

MEDIDA DO FLUXO DE NÊUTRONS TÉRMICOS DO REATOR IPEN/MB-01 COM DETECTORES DE ATIVAÇÃO DE FIOS DE ^{197}Au

André Luis Ferreira Marques *, Daniel Kao Sun Ting **, Ulysses d'Utra Bitelli **

* Coordenadoria Para Projetos Especiais - Ministério da Marinha
Caixa Postal 11253
05508-900, São Paulo, Brasil

** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP
Caixa Postal 11049
05499-900, São Paulo, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta a implantação da técnica de medida do fluxo neutrônico por meio da análise da ativação de detectores de fios, com o propósito de determinar a distribuição espacial do fluxo neutrônico da unidade crítica do reator IPEN/MB-01. São apresentadas as medidas da distribuição espacial do fluxo térmico de nêutrons obtidas por ativação de fios de ouro, com diâmetros nominais de 0.125 e 0.250 mm, em sete canais do núcleo do reator. O emprego de fios de ouro para medida de fluxo neutrônico foi feito pela primeira vez no reator IPEN/MB-01, estando esta técnica implementada para uso de experimentalistas no mapeamento de fluxo do reator.

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é descrever a implantação da técnica de ativação e contagem de fios para medir a distribuição espacial do fluxo neutrônico térmico em canais do reator IPEN/MB-01, por meio da irradiação de fios de ouro (^{197}Au), tendo em vista a verificação do projeto neutrônico do reator nuclear da Instalação Nuclear à Água Pressurizada (INAP) da Marinha do Brasil (MB).

O Reator IPEN/MB-01 é uma instalação do tipo Unidade Crítica, destinada ao estudo das características neutrônicas de núcleos moderados a água leve, possibilitando a verificação experimental de métodos de cálculo, estruturas celulares e malhas do reator, efetividade das barras de controle e resposta do núcleo a inserções de reatividade.

As medidas de fluxo e espectro de energia dos nêutrons por ativação são feitas através da contagem da radioatividade induzida nos detectores de ativação, por meio da espectrometria da radiação ou da partícula emitida (gama, beta etc.). Os detectores de ativação são pequenos fios, folhas, fitas, discos ou esferas de metais ou pastilhas que, ao serem ativados por nêutrons, produzem

radioisótopos que decaem emitindo radiações ionizantes (as quais por sua vez serão medidas).

Atualmente, a utilização da técnica de irradiação e contagem de detectores de ativação de fios está dominada e consagrada, encontrando-se em larga utilização, principalmente em reatores nucleares de pesquisa (1).

O fluxo neutrônico pode ser obtido numa primeira instância pela solução da Equação de Transporte de Nêutrons com dependência espacial, energética e angular.

Todavia, a solução desta equação apresenta muitas incertezas, por causa do seguinte conjunto de fatores:

1) das heterogeneidades inerentes ao núcleo do reator;

2) das simplificações implementadas nos modelos; e

3) das imprecisões e incertezas dos dados nucleares.

Pelos motivos expostos acima, somente com medidas experimentais do fluxo neutrônico, em confronto com cálculos, é que podem ser validadas ou corrigidas as hipóteses assumidas para a solução das equações propostas para validar o projeto neutrônico do núcleo.

DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Inicialmente preparamos o fio para ser inserido no núcleo (nos 209 canais disponíveis), cortando-o em comprimentos de 1300 mm e soldando-se dois parafusos adaptados, um em cada extremidade do fio, para mantê-lo esticado durante a irradiação e a respectiva contagem.

Para prover apoio mecânico e proteção física, o fio de Ouro é colocado no interior de um tubo de Alumínio (com diâmetro externo de 4,5 mm), material este de fácil trabalhabilidade e com seções de choque de absorção e espalhamento de nêutrons térmicos muito pequenas (cerca de 0.241 e 1.4 barns respectivamente)[2]. O tubo de Alumínio não é estanque ao moderador, para que as mesmas condições do núcleo sejam garantidas no detector.

