



INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

RT-IEN- 13/2002

Comportamento do Fluxo de Nêutrons Térmicos e Epitérmicos na Saída do Canal J-9 do Reator Argonauta para Obtenção de Imagens Radiográficas

por

Maria Ines S. Souza e Rosanne C. A. A. Furieri

Maio/2002

NOTA

**ESTE RELATÓRIO É PARA USO EXCLUSIVO DO
INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

O direito a utilização de informações relacionadas ao trabalho de pesquisa realizado no IEN é limitado aos servidores da CNEN e pessoal de organizações associadas, nos limites dos termos contratuais que regem os respectivos convênios. O conteúdo dos relatórios não pode ser separado ou copiado sem autorização escrita do IEN



INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

Título: Comportamento do Fluxo de Nêutrons Térmicos e Epitérmicos na Saída do Canal J-9 do Reator Argonauta para Obtenção de Imagens Radiográficas

Autor (es): Maria Ines S. Souza e Rosanne C. A. A. Furieri

e-mail: msouza@ien.gov.br
rfurieri@ien.gov.br

Identificação:
RT-IEN-13/2002

Nº de
páginas:
8

Tipo de Divulgação:
Irrestrita (x) Restrita ()

Divulgar para:
IEN

Localização: Intranet

Publicação externa associada (congresso/periódico):

Palavras chave: Fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos, colimação de nêutrons, canal de irradiação, reatores de pesquisa.

Resumo: Neste trabalho foi verificado o comportamento do fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos em toda área de saída do canal J-9 do reator Argonauta para diversos arranjos de colimação. O objetivo principal foi definir um arranjo otimizado para ser utilizado na obtenção de imagens radiográficas com nêutrons, incluindo tomografias e neutrografias. Como a homogeneidade do feixe e a energia dos nêutrons são fatores que influenciam na qualidade das imagens de um objeto radiografado, a área do canal foi dividida em treze seções e, em cada uma foi obtido o fluxo absoluto de nêutrons térmicos e epitérmicos para cada arranjo de colimação. Os valores dos fluxos em cada seção foram determinados pela ativação (n, γ) de folhas de índio colocadas em cada posição. O método de diferença de cádmio foi o utilizado para separar a contribuição dos nêutrons térmicos dos epitérmicos.

Abstract: In this work the behavior of the neutron flux, for thermal and epithermal regions, at the exit of the J-9 channel of the Argonauta reactor - where the systems for acquisition of the radiographic images, e.g. neutronography and tomography, are installed - has been verified. The quality of a radiographic image is a function of the energy and homogeneity of the neutron beam. In order to improve the beam, three different moderation and collimation arrangements have been fitted to the J-9 channel. For each of them, the thermal and epithermal neutron flux at several places, distributed over the cross section of the channel exit, have been measured using the foil activation method.

| Emissão | | Nome | Rubrica | Data |
|----------------|-------------|--|---------|------|
| Data: | Elaboração: | Maria Ines S. Souza e Rosanne C. A. A. Furieri | | |
| Divisão: DIRE | Revisão: | Carlos Alberto Renke | | |
| Serviço: SEREA | Aprovação: | Orlando J. A. Gonçalves Filho | | |

Instituto de Engenharia Nuclear:

Via 5 s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21945-970, CP 68.550, Rio de Janeiro – RJ - Brasil .

Tel.: 00 55 21 2560-4113 Internet: www.ien.gov.br

1 – Introdução

Todos métodos radiográficos por transmissão são baseados no mesmo princípio geral: *A radiação é atenuada ao passar pela matéria*, seja ela raio-X, gama ou nêutron. Baseado nisso, defeitos internos, como vazios, rachaduras, porosidade ou inclusão de outros materiais, podem ser observados através da mudança de intensidade da radiação, registrada por um detetor ou filme fotográfico, após ser transmitida pelo objeto sob exame. A lei básica de atenuação da radiação, em um material homogêneo, é dada por:

$$I = I_0 e^{-C(E).x} \quad (1)$$

onde I_0 e I são as intensidades do feixe incidente e a transmitida, respectivamente, C o coeficiente de absorção do material e x a espessura que o feixe atravessa. Geralmente, associa-se ao valor de C o coeficiente de atenuação linear e a seção de choque macroscópica para fôtons e nêutrons, respectivamente.

