

# **MEDIDAS E CÁLCULOS DE ESPECTRO DE ENERGIA DE NÊUTRONS EMERGENTES DE UM DUTO EM UMA BLINDAGEM**

Elcio Angioletto, Alfredo Y. Abe e Paulo Rogério P. Coelho \*

Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, CTMSP  
Caixa Postal 68 550  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária  
21945-970, São Paulo, Brasil  
e-mail: angiolet@net.ipen.br

\*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP  
Divisão de Física de Reatores  
Caixa Postal 11049  
Travessa R-400, Cidade Universitária  
05422-970, São Paulo, Brasil

## **RESUMO**

Neste trabalho são apresentadas medidas do espectro de energia de nêutrons emergentes de dutos em blindagens para diferentes faixas de energias. As blindagens são compostas por placas de parafina e por placas de polietileno borado. Os dutos são construídos em forma de labirinto (com três “pernas” ou segmentos) para minimizar a fuga de radiação. Uma fonte de nêutrons de Am-Be de 37GBq foi utilizada para as medidas experimentais. O espectro de energia de nêutrons rápidos foi medido utilizando-se cintilador tipo próton de recuo (NE-213) e equipamento eletrônico apropriado, e forneceu um resultado concordante com a literatura. As medidas da intensidade de fluxo térmico foram realizadas utilizando-se um detector BF<sub>3</sub>. O código MCNP-4B foi utilizado para simular o experimento obtendo-se uma discrepância de 9% entre os resultados calculados e os medidos com o BF<sub>3</sub> na saída do duto. Observando os resultados obtidos nota-se que os nêutrons térmicos são “conduzidos” por multiespalhamentos nas paredes do duto para fora da blindagem e que acontece moderação e atenuação no fluxo de nêutrons.

Palavras-chave : NE-213, Monte Carlo, espectrometria, BF<sub>3</sub>.

## **I. INTRODUÇÃO**

Nas instalações nucleares são utilizadas fontes radioativas ou equipamentos produtores de radiações altamente penetrantes e com grande intensidade, implicando na necessidade de blindagens para a radiação com o objetivo de proteger da mesma os operadores e o meio ambiente. É inerente ao funcionamento destas instalações, como em reatores nucleares, por exemplo, a existência de penetrações nas blindagens, tais como portas e dutos para a passagem de fios ou fluidos de processo. Normalmente as penetrações são construídas em forma de “labirinto” para minimizar a fuga de radiações por estes pontos da blindagem [1].

A medida do espectro de energia de nêutrons é importante para obtenção de vários parâmetros na área de física de reatores, bem como no campo de dosimetria, visto que o dano biológico é função da energia dos nêutrons

## **II. OBJETIVOS**

O presente trabalho foi executado em duas fases: experimentação e simulação, podendo ser dividido em seis etapas ou objetivos:

- i) elaboração e montagem de todo o arranjo experimental;
- ii) calibração dos sistemas de medidas de radiação e verificação da estabilidade dos mesmos;
- iii) medidas do espectro de energia dos nêutrons com o detector fixo frente à fonte (posição P1), para verificação da acurácia do sistema de medidas, comparando-se os resultados com a literatura;
- iv) medidas da distribuição espacial e energética dos nêutrons que emergem das placas, deslocando os detectores para várias posições conforme Figura 3;
- v) simulação numérica com o código MCNP e
- vi) análise e discussão dos resultados

## **III. APARATO EXPERIMENTAL**

O aparato experimental foi montado no galpão do acelerador Van de Graaff, do IPEN/CNEN-SP, onde dispõe-se de um tanque d'água que serve de suporte para as placas, fontes de nêutrons, fontes emissoras de raios gama, um monitor de nêutrons tipo BF<sub>3</sub>, cintilador NE-213 e sistema eletrônico associado.

O tanque d'água é uma estrutura de cantoneiras metálicas revestidas de aço carbono, com 1,60 m de largura por 2,60 m de comprimento e 2,60 m de altura, tendo na sua face frontal uma abertura cúbica de 0,59 m de aresta que é usada como seção de testes (Figura 1). Este tanque, além de servir de apoio para a blindagem a ser estudada, é utilizado como blindagem para nêutrons e gama que não vão diretamente da amostra para o detector, reduzindo a radiação de fundo na posição do detector, proveniente da radiação espalhada nas paredes e chão do laboratório.