Uma vez inserido no tubo de Alumínio, por meio de parafuso sem cabeça e com porca, o fio é então tracionado por meio do acionamento da porca, garantindo-se que ocupará a posição central do tubo de Alumínio em todo o seu comprimento (a outra extremidade do fio possui um parafuso com cabeça que se apoia no tubo de Alumínio).

O procedimento de irradiação, estando o fio de ativação já posicionado no canal selecionado, constitui em criticalizar o reator e estabilizar o nível de potência via instrumentação do próprio reator. Atingido este ponto, prosseguimos com a irradiação do detector durante um intervalo de tempo, de pelo menos 30 minutos [1].

Para a medida do fluxo térmico, emprega-se o procedimento "Cadmium-difference method" - método da diferença ou razão de Cádmio, que consiste em se irradiar, na mesma posição, um detector com uma cobertura de Cádmio, com espessura da ordem de 1.0 mm - 0.040 pol, e um detector sem a cobertura (nu). Desta forma, medimos a atividade existente nos dois fios, subtraindo-se a atividade sem cobertura daquela existente no detector nu. Em ambos os casos utiliza-se a cobertura de Alumínio.

A cobertura de Cádmio atua como um filtro "seletivo" (retendo os nêutrons com energia abaixo da energia de corte do Cádmio). O fluxo térmico é calculado através da diferença entre o fluxo total e o fluxo não térmico (rápido e epitérmico).

Para o emprego do método da Razão de Cádmio, utilizamos como cobertura um tubo de 0.09 pol de diâmetro externo e espessura de 0.5 mm, com pureza 99,999 %.

Conforme mencionado, existem 209 canais nas placas espaçadoras superior e inferior do núcleo do Reator IPEN/MB-01, onde podem ser inseridos os fios para irradiação. Em nosso experimento, foram selecionados 7 canais, posicionados e medidos da seguinte forma:

- um canal ao centro do núcleo, com 73 pontos axiais medidos;
- três canais no sentido do centro para leste, igualmente espaçados de 60 mm radialmente, com 30 pontos axiais medidos;
- um canal na região do refletor com 16 pontos axiais medidos;

- um canal próximo a uma das barras de controle (Ag-In-Cd); e um no interior da região de atuação do Mecanismo de Acionamento de Barras, só que afastado das barras de controle, ambos com 28 pontos axiais medidos.

Após a irradiação, o reator é desligado com a inserção de barras e drenagem do moderador, iniciando-se o procedimento de radioproteção para o acesso ao núcleo e a retirada do fio irradiado. Em seguida, o fio é levado para o dispositivo de contagem.

Para a contagem dos fios, foi montado um sistema que é composto pelos seguintes itens:

- 1) **Bancada do Sistema** - para suportes dos sistemas a seguir;
- 2) **Sistema de Movimentação do Fio** - que possui:
 - motor de passo (acionado eletronicamente, com precisão de posição da ordem de 0.5 mm, havendo possibilidade de acionamento programado por computador);
 - hastes ajustáveis de apoio;
 - fuso ou sem-fim;
 - régua de fixação (com base de lucite para evitar interferências) do fio a ser medido.

Este sistema possui 2054 mm de comprimento, 600 mm de largura e 250 mm de altura. O fio ativado é fixado na régua pelos seus parafusos, que se encaixam em ressalto da régua, deixando o fio perfeitamente esticado. Com o acionamento do motor de passo, a régua (atrelada ao fuso) movimenta-se por dentro da Capela de Blindagem;

- 3) **Capela de Blindagem** - que possui:

- colimador circular (projetado com uma abertura de 10 mm de diâmetro);
- paredes em Chumbo; e
- dispositivos de fixação e suporte (em aço) para o detector.

No dimensionamento do colimador, foram levadas em consideração as dimensões da janela do detector, as recomendações de normas internacionais [3] e a necessidade de se evitar a contribuição de trechos do fio já contados ou ainda por medir;

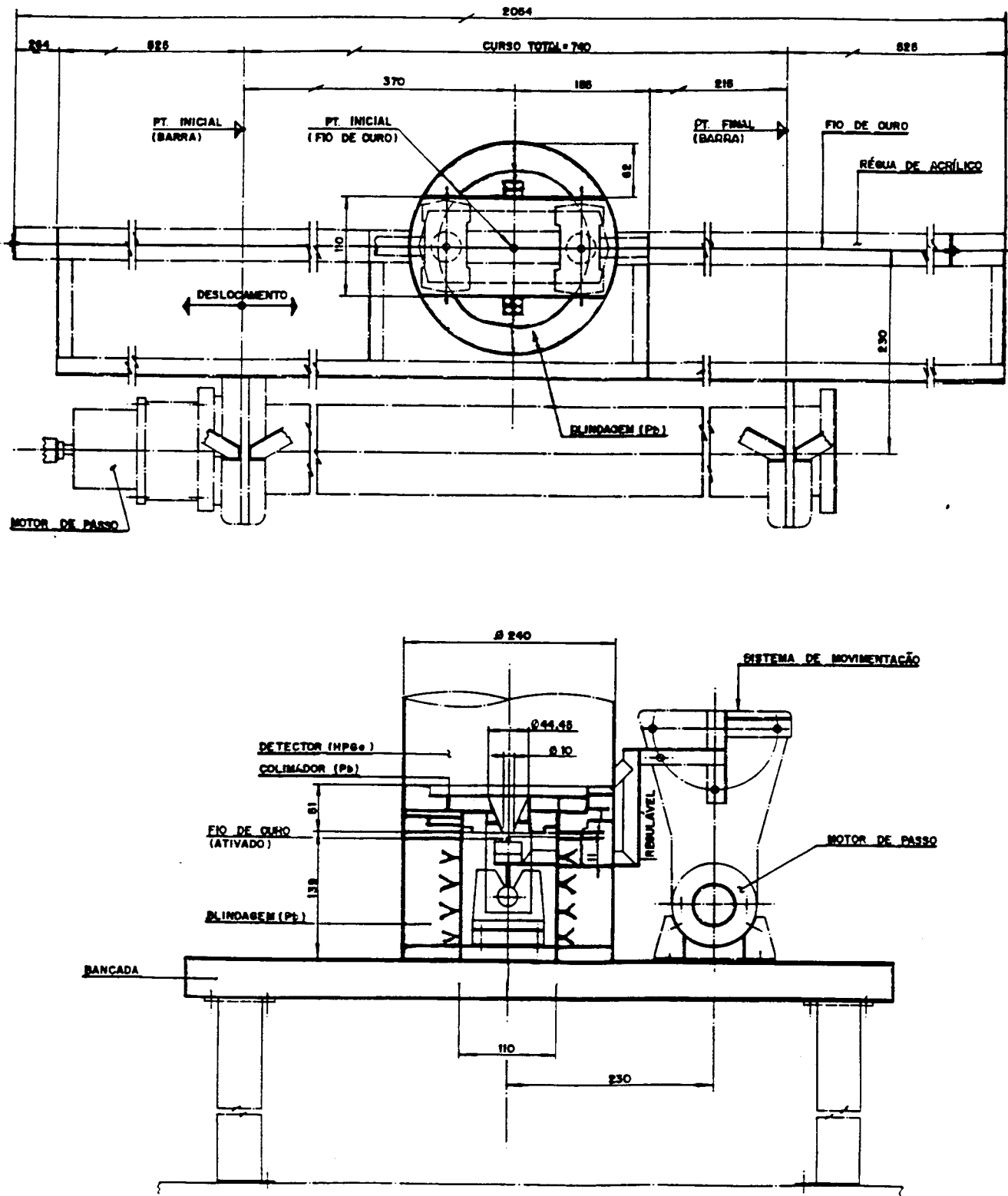
- 4) **Multicanal** (1024 canais); e

- 5) **Microcomputador e Impressora**.

Todo o Sistema de Contagem foi calibrado previamente com uma fonte de fio de ^{152}Eu , sendo uma fonte emissora de várias gamas de energia (de 122 a 1408 keV) com meia-vida de 13.5 anos, no formato de fio (1 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento). Foram utilizados 8 fotopicos entre 244 e 1408 keV, tendo sido calculada a respectiva eficiência de $5.064\text{E}-03$ ($\pm 3.065\text{E}-05$), valor compatível com outras referências [4].

Para iniciarmos a contagem, a régua é movimentada para ajustar o indicador de posição do sistema de movimentação com a cota 00 mm. Feito isto, zeramos o contador e iniciamos a contagem, segundo nossa estratégia de medição, de acordo com os avanços longitudinais providos pelo motor de passo no fuso. A figura 1 apresenta as vistas lateral e superior do Sistema de Contagem.

FIGURA 1 - VISTAS SUPERIOR E LATERAL DO SISTEMA DE CONTAGEM



O número de contagens líquidas para a posição central foi de 20.000, enquanto que para as outras posições foi de 10.000, obtendo-se uma incerteza estatística da ordem de 1.5%.

Os fios de ouro irradiados foram de 0.125 e 0.25 mm de diâmetro e 1300 mm de comprimento, para avaliarmos as vantagens e desvantagens de cada um, com relação a características de montagem, tempo de irradiação e perturbação ao fluxo.

O fluxo térmico é obtido pela expressão abaixo [5]:

$$\Phi = \frac{A_{nu}^{\infty}(1 - F_{cd}/R_{cd})}{N_0 \sigma_{av} K_t} \quad (1)$$

onde:

A_{nu}^{∞} é a atividade de saturação do fio nu, obtida experimentalmente, considerando-se o tempo de irradiação, o tempo de decaimento, a eficiência do sistema de contagem e as propriedades nucleares do detector;

F_{cd} é o fator de Cádmiu, para compensar o fato do Cd não ser um filtro ideal de nêutrons térmicos, fato este explicado pela faixa muito larga de ressonância epitérmica, absorvendo também uma pequena parcela de nêutrons epitérmicos. Este fator depende da geometria e dimensões do detector, da pureza dos materiais, das características de absorção e da distribuição angular e energética dos nêutrons;

R_{cd} é a razão de Cádmiu, que é obtida experimentalmente, sendo definida como a razão entre as atividades de saturação sem e com a cobertura de Cd;

N_0 é o número de átomos do detetor;

σ_{av} é a seção microscópica de ativação; e

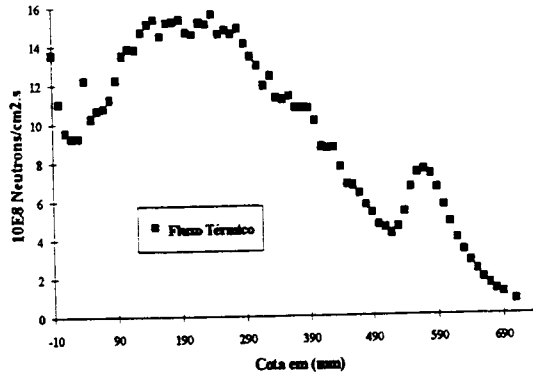
K_t é o fator de perturbação do fluxo térmico, que inclui efeitos de auto-blindagem e de depressão de fluxo.

Foi aplicada a fórmula de propagação de erros na equação acima, considerando-se a variação percentual de cada um dos componentes, tendo-se chegado a um erro de 2.8% de todo o processo de medida.

RESULTADOS OBTIDOS

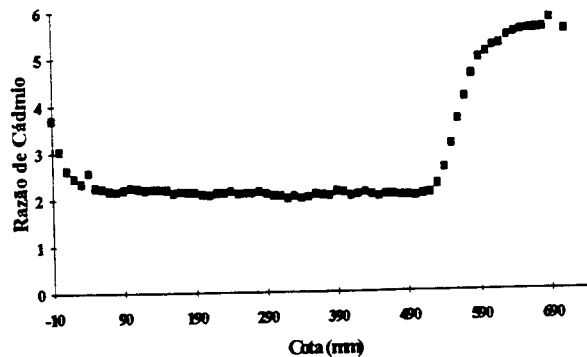
A figura 2 apresenta o mapeamento do fluxo neutrônico térmico medido no canal central. O comprimento ativo das varetas está entre as cotas 91 e 546 mm e a posição vertical das barras de controle foi a de "inseridas em 40% do comprimento ativo".

Figura 2 - Fluxo Térmico na Posição Central do Núcleo



Para obtermos um valor aproximado da soma dos fluxos epitérmico e rápido, apresentamos a figura 3, onde está plotada a Razão de Cádmiu medida ao longo da dimensão vertical, uma vez que a razão entre o fluxo térmico e os fluxos epitérmico e rápido é igual a $(R_{cd} - 1)$, considerando-se como pequena a fração de nêutrons epitérmicos existentes entre o limite da faixa térmica (μkT) e o valor da energia de corte do Cd (E_{cd}). A equação 2 nos indica matematicamente a composição do termo $R_{cd} - 1$.

Figura 3 - Razão Cd x Cota



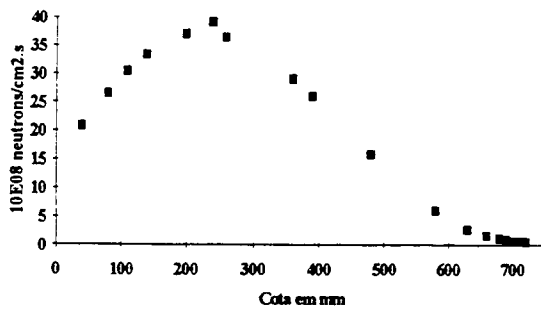
$$R_{cd} - 1 = \frac{\int_0^{\infty} \phi_{term}(E) \sigma(E) dE + \int_{E_c}^{E_f} \phi_{int}(E) \sigma(E) dE}{\int_{E_c}^{\infty} \phi_{int}(E) \sigma(E) dE} \quad [2]$$

Ao longo do comprimento ativo, a Razão de Cádmiu manteve o seu valor próximo a 2,1. Na região fora do comprimento ativo, e principalmente na parte superior do núcleo, onde o fenômeno da **termalização** é mais preponderante, o valor de R_{cd} foi maior, chegando até a ser da ordem de 5,5.

Na região do refletor (externa aos elementos combustíveis) o valor do fluxo térmico apresentou o

formato da figura 4, com o valor máximo de 39,75E08 nêutrons/cm².s.

Figura 4 - Fluxo Térmico no Refletor



CONCLUSÕES

A medida do fluxo neutrônico em núcleos de reatores nucleares no Brasil vem sendo feita por meio de vários métodos [6 e 7]. No Reator IPEN/MB-01, utiliza-se o método de detectores de ativação na forma de folhas, entre outros [8]. Com este trabalho, mostrou-se a viabilidade do emprego do método de detectores de ativação na forma de fios (com diâmetros de 0.125 e 0.25 mm), possibilitando a sua aplicação frequente, inclusive com outros materiais, em futuras medidas naquele reator.

Em nossa experimentação, chegamos à conclusão de que um período total de 90 minutos é suficiente para a irradiação dos fios (nus) de 0.125 mm de diâmetro. As atividades induzidas permitiriam a contagem de até dois fios por dia (60 pontos em média, com espaçamento de 10 mm entre si), considerando-se 10.000 contagens líquidas na região do fotopico, integradas ao longo do tempo, em cada posição, com uma incerteza estatística da ordem de 1.5%. Para as medidas futuras, recomendamos que sejam obtidas 20.000 contagens líquidas.

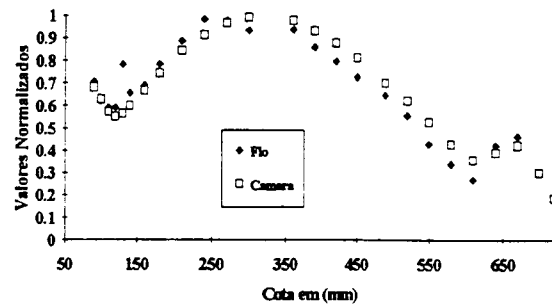
Para o método da razão de Cádmio, irradiamos fios com cobertura de Cd, por um período médio de 7 horas, para que pudéssemos reunir as mesmas atividades existentes na medida dos fios nus, otimizando a operação de contagem.

No caso dos fios de 0.250 mm de diâmetro, estes mesmos períodos de irradiação mostraram-se mais que suficientes para diminuir o tempo total de contagem, melhorando a eficiência desta tarefa. A preparação dos fios mostrou-se também adequada, só que um pouco desfavorável em relação aos fios de 0.125 mm, devido a sua maior rigidez.

Para avaliarmos os resultados medidos com a ativação de fios, comparamos com resultados medidos pela ativação de folhas de ouro, pelo emprego de Câmara de Fissão e por meio de modelagem utilizando os softwares HAMMER-CITATION (teoria de Difusão de Nêutrons). Em todos os casos, foi feita a normalização dos respectivos valores de fluxo térmico pelo maior valor medido [6 e 7].

A Figura 5 mostra a comparação entre os valores medidos por fio e por Câmara de Fissão, cuja diferença teve a média de 0.055 e desvio padrão de 0.043, o que demonstra haver coerência nos resultados obtidos pela técnica de ativação de fios de ouro.

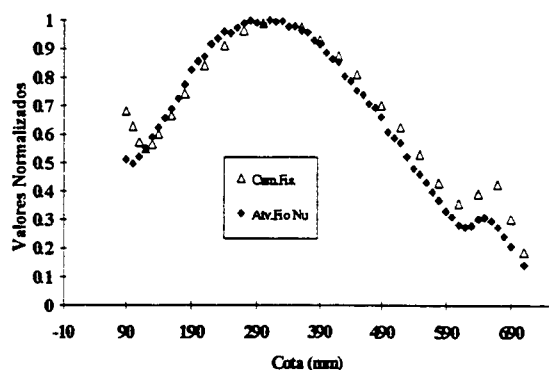
Figura 5 - Fluxo Térmico Fio x Cam Fissão



As possíveis explicações para as discrepâncias observadas são:

- a - Diferença entre os dois métodos no número de medidas para cada posição;
- b - Não contabilização das fissões de ²³⁸U, nas medidas da Mini-Câmara de Fissão, uma vez que assumiu-se que as fissões que ali ocorreram seriam exclusivamente devido ao ²³⁵U, o que não é totalmente correto devido existir também um parcela pequena de ²³⁸U;
- c - Cômputo do fluxo rápido junto ao fluxo térmico pela Mini-Câmara de Fissão. Devemos comparar assim o fluxo térmico normalizado da Câmara de Fissão (que pelo visto não é estritamente térmico) com as medidas normalizadas do fio nú (que considera nêutrons de todas as energias). A Figura 6 mostra a comparação mencionada;

Figura 6 - Atividade Fio Nu x Fluxo Cam Fissão

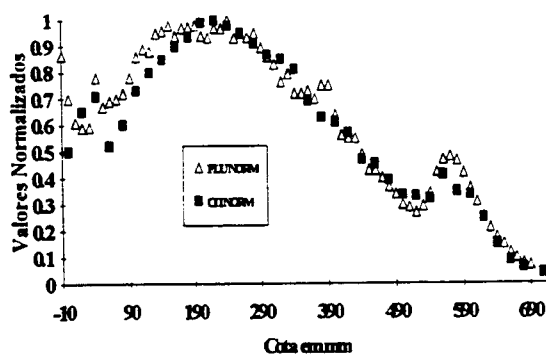


- d - Diferença nos erros de posicionamento entre os dois. Caso haja uma diferença entre as duas irradiações para o fio (com e sem cobertura de Cd), em termos de posicionamento dos fios na bancada de contagem, estaremos com medidas decaladas, o que prejudica os resultados de fluxo térmico e a comparação com as medidas da Mini-Câmara de Fissão.

A figura 7 mostra a comparação entre os valores calculados numericamente (CITATION) e com os valores

experimentais, indicando-se haver uma pequena discrepância nos valores relativos nas cotas entre -10 e 190 mm. Obtendo-se o módulo das diferenças dos fluxos normalizados, encontramos a média como sendo 0.09 e o desvio padrão de 0.015, indicando também haver coerência entre os dois métodos.

Figura 7 - Comparação Fluxo x Cota



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - ADOLPH, J. - "Studie zur experimentellen Bestimmung der thermischen neutronenflussdichteverteilung in den Forschungsreaktoren FRG 1 und FRG 2" - Geesthacht-Tesperhude, Gesellschaft fuer Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt m.b.H. - Alemanha - 1984 (GKSS-84/E/34).
- [2] - DUDERSTADT, J.J.; HAMILTON, L. J. - "Nuclear Reactor Analysis" - John Wiley & Sons - EUA - 1976.
- [3] - AMERICAN NATIONAL STANDARD - "Calibration and Usage of Germanium Detectors for Measurement of Gamma-Ray Emission of Radionuclides" - N42.2.14 - EUA - Abril - 1978.
- [4] - DEBERTIN, K.; SCHOTZIG, U.; WALZ, K.F.; WEISS, H. - "Efficiency Calibration of Semiconductor Spectrometers - Techniques and Accuracies" - Proceedings ERDA X and Gamma Ray Symposium - Ann Arbor - Michigan - EUA - 1976.
- [5] - DROULERS, Y. - "Thermal Neutrons" - Neutron Fluence Measurements - Report Series No. 107 - IAEA - Viena - 1970.
- [6] - MIRANDA, A.F; BITELLI, U.U; JEREZ, R; FERREIRA, C.R - "Mapeamento do Fluxo de Nêutrons no reator IPEN/MB-01 com Câmara de Fissão miniatura". In: IX ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA

DE REATORES E TERMO-HIDRÁULICA, proceedings ... in Cachambu, Brasil, outubro de 1993. Associação Brasileira de Energia Nuclear, p.132-134.

[7] - GUIMARÃES, R.R.R; SANTORO, C.A.B - "Levantamento da Distribuição do Fluxo de Nêutrons Térmicos e Rápidos no Núcleo do Reator IPR-R1" - In: IV ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DE REATORES E TERMO-HIDRÁULICA, proceedings ... in São José dos Campos, Brasil, 1983. Associação Brasileira de Energia Nuclea - STC2.

[8] - BITELLI, U.U; JEREZ, R; YAMAGUCHI, M. - "Calibração de potência do reator IPEN/MB-01 através do mapeamento do fluxo de nêutrons térmicos por detectores de ativação" - In: V CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR: proceedings .. in Rio de Janeiro, Brasil, agosto de 1994. Associação Brasileira de Energia Nuclear, p.87-90.

ABSTRACT

The main task of this work is the implementation of the thermal neutron flux measurement technique, using gold wires as activation detectors in the IPEN/MB-01 reactor core.

The neutron thermal flux spatial distribution was obtained by gold wire activation technique, with wire diameters of 0.125 and 0.250 mm in seven selected reactor experimental channels.

This experiment was the first conducted with gold wires in the IPEN/MB-01 reactor, being this technique implemented for use by experimentalists in flux mapping of the core.