

CALIBRAÇÃO DO LONG COUNTER DE DE PANGHER COM O PADRÃO SECUNDÁRIO DESTINADO A CALIBRAÇÃO DE MONITORES DE NEUTRONS COM MODERADORES

Luiz Alexandre Schuch

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

Ivanor Antonio Sachett

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

RESUMO

O presente trabalho visa fundamentalmente a calibração do Long Counter de De Pangher, utilizado como padrão secundário, destinado a calibração de monitores de neutrons com moderadores.

Empregou-se como padrão primário uma fonte de Am-Be de 5 Ci padronizada, em relação a taxa de emissão de neutrons, pelo método de ativação de um banho de sulfato de manganês.

Devido ao formato cilíndrico da fonte padrão, determinou-se seu fator de anisotropia. Foram efetuados testes de reprodutibilidade do Long Counter e determinou-se experimentalmente, pelo método do cone de sombra, os efeitos de espalhamento no ambiente.

SUMMARY

SCHUCH, L.A. and SACHETT, I.A., 1985. Calibration of the De Pangher Long Counter used as Secondary Standard for Calibration of Neutron Moderator Detectors. *Ciência e Natura*, 7:19-30.

In this work a De Pangher Long Counter used as a secondary standard for calibration of neutron moderator detectors was calibrated.

A 5 Ci Am-Be standard source calibrated for neutron emission rate by the manganese sulfate bath method was used as a primary standard. Due to the cylindrical shape of the standard source an anisotropy factor was determined, The scattering effects were experimentally determined using the shadow cone method and reproducibility tests were also done.

INTRODUÇÃO

Detetores com moderadores são amplamente utilizados em proteção radiológica (1,2) para propósitos de calibração de fontes e monitores de neutrons. O "Long Counter" de De Pangher (PLC) que pode ser empregado como padrão secundário, possui alta sensibilidade para detecção de neutrons, resposta uniforme, estabilidade e excelente discriminação à radiação gama.

A calibração destes instrumentos é feita principalmente por meio de fontes padrões de neutrons com o objetivo de determinar a

sensibilidade por neutron incidente, calculada variando-se a distância entre a fonte e o detetor e aplicando-se fórmulas semi-empíricas que incluem a emissão da fonte, fatores de espalhamento e parâmetros obedecendo a lei do inverso do quadrado da distância (3-9).

Uma versão deste "Long Counter" é o PLC - Modelo III, que utiliza polietileno como moderador e possui um detetor para neutrons térmicos do tipo BF_3 blindado com polietileno borado e revestido com alumínio e cádmio.

SALÃO DE BAIXO ESPALHAMENTO

Deve-se evitar tanto quanto possível a presença de materiais espalhadores nas vizinhanças do sistema fonte-detetor, de modo que a contribuição de espalhamento seja mínima. O laboratório deve possuir grandes dimensões, ser constituído de materiais de baixa densidade e o sistema fonte-detetor posicionado o mais elevado possível do solo.

O sistema de calibração usado consiste de um conjunto de trilhos com carrinhos para fonte e detetor, montados numa plataforma de 2,20 metros do nível do solo, num salão de baixo espalhamento de 7m X 18m X 6m, de paredes de madeira bastante fina.

Existem dois carrinhos com controle de parada automática e manual, os quais podem ser posicionados em distâncias pré-selecionadas por meio de motores e células fotoelétricas. O controle é feito por um circuito interno de televisão, de uma sala anexa, onde se encontra o sistema de contagem. Outros três carrinhos são disponíveis, sendo um deles empregado como suporte da fonte, possuindo acoplado um dispositivo para girá-la durante as medidas.

PROCEDIMENTO TEÓRICO

Para a calibração de monitores é necessário conhecer-se o valor real do campo em um ponto. A taxa de neutrons provenientes de uma fonte puntual varia com a distância de acordo com a lei $1/r^2$.

Evidentemente esta lei não pode ser empregada devido a forma não puntual da fonte e detetor, anisotropia da fonte e radiação espalhada no ambiente, sendo necessário a introdução de correções.