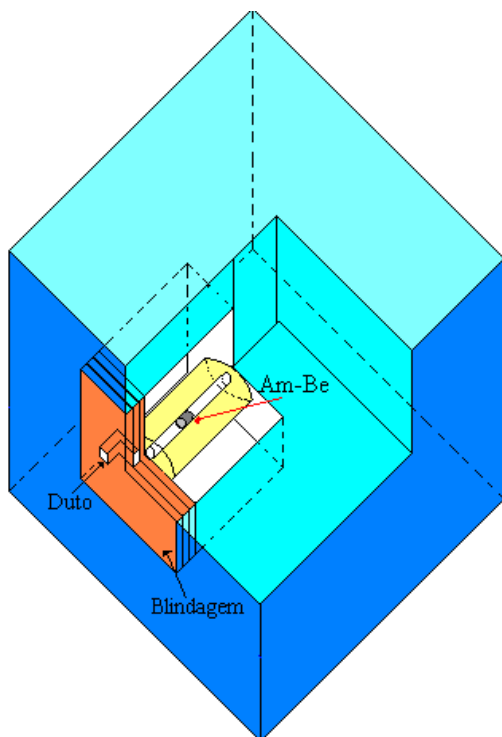


Figura 1. Representação Esquemática do Tanque D'água.

A fonte de nêutrons utilizada é uma fonte Am-Be de 37GBq, fabricada pela Amershan, com um formato cilíndrico encapsulada por aço inoxidável, perfazendo um total de 1,5 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura. Este formato foi levado em consideração quando foram feitas as avaliações dos resultados, pois faz com que a fonte contribua mais nas contagens em uma posição do que em outra, por ter mais ou menos blindagem entre a porção da fonte exposta e o detector. Considera-se que a fonte é isotrópica quanto à emissão de nêutrons. A fonte foi posicionada com o eixo do cilindro na mesma direção do eixo do detector, pois sabe-se que com este tipo de fonte, a variação da taxa de emissão com o ângulo é mínima no eixo azimutal[2]. A fonte é disposta dentro de um tubo vazado de polietileno, que serve como blindagem para a

mesma e como colimador para os nêutrons. O tubo, por sua vez, é circundado por blocos de parafina e posto na seção de testes no tanque d'água.

O sistema de detecção foi montado como mostra a Figura 2, e calibrado utilizando-se fontes emissoras de raios gama (<sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, Am-Be e <sup>22</sup>Na), para os quais a resposta do NE-213 é linear[3].

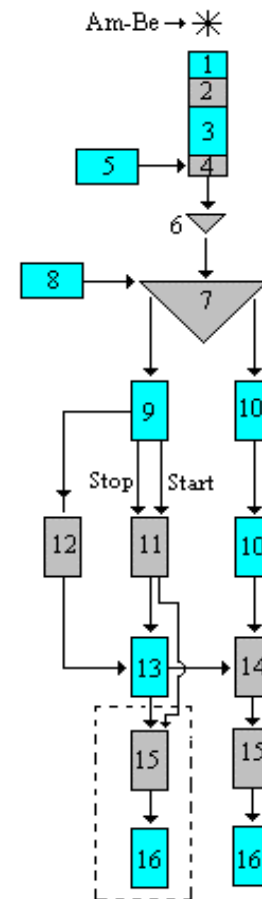


Figura 2. Diagrama de Blocos do Sistema Eletrônico do Espectrômetro de Nêutrons NE-213.