Em um reator nuclear, como o Argonauta, os nêutrons rápidos produzidos na fissão do ^{235}U são moderados até a energia térmica. O movimento dos nêutrons durante esta moderação é complicado e as trajetórias são em “zig-zag” devido às colisões repetidas com os núcleos [1]. Como consequência, nêutrons originários num local do reator e movimentando-se numa direção com determinada energia aparecem, após um tempo, em outra parte do sistema movimentando-se em outra direção e com outra energia. Por isso numa posição particular do reator, contribuem para o fluxo neutrônico, nêutrons de energias diferentes.

A divisão dos nêutrons em grupos de energia é arbitrária, mas a classificação apresentada na tabela 1 é bem utilizada [2].

Tabela 1.
Classificação dos nêutrons por energia

| | |
|----------------|----------------------------|
| Frios | Energias abaixo de 0,01 eV |
| Térmicos | 0,01 eV a 0,3 eV |
| Epitérmicos | 0,3 eV a 10 keV |
| Rápidos | 10 keV a 20 MeV |
| Relativísticos | > 20 MeV |

O feixe de radiação ideal para a obtenção de imagens radiográficas teria que ser de mesma natureza, monoenergético e homogêneo, no volume do objeto. Não homogeneidade significa diferentes valores de I_0 incidindo no objeto.

O objetivo principal deste trabalho foi verificar e otimizar a uniformidade do fluxo de nêutrons térmicos na seção de saída de um dos canais da coluna térmica externa (canal J-9), onde são instalados os sistemas para obtenção de neutrografias e tomografias. Para isso, foram colocados dentro deste canal diferentes arranjos compostos sempre de um bloco de grafite para moderação e outro, também em grafite, contendo um orifício interno com geometria variável, para colimação dos nêutrons. Para cada um foram obtidos o fluxo absoluto de nêutrons térmicos e epitérmicos em diversas posições da seção equivalente à saída do canal.

2. Metodologia

O canal-J9, esquematizado na figura 1, tem seção transversal quadrada de 10 cm de lado e 282 cm de comprimento, sendo os últimos 46cm com seção transversal retangular de 40 cm de largura e 14 cm de altura, para encaixe de gavetas utilizadas em arranjos experimentais.

Os nêutrons produzidos na fissão do núcleo de urânio tem em média energia entre 2 a 3 MeV e são moderados até a energia térmica ($E = 0,025\text{eV}$) em água e cunhas de grafite, no próprio núcleo, e no bloco moderador de grafite colocado dentro do canal.

O comprimento desse bloco moderador foi determinado por um estudo teórico da moderação dos nêutrons na direção do canal J-9, com o objetivo de conseguir um maior percentual de nêutrons térmicos no canal. Essa dimensão foi obtida através do código ANISN utilizado no cálculo de transporte a uma dimensão [3].

O valor e a uniformidade do fluxo de nêutrons dependem da colimação. Três arranjos foram estudados, e em cada um deles foi feito um mapeamento do fluxo térmico e do epitérmico, em toda área na saída do canal utilizando a gaveta mostrada na figura 1. Confeccionada em parafina borada, tem um orifício retangular vazado de 15 cm de largura e 10 cm de altura ao longo dos 46 cm de comprimento. Os valores absolutos dos fluxos foram obtidos utilizando a técnica de ativação de materiais. Foram irradiadas treze folhas de índio ($\sigma = 155\text{ b}$, meia vida = 54 minutos) distribuídas uniformemente na área da saída do canal. A atividade induzida nas folhas foi obtida por espectrometria gama utilizando um detetor HP-Ge. O valor do fluxo térmico e do epitérmico em cada ponto de medida foi calculado a partir dos dados obtidos de duas irradiações, uma com folhas nua e a outra com folhas cobertas com cádmio de 0,5 mm de espessura. Uma normalização entre as irradiações foi feita através de uma folha testemunha, também de índio, colocada na mesma posição nas duas irradiações. Os valores foram determinados pelo “software” FLUXO, desenvolvido em FORTRAN [4], para o cálculo de fluxo de nêutrons.

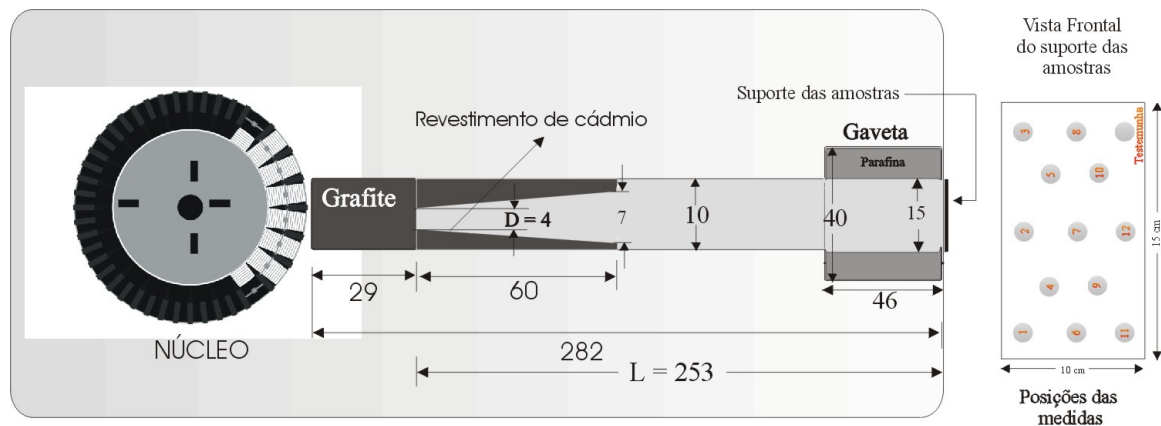


Figura 1. Esquema do canal J-9 do reator Argonauta com o arranjo: bloco moderador e colimador divergente, utilizado na instalação de sistemas para a obtenção de imagens radiográficas com nêutrons térmicos.

No primeiro arranjo de colimação foi colocado no canal J-9 somente o bloco de grafite de 29 cm de comprimento. No segundo, além do bloco de grafite, foi utilizado um colimador paralelo também de grafite com 60 cm de comprimento e um orifício longitudinal com 2,5 cm de

diâmetro. No terceiro arranjo, o que está esquematizado na figura 1, além do bloco moderador foi utilizado um colimador divergente também de grafite, com 60 cm de comprimento e um orifício longitudinal igual a um tronco de pirâmide com bases quadradas de 16 e 49 cm², revestido internamente e externamente com cádmio de 0,5 mm de espessura.

A uniformidade do feixe foi verificada através do parâmetro denominado SIGMA, definido pelo desvio máximo do fluxo de nêutrons ϕ , calculado para cada posição, em relação a média, $\phi_{\text{médio}}$, obtida dos valores absolutos em cada posição da seção em questão, resultando deste modo, uma relação crescente entre SIGMA e a heterogeneidade do fluxo.

A quantidade de nêutrons perdida devido à moderação é função da geometria do colimador através do parâmetro conhecido como “razão de colimação”, dado por L/D, onde L e D são o comprimento e a abertura da colimação, respectivamente. Para o colimador da figura 1, ela está relacionada com o fluxo de nêutrons através da equação:

$$\Phi = \frac{\Phi_0 D^2}{4\pi L^2} \quad (2)$$

onde ϕ_0 e ϕ são, respectivamente, os fluxos de nêutrons incidente e emergente do colimador.

A qualidade da imagem radiográfica melhora com o aumento de L/D, como é descrito com clareza por Domanus em [5]. Entretanto, o fluxo de nêutrons emergente diminui com o aumento de L, necessitando um tempo maior para a obtenção de uma radiografia. Tem que haver um compromisso entre o tempo e a razão L/D para obter-se do sistema uma imagem de qualidade aceitável.

3. Resultados

Nas figuras 2 a 4 são apresentados os resultados da homogeneidade do fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos para os três arranjos descritos.

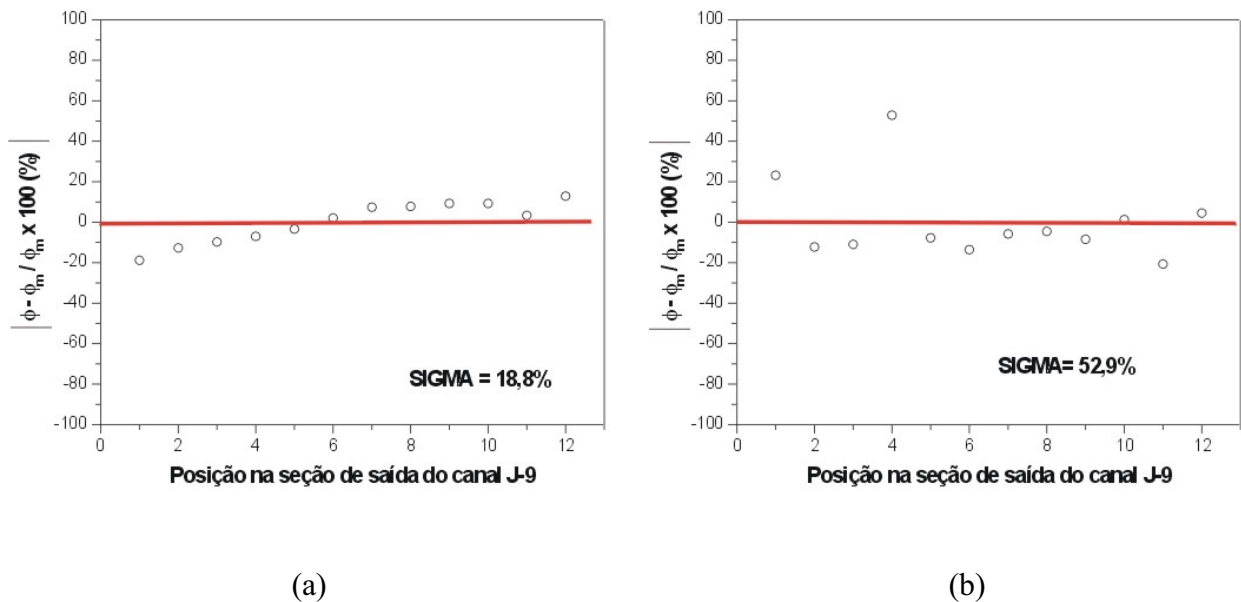


Figura 2. Comportamento do fluxo de nêutrons em relação ao valor médio na seção de saída do canal J-9 contendo somente o bloco moderador.(a) térmicos e (b) epitérmicos.

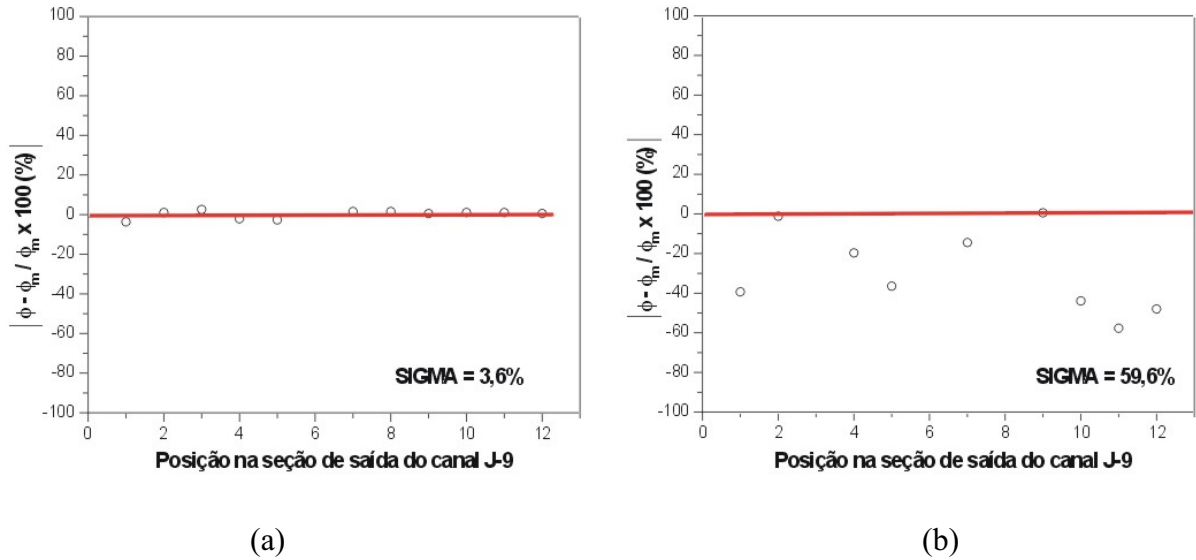


Figura 3. Comportamento do fluxo de nêutrons em relação ao valor médio na seção de saída do canal J-9 contendo o bloco moderador e o colimador paralelo.(a) térmicos e (b) epitérmicos.

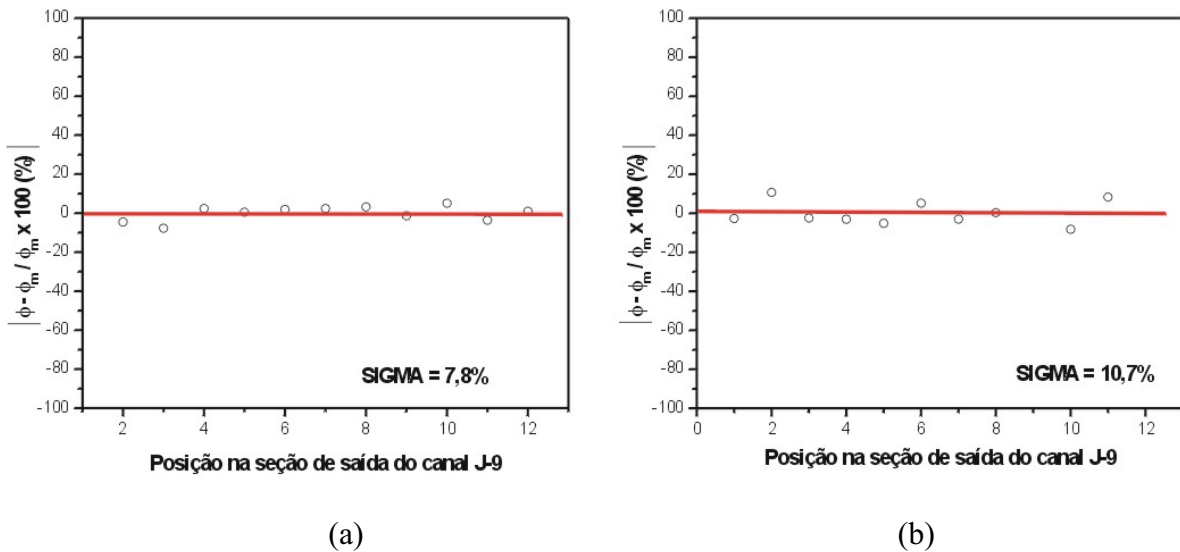


Figura 4. Comportamento do fluxo de nêutrons em relação ao valor médio na seção de saída do canal J-9 contendo o bloco moderador e o colimador divergente.(a) térmicos e (b) epitérmicos.

A tabela 2 apresenta os valores obtidos para o fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos, a razão de cádmio e a razão de colimação para cada arranjo utilizado, com o reator operando na potência de 170 watts.

Tabela 2. Características nêutronicas na saída do canal J-9 do reator Argonauta com diversos arranjos de colimação

| Parâmetro | Bloco moderador | Bloco e colimador paralelo | Bloco e colimador divergente 7 |
|---|------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Fluxo Térmico Médio (n.cm ⁻² s ⁻¹) | 4,73 x 10 ⁵ | 1,92 x 10 ⁵ | 2,23 x 10 ⁵ |
| Fluxo Epitérmico Médio (n.cm ⁻² s ⁻¹) | 1,55 x 10 ⁴ | 1,48 x 10 ³ | 3,18 x 10 ³ |
| Homogeneidade Térmica (%) | 18,8 | 3,6 | 7,8 |
| Homogeneidade Epitérmica (%) | 52,9 | 59,6 | 10,7 |
| Razão de Cádmiu ($\bar{\phi}_{th} / \bar{\phi}_{ep}$) | 30,52 | 129,7 | 70,1 |
| Razão L/D | — | 101,20 | 63,25 |

O arranjo com o colimador paralelo apresenta a melhor uniformidade do fluxo de nêutrons térmicos, além da melhor razão de colimação e de cádmio. Entretanto, com o colimador divergente é obtido um fluxo de nêutrons térmicos, em valores absolutos, aproximadamente 20% maior. Isso tem que ser levado em conta na escolha do arranjo para uma aplicação em particular.

Bibliografia

- [1] LAMARSH, J. R., 1966, *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, 1st ed., USA, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [2] BERGER, H. , 1965, *Neutron Radiography Methods, Capabilities and Applications*. Elsevier Publishing Company.

- [3] RENKE, C.A.R., 1993, “Estudo da Moderação de Nêutrons na Direção do canal J-9 do Reator Argonauta”, *Comunicação Técnica*, IEN/CNEN, Rio de Janeiro.
- [4] SOUZA, M. I. S and FURIERI, R. C. A. A., 2000, “ Mapeamento do Fluxo de Nêutrons do Reator Argonauta na Nova Configuração do seu Núcleo”, *XII ENFIR*, Rio de Janeiro, Brasil.
- [5] DOMANUS, J. C.,1992, *Practical Neutron Radiography*, ed. 1, Commission of the European Communities, Kluwer Academic Publishers.