

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA**  
**DE ENGENHARIA**  
**Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares**

**OBTENÇÃO DOS FLUXOS DE NÊUTRONS TOTAL E TÉRMICOS NA MESA**  
**GIRATÓRIA DO REATOR TRIGA MARK I IPR-R1 UTILIZANDO O MÉTODO DE**  
**TRANSPORTE MONTE CARLO**

**Bruno Teixeira Guerra**

**BELO HORIZONTE**

**2011**

Bruno Teixeira Guerra

**OBTENÇÃO DOS FLUXOS DE NEUTRÔNS TOTAL E TÉRMICOS NA MESA  
GIRATÓRIA DO REATOR TRIGA MARK I IPR-R1 UTILIZANDO O MÉTODO DE  
TRANSPORTE MONTE CARLO**

**Dissertação apresentada como Parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de Mestre em  
Ciências e Técnicas Nucleares – Aplicações das  
Radiações.**

**Área: Ciência das Radiações**

**Orientador: Prof. Dr. Arno Heeren de Oliveira**

**Co-Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Pereira  
Bezerra Lima**

Escola de Engenharia da UFMG  
Belo Horizonte  
2008

Guerra, Bruno Teixeira  
G934o Obtenção dos fluxos de nêutrons total e térmicos na mesa giratória do reator Triga Mark I IPR-R1 utilizando o método de transporte Monte Carlo [manuscrito] / Bruno Teixeira Guerra. – 2011.  
viii, 70 f., enc. : il.

Orientador: Arno Heeren de Oliveira.  
Co-orientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 47-70.  
Bibliografia: f. 45-46.

1. Reatores nucleares – Teses. 2. Física nuclear – Teses. I. Oliveira, Arno Heeren de. II. Lima, Cláudia Pereira Bezerra. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039.5 (043)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS por ter colocado os desafios no meu caminho e, juntamente com eles, pessoas maravilhosas com as quais pudesse contar.

À minha mãe Andréa, a que devo tudo que sou e que me deu forças pra lutar por um sonho que às vezes pensava não ser possível. À minha irmã Flávia pelo amor, carinho, atenção e de quem tanto me orgulho. Ao meu irmão Fernando pelo amor e carinho.

Ao meu avô Maurilo em quem procuro me espelhar e minha avó Maria Aparecida por ter sido peça fundamental na minha criação e educação. Aos meus padrinhos Antônio Márcio e Vera Lúcia, que me deram grande apoio durante toda minha formação acadêmica.

Aos meus amigos, irmãos por escolha, Leandro, Quirino, Pablo e Francisco Wagner.

A minha namorada Jadna pelo amor, carinho, atenção e compreensão nos momentos de ausência e angústia.

Ao Prof. Dr. Arno Heeren de Oliveira pela orientação, incentivos e amizade.

À Profa. Dra. Cláudia Pereira Bezerra Lima pela co-orientação, confiança, apoio e estímulo.

À Profa. Dra. Maria Ângela de Barros Correia Menezes pela confiança e apoio.

Ao pessoal do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG, Prof<sup>a</sup> Ângela, Prof. Clemente, Prof<sup>a</sup> Maria Auxiliadora, Prof<sup>a</sup> Antonella, Bernadete, Nanci, Vanderlei e aos amigos de trabalho Marinho, Danilo, Fabiano, Arione, Adélk, Mauricio, Clarysson, Wagner, Carla, Sâmia, Luciana, João, Reginaldo e Barbara.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

E tantos outros familiares e colegas que porventura não citei, mas que estiveram comigo ao longo desta jornada, aos quais também dedico este trabalho e apreço.

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| <b>RESUMO</b> .....  | V    |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | VI   |
| LISTA DE FIGURAS .....   | VII  |
| LISTA DE TABELAS .....   | VIII |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 1    |
| 1.1 JUSTIFICATIVA.....   | 2    |
| 1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS .....   | 2    |
| 1.3 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....  | 3    |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | 4    |
| 2.1 ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA .....  | 4    |
| 2.1.1 CÁLCULO DA ATIVIDADE PARA ANÁLISE DE ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA PELO<br>MÉTODO CONVENCIONAL ..... | 5    |
| 2.1.2 ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA PELO MÉTODO PARAMÉTRICO $K_0$ .....                        | 6    |
| 2.2 O REATOR DE PESQUISA TRIGA IPR-R1 .....  | 8    |
| 2.2.1 DISPOSITIVOS DE IRRADIAÇÃO.....  | 10   |
| 2.2.2 FUNCIONAMENTO DO REATOR TRIGA IPR-R1 .....   | 10   |
| 2.3 CÓDIGO MONTE CARLO.....  | 13   |
| 2.3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO MONTE CARLO.....   | 14   |
| 2.3.2 NORMALIZAÇÃO DO FLUXO DE NÊUTRONS .....  | 19   |
| <b>3 METODOLOGIA</b> .....   | 21   |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | 30   |
| 4.1 ANÁLISE DO FLUXO TOTAL DE NÊUTRONS .....   | 30   |
| 4.2 ANÁLISE DO FLUXO DOS NÊUTRONS TÉRMICOS .....   | 40   |
| <b>5 CONCLUSÃO</b> .....   | 43   |
| 5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS .....   | 44   |
| <b>6 REFERÊNCIAS</b> .....   | 45   |
| <b>APÊNDICE</b> .....  | 47   |

## RESUMO

O IPR-R1 é um reator do tipo TRIGA, modelo Mark-I, fabricado pela empresa General Atomic e instalado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) da Comissão Brasileira de Energia Nuclear (CNEN), em Belo Horizonte, Brasil. Moderado e refrigerado a água leve, o reator possui refletor de grafite e é do tipo piscina aberta. O IPR-R1 funciona a 100 kW, mas será brevemente licenciado para operar a 250 kW. Ele opera a uma baixa potência, baixa pressão e é aplicado na pesquisa, treinamento e produção de radioisótopos. O combustível do IPR-R1 é uma liga de hidreto de zircônio e urânio enriquecido a 20% em  $^{235}\text{U}$ . O objetivo deste trabalho é a modelagem do Reator de Pesquisa TRIGA IPR-R1, utilizando o MCNPX2.6.0 (Monte Carlo N-Particle Transport estender) e o MCNP5, para o cálculo do fluxo de nêutrons na Mesa Giratória. Em cada simulação, a amostra foi colocada em uma posição diferente, num total de 40 posições ao redor do núcleo do reator. A comparação entre os resultados obtidos com o MCNPX 2.6.0 e o MCNP5 com os valores experimentais de outros trabalhos se mostraram bem aceitáveis.

Além disso, esta metodologia é uma ferramenta teórica importante na validação dos dados experimentais e necessária para a determinação de fluxos de nêutrons onde não é possível acesso experimental.

Palavras-chave: MCNP, Fluxo de Nêutrons, TRIGA MARK I IPR-R1, Análise por Ativação Neutrônica.

## ABSTRACT

The IPR-R1 is a reactor type TRIGA, Mark-I model, manufactured by the General Atomic Company and installed at Nuclear Technology Development Centre (CDTN) of Brazilian Nuclear Energy Commission (CNEN), in Belo Horizonte, Brazil. It is a light water moderated and cooled, graphite-reflected, open-pool type research reactor. IPR-R1 works at 100 kW but it will be briefly licensed to operate at 250 kW. It presents low power, low pressure, for application in research, training and radioisotopes production. The fuel is an alloy of zirconium hydride and uranium enriched at 20% in  $^{235}\text{U}$ . The goal this work is modelling of the IPR-R1 Research Reactor Triga using the codes MCNPX2.6.0 (Monte Carlo N-Particle Transport eXtend) and MCNP5 to the calculating the neutron flux in the carousel facility. In each simulation the sample was placed in a different position, totaling forty positions around of the reactor core. The comparison between the results obtained with experimental values from other work showing a relatively good agreement.

