺¹ -0,28599.10 ⁺⁰ -0,12388.10 ⁻¹	
	1,2.10 ⁺⁶ a 2,5.10 ⁺⁶	0,33061.10 ⁺² -0,27109.10 ⁺¹ -0,16299.10 ⁻¹ -0,12318.10 ⁻¹ -0,47271.10 ⁻³ -0,35469.10 ⁻⁴	0,39
	2,5.10 ⁺⁶ a 1,5.10 ⁺⁷	0,29841.10 ⁺³ -0,21457.10 ⁺² -0,23902.10 ⁺¹ -0,19439.10 ⁺⁰ -0,65590.10 ⁻² -0,66954.10 ⁻³	12,41

Na solução das integrais, deve-se considerar que os polinômios foram obtidos pelo ajuste de valores de $\ln E$ e sensibilidade ϵ , porém a integral deve ser resolvida para valores de E e ϵ . Há necessidade, portanto, de uma troca de variáveis com a utilização do fator e^E , que poderia ser considerado como um fator de expansão de área.

Deste modo, os coeficientes do sistema de equações (15) e (16), seriam obtidos pela soma conveniente de 88, 40, 52 e 61 integrais de produtos de polinômios.

Assim, obtêm-se

$$R_{ALB} = (0,2680C_{2''} + 0,2652C_{3''} + 0,0889C_{5''}).10^{-6}, \quad (17)$$

$$R_{ALB} = (0,0206C_{2''} + 0,5741C_{3''}).10^{-6} \text{ e} \quad (18)$$

$$R_{ALB} = (0,3605C_{3''} + 0,0719C_{5''}).10^{-6}. \quad (19)$$

Nestas equações, a unidade dos fatores $C_{2''}$, $C_{3''}$ e $C_{5''}$ é ctg/s e a unidade dos seus coeficientes é $R^{60}\text{Co/ctg}$, o que fornece

$\cdot R_{ALB}$ em R^{60}_{Co}/s .

E, para o cálculo da dose,

$$\dot{D}E = (1,4546C_{2''} + 2,4237C_{12''} - 0,0265C_{5''}) \cdot 10^{-4} \quad (20)$$

Nesta equação, a unidade dos fatores $C_{2''}$, $C_{12''}$ e $C_{5''}$ é ctg/s e a unidade dos seus coeficientes é $mRem/ctg$, o que fornece $\dot{D}E$ em $mRem/s$.

Teste do Programa

Fez-se um teste da exatidão do programa, resolvendo-se a integral do produto de duas funções $y = f(x)$ num intervalo (a, b) .

Ajustou-se polinômios de quinto grau, das funções $y=f(x)$, válidas em todo o intervalo (a, b) usando o método de mínimos quadrados¹⁹.

Resolveu-se a integral do produto de polinômios e os resultados obtidos pelos dois modos apresentaram um desvio de 0,019%.
REPRODUTIBILIDADE DO DOSÍMETRO DE ALBEDO

Em cada uma das 42 irradiações efetuadas, empregou-se dois conjuntos de cinco dosímetros numerados de 1 a 10 e fixados na superfície frontal do simulador de polietileno contendo uma solução de densidade e seção de choque equivalente ao tecido mole do corpo humano, solução de Goodman. Esta solução contém 65,6% de água destilada (H_2O), 26,8% de glicerina ($C_3H_8O_3$) e 7,6% de uréia (CH_4N_2O).

Foram obtidos os resultados médios das irradiações, para cada conjunto de cinco dosímetros irradiados simultaneamente, por uma fonte de Am-Be de 5 Ci²⁰, e a partir de uma fonte de ^{252}Cf (51,61 μg) sem revestimento e com revestimentos de 11cm e 45cm de grafite.

Observou-se que os desvios da taxa de dose média, para todas as irradiações efetuadas, é no máximo de 12% para a fonte de ^{252}Cf revestida com 45 cm de grafite.

A reprodutibilidade individual de cada Dosímetro de Albedo foi avaliada para os diversos espectros acima citados²⁰.

Para cada dosímetro empregou-se sempre o mesmo par de detectores termoluminescentes identificados por T/1 a T/10, representando os TLD 600 e TLD 700 respectivamente.

O desvio máximo em relação à taxa de dose média para as diversas irradiações foi 18%. Deste modo, no teste de reprodutibilidade dos Dosímetros de Albedo, os resultados foram considerados satisfatórios, desde que unicamente na leitura dos TLDs pode haver desvios na ordem de 5 a 10%.

INTERVALO DE LEITURA DE UTILIZAÇÃO DO DOSÍMETRO DE ALBEDO

Observou-se que o desvio da média das taxas de dose, para as diversas irradiações com uma mesma fonte, varia no máximo de 12%, para os diversos tempos de irradiações²⁰.

Assim, os valores de leituras do Dosímetro de Albedo mostram-se lineares em função do tempo de irradiação para o intervalo de doses testado (10m R^{60}_{Co} a 2700m R^{60}_{Co}). Testes posteriores serão efetuados para se verificar o intervalo de utilização do dosímetro dentro de uma precisão aceitável.

TESTE DO FATOR DE CALIBRAÇÃO DO DOSÍMETRO DE ALBEDO

Foram efetuados teste do fator de calibração do Dosímetro de Albedo²⁰, para as fontes de Am - Be, de 5 Ci, a 55 cm e a 100 cm e para ²⁵²Cf a 100 cm do simulador, respectivamente.

Observa-se que o desvio entre os valores de taxa de dose obtidos experimentalmente pelo PLC²⁰ e pelos Dosímetros de Albedo foi 7,19%, 12,45% e 3,59% para as três situações consideradas.

Pelos resultados conclui-se que a curva de resposta do Dosímetro de Albedo, os fatores de calibração dos detetores TLDs e as características do simulador estão sendo empregados corretamente.

A taxa de dose calculada teoricamente para as fontes de Am - Be e ²⁵²Cf são dadas respectivamente pelas expressões^{16,21,22}:

$$\dot{D}E = \frac{Q}{4\pi R^2} d(E) \quad e \quad (21)$$

$$\dot{D}E = 6,20 \cdot 10^6 \frac{m}{R^2} \quad (22)$$

onde,

$\dot{D}E$ é a taxa de dose equivalente (mRem s⁻¹),

Q é a taxa de emissão da fonte de Am - Be (n/s),

$d(E)$ é o fator de conversão da fluência para dose equivalente (mRem cm²),

R é o afastamento da fonte (cm) e

m é a massa da fonte de Cf (g).

A taxa de dose fornecida pelo PLC e pelos Dosímetros de Albedo, para ambas as fontes, é fornecida pela expressão

$$\dot{D}E = \frac{Y}{\epsilon} d(E) \quad (23)$$

onde,

Y é a leitura do PLC (cps) ou do Dosímetro de Albedo (⁶⁰Co s⁻¹),

ϵ é a sensibilidade do PLC (ctg n⁻¹cm²) ou do Dosímetro de Albedo (⁶⁰Co n⁻¹cm²),

$d(E)$ é o fator de conversão de fluência para dose equivalente, para as energias médias das fontes (mRem cm²).

COMPROVAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE SIMULAÇÃO

As leituras das Esferas de Bonner, do Dosímetro de Albedo e do "Rem-Counter", bem como os valores obtidos pelas simulações juntamente com seus desvios, são apresentados na Tabela (2).

Na simulação da resposta do Dosímetro de Albedo, a equação (19) é a que melhor satisfaz os valores experimentais para irradiações com as fontes de diferentes espectros.

TABELA 2 - Comprovação das equações obtidas pelas simulações para diferentes espectros.

FONTE		Am-Be (5 Ci)	²⁵² Cf (51,61 µg)		
			Sem Grafite	11 cm Grafite	45 cm Grafite
Distância (cm)		55	100	100	100
Esferas de Bonner	2" (cps)	2,27	16,54	28,12	20,45
	3" (cps)	8,07	58,34	80,18	36,13
	5" (cps)	26,58	163,34	151,49	43,01
	12" (cps)	29,47	92,95	58,98	8,55
Dosímetro de Albedo (10 ⁶ R ⁶⁰ Co s ⁻¹)		3,31	24,68	31,55	12,12
Equação 17	Valor(10 ⁶ R ⁶⁰ Co s ⁻¹)	5,11	34,43	42,27	18,89
	Desvio (%)	54	40	34	56
Equação 18	Valor(10 ⁶ R ⁶⁰ Co s ⁻¹)	4,68	33,83	46,61	21,16
	Desvio (%)	41	37	48	75
Equação 19	Valor(10 ⁶ R ⁶⁰ Co s ⁻¹)	4,82	32,78	39,80	16,12
	Desvio (%)	46	33	26	33
Rem-Counter (10 ³ mRem s ⁻¹)		9,17	36,11	24,44	4,16
Equação 20	Valor(10 ³ mRem s ⁻¹)	7,40	24,50	17,98	4,93
	Desvio (%)	19	32	26	18

Para uma melhor aproximação da leitura do Dosímetro de Albedo, de acordo com os desvios observados, sugere-se que um fator multiplicativo igual a 0,7 seja aplicado na equação (19), o que corresponde a uma redução do valor da dose lida pelas Esferas de Bonner em torno de 30%.

Os desvios encontrados pelas equações (17), (18) e (19) ocorrem principalmente devido as imprecisões nos valores da curva de resposta do Dosímetro de Albedo, em especial para energias abaixo de 120 KeV, e das matrizes respostas empregadas.

A equação (20) utilizada para simulação do fator de conversão de fluência para dose foi comparada com os resultados obtidos pela leitura do "Rem-Counter", consistindo de um sistema de detecção modelo 9140 fabricado pela Texas Nuclear Division, USA.

A taxa de dose fornecida pelo "Rem-Counter", quando comparada com a fornecida pelo PLC para as fonte de Am - Be e ²⁵²Cf, apresenta um desvio de 11% e 16% respectivamente²⁰.

Uma aproximação da taxa de dose, com base nas matrizes

respostas existentes, não pode ser obtida sem os termos negativos devido a elevada sensibilidade das esferas de 10 e 12 polegadas na região de altas energias. Conseqüentemente, precisam ser subtraídas as taxas de contagem medidas pelas esferas com diâmetros entre 3 e 5 polegadas, as quais possuem sensibilidade máxima na região de energia intermediária¹⁶.

Com espectros contendo alta proporção de neutrons intermedíarios, como em geral ocorre nas vizinhanças de reatores e aceleradores, pequenas diferenças podem ocorrer na solução da equação, resultando erros consideráveis na medida da dose equivalente.

Desta forma, precisa-se fazer considerações acerca do intervalo de validade do método. Para as fontes utilizadas, existe uma variação máxima da taxa de dose em torno de 30%.

FATOR DE CALIBRAÇÃO DO DOSÍMETRO DE ALBEDO

O fator de calibração do Dosímetro de Albedo pode ser calculado pelas expressões (6) e (7). Na expressão (6) utiliza-se a equação (19) para simular a resposta do Dosímetro de Albedo e faz-se a leitura da dose com um "Rem-Counter". Na expressão (7), a equação (19) simula a resposta do Dosímetro de Albedo e a expressão (20) simula o fator de conversão de fluência para dose equivalente.

A dose total no local de medida é dada por

$$D = FC \cdot L_{ALB}, \quad (24)$$

onde,

D é a dose total no local de medida

FC é o fator de calibração do dosímetro no local de medida e

L_{ALB} é a leitura fornecida pelo Dosímetro de Albedo.

O fator de calibração do Dosímetro de Albedo, para qualquer espectro de neutrons de acordo com a equação (7) é dado por

$$FC = \frac{(1,4546 C_2 + 2,4237 C_{12} - 0,0265 C_5) \cdot 10^{-7}}{0,7 \cdot (0,3605 C_3 + 0,0719 C_5) \cdot 10^{-6}} \quad (25)$$

onde,

FC é o fator de calibração do Dosímetro de Albedo no local de medida e

C_2, C_3, C_5 e C_{12} são as leituras das Esferas de Bonner em cps.

Deste modo, torna-se possível determinar rapidamente os fatores de calibração do Dosímetro de Albedo para todas as posições necessárias pela simples leitura das Esferas de Bonner.

O erro cometido na determinação do fator de calibração local do Dosímetro de Albedo equação (25), é estimado considerando-se:

a) o erro na simulação da resposta do Dosímetro de Albedo, equação (19), após correção com o fator multiplicativo devido ao desvio

sistemático observado $\pm 5\%$ e

b) o erro na simulação da dose equivalente, equação (20) $\pm 30\%$.

O erro máximo no valor fornecido pelos Dosímetros de Albedo, para qualquer espectro, será considerado 25%.

Pela análise das considerações acima, obteve-se o desvio máximo observado no cálculo da dose absorvida no local de medida equação (24), como sendo $\pm 40\%$, o que em termos de proteção radiológica é um resultado razoável.

Pode-se assim considerar a dose como sendo 40% maior para qualquer situação, aumentando a segurança do usuário.

De acordo com esta consideração, poder-se-ia considerar estes 40% inseridos no cálculo do fator de calibração como um fator multiplicativo igual a 1,4.

Neste caso, a equação (25) torna-se,

$$FC = \frac{2.(1,4546 C_2 + 2,4237 C_{12} - 0,0265 C_5).10^{-7}}{(0,3605 C_3 + 0,0719 C_5).10^{-6}} \quad (26)$$

Assim a dose total no local de medida (equação 24) é estimada com uma segurança adicional de 40%.

CONCLUSÕES

Da análise dos valores médios de dose obtidas em irradiações, individuais ou em conjunto do Dosímetro de Albedo, para teste de reprodutibilidade, observou-se desvios da ordem de 18% e 12% respectivamente. Estes resultados são considerados satisfatórios em termos de Proteção Radiológica individual.

Verificou-se um comportamento aproximadamente linear da dose total absorvida em função do tempo de exposição, num intervalo testado de dose equivalente compreendida entre 10 mRem e 3000 mRem. Este intervalo torna viável a utilização do dosímetro em monitoração de rotina, pessoal ou de área.

O método de determinação dos fatores de calibração do Dosímetro de Albedo, através da simulação da resposta do dosímetro pela combinação conveniente de respostas de Esferas de Bonner de diversos diâmetros, pode ser utilizado para diferentes espectros de neutrons.

A dose no local de medida também pode ser determinada da maneira descrita acima ou por leitura direta fornecida por um monitor do tipo "Rem-Counter".

Pelos resultados obtidos, sugere-se dois modos de determinação do fator de calibração do Dosímetro de Albedo:

a. Simulando-se a leitura fornecida pelo Dosímetro de Albedo e medindo-se a dose equivalente por meio de um "Rem-Counter" ou

b. Simulando-se a leitura fornecida pelo Dosímetro de Albedo e pelo "Rem-Counter".

Para simular o valor de leitura do Dosímetro de Albedo sugere-se um fator multiplicativo igual a 0,7 correspondendo a um desvio sistemático de 30%, ao comparar-se o valor fornecido pela equação de simulação e o lido pelos Dosímetros de Albedo.

Na simulação da dose equivalente supõe-se que o valor de dose fornecida pela equação de simulação possa oscilar entre $\pm 30\%$.

Pela análise dos erros envolvidos nos cálculos, a dose equivalente total no local de medida pode variar no máximo de 40%, que será tomada no sentido de aumentar a segurança do usuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hankins, D.E., Factors Affecting the Design of Albedo Neutron Dosimeters Containing Lithium Fluoride Thermoluminescent Dosimeters, Report LA-4832, Los Alamos Scientific Laboratory (1972).
2. Piesch, E., Burgkhordt, B., LiF Albedo Dosimeters for Personnel Monitoring in a Fast-Neutron Radiation Field, Proc. Symp., IAEA, Vienna (1973).
3. Preston, H.E., Peabody, C.O., Measurements of Personnel Neutron Dose in Reactor and Associated Areas, Proc. Symp., IAEA, Vienna (1973).
4. Harvey, J.R., Hudd, W.H.R. and Townsend, S., A Personal Dosimeter which Measures Doses from Thermal and Intermediate Energy Neutrons and from Gamma and Beta Radiation, Berkeley Nuclear Laboratory, Report RD/B/N-1547, Berkeley, England (1969).
5. Brown, J.B.C., Gayton, F.M., Hall, J.A., Harvey, J.R. and Weeb, G.A.M., Recommendations Concerning the Use of the Personnel Neutron Albedo Dosimeter, Berkeley Nuclear Laboratory, Report RD/B/R-828, Berkeley, England (1967).
6. Alsmiller Jr., R.G., Barish, J., The Calculated Response of LiF Albedo Dosimeters to Neutron with Energies < 400 MeV, Health Physics, 26, (1974).
7. Hoy, J.E., Personnel Albedo Neutron Dosimeter with Thermoluminescent ^6LiF and ^7LiF Report DP-1277, E.I. du Pont de Nemours, Savannah River Plant (1972).
8. Harvey, J.R., Beynon, S., A Neglected Energy Range, Proc. Symp. on Neut. Dosim. in Biol. and Med., Neuherberg, Munich (1972).
9. Seguin, H., Resultats Preliminaires d'un Programme de Comparaison des Dosimetres Individuels a Neutrons, Proc. Symp. on Neut. Monit. for Rad. Prot. Purposes, IAEA, Vienna (1973).
10. Becker, K., Solid State Dosimetry, CRC Press, Cleveland, Ohio (1973).
11. Nachtigall, D., Contribution of Intermediate Energy Neutrons to

- the Neutron Dose-Equivalent Outside the Shielding of Reactors and High Energy Accelerators, Proc. Symp. on Neut. Monit., IAEA, Vienna (1967).
12. Hankins, D.E., Monitoring Intermediate Energy Neutrons, Health Physics, 9, (1963).
 13. Regulatory Guide 8.14, Office of Standards Development, U.S. Nuclear Regulatory Commission, (1976).
 14. Furuta, Y., Tanaka, S., Response of ^6LiF and ^7LiF Thermoluminescence Dosimeters to Fast Neutrons, Nucl. Inst. Meth., 104, (1972).
 15. Carvalho, W.B.D., Monitor Pessoal de Neutrons Baseado na Técnica de Albedo, Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro (1975).
 16. Nachtigall, D., Burger, G., Dose Equivalent Determinations in Neutron Fields by Means of Moderator Techniques, Topics in Radiation Dosimetry, Academic Press (1972).
 17. Bramblet, R.L., Ewing, R.I. and Bonner, T.W., A New Type of Neutron Spectrometer, Nucl. Inst. Meth., 9, (1960).
 18. Awschalom, M., Use of Multisphere Neutron Detector for Dosimetry of Mixed Radiation Fields, Proc. Symp. on Neut. Monit., IAEA, Vienna (1967).
 19. Reinert de Lima, C.A., PAJMQ - Programa para Ajustamento Automático por Mínimos Quadrados, IME.
 20. SCHUCH, L.A., Calibração de Monitores de Neutrons com Moderadores e Aplicação na Determinação de Fatores de Calibração de Dosímetros de Albedo. Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro (1979).
 21. Californium-252, Guide for Fabricating and Handling ^{252}Cf Sources, SRO 153, (1971).
 22. Fields, P.R., Diamond, H., Californium - 252, A Primary Standard for Neutrons, Proc. Symp. on Neut. Dosim. in Biol. and Med., IAEA (1962).

Recebido em setembro, 1986; aceito em outubro, 1986.