Uma simples aproximação da taxa de contagem seria,

$$Y = \epsilon \frac{Q}{4\pi (R+A)^2} \quad [1]$$

Considerando a absorção de neutrons pelo ar e o fator de anisotropia da fonte,

$$Y = \epsilon \frac{F Q \ell^{-\Sigma R}}{4\pi (R+A)^2} \quad [2]$$

A equação [2] pode ser utilizada somente quando a contribuição

do espalhamento na taxa de contagem for nula. Caso contrário, esta contribuição pode ser considerada teoricamente de três modos distintos:

$$Z_s = S_o \quad ,$$

$$Z_s = \frac{Z}{R} \quad e$$

$$Z_s = \frac{Z}{R} + S_o$$

Introduzindo-se as expressões acima na equação [2], obtêm-se as fórmulas segundo as quais as taxas de contagem, para as diferentes distâncias, podem ser determinadas:

$$Y = \frac{K' e^{-\Sigma R}}{(R+A)^2} + S_o \quad , \quad [3]$$

$$Y = \frac{K' e^{-\Sigma R}}{(R+A)^2} + \frac{Z}{R} \quad e \quad [4]$$

$$Y = \frac{K' e^{-\Sigma R}}{(R+A)^2} + \frac{Z}{R} + S_o \quad [5]$$

Com espalhamento determinado experimentalmente, segue que:

$$Y' = \frac{K' e^{-\Sigma R}}{(R+A)^2} \quad [6]$$

sendo,

Y a taxa de contagem,

Y' a taxa de contagem com a contribuição de espalhamento subtraída,

e a sensibilidade do detetor,

F o fator de anisotropia,

Q a taxa de emissão da fonte,

R a distância fonte-detetor,

A o centro efetivo do detetor,

Σ a seção de choque macroscópica de absorção de neutrons no ar e

So e $\frac{Z}{R}$ os termos que consideram o espalhamento.

A constante K' é definida pela seguinte relação:

$$K' = e \frac{FQ}{4\pi}$$

De Pangher considerou constante o espalhamento (3) isto é, $Z_s = S_o$. Hajnal (4) analisou seus dados com base na equação geral para transporte de neutrons, obtida por Lindenbaum (10). Através de uma série de simplificações feitas nesta equação, pode-se obter a equação [5].

Os parâmetros K', A, So, Z são derivados dos dados experimentais por meio de ajuste dos pares (Y_i, R_i) às equações [3], [4],

[5] e [6] pelo método de mínimos quadrados. Quatro programas computacionais foram utilizados para os ajustes. Em cada um dos programas foram considerados todos os pontos, eliminados os pontos mais próximos da fonte, os pontos mais afastados da fonte e pontos extremos, respectivamente. Este procedimento foi empregado para saber-se o comportamento dos parâmetros calculados para diferentes distâncias.

A equação [6] é utilizada quando o espalhamento é determinado experimentalmente utilizando-se um Cone de Sombra, obtendo-se resultados mais estáveis para longas distâncias.

Este cone é constituído de polietileno e revestido com cádmio, possuindo ângulo sólido adequado e comprimento suficiente para assegurar a moderação e absorção completa dos neutrons incidentes. Com o cone colocado entre a fonte e o detetor, o monitor detetará somente a contribuição do espalhamento. Subtraindo-se esta contribuição da taxa de contagem total sem o cone, obtém-se a taxa de contagem Y' da equação [6].

REPRODUTIBILIDADE DO "LONG COUNTER"

Foram feitos testes de reprodutibilidade do PLC com sua fonte interna de Am-Be de 30 mCi. Os valores médios de contagem, bem como seus desvios padrões para os diferentes dias, foram determinados. Concluiu-se que as contagens para uma mesma série de medidas diferem no máximo 1%, confirmando resultados obtidos para outros PLCs (3, 11, 12).

FATOR DE ANISOTROPIA DA FONTE

Em calibração de rotina, a fonte padronizada de forma cilíndrica é usada num pequeno suporte, com seu eixo na posição vertical e normal à direção fonte-detetor.

A fonte de Am-Be de atividade 5 Ci foi considerada como padrão primário. Devido a sua forma cilíndrica, determinou-se seu fator de anisotropia (9). Por conveniência fabricou-se um suporte especial para medidas de anisotropia, no qual a fonte é orientada horizontalmente, e são feitas contagens com PLC, com incremento angular de $\pi/6$ radianos. Medidas de anisotropia foram feitas com a face frontal do detetor BF₃ do PLC a 80 cm da fonte.

A taxa de contagem do PLC, para um dado ângulo com o eixo da fonte, é $F(\theta)$ e supõe-se que o número de neutrons por radiano em θ é dado por $P.F(\theta)$, onde P é um fator que corrige a leitura do PLC, tornando possível a determinação do número de neutrons realmente emitidos pela fonte.

O número de neutrons, dN , que está sendo emitido pela fonte, segundo um ângulo sólido $d\Omega$, é definido por

$$dN = P \cdot F(\theta) d\Omega,$$

onde $d\Omega = 2\pi \sin(\theta) d\theta$.

Os neutrons emitidos entre zero e π radianos \bar{e}

$$N = 2\pi P \int_0^\pi F(\theta) \sin(\theta) d\theta. \quad [7]$$

A taxa de emissão efetiva para a geometria utilizada, isto \bar{e} , $\theta = \pi/2$ \bar{e}

$$N' = 4\pi P F(\theta)_{\pi/2}. \quad [8]$$

Substituindo o fator da equação [7] e fazendo $N' = NF$, tem

-se

$$F = \frac{2F(\theta)_{\pi/2}}{\int_0^\pi F(\theta) \sin(\theta) d\theta} \quad [9]$$

que \bar{e} o fator de anisotropia da fonte de neutrons.

O fator $F(\theta)$ utilizado na equação [9] \bar{e} calculado através de um polinômio determinado pelo ajuste de valores tabelados (Tabela 1) usando o método de mínimos quadrados (13) com um erro máximo percentual de 0,46. A função $\sin(\theta)$ foi expandida em série de Taylor. Resolvendo-se a equação [9] encontrou-se um fator de anisotropia de 1,0095.

Devido a isso, a taxa de emissão de neutrons pela fonte será considerada aproximadamente 1% maior do que o seu valor de padronização.

TABELA 1. TAXAS DE CONTAGEM FORNECIDAS PELO PLC PARA OS DIFERENTES ÂNGULOS ENTRE O EIXO DE SIMETRIA DA FONTE E DIREÇÃO FONTE-DETECTOR.

ÂNGULO (Rd)	cps
0,0000	423,7
0,3490	419,1
0,6981	416,0
1,0471	420,0
1,3962	425,4
1,7453	425,5
2,0943	422,7
2,4434	421,2
2,7925	417,0
3,1415	419,6
	425,2

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram feitas 24 medidas desde 17,5 cm até 345,5 cm de

distância do eixo da fonte à face do detetor BF_3 , tomado como ponto de referência.

Os valores de taxa de contagem para as fontes de Am-Be de 5 Ci e 1 Ci, foram obtidas com as contagens fixadas em 50.000 e 10.000 sem o cone de sombra e 10.000 e 3.000 com o cone de sombra.

A taxa de contagem de radiação de fundo foi desprezada por ser insignificante comparada com as taxas de contagem devido às fontes.

Utilizou-se três programas computacionais para solucionar as equações [3], [4] e [5], respectivamente. Os dados de entrada são: distâncias fonte-detetor, taxas de contagem, emissão da fonte corrigida devido à anisotropia e seção de choque macroscópica de absorção de neutrons no ar. Como dados de saída são fornecidos os valores de centro efetivo, sensibilidade do PLC e fatores de espalhamento.

Os valores de sensibilidade obtidos por estas equações estão representados nas Figuras 1, 2 e 3.

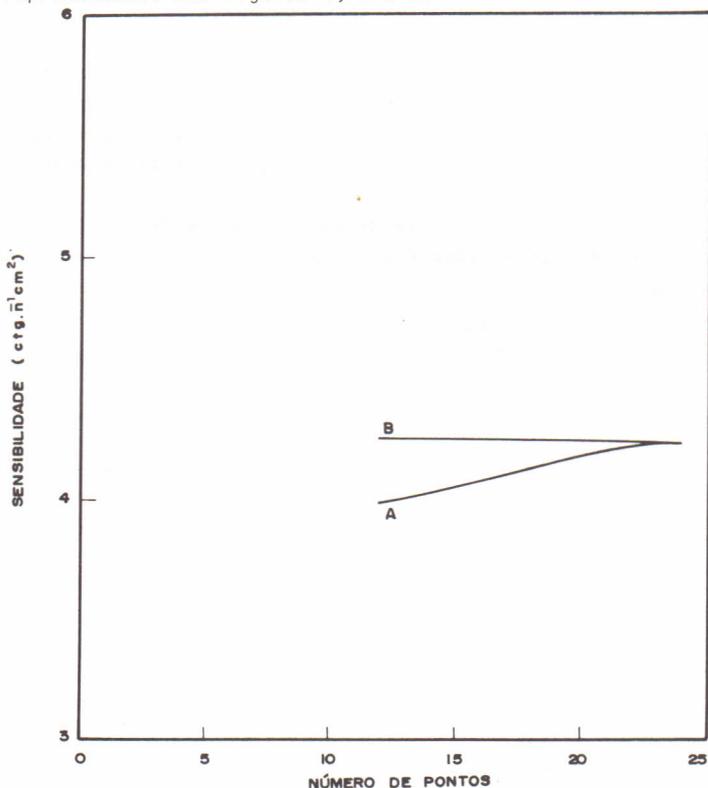


Figura 1. Valores de sensibilidade do PLC, para a fonte de neutrons de Am-Be (5 Ci), em função do número de pontos utilizados no ajuste pela equação 3. Retirou-se no ajuste, sucessivamente, pontos internos (curva A) e externos (curva B), com pontos de leitura tomados no intervalo entre 17,5 cm e 345,5 cm.

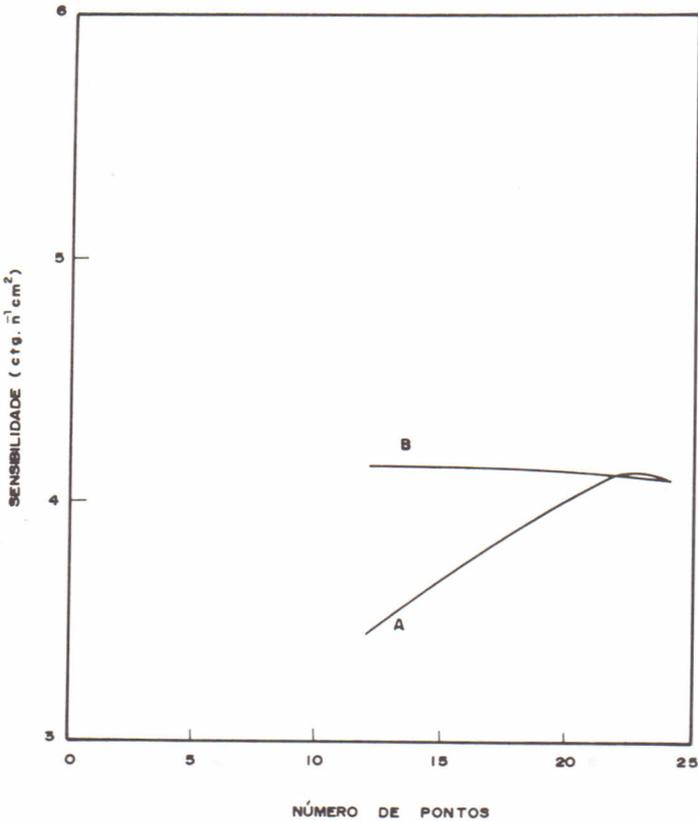


Figura 2. Valores de sensibilidade do PLC, para a fonte de neutrons de Am-Be (5 Ci), em função do número de pontos utilizados no ajuste pela equação 4. Retirou-se no ajuste, sucessivamente, pontos internos (curva A) e externos (curva B), com pontos de leitura tomados no intervalo entre 17,5cm e 345,5 cm.

O cálculo da sensibilidade foi efetuado eliminando-se os pontos mais próximos da fonte (Curva A), os mais afastados (Curva B) e os extremos.

Pela análise destas figuras verifica-se que o fator de espalhamento Z_s nas equações [3], [4] e [5] não satisfaz corretamente as condições de espalhamento.

Os valores de S_0 , obtidos a partir do programa que soluciona a equação [3] foram subtraídos dos valores de taxa de contagens medidas e efetuados novos ajustes, não havendo variações substanciais nos valores de centro efetivo e sensibilidade.

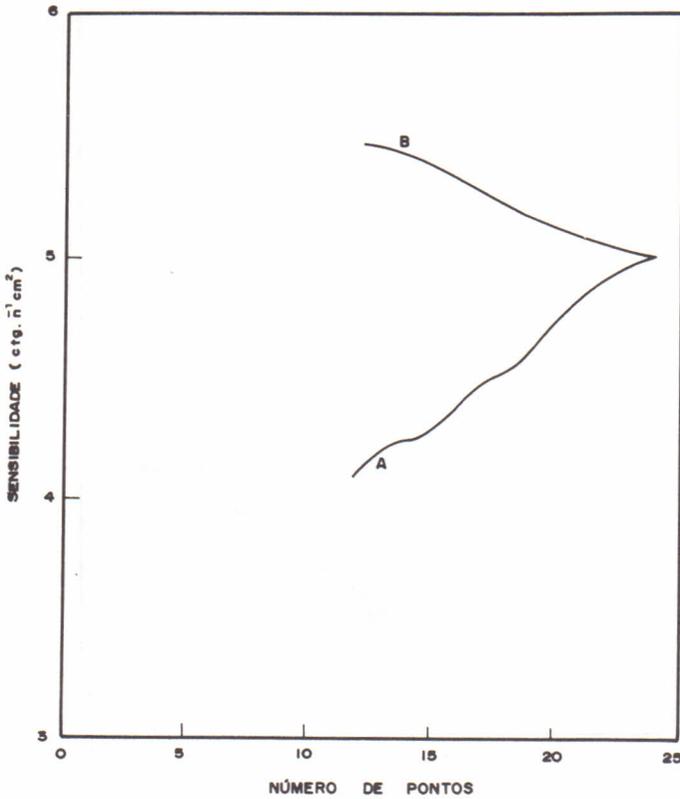


Figura 3. Valores de sensibilidade do PLC, para a fonte de neutrons de Am-Be (5 Ci), em função do número de pontos utilizados no ajuste pela equação 5. Retirou-se no ajuste, sucessivamente, pontos internos (curva A) e externos (curva B), com pontos de leitura tomados no intervalo entre 17,5cm e 345,5 cm.

Supõe-se a impossibilidade de ajuste por estas equações devido ao espalhamento variar continuamente, não havendo regiões de afastamento onde permaneça constante, como pode-se constatar pela Figura 4.

Certamente, a causa desta variação contínua é devido ao espalhamento nas colunas de concreto do prédio, nos trilhos e no próprio carrinho do "Long Counter".

Com o cone de sombra posicionado entre a fonte e o detector, os valores de taxas de contagem de espalhamento para as diferentes distâncias são subtraídas daquelas sem o cone de sombra. Esses valores são ajustados de acordo com a equação [6].

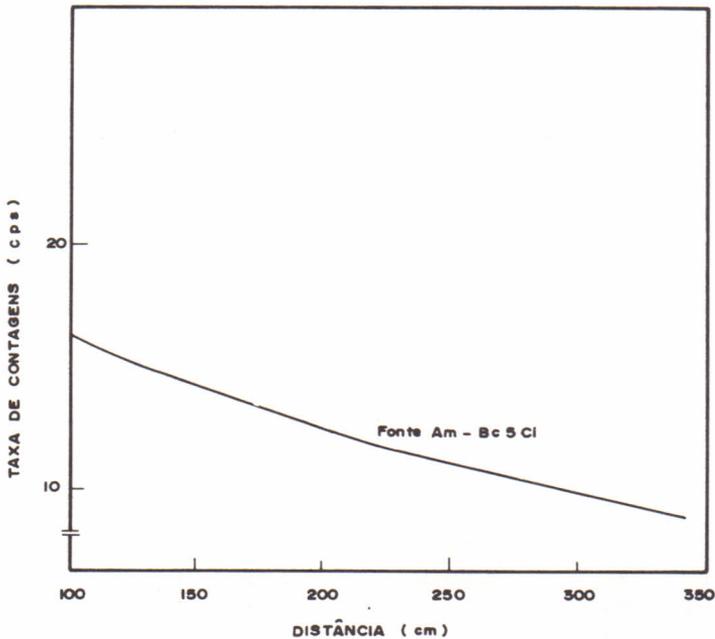


Figura 4. Taxa de contagem de espalhamento para diferentes distâncias fonte-detetor, utilizando-se o cone de sombra posicionado entre as fontes de neutrons e o PLC.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2, para a fonte de Am-Be de 5 Ci.