Moreover, this methodology is a theoretical tool in validating of the experimental values and necessary for determining neutron flux which can not be accessible experimentally.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Seção de choque microscópica para a captura radioativa representativa[11].....  | 5  |
| Figura 2 - Configuração do núcleo do reator TRIGA IPR-R1(Abril, 2007) [21] .....   | 9  |
| Figura 3 - Vista axial do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por Dalle [3].....  | 22 |
| Figura 4 - Vista axial do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por esta pesquisa.....  | 22 |
| Figura 5 - Vista transversal do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por Dalle [3] .....   | 23 |
| Figura 6 - Vista transversal do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por esta pesquisa .....   | 23 |
| Figura 7 - Vista axial do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por esta pesquisa.....  | 24 |
| Figura 8 - Visão do reator TRIGA IPR-R1 simulada no MCNP .....   | 25 |
| Figura 9 - Taxa de contagem específica normalizada de padrões $^{198}\text{Au}$ , irradiados nos canais da<br>Mesa Giratória [15]. .....   | 27 |
| Figura 10 - Seção de choque de captura radioativa ( $n, \gamma$ ) do $^{197}\text{Au}$ .....   | 29 |
| Figura 11 - Taxa de contagem específica normalizada de padrões $^{198}\text{Au}$ , irradiados nos canais da<br>Mesa Giratória [15] .....   | 30 |
| Figura 12 - Fluxo total de nêutrons normalizado pela média do fluxo total nas 40 posições da<br>Mesa Giratória, no pote de polietileno aonde as amostras são irradiadas, utilizando o código<br>MCNP5..... | 31 |
| Figura 13 - Fluxo total de nêutrons normalizado pela média do fluxo total nas 40 posições da<br>Mesa Giratória, no pote de polietileno aonde as amostras são irradiadas, utilizando o código<br>MCNPX..... | 32 |
| Figura 14 - Fluxo total de nêutrons no pote de polietileno normalizado utilizando o código<br>MCNP5 associado à ferramenta IMP.....  | 35 |
| Figura 15 - Fluxo total de nêutrons no pote de polietileno normalizado utilizando o código<br>MCNP5 associado à ferramenta DXTRAN .....  | 35 |
| Figura 16 - Fluxo total de nêutrons normalizado utilizando o código MCNP5 associado à<br>ferramenta IMP e DXT .....  | 36 |
| Figura 17 - Fluxo total de nêutrons normalizado utilizando o código MCNP5, na amostra de Al-<br>(0,1%)Au, associado ao IMP e ao DXT .....  | 38 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Medidas e cálculos de fluxo no reator TRIGA IPR-R1 .....  | 11 |
| Tabela 2 - Resumo das operações do reator IPR-R1 [21] .....  | 12 |
| Tabela 3 - Dimensões da amostra e dos tubos onde ela é inserida.....   | 24 |
| Tabela 4 - Metodologias desenvolvidas de forma a avaliar o fluxo de nêutrons .....                             | 26 |
| Tabela 5 - Metodologias desenvolvidas de forma a avaliar o fluxo de nêutrons .....                             | 28 |
| Tabela 6 - Fluxo Total de Nêutrons ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) $\times 10^{12}$ .....     | 33 |
| Tabela 7 - Fluxo Total de Nêutrons ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) $\times 10^{12}$ .....     | 37 |
| Tabela 8 - Fluxo Total de Nêutrons ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) $\times 10^{12}$ .....     | 39 |
| Tabela 9 - Fluxo de Nêutrons térmicos( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) $\times 10^{11}$ .....   | 40 |
| Tabela 10 - Fluxo de Nêutrons térmicos ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) $\times 10^{11}$ ..... | 41 |

## 1 INTRODUÇÃO

Desde 1960, o reator de pesquisa TRIGA IPR-R1 do tipo MARK-1 opera no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN), em Belo Horizonte, Brasil. Ele tem como principais aplicações nucleares: a análise por ativação neutrônica (AAN), treinamento de operadores de centrais nucleares, aplicações neutrônicas e termo-hidráulica [3, 17, 20].

O IPR-R1 já passou por várias configurações em seu núcleo [3, 20]. Durante estas modificações, alguns autores realizaram estudos com o objetivo de caracterizar o fluxo de nêutrons em seus dispositivos de irradiação, de forma a acrescentar mais informações para auxiliar na aplicação da técnica AAN [20].

O Laboratório de Ativação Neutrônica (LAN/CDTN) do CDTN/CNEN é responsável por 70% da demanda analítica do reator IPR-R1. Assim, atende às necessidades das indústrias, dos centros de pesquisa, das universidades, de outras instituições do governo e de clientes privados de todo o país [14].

Em 1995, foi implantado no LAN o método  $k_0$  de ativação neutrônica que, desde então, se tornou responsável por 90% da demanda [14]. Este método tem como peculiaridade a exigência do conhecimento do fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos no local de irradiação da amostra. Sendo assim, a avaliação do fluxo se tornou imprescindível na aplicação da AAN.

Com o propósito de contribuir na utilização e aperfeiçoamento da técnica de ativação neutrônica aplicada no CDTN/CNEN, este estudo desenvolveu uma metodologia de cálculo neutrônico em busca da caracterização do fluxo de nêutrons térmicos nos dispositivos onde as amostras são irradiadas de modo a validar a caracterização realizada experimentalmente. Uma outra aplicação importante é a caracterização do fluxo em locais no reator onde não é possível o estudo experimental.

Para este fim, foi utilizado o código MCNP (Monte Carlo N-Partículas) [ 2, 3, 6], por ser uma das principais ferramentas matemáticas empregadas na determinação dos parâmetros neutrônicos de um reator nuclear. Ele é utilizado em problemas complexos, que não possam ser modelados pelos códigos que usam métodos determinísticos, pois a probabilidade de distribuições que governa esses eventos é exemplificada estatisticamente para descrever estes fenômenos. Além disso, é um código com grande flexibilidade geométrica.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Para avaliar o fluxo de nêutrons nas 40 posições na Mesa Giratória, um dos dispositivos de irradiação do reator [21], será usado o MCNPX 2.6.0 na tentativa de determinar se a queima do combustível, durante o tempo em que a amostra é irradiada, influi ou não no fluxo. Além disso, será utilizado o MNCP5 permitindo uma comparação entre os dois códigos, em relação a esta análise de fluxo neutrônico durante a simulação do reator TRIGA IPR-R1.

Ao obter os resultados teóricos dos fluxos de nêutrons térmicos em uma amostra de alumínio Al-(0,1%)Au [15] para cada uma das 40 posições, onde a amostra é irradiada, eles serão comparados com os resultados experimentais [16]. Assim, será possível determinar se a metodologia proposta é realmente eficaz e útil na produção de resultados mais precisos.

Espera-se que o desenvolvimento desta metodologia possa vir a contribuir na aplicação do método  $K_0$ , aumentando a confiabilidade dos seus resultados ao validar os valores de fluxos de nêutrons determinados experimentalmente [16].

Além disso, com esta metodologia espera-se obter conhecimento sobre o código MCNP, simulando um sistema complexo e validando-o com resultados experimentais.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia teórica para o cálculo do fluxo de nêutrons térmicos nos dispositivos de irradiação do reator de pesquisa TRIGA IPR-R1 operando a 100 kW, utilizando o código MCNP. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o modelo do reator de pesquisa TRIGA IPR-R1 desenvolvido por Dalle [3], utilizando o MCNP;
- Modelar a Mesa Giratória e a amostra, partindo do modelo já desenvolvido [3];
- Comparar os resultados obtidos da metodologia proposta com dados de trabalhos anteriores [16], já realizados no reator TRIGA IPR-R1;
- Validar esta metodologia.

### 1.3 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Inicialmente, no capítulo 2, foi realizada a conceitualização da AAN e apresentado os cálculos necessários para a aplicação de seus métodos: convencional e paramétrico  $k_0$ . Em seguida, foi feita uma descrição sobre o reator de pesquisa IPR-R1, assim como os estudos já realizados nele para o cálculo do seu fluxo de nêutrons. Outro aspecto abordado foi a importância da técnica de Ativação Neutrônica devido a sua demanda em relação à utilização do IPR-R1.

Ainda neste capítulo, foi feito um breve histórico do MCNP, sua conceitualização e a demonstração de alguns de seus cálculos.

Em seguida, o capítulo 3 descreve a metodologia utilizada, através da modelagem feita no reator TRIGA e das ferramentas utilizadas para a obtenção de uma melhor avaliação do fluxo de nêutrons através do MCNP.

Já no capítulo 4, foram apresentados os resultados obtidos, comparando-os com os dados experimentais [16]. A partir daí, foi avaliada, dentre as técnicas propostas, qual seria a mais apropriada para a avaliação do fluxo de nêutrons na amostra.

Por fim, são apresentadas as conclusões gerais da pesquisa e as perspectivas futuras para a aplicação e aperfeiçoamento deste estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA

Ao longo dos anos, os métodos de análises multi-elementares sofreram diversos avanços tecnológicos. Hoje em dia, eles são melhor estabelecidos e largamente utilizados nas mais diversas áreas de interesse técnico e científico.

A Análise de Ativação Neutrônica (AAN) é um método multi-elementar, com vasto campo de aplicações que pode ser exemplificado por determinações geoquímicas, análise da poluição por resíduos sólidos de origem doméstica e industrial, estudos de traços de elementos em sistemas biológicos, etc. [4]

Essa técnica identifica os elementos e a quantificação dos mesmos em uma amostra, possuindo um alto grau de precisão, exatidão e oferece uma sensibilidade superior a outras técnicas de análise, da ordem de  $\text{mg.kg}^{-1}$  ou menos.

A AAN é fundamentada na descoberta de Hevesy e Levi em 1936 [4], onde eles observaram que amostras contendo terras raras tornavam-se radioativas após serem expostas a uma fonte de nêutrons. Eles encontraram que a atividade induzida decrescia em diferentes matrizes com diferentes constantes de decaimento, sugerindo que esta técnica poderia ser utilizada para a obtenção de informações sobre a composição das amostras.

Essa análise se dá pelo processo de indução da radioatividade artificial, onde a amostra a ser observada é submetida a um fluxo de nêutrons. Esses nêutrons, ao sofrerem interação com uma fração dos núcleos dos átomos dessa amostra, são absorvidos por estes núcleos que emitem raios  $\gamma$ . Esta reação é conhecida como captura radiativa e é representada por  $(n, \gamma)$ .