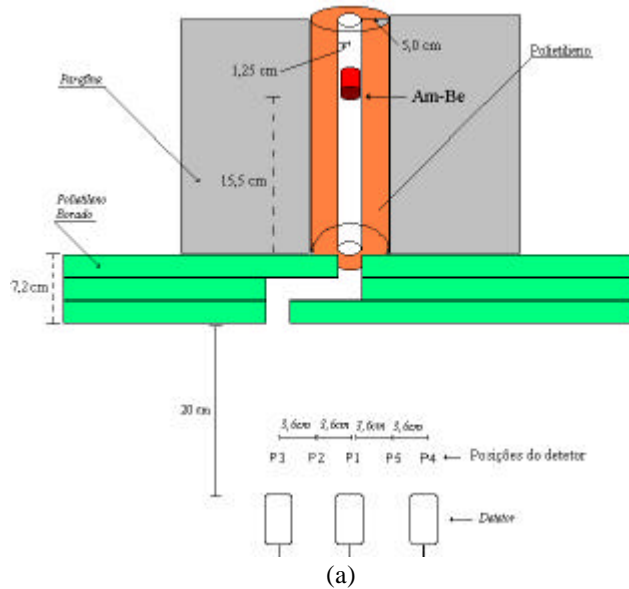
Onde:

- 1) Cintilador NE-213; 2) Guia de Luz de lucite;
- 3) Fotomultiplicadora RCA 8575; 4) Base PMT 265;
- 5) Alta tensão Fluke 415-B; 6) Pré-Amplificador 113;
- 7) Amplificador com DDL 460; 8) Pulsador ;
- 9) Analisador de forma de Pulso 552; 10) Amplificador de atraso 427; 11) Conversor de tempo para altura de pulso) TAC-567; 12) Gerador de disparo e atraso; 13) Unidade de coincidência 418-A; 14) Porta linear 426;
- 15) ADCAM; 16) Analisador Multicanal

Na primeira configuração da montagem experimental usou-se três placas de polietileno borado, perfuradas de modo à simularem uma blindagem com um duto quadrado em forma de "labirinto", esquematizado na Figura 3a. Duas placas têm furos com área de seção transversal de 2,4×2,4 cm, que é a espessura exata das placas utilizadas, facilitando a confecção do furo na placa do meio, que tem 2,4 cm de altura por 9,6 cm de

comprimento. As placas são homogêneas (densidade de aproximadamente  $0,78 \text{ g/cm}^3$ ) e medem  $57 \times 57 \times 2,4 \text{ cm}$ .

Com o mesmo objetivo, montou-se um aparato conforme Figura 3-b, com placas de parafina (densidade de aproximadamente  $0,88 \text{ g/cm}^3$ ), sem boro. Duas placas têm furos com área de seção transversal de  $3,5 \times 3,5 \text{ cm}$ , que é a espessura exata das placas utilizadas. O furo na



placa do meio tem 3,5 cm de altura por 14,0 cm de comprimento. Cada placa mede  $3,5 \times 40 \times 30 \text{ cm}$ .

Também montou-se um sistema com detetor  $\text{BF}_3$ , para monitorar o fluxo de nêutrons emergente do duto. A montagem deste detetor, juntamente com seu aparato é bem conhecida e não cabe aqui uma descrição da mesma.

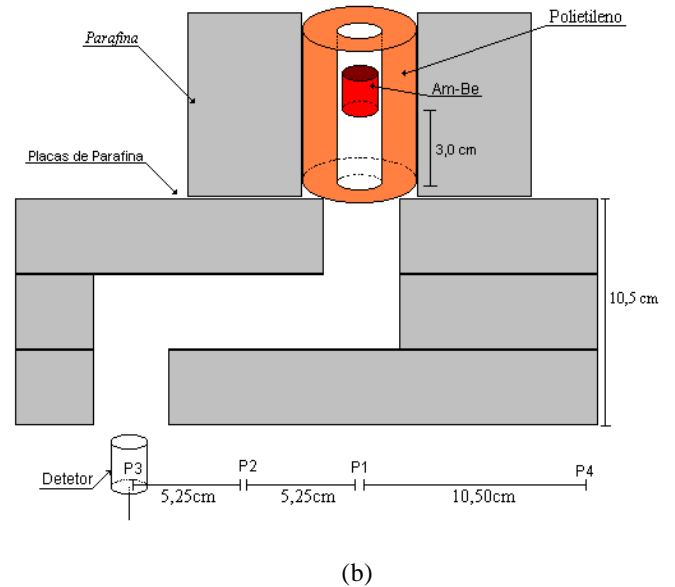


Figura 3. (a) Representação Esquemática do Arranjo Experimental com Placas de Polietileno Borado e Detetor e (b) Arranjo Experimental Utilizando Placas de Parafina e Detetor. Vista Superior.

#### IV. MODELAGEM DE BLINDAGEM COM DUTO

Utilizando-se o código MCNP - “A General Monte Carlo code for Neutron and Photon Transport”[4], modelou-se o arranjo experimental conforme a Figura 4.

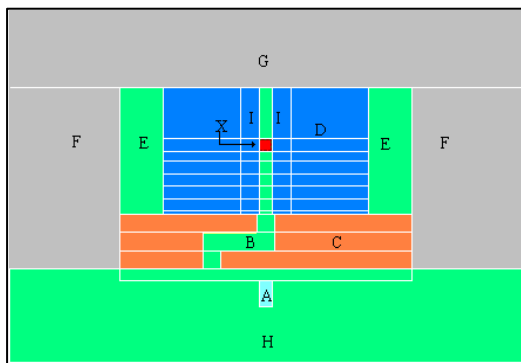


Figura 4. Modelagem da Geometria da Blindagem com Duto, Utilizando-se MCNP-4B.

Na figura, podemos identificar as regiões e os materiais que as compõe, onde:

A) detetor; B) duto; C) placas (blindagem); D) parafina; E) ar; F) água (lateral à fonte de nêutrons); G) água (atrás da fonte de nêutrons); H) ar (na região onde se encontra o detetor); I) colimador de polietileno e X) fonte de nêutrons.

#### V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tomou-se uma medida de prótons de recuo que após a deconvolução com o código FANTI[5] resultou no

espectro de energia de nêutrons (Figura 5). Esta medida foi realizada sem as placas entre a fonte e o detetor, na posição P1 (Figura 3), para comparar com o espectro apresentado na literatura[2], podendo-se assim, determinar que a acurácia do equipamento é satisfatória para os objetivos deste trabalho.

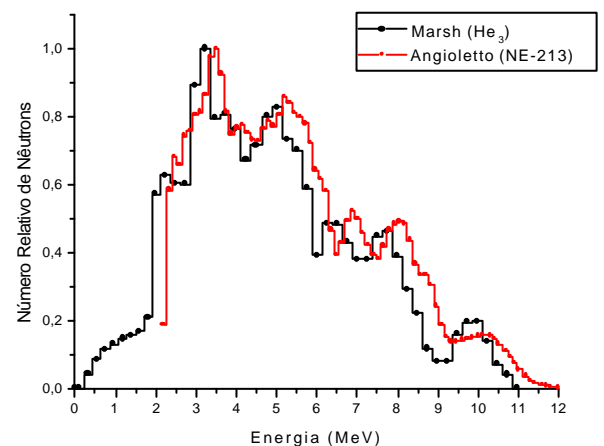


Figura 5. Comparação entre os espectros obtidos por Marsh[2] e o obtido neste trabalho.

Nota-se que existe um desvio em energia de um espectro para outro, que pode advir das diferentes calibrações, entre um trabalho e outro, e/ou dos diferentes métodos de deconvolução de espectros de prótons de recuo[3] utilizados nos referidos trabalhos.

Os resultados obtidos com as medidas realizadas conforme as Figuras 3-a e 3-b estão expostos nas Figuras 6 e 7.

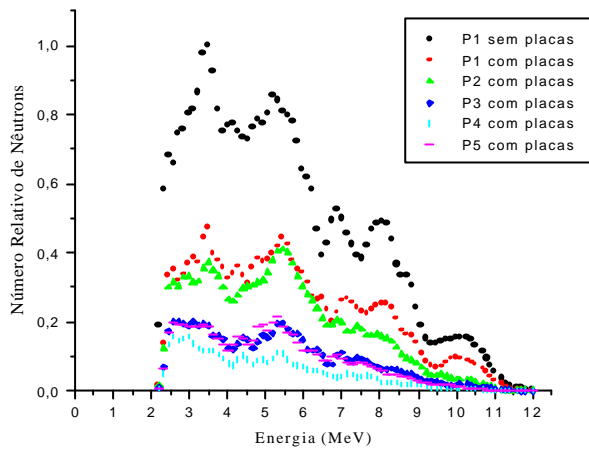


Figura 6. Espectros Obtidos nas Diferentes Posições do Detetor, Utilizando Polietileno Borado (Figura 3-a)

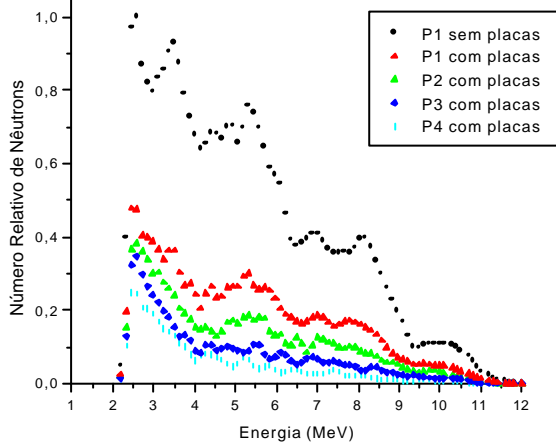


Figura 7. Espectros Obtidos nas Diferentes Posições do Detetor, Utilizando Parafina (Figura 3-a)

A medida com detector tipo  $\text{BF}_3$  tornou-se necessária pelo fato de o cintilador orgânico NE-213 não detectar nêutrons na faixa de energia térmica. Os resultados obtidos estão expostos na TABELA 1.

TABELA 1. Contagem Acumulada em Cada Posição, Mudando-se o Material de Blindagem e Utilizando Detetor  $\text{BF}_3$ , por 2500s

Posição	Contagens (parafina)	Contagens (polietileno borado)
P1	$60312 \pm 245$	$10162 \pm 101$
P2	$53882 \pm 232$	$9965 \pm 100$
P3	$67900 \pm 260$	$9420 \pm 97$
P4	$44600 \pm 211$	$9066 \pm 95$
P5	$52360 \pm 229$	$9590 \pm 98$

Calculou-se o espectro de nêutrons emitidos pela fonte Am-Be sem material de blindagem entre a saída do colimador e o detetor na posição P1. O resultado obtido com o cálculo é semelhante ao obtido através de medidas utilizando o detetor NE-213 (Figura 8), apresentando uma

diferença de fluxo integrado na região de nêutrons rápidos de 8,9%, entre o espectro medido e calculado.

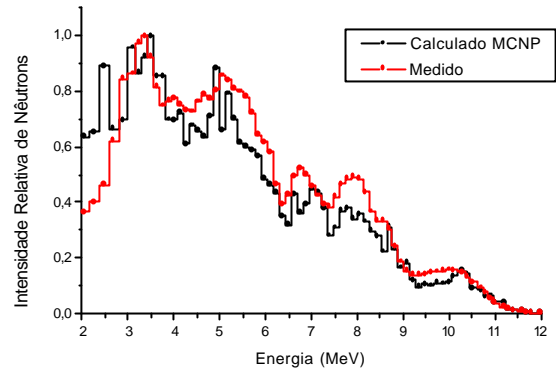
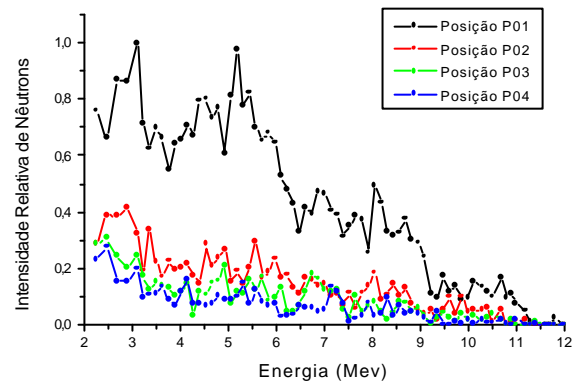
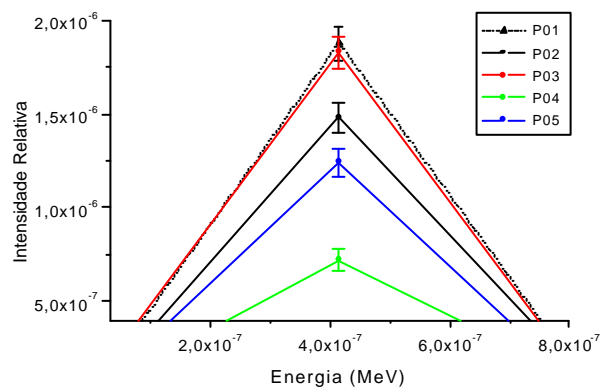


Figura 8. comparação entre espectro calculado e medido.

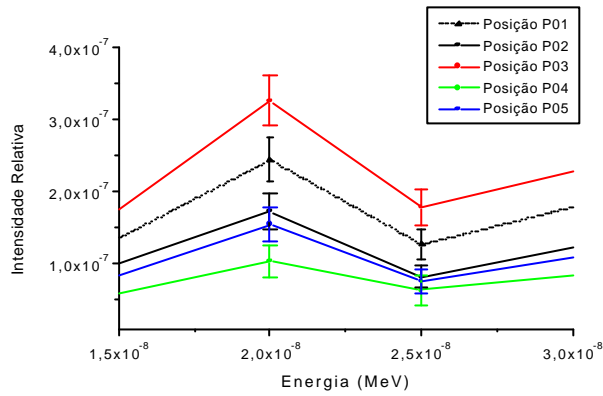
Com o intuito de aferir a contribuição do duto na condução de nêutrons para fora da blindagem, calculou-se a intensidade de partículas que atravessam a superfície do detetor nas diferentes posições. Em cada caso considerou-se que a fonte emite quatro milhões de partículas (quatro milhões de histórias), que fornece uma boa estatística de contagem. Os resultados estão expostos nas figuras 9-a, 9-b e 9-c, divididos em diferentes faixas de energias.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. Espectros de Nêutrons em Diferentes Faixas de Energias. 9-a: Faixa de Energia de Nêutrons Rápidos; 9-b: Faixa de Energia Epitérmica e 9-c: Faixa de Energia que Inclui a Região Térmica.

Para facilitar a análise, escreveu-se os valores das intensidades em forma de tabela (Tabela 2), onde estão expostos os valores para energias térmicas. Os valores foram normalizados pela intensidade da posição P01, para ambos os resultados: medido e calculado.

TABELA 2. Comparação Entre Intensidades de Nêutrons Térmicos Calculadas e Medidas nas Diferentes Posições, Normalizadas Pelas Intensidades da Posição P1.

Posição	Intensidade calculada	Intensidade medida
P1	$1,000 \pm 0,022$	$1,000 \pm 0,003$
P2	$0,774 \pm 0,019$	$0,893 \pm 0,004$
P3	$1,040 \pm 0,026$	$1,130 \pm 0,004$
P4	$0,398 \pm 0,013$	$0,739 \pm 0,002$
P5	$0,645 \pm 0,017$	$0,868 \pm 0,003$

Para facilitar a análise da tabela, temos a seguir um gráfico (Figura 10) com os valores das intensidades normalizadas em função do deslocamento do detector.

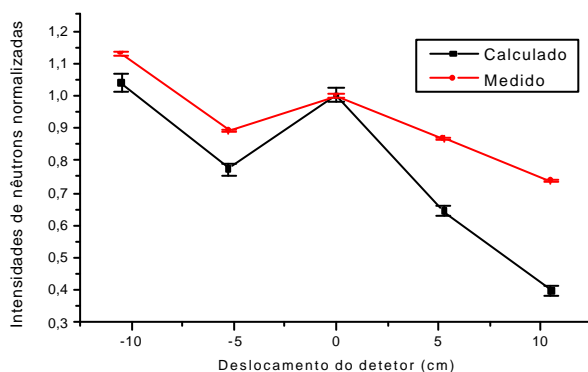


Figura 10: Valores das Intensidades Medidas e Calculadas em Função do Deslocamento do Detetor  $\text{BF}_3$

Este gráfico mostra que na região da saída do duto (deslocamento  $-10,5$  cm), as intensidades medida e calculada têm o mesmo comportamento, ou seja, aumentam seus valores com relação às demais posições. Embora demonstrem valores diferentes, o comportamento é o mesmo para todas as posições, e na região da saída do duto, esta diferença é de 9,0%. Nas demais posições a diferença aumenta, mas o comportamento é o mesmo.

Neste trabalho estamos utilizando valores normalizados, pois não existe, aqui, interesse em valores absolutos

## VI. CONCLUSÕES

Observando a Tabela 1 e as Figuras 6 e 7, percebe-se que existem diferenças nas contagens e nas formas de espectros medidos nas posições P3 e P4, embora estas posições sejam simétricas com relação à fonte de nêutrons, deixando clara, assim, a influência do duto na blindagem, ou seja, existe atenuação e absorção menor na saída do duto pela falta de material ocasionada pela existência do duto.

Uma análise da Tabela 1 indica que os nêutrons na faixa de energia térmica são “conduzidos” por multi-espalhamentos nas paredes do duto para fora da blindagem, mas esta condução é evitada se o material da blindagem contém boro. Não observou-se “condução”, pelo duto, de nêutrons com energias superiores à 2,5 MeV, tanto com boro como sem boro.

O experimento foi modelado com o código MCNP, de maneira que a geometria modelada ficou esquematizada de modo semelhante ao arranjo experimental, conforme a Figura 4. A reprodução da medida de espectro da fonte de nêutrons (Amerício-Berílio), tem boa concordância com o resultado experimental, como pode-se observar na Figura 8. Portanto, pode-se concluir que a modelagem, neste caso, fornece resultados confiáveis.

Baseando-se na Figura 10 e na Tabela 2, pode-se concluir que os resultados de cálculos (simulações), na região do duto, apresentam concordância satisfatória com os resultados experimentais e que a tendência do cálculo é repetir os resultados obtidos nas medidas. A diferença de aproximadamente 9,0%, para os objetivos deste trabalho, é perfeitamente aceitável.

Pretende-se melhorar os resultados calculados, aproximando-os aos experimentais utilizando-se de recursos do código que não foram utilizados, pois o MCNP é muito extenso e complexo, exigindo muito tempo de dedicação e experiência; embora seja amigável é poderoso e tem um volume muito grande de recursos.

Dando segmento a este trabalho, poderão ser realizadas medidas na faixa de energias intermediárias (nêutrons epitérmicos) utilizando-se detectores do tipo próton de recuo a gás, que são sensíveis a esta faixa de energia.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; **Engineering Compendium on Radiation Shielding**; 1968
- [2] MARSH, J. W., THOMAS, D. J., BURKE, M.; **High Resolution Measurements of Neutron Energy Spectra**

**From Am-Be and Am-Be neutron Sources;** Nuclear Instruments and Methods 366; 340-348, (1995).

[3] COELHO, P R P; **Padrão Experimental em Espectrometria de Nêutrons Rápidos Utilizando Nêutrons da Reação DT e Avaliação de Métodos de Cálculo de Blindagem;** Tese de Doutorado, IPEN/CNEN-SP, 1993.

[4] BRIESMEISTER, J. F.; **MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code (version 4B);** Los Alamos, March 1997.

[5] ANTUNES, L.J; BORKER, G; KLEIN, H; BULSKI, G; **Unfolding of NE-213 Scintillation Spectra Compared With Neutron Time of Flight Measurements;** In: Nuclear Data and Applied Science: Proceedings of the international conference on ... held in Santa Fé, May 1985

#### **ABSTRACT**

This work presents the measurements of neutron streaming, for different energy ranges, in shielding ducts. The shielding is composed of plates of different materials (borate polyethylene and paraffin). The two ducts are conceived as labyrinths in order to (a three-legged duct) minimize the radiation streaming. A 37GBq Americium-Beryllium neutron source type was used for the experimental measurements. The fast neutron energy spectra were measured using a detection system with a liquid organic scintillator, NE-213 detector, and appropriate electronic equipment. The results are in good agreement with the literature. The measurements of thermal neutrons intensity were performed with a BF<sub>3</sub> counter. The MCNP-4B code was used to simulate the experiment. The simulation was performed with success, obtaining a small discrepancy (9.0%) between the calculated results and the measurements with the BF<sub>3</sub> counter, at the duct third leg. From the results it was possible to observe the thermal neutron streaming through the duct, the effects of neutron flux moderation, the attenuation in the shielding and also the neutron energy spectra modifications emerging from the shielding.