Pela Figura 5 conclui-se que estes resultados de sensibilidade estão em concordância com os apresentados em bibliografia (2, 3, 9).

A partir desta análise, os valores de sensibilidade e centro efetivo, tomados com referência ao espectro de fontes de Am-Be, são

$$\epsilon = 3,6 \text{ ctg. n}^{-1} \text{ cm}^2$$

$$A = 13,3 \text{ cm}$$

PADRONIZAÇÃO DE FONTES POR INTERMÉDIO DO PADRÃO SECUNDÁRIO

A partir das considerações anteriores, pode-se padronizar qualquer fonte de neutrons por intermédio do padrão secundário.

Foram feitos 4 programas computacionais, de acordo com as equações [3], [4], [5] e [6], sendo que nesta última, a contribuição do espalhamento é determinada experimentalmente pelo uso do cone de sombra.

TABELA 2. RESULTADOS OBTIDOS PELA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO [6] PARA A FONTE DE Am-Be 5 Ci.

PONTOS	INTERVALO (cm)	$k'(\text{ctg.cm}^2\text{s}^{-1}).10^7$	$\Sigma\sigma(\text{ns}^{-1}).10^3$	A(cm)	$\epsilon(\text{ctg.n}^{-1}\text{cm}^2)$
Variando-se o limite inferior					
12	102,5 - 345,5	0,33220	0,14	13,099	3,5987
11	114,5 - 345,5	0,33134	0,13	13,299	3,5895
10	128,5 - 345,5	0,33100	0,13	13,299	3,5857
9	144,5 - 345,5	0,33149	0,13	13,299	3,5911
8	161,5 - 345,5	0,33344	0,13	13,299	3,6122
7	180,5 - 345,5	0,33651	0,12	13,299	3,7117
6	201,5 - 345,5	0,34263	0,11	13,299	3,7117
Variando-se o limite superior					
12	102,5 - 345,5	0,33220	0,14	13,099	3,5987
11	102,5 - 310,5	0,33317	0,14	13,209	3,6093
10	102,5 - 279,5	0,33319	0,14	13,299	3,6095
9	102,5 - 250,5	0,33323	0,14	13,299	3,6100
8	102,5 - 225,5	0,33331	0,14	13,299	3,6107
7	102,5 - 201,5	0,33233	0,19	13,299	3,6002
6	102,5 - 180,5	0,33247	0,18	13,299	3,6016
Variando-se os limites extremos					
12	102,5 - 345,5	0,33220	0,14	13,099	3,5987
10	114,5 - 310,5	0,33138	0,13	13,299	3,5899
8	128,5 - 279,5	0,33101	0,13	13,299	3,5858
6	144,5 - 250,5	0,33162	0,13	13,299	3,5924
4	161,5 - 225,5	0,33437	0,12	13,299	3,6222

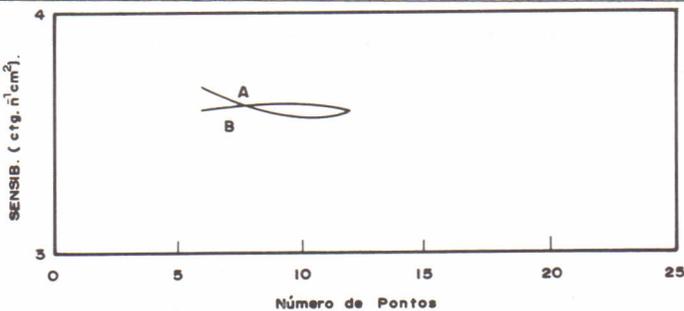


Figura 5. Valores de sensibilidade do PLC, para a fonte de neutrons de Am-Be(5Ci) em função do número de pontos utilizados no ajuste pela equação 6. Retirou-se no ajuste, sucessivamente, pontos internos (curva A) e externos (curva B), com pontos de leitura tomados no intervalo entre 105,5cm e 345,5cm.

Os dados de entrada são as distâncias, taxas de contagem, sensibilidade e o centro efetivo.

Ao se padronizar qualquer fonte de Am-Be, os valores de ϵ e A utilizados devem ser aqueles obtidos anteriormente. Para outras fontes de espectros diferentes, o valor da sensibilidade é considerado o mesmo, já que o PLC possui uma resposta praticamente constante, para neutrons de quaisquer energias.

O valor de A, sendo dependente da energia, deve ser obtido tendo-se como base a relação de De Pangher (3) obtida pelo ajustamento de centro efetivo de diferentes fontes de neutrons,

$$A = 7,7 + 1,1 \bar{E} \quad [10]$$

onde, \bar{E} é a energia média dos neutrons em MeV.

Na obtenção da equação [10] a face frontal do detetor BF_3 , a qual coincide com a face externa do moderador, é considerada como referência de distância e está a 0,9 cm da blindagem de cádmio.

No presente caso a referência de distância também é considerada como sendo a face frontal do detetor BF_3 , porém estando a 2,1 cm da blindagem de cádmio. Para uma fonte de Am-Be, com energia média de 4,4 MeV, os valores de A seriam 12,54 cm pela equação [10] e 13,30 cm se calculado de acordo com a Tabela 2, havendo, portanto, uma diferença de 0,76 cm. Supondo-se a inclinação da reta igual àquela obtida por De Pangher e adicionando-se a diferença de 0,76 cm na equação [10] obtém-se

$$A = 8,56 + 1,1 \bar{E} \quad [11]$$

Esta equação também poderia ser obtida somando-se 5,56 cm aos valores de centro efetivo obtidos por Thompson (9).

Dos programas computacionais feitos, se utilizará aquele cuja equação melhor satisfazer as condições de espalhamento. Pela análise anterior conclui-se que o programa relacionado com a equação [6] é o que será utilizado, para as condições do salão de baixo espalhamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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).
2. NACHTIGALL, D., BURGER, G., Dose Equivalent Determinations in Neutron Fields by Means of Moderator Techniques, Topics in Radiation Dosimetry, Academic Press (1972).
3. DE PANGHER, J., NICHOLS, L.L., A Precision Long Counter for Measuring Fast Neutron Flux Density, BNWL-260, Washington (1966).

4. HAJNAL, F., McLAUGHLIN, J.E., OECHSLER, R., Technique for Determining Moderated Neutron Instrument Characteristics, HASL 222, New York (1970).
5. MIJNHEER, B.J., Standard Fluxes and Standard Moderating Counters for Neutron Fluence Measurements, Thesis, Amsterdam (1971).
6. HUNT, J.B., ROBERTSON, J.C., The Long Counter as a Secondary Standard for Neutron Flux Density, Proc. First Symp. on Neut. Dosim. in Biol. and Med., EUR 4896 (1972).
7. MASSAND, O.P., Investigation of Some Properties of the Precision Long Counter, EURATOM-Rep. (1972).
8. SCRAUBE, A., GRUNAUER, F., BURGER, G., Calibration Problems With Neutron Moderator Detectors, Proc. Neut. Monit. for Rad. Prot. Purposes, *II*, IAEA (1973).
9. THOMPSON, I.M.G., LAVENDER, A., Calibration of the De Pangher Long Counter, Proc. Neut. Monit. for Rad. Prot. Purposes, *II*, IAEA (1973).
10. LINDENBAUM, S.J., Conf. on Shielding of High-Energy Accelerators, TID-7545, New York (1957).
11. DE PANGHER, J., A Reproducible Precision Polythene Long Counter for Measuring Fast Neutron Flux, Rep. Hanford Lab., Richland, Washington (1961).
12. MARSHALL, T.O., Some Tests on the Consistency of the Performance of Six Precision Long Counters Intended as Secondary Standards for the Measurement of Fast Neutron Flux Density, Health Physics, *18*, (1979).
13. REINERT DE LIMA, C.A., PAJMQ - Programa para Ajustamento Automático por Mínimos Quadrados, IME.

Recebido em maio, 1985; aceito em junho, 1985.