Esses raios  $\gamma$  são característicos de cada radioisótopo, podendo assim determinar o elemento existente na amostra irradiada. Todo este processo é conhecido como ativação neutrônica. [19]

Para a indução desta reação, é necessária uma fonte de nêutrons. Existem vários tipos de fontes, tais como reatores, aceleradores e radioisótopos emissores. Os reatores são as fontes

mais utilizadas, pois possuem um grande fluxo de nêutrons, permitindo melhor rendimento desta técnica.

Para um grande número de elementos, especialmente os que possuem número de massa maior que 100, a seção de choque microscópica, para a captura radioativa ( $n, \gamma$ ), tem um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 1.

A energia dos nêutrons produzidos em um reator pode alcançar 10 MeV, mas a faixa abaixo de 0,5 eV, que corresponde à faixa de nêutrons térmicos, é geralmente a mais utilizada nas irradiações devido, à maior probabilidade de ocorrência da reação ( $n, \gamma$ ) [16].

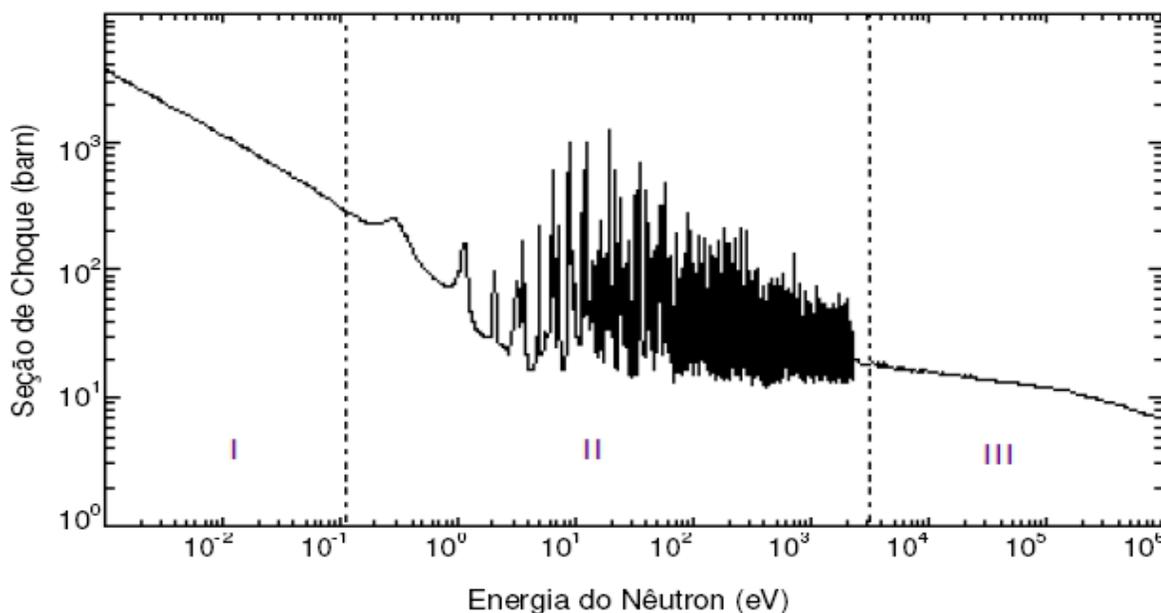


Figura 1 - Seção de choque microscópica para a captura radioativa representativa[11]

### 2.1.1 CÁLCULO DA ATIVIDADE PARA ANÁLISE DE ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA PELO MÉTODO RELATIVO

Após a irradiação das amostras é possível calcular a concentração do isótopo em estudo na amostra. Isso é feito através da comparação entre a área do pico de energia dos raios  $\gamma$ , emitidos pelo radioisótopo, na amostra padrão e na amostra analisada. A expressão utilizada para este cálculo é dada por Ehmann e Vance (1991):

$$\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{m_{\text{padrão}}} \cdot \frac{e^{\lambda \cdot T_{\text{após irrad. amostra}}}}{e^{\lambda \cdot T_{\text{após irrad. padrão}}}}, \quad (1)$$

Sendo:

$R_{\text{amostra}}$  = radioatividade da amostra;

$R_{\text{padrão}}$  = radioatividade do padrão;

$m_{\text{amostra}}$  = massa da amostra;

$m_{\text{padrão}}$  = massa da amostra padrão;

$\lambda \cong (0,693/T_{1/2})$  = constante de decaimento do radionuclídeo calculada a partir da sua meia vida ( $T_{1/2}$ );

$T$  = tempo decorrido entre o final da irradiação no reator e o início da medida da radioatividade da amostra e do padrão respectivamente.

### 2.1.2 ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA PELO MÉTODO PARAMÉTRICO $K_0$

Outra forma de aplicação da AAN é por meio do método  $k_0$  cuja sua principal vantagem é a determinação de um número maior de elementos por amostra sem haver a necessidade do uso de padrões. Todos os elementos detectados após a irradiação podem ser analisados sem a necessidade de um padrão para cada elemento de interesse, pois é usado um comparador ou monitor de fluxo de nêutrons. Desta forma, há um aumento significativo na capacidade analítica [5].

Este método consiste na co-irradiação de um monitor de fluxo, usualmente um disco de Al-(0,1%)Au, com a amostra. As concentrações da maioria dos elementos que foram ativados podem ser calculadas em um único experimento através da atividade do monitor, da eficiência do detector, dos parâmetros  $\alpha$  e  $f$  do reator, e da aplicação das constantes  $k_0$  específicas [4, 5, 12]. A convenção de Högdahl, representada na equação 2, é utilizada para calcular a concentração dos elementos de interesse.

$$m_a = \frac{m_p \cdot C_{n,a} \cdot \varepsilon_p \cdot F_p \cdot S_p \cdot C_a \cdot D_a \cdot H_a}{k_0 \cdot C_{n,p} \cdot \varepsilon_a \cdot F_a \cdot S_a \cdot C_p \cdot D_p \cdot H_p}, \quad (2)$$

onde:

o índice *a* se refere à amostra e o índice *p* ao monitor padrão de fluxo;

*m* é a massa do elemento analisado (g);

*C<sub>n</sub>* é a área líquida sob o fotopico do elemento de interesse;

$\varepsilon$  é a eficiência do detector para o fotopico considerado;

$F = [f + Q_0(\alpha)]$ , sendo:

*f* é a razão entre os fluxos de nêutron térmico e epitérmico;

$Q_0(\alpha)$  é a razão entre  $I_0(\alpha)$  (integral de ressonância) e a  $\sigma_0$  (secção de choque microscópica para nêutrons térmico);

*S* é o fator de saturação da irradiação em função do tempo de irradiação;

*C* é o fator de correção do decaimento durante a contagem;

*D* é o fator de correção do decaimento do radionuclídeo entre final da irradiação e início da contagem;

*H* é o tempo morto do detector durante a contagem.

onde:

$$k_0 = \frac{M_m \cdot \theta_a \cdot P_{\gamma,a} \cdot \sigma_{o,a}}{M_a \cdot \theta_m \cdot P_{\gamma,m} \cdot \sigma_{o,m}}, \quad (3)$$

sendo:

*M* é a massa atômica do elemento (g.mol<sup>-1</sup>);

$\theta$  é a abundância isotópica do elemento;

$P_{\gamma}$  é a abundância absoluta do fotopico medido;

$\sigma_0$  é a secção de choque microscópica para nêutrons térmico ( $\text{cm}^2$ ).

Com isso, diversos laboratórios, que utilizam a técnica de ativação neutrônica pelo método  $k_0$ , se dedicam ao estudo do fluxo de nêutrons nos dispositivos de irradiação, onde as amostras são submetidas, por ser preponderante no processo.

## 2.2 O REATOR DE PESQUISA TRIGA IPR-R1

Os reatores nucleares de pesquisa são equipamentos empregados na análise das propriedades de materiais, produção de radioisótopos, análises químicas por ativação neutrônica, criação de novos materiais e até mesmo no treinamento e formação de pessoal. Com isso, eles são excelentes ferramentas para as mais variadas linhas de pesquisa, além de serem utilizados na prestação de serviços.

O reator nuclear usado no desenvolvimento desta pesquisa é o reator TRIGA IPR-R1. Fabricado pela General Atomic de San Diego – Califórnia, o IPR-R1 do tipo Mark I teve sua primeira criticalidade em 6 de novembro de 1960, no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), em Belo Horizonte, Minas Gerais. Inicialmente, ele operava a uma potência máxima de 30 kW. No ano de 1973, ele passou a ser operado em 100 kW. Atualmente, sua potência máxima pode atingir 250 kW, mas ainda está sendo utilizado a uma potência de 100 kW, pois o CDTN ainda aguarda autorização do setor de licenciamento da CNEN para poder operar em sua potência máxima [20].

Os reatores TRIGA são caracterizados por terem um sistema de segurança intrínseco devido, principalmente, ao seu coeficiente negativo de temperatura/reactividade. Outra característica de segurança é a alta retenção dos produtos de fissão no combustível, mesmo que o revestimento venha a sofrer falha. Além disso, há um sistema passivo de remoção de calor no núcleo durante as operações.

O IPR-R1 tem o núcleo situado abaixo do piso, no fundo de um poço cilíndrico, cujo topo encontra-se a 25 cm abaixo do nível da sala e possui um diâmetro interno de 1,92m a uma profundidade de 6,62 m.

O volume do poço é ocupado por cerca de 18.000 litros de água desmineralizada que atua como refrigerante do reator, cooperando no processo de moderação e reflexão dos nêutrons e também servindo como blindagem biológica às radiações provenientes do núcleo.

Atualmente, o núcleo do reator é formado por 91 cilindros, onde são distribuídos 63 elementos combustíveis-moderadores (58 revestidos com alumínio e 5 com aço inoxidável), 23 elementos refletores de grafita, três barras de controle, uma fonte de nêutrons (Ac-Be) e um tubo central de irradiação. A Figura 2 mostra a configuração atual do núcleo do reator.

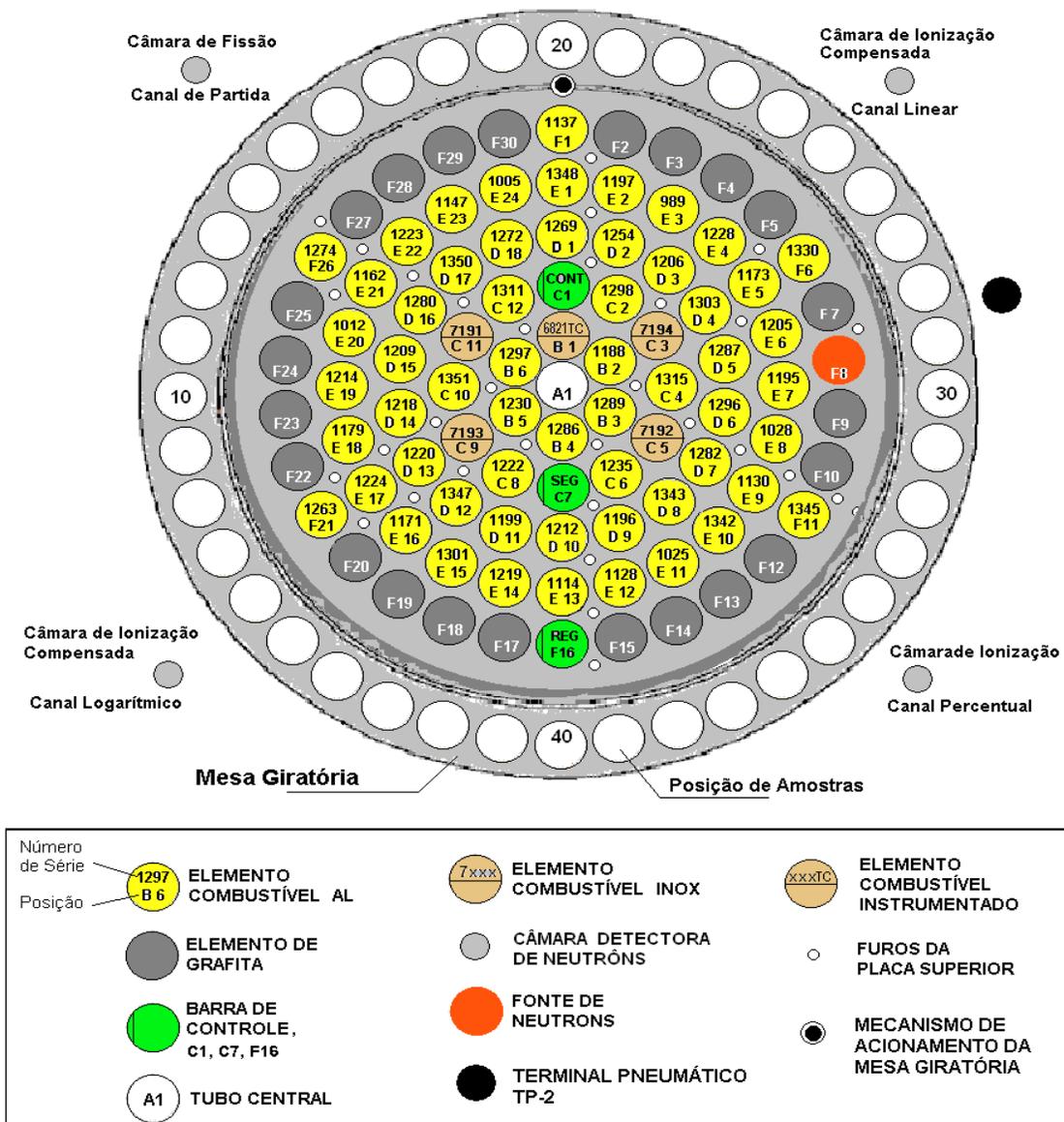


Figura 2 - Configuração do núcleo do reator TRIGA IPR-R1(Abril, 2007) [21]

### 2.2.1 DISPOSITIVOS DE IRRADIAÇÃO

Um dos objetivos básicos do reator TRIGA IPR-R1 é a produção de radioisótopos e análise por ativação. Por esse motivo, o reator possui dispositivos de irradiação: um no núcleo do reator (Tubo Central), outro ao redor do núcleo (Mesa Giratória) e dois terminais pneumáticos.

O Tubo Central é um dispositivo imerso em água, que permite irradiar pequenas amostras na posição onde o fluxo de nêutrons no reator IPR-R1 é máximo, no núcleo do reator.

Já a Mesa Giratória, são 40 cilindros ao redor do núcleo do reator, nos quais são inseridas as amostras para serem irradiadas. Ela possui um mecanismo de rotação automático para permitir a irradiação das amostras sob um mesmo valor de fluxo médio. De forma a preservar esse dispositivo, a Mesa Giratória tem sido utilizada manualmente.

Quanto aos dois terminais pneumáticos, um é dedicado à dosagem de urânio pelo método de nêutrons de fissão retardados. O outro está sendo adaptado para irradiações curtas.

### 2.2.2 FUNCIONAMENTO DO REATOR TRIGA IPR-R1

Ao longo dos anos, vários estudos relativos à análise e determinação do fluxo neutrônico no Reator TRIGA foram realizados. A tabela 1 ilustra as pesquisas feitas durante o período desde 1960 até 2004, mostrando os dispositivos que cada autor utilizou e uma breve descrição de seu objeto de estudo [3, 15, 16].

Tabela 1 - Medidas e cálculos de fluxo no reator TRIGA IPR-R1 [21]

| AUTORES,<br>ANO PUBLICAÇÃO | DESCRIÇÃO   | LOCAL*   |
|----------------------------|---|----------|
| Santoro, 1975              | Espectro de nêutrons intermediários e rápidos.        | TC       |
| Guimarães, 1985            | Perfil axial do fluxo de nêutrons rápidos e térmicos. | Núcleo   |
| Dalle, 2005                | Fluxo teórico térmico e total.                        | MG<br>TC |
| Menezes e Jaćimović, 2006  | Fluxo térmico e epitérmico.                           | MG       |
| Souza, 2006                | Fluxo térmico médio.                                  | MG<br>TC |
| Franco, 2006               | Fluxo térmico e epitérmico.                           | MG<br>TC |

A Tabela 2 resume as operações realizadas no IPR-R1, desde 1960 até 2004, comparando o número de aplicações entre a AAN e os outros tipos de aplicações que o utilizam como ferramenta [20].

Tabela 2 - Resumo das operações do reator IPR-R1 [21]

| NÚMERO DE AMOSTRAS IRRADIADAS NO IPR-R1 |                              |                                       |  |
|---|------------------------------|---------------------------------------|--|
| ANO                                     | ENERGIA<br>Produzida<br>(kW) | ANÁLISE POR<br>ATIVACÃO<br>NEUTRÔNICA | EXPERIMENTOS,<br>TESTES E<br>OUTRA<br>APLICAÇÕES |
| 1960-1964                               | 152.989                      | 217                                   | 1.577  |
| 1965-1969                               | 85.601                       | 14.184                                | 3.405  |
| 1970-1974                               | 247.48                       | 50.026                                | 3.562  |
| 1975-1979                               | 505.162                      | 137.943                               | 2.631  |
| 1980-1984                               | 384.036                      | 167.477                               | 1.024  |
| 1985-1989                               | 131.295                      | 36.430                                | 650  |
| 1990-1994                               | 69.666                       | 10.399                                | 214  |
| 1995-1999                               | 154.639                      | 13.063                                | 468  |
| 2000-2004                               | 167.029                      | 17.006                                | 455  |
| TOTAL                                   | 1.897.897                    | 446.745                               | 13.986   |

Conforme os dados apontados, a AAN demonstra sua importância por ter uma expressiva demanda em relação às outras aplicações utilizadas no reator. Assim, fica clara a relevância em se realizar pesquisas referentes à AAN e, conseqüentemente, ao método  $K_0$  e o fluxo de nêutrons, como já foi dito. Avaliar a aplicabilidade e a precisão de uma metodologia que simule o funcionamento do reator se torna fundamental, pois desta forma será possível estudar diversos parâmetros no reator, como por exemplo, o fluxo de nêutrons nos dispositivos onde as amostras são irradiadas, de forma ágil e com um custo irrelevante. A ferramenta utilizada neste trabalho para o desenvolvimento dessa metodologia é o Código Monte Carlo, que será descrito a seguir.

## 2.3 CÓDIGO MONTE CARLO

Em sua fase inicial, a técnica de Monte Carlo [1] era de certa forma impraticável, pois demandava uma infinidade de cálculos complexos que dificultavam sua aplicação. Com o surgimento dos computadores, a utilização do código passou a ser mais viável e, na medida em que a tecnologia dos computadores vem evoluindo, a técnica de Monte Carlo também acompanhou essa evolução.

Em 1977, com a incorporação dos vários tipos de códigos de Monte Carlo utilizados, tanto para o tratamento físico de energias abaixo de 1 keV quanto para as interações nêutron-fóton, o novo código ficou conhecido como MCNP. Ainda que a princípio o MCNP representasse “Monte Carlo Neutron Photon”, agora representa o “Monte Carlo N-Particle”.

Em 1983, o MCNP3 foi lançado e reescrito inteiramente em ANSI padrão Fortran77. Ele foi a primeira versão do MCNP distribuída internacionalmente, através do Centro de Informação e Proteção da Radiação em Oak Ridge, Tennessee EUA. Outras versões do MCNP foram desenvolvidas na década de 80, como o MCNP3A (1986) e o MCNP3B (1988), que incluem o comando que gera os gráficos (MCNPLOT), a fonte generalizada, as fontes de superfícies e as geometrias de estruturas repetidas (lattice).

O MCNP4 foi lançado em 1990 e foi à primeira versão UNIX do código. Ele acrescentou o transporte de elétrons, o registro (*tally*) de altura de pulso (F8), a aproximação da radiação de frenagem em alvos-densos para o transporte de fótons, a adição de detectores pontuais e um detector esférico (DXTRAN) com o tratamento térmico  $S(\alpha, \beta)$ . Além disso, ele é provido de um maior controle do número aleatório e da geração dos resultados do *tally*, enquanto o código é executado.

Já o MCNP4A, lançado em 1993, retrata análises estatísticas intensificadas, distribuição das multitarefas do processador (executando-as paralelamente em um “cluster”), novas bibliotecas de fótons, delineação do caminho das partículas via SABRINA, *tallies* aperfeiçoados em estruturas repetidas e outras melhorias menores.

Em seguida, foi lançado o MCNP4B, no ano de 1997. A ele foram acrescentadas algumas ferramentas como a geração da seção de choque, o poder de ser executado em 64-bits, a intensificação do tempo de vida do nêutron, além de melhorias no “lattice” e outros aperfeiçoamentos.

O MCNP4C, lançado em 2000, contém avanços como o tratamento de ressonância não resolvido, *tallies* cumulativos e intensificações das perturbações e da física de elétrons.

Em 2003, é desenvolvido o MCNP5, que foi reescrito em ANSI padrão Fortran 90. Ele incluía novas aplicações como a adição da física de colisão dos fótons.

Outra versão do código foi desenvolvida a partir do MCNP4B e LAHET 2.8 e é chamada de MCNPX versão 2.1. Ela foi criada em 23 de outubro de 1997 e uma equipe foi formada para testá-la antes do lançamento oficial. Aproximadamente 1.750 usuários em cerca de 400 instituições ao redor do mundo tiveram a oportunidade de experimentar as melhorias, fazendo com que surgisse a versão 2.6.0.

Dentre as principais vantagens acrescentadas no MCNPX 2.6.0 em relação ao MCNP5, estão: o “Burnup”, o transporte de íons pesados, a emissão de gamas atrasados, dentre outras.

A grande produção de códigos tem revolucionado a ciência, não só na maneira em que eles são produzidos, como também na formação de verdadeiros repositórios de conhecimentos físicos.

O desenvolvimento do MCNP é caracterizado por uma forte ênfase no controle de qualidade, na documentação e na pesquisa. Novos atributos continuam sendo acrescentados ao código, refletindo os avanços da arquitetura de computadores.

### 2.3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO MONTE CARLO

Os métodos Monte Carlo são utilizados para simular processos estatísticos. Assim, as simulações são relativísticas, ou seja, são frutos de experimentos teóricos. Seu processo de amostragem é baseado na seleção de números aleatórios – análogo aos dados arremessados em um cassino – daí o nome “Monte Carlo”.

O comportamento médio dessas partículas é descrito em termos de grandezas macroscópicas, como fluxo ou densidade de partículas. O valor esperado dessas grandezas corresponde à solução da equação determinística de Boltzmann (que rege o fenômeno de transporte de radiação) [2].

Para o cálculo de Monte Carlo, é necessário o conhecimento da distribuição das probabilidades associadas aos possíveis eventos dos quais a partícula pode participar, bem como

todas as variáveis envolvidas em cada evento. O cálculo, que aponta se um determinado evento vai ocorrer ou não e se uma variável vai assumir um valor, é feito através das distribuições de probabilidade.

Considerando uma variável  $x$  e definindo  $f(x)\Delta x$  como a probabilidade de que  $x$  esteja entre  $x$  e  $x + \Delta x$ , a função  $f(x)$  é definida como a função distribuição de probabilidade (pdf – probability distribution function) da variável  $x$ , normalizada para um. Uma função de probabilidade acumulativa (cdf – cumulative distribution function),  $F(x)$  é definida como:

$$F(x) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)\Delta x, \quad (4)$$

onde  $F(x)$  é a probabilidade que o valor da variável  $x$  seja menor ou igual a  $x$ . Baseado nesta definição,  $F(x)$  está delimitada entre 0 e 1.

Para selecionar valores corretos de  $x$  para o cálculo de Monte Carlo, a distribuição destes valores deve seguir a função  $f(x)$ . Isto é feito selecionando um valor (RN) e ajustando

$$RN = F(x), \quad (5)$$

e invertendo-o para obter

$$x = F^{-1}(RN), \quad (6)$$

Pode ser mostrado que se os valores de  $x$  forem selecionados conforme as Equações (5) e (6), baseado nos valores de RN uniformemente distribuídos entre 0 e 1, sua distribuição é a de  $f(x)$ . Computadores são capazes de gerar uma série de números aleatórios entre 0 e 1,

distribuídos uniformemente nesta faixa. Em outras palavras, com igual probabilidade de encontrar um número entre 0 e 1.

Existem casos onde a pdf é uma função discreta. Então, se o número de casos é N, tem-se:

$$\sum_{i=1}^N f(x_i) = 1, \quad (7)$$

e a cdf é dada por:

$$F(x_i) = \sum_{j \leq i} f(x_j), \quad (8)$$

Para ilustrar o uso de números aleatórios para a seleção de uma variável, é considerado um nêutron de energia  $E$  penetrando em um meio. Sendo necessário obter as seguintes informações:

- A localização da primeira colisão;
- O tipo da primeira colisão; e
- A direção da trajetória após a colisão.

Para encontrar a distância  $S$  em que o nêutron terá sua primeira interação, é necessário determinar a probabilidade de tal evento ocorrer entre  $S$  e  $S + \Delta S$ . A função (assumindo um meio uniforme) é dada por:

$$f(s)\Delta s = \exp(-\sum_t s) \sum_t \Delta s, \quad (9)$$

onde:

$\Sigma_t$  = seção de choque macroscópica total;

S é a distância em que o nêutron terá sua primeira interação.

A função cdf é dada por:

$$F(s) = \int_0^s f(s)\Delta s = 1 - \exp(-\Sigma_t s), \quad (10)$$

Selecionando-se um número aleatório RN, ajustando-o igual a F(s), e resolvendo para S, obtém-se:

$$s = -(1/\Sigma_t) \ln(1 - RN), \quad (11)$$

Considerando que a seção de choque macroscópica de espalhamento seja  $\Sigma_s$  e a seção de choque de absorção seja  $\Sigma_a$ , a probabilidade de uma reação de espalhamento é  $\Sigma_s/\Sigma_t$  e a probabilidade de uma reação de absorção é  $\Sigma_a/\Sigma_t$ . Um novo número aleatório é selecionado e comparado com estas probabilidades:

Se  $RN \leq \Sigma_a/\Sigma_t$ , o evento é absorção

Se  $RN > \Sigma_a/\Sigma_t$ , o evento é espalhamento

A determinação da direção da trajetória exige a decisão sobre o ângulo azimutal  $\phi$  e ângulo polar  $\theta$ . Desde que qualquer ângulo azimutal é igualmente provável, a sua pdf é

$$f(\phi)\Delta\phi = (1/2\pi)\Delta\phi \mid 0 \leq \phi \leq 2\pi, \quad (12)$$

e a cdf é:

$$F(\Phi) = \int_0^{\Phi} \left(\frac{1}{2\pi}\right) \Delta\Phi = \frac{\Phi}{2\pi}, \quad (13)$$

Selecionando um novo número aleatório e definindo-o igual a  $F(\emptyset)$  obtém-se o valor de  $\phi$

$$\phi = 2\pi RN \mid 0 \leq \phi \leq 2\pi, \quad (14)$$

Para a determinação do ângulo polar  $\theta$  obtém-se o valor de pdf usando a definição da seção de choque diferencial de espalhamento:

$$f(\phi)\Delta\phi = \frac{\sigma_s(\theta) \sin \theta \Delta\theta}{\sigma_s}, \quad (15)$$

onde  $\sigma_s$  é a seção de choque total de espalhamento. A cdf é:

$$F(\phi) = \frac{\int_0^{\theta} \sigma_s(\theta) \sin \theta \Delta\theta}{\sigma_s}, \quad (16)$$

Um novo número aleatório é selecionado e é definido como  $F(\theta)$ . Então, o valor de  $\theta$  é obtido através da inversão da Equação (15), conforme foi mostrado na Equação (5). Um caso muito comum é o de espalhamento isotrópico. Então, a seção de choque diferencial de espalhamento é independente do ângulo polar e da Equação (15), com isso temos:

$$\phi = \arccos(1 - 2RN) \mid 0 \leq \phi \leq 2\pi, \quad (17)$$

As seguintes características são comuns nos cálculos de Monte Carlo:

- Descrição do processo físico;
- Formulação do modelo de probabilidade;
- Definição da base estimando uma variável aleatória;
- Construção de distribuição de amostragem, usando números aleatórios; e
- Processamento de amostras e análise estatística de dados.

A maior utilidade do método Monte Carlo é sua capacidade de simular fenômenos em geometria complicada, envolvendo fórmulas que seriam praticamente impossíveis de se representar por uma equação diferencial. Outra vantagem é a obtenção de resultados em qualquer detalhe desejado, onde o usuário grava todos os eventos pertinentes.

Sendo os processos nucleares também estatísticos, o método Monte Carlo permitiu o surgimento do MCNP, para simular as reações nucleares. Efetivamente, o MCNP consiste em acompanhar cada uma das muitas partículas da fonte, desde seu “nascimento” (momento em que ela é emitida pela fonte) até o momento em que ela “morre” (é absorvida ou escapa do sistema). Este processo é chamado de “História da Partícula”.

Com isso, o código estima as reações que ocorrem em uma simulação, provocadas direta ou indiretamente por cada partícula, e faz outros cálculos relacionados à física de nuclear.

### 2.3.2 NORMALIZAÇÃO DO FLUXO DE NÊUTRONS

O fluxo de nêutrons deve ser normalizado para a potência térmica do sistema. Para realizar esta normalização, é necessário obter o valor da fluência  $\phi_j$ , a energia média liberada por fissão  $Q$ , o coeficiente de criticalidade efetivo  $k_{eff}$  e os nêutrons gerados por fissão  $\nu$ . Como no MCNPX a potência térmica do reator é fornecida pelo usuário e ele gera os outros dados de forma automática e, no MCNP5 a energia média liberada por fissão  $Q$  não é fornecida automaticamente, este valor pode ser aproveitado de um código ao outro, pois a modelagem em ambos é a mesma.

Assim, a aplicação da fórmula de normalização 18 permite a comparação dos dados adquiridos pelos códigos com o fluxo real:

$$\Phi = \varphi_j \cdot \frac{\text{Potência} \cdot \nu}{Q \cdot k_{\text{eff}}}, \quad (18)$$

Sendo:

$\Phi_n^j$  = fluxo de nêutrons na célula j ( $\frac{\text{neutrões}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ );

$\varphi_j$  = fluência na célula j;

Potência = potência térmica do sistema, fornecida pelo usuário no comando Power do MCNPX;

$\nu$  = nêutrons produzidos por fissão;

$Q$  = média das energias liberadas por fissão;

$k_{\text{eff}}$  = coeficiente de criticalidade efetivo do sistema.

Após a normalização, é possível comparar o fluxo proveniente da simulação do código com os dados experimentais.

### 3 METODOLOGIA

A modelagem do reator de pesquisa IPR-R1 desenvolvida por Dalle [3], utilizando o código MCNP, representa seu modelo mais atual. O pesquisador simulou o seu funcionamento considerando a evolução do reator desde o início de sua vida em 1960 até 6 de novembro de 2004. O estudo de Dalle (2009) tinha como objetivo principal a caracterização do núcleo do reator IPR-R1, considerando-o um cilindro. Na medida em que o presente trabalho tem como objeto de estudo a caracterização do fluxo de nêutrons térmicos na Mesa Giratória, faz-se necessário um melhor detalhamento dessa modelagem, de forma a caracterizar com mais precisão o dispositivo onde as amostras são irradiadas. Estas alterações serão feitas com base nos dados obtidos por informações dos operadores do CDTN/CNEN, pois estas não terem no manual e nem foram fornecidas pelo fabricante.

Os ajustes a serem realizados no modelo simulado são:

- Inserir, no centro da Mesa Giratória, o receptáculo de alumínio cilíndrico com raio interno de 1,5 cm, espessura de 0,1 cm e altura de 20,0 cm;
- Acrescentar o revestimento de alumínio da Mesa Giratória (espessura de 1,6 cm);
- Passar de 0,64 cm para 1,0 cm a camada de alumínio que reveste o núcleo do reator.

Essas mudanças visam aproximar, ainda mais, a simulação do reator TRIGA em relação ao funcionamento real do reator. As figuras 3 e 5 ilustram o modelo de Dalle, de forma a comparar com as figuras 4, 6 e 7, que representam o modelo desenvolvido neste trabalho.

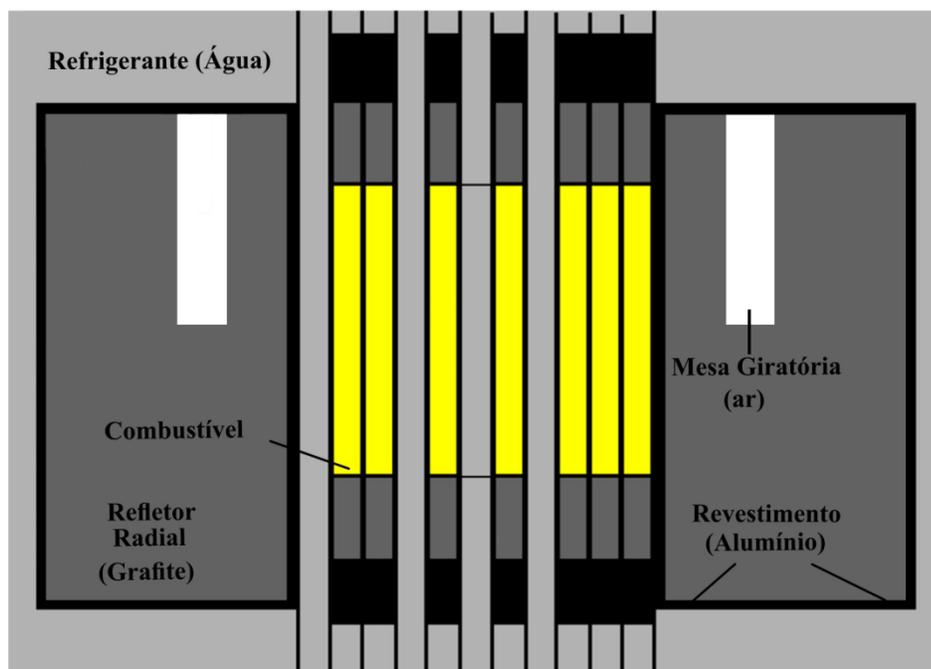


Figura 3 - Vista axial do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por Dalle [3]

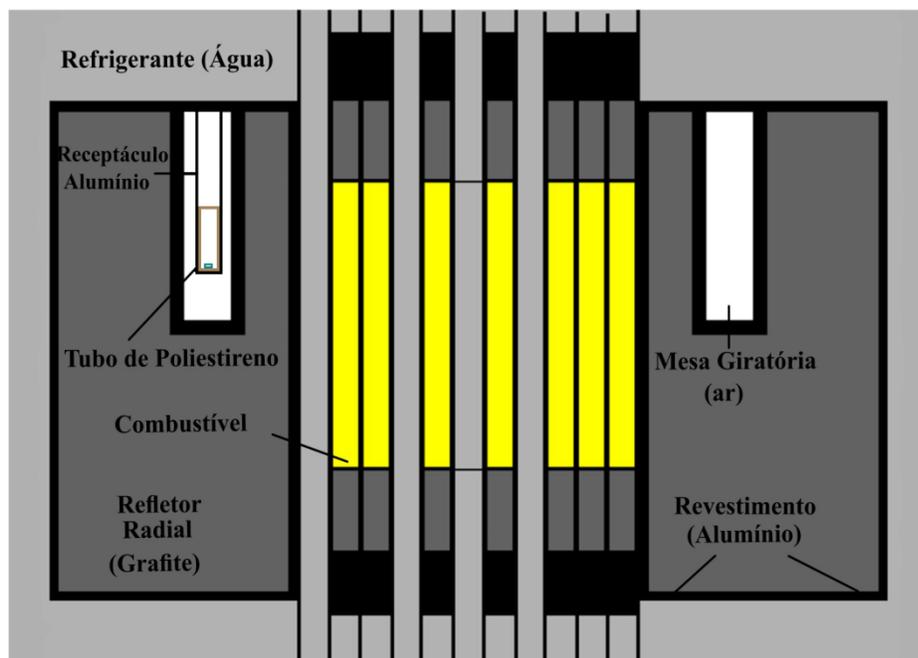


Figura 4 - Vista axial do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por esta pesquisa

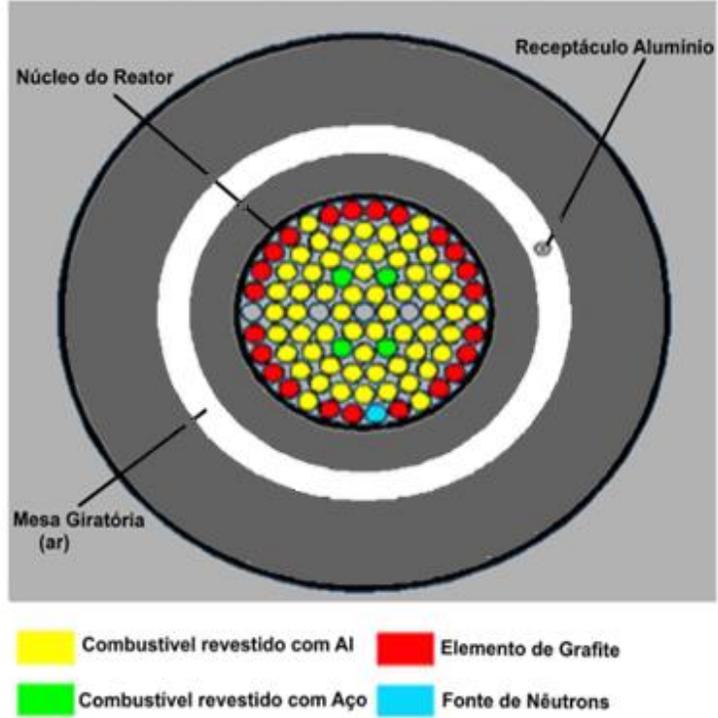


Figura 5 - Vista transversal do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por Dalle [3]

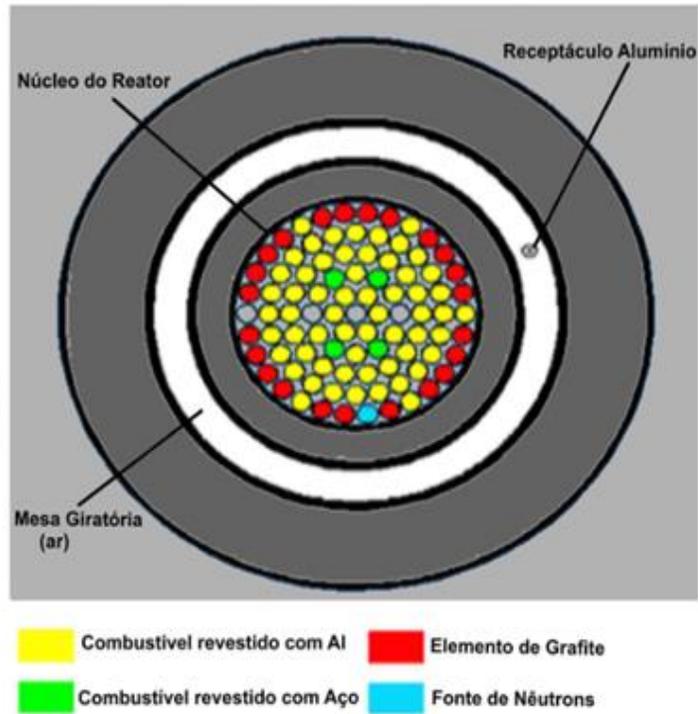


Figura 6 - Vista transversal do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por esta pesquisa

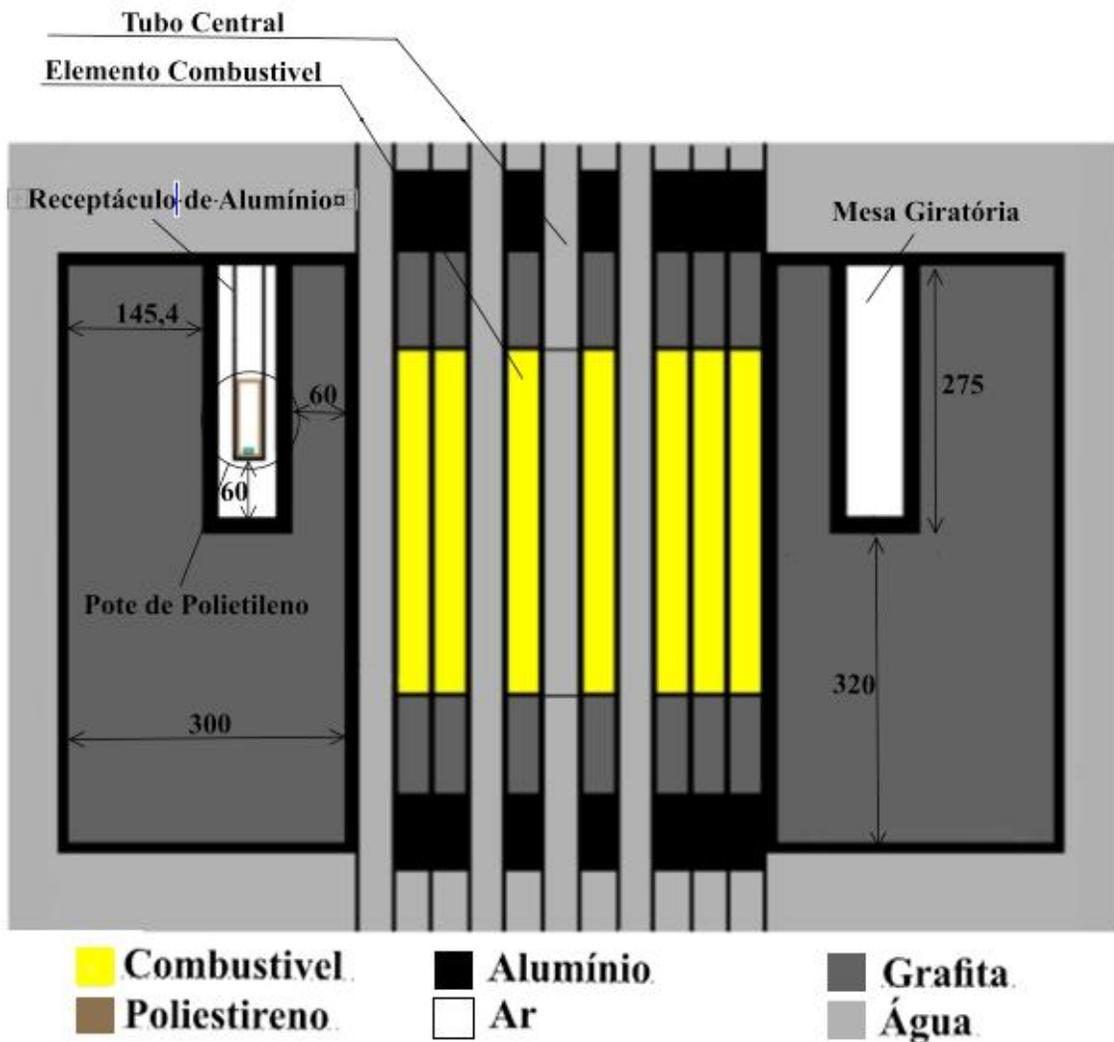


Figura 7 - Vista axial do IPR-R1, desenvolvido no MCNP por esta pesquisa

O próximo passo será modelar a amostra e os potes de polietileno e poliestireno nos quais ela é inserida.

Tabela 3 - Dimensões da amostra e dos tubos onde ela é inserida

|                   | Raio Interno (cm) | Espessura Lateral (cm) | Espessura Superior e Inferior (cm) | Altura (cm) |
|-------------------|-------------------|------------------------|------------------------------------|-------------|
| Amostra           | 0,30              | -                      | -                                  | 0,01        |
| Pote Polietileno  | 0,48              | 0,07                   | 0,06                               | 0,55        |
| Pote Poliestireno | 1,10              | 0,30                   | 0,20                               | 7,90        |

A amostra fica localizada no tubo de polietileno, que se encontra dentro do tubo de poliestireno, o qual fica inserido no receptáculo de alumínio da Mesa Giratória, conforme a figura 8 logo a seguir. O receptáculo de alumínio terá sua localização definida de acordo com o ponto de referência em que a amostra fica localizada a 34 cm do centro do reator e no centro da Mesa Giratória.

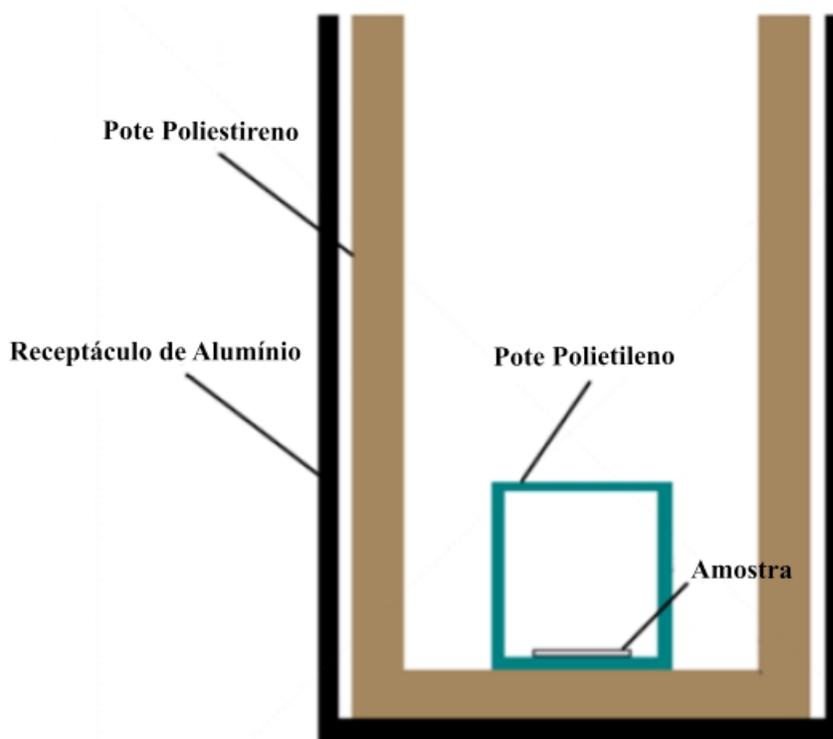


Figura 8 - Visão do reator TRIGA IPR-R1 simulada no MCNP

Depois de todos os ajustes na geometria, o próximo passo será ajustar a ferramenta para o cálculo de criticalidade (Kcode) com 10000 nêutrons por ciclo, em um total de 500 ciclos ativos e inserir o comando F4 para que os códigos façam os cálculos de fluxo de nêutrons térmicos (energias de até 0,5 eV definido pelo usuário) [16] e total na região selecionada, tanto no MCNP5 quanto no MCNPX 2.6.0.

Já no MCNPX 2.6.0 haverá o acréscimo da opção do burnup, onde será determinado o tempo de queima do combustível (uma hora, período que as amostras são irradiadas) e a potência com que o reator TRIGA opera atualmente (0,1 MeV).

Além disso, nas simulações feitas no MCNPX 2.6.0 serão obtidos os valores de  $\nu$  (média de nêutrons liberados por fissão) e  $Q$ (energia media liberada por fissão) de todas as posições, que também serão utilizados para os cálculos de normalização do fluxo de nêutrons no MCNP5.

Como o volume da amostra é pequeno, haveria uma faixa de erro significativa nos resultados obtidos, pois os códigos utilizam cálculos estatísticos para estimar o fluxo de nêutrons na área selecionada pelo usuário. Com isso, será usado o pote de polietileno como ponto de partida, por possuir um volume consideravelmente maior, o que levaria a resultados mais precisos. Desta forma, os resultados apresentados serviriam de base comparativa para a simulação da amostra. Desta forma, será estimado o fluxo de nêutrons no pote de polietileno - onde a amostra é colocada - para todas as 40 posições demonstradas na Figura 3, usando o MCNP5 (Método A) e o MCNPX (Método B). A Tabela 4 a seguir ilustra estes métodos:

Tabela 4 - Metodologias desenvolvidas de forma a avaliar o fluxo de nêutrons

| Método | CÓDIGO      | LOCAL            |
|--------|-------------|------------------|
| A      | MCNP5       | Pote Polietileno |
| B      | MCNPX 2.6.0 | Pote Polietileno |

Após a obtenção dos resultados do fluxo de nêutrons em cada posição da Mesa Giratória, cada fluxo será normalizado pela média de todos os fluxos, tanto no MCNPX quanto no MCNP5. A partir daí, será possível comparar o comportamento do fluxo de nêutrons normalizado com o comportamento da atividade de padrões irradiados nas posições da Mesa Giratória, que também serão normalizados pela média das atividades.

Um dos métodos aplicados, para se obter uma estimativa padrão do comportamento do fluxo de nêutrons, utiliza a liga Al-(0,1%)Au e por meio dela determinou o  $^{198}\text{Au}$  como padrão [15]. Apesar da análise feita no padrão  $^{198}\text{Au}$  ter como objetivo a avaliação da atividade radioativa e nesta pesquisa o foco se concentrar na análise do fluxo neutrônico, a atividade do  $^{198}\text{Au}$  continua sendo um parâmetro de comparação visto que as variações em ambos os casos são proporcionais. Na medida em que a intensidade do fluxo de nêutrons é maior, são produzidos mais radioisótopos, aumentando assim a atividade. Desta forma, o comportamento da atividade

do  $^{198}\text{Au}$  ilustrado na figura 9 será utilizado como comparativo em relação aos resultados deste trabalho.

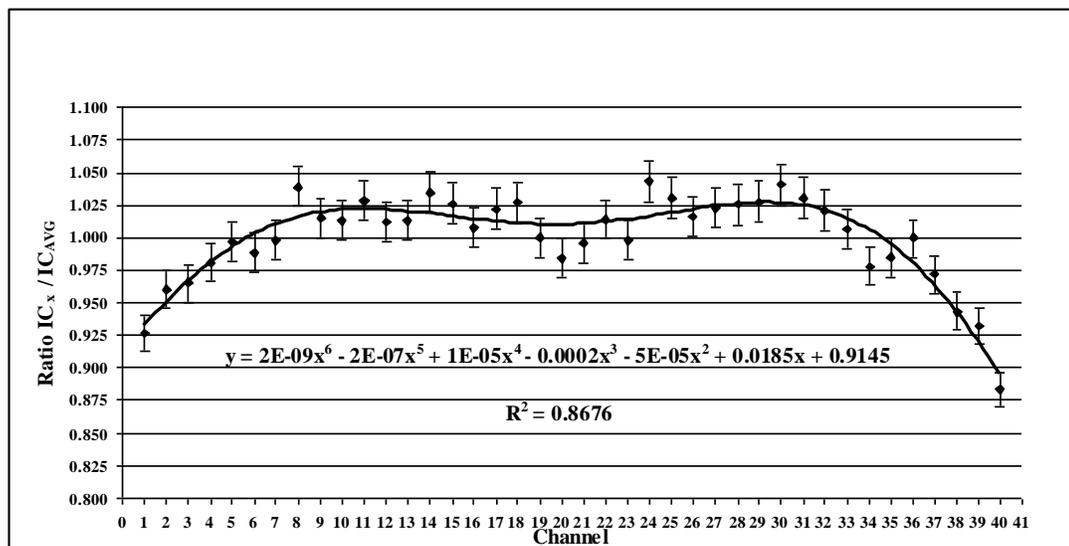


Figura 9 - Taxa de contagem específica normalizada de padrões  $^{198}\text{Au}$ , irradiados nos canais da Mesa Giratória [15].

Logo em seguida, será feita uma avaliação de qual é a melhor metodologia (Método A ou Método B), levando em consideração o comportamento dos resultados obtidos em cada método com o comportamento da atividade do  $^{198}\text{Au}$  [15] e o tempo que cada método leva para ser processado.

Escolhida a melhor metodologia, o próximo passo será acrescentar nela as ferramentas IMP e DXTRAN, com o intuito de aprimorar os resultados.

A aplicação da ferramenta IMP é justificada pelo código permitir o aumento do número de partículas quando estas passam de um meio para outro. A utilização desta técnica possibilita um aumento significativo no número de partículas que chegam ao volume analisado, de forma a contribuir para o melhor tratamento estatístico dos cálculos.

A ferramenta IMP consiste em atribuir um número para cada uma das células (volume em análise) do experimento, este número é denominado “importância”. Quando uma partícula passa de um volume  $V_1$  com importância  $I_1$  para outro volume  $V_2$  com importância  $I_2$ , ela é multiplicada pela razão  $I_2/I_1$  e a soma destas partículas terão a mesma contribuição que a partícula inicial. Desta forma, a partícula que for multiplicada em duas ou mais partículas terá seu peso dividido entre as

partículas geradas, ou seja, a soma dos pesos destas partículas será igual ao peso da partícula inicial.

Assim, a utilidade da ferramenta IMP está na manipulação da amostragem, de forma a melhorar a precisão dos resultados, sem para isso influenciar nos resultados.

Já a aplicação da ferramenta DXTRAN, se dá pelo fato de que uma pequena região está sendo analisada, ou seja, as partículas têm uma pequena probabilidade de espalhamento. Para amenizar esta situação, a ferramenta DXTRAN pode ser utilizada pelo usuário ao especificar no arquivo de entrada uma esfera DXTRAN que abrange esta região de pequeno porte.

Além das partículas que interagem na região analisada pelo *tally*, a ferramenta DXTRAN permite que aquelas que colidem fora deste volume também sejam analisadas. A partir da colisão fora da esfera, o DXTRAN cria uma partícula especial "partícula DXTRAN" que é transportada para dentro da esfera DXTRAN e a partícula real chamada agora de "partícula NÃO-DXTRAN" continua seu trajeto normalmente.

A sutileza sobre a esfera DXTRAN é que o peso extra criado pelas partículas DXTRAN é equilibrado pela destruição das partículas NÃO-DXTRAN que atingem a esfera DXTRAN. A grande desvantagem desta ferramenta é o tempo extra consumido seguindo as partículas DXTRAN com baixo peso.

Desta forma, as medidas a serem tomadas serão: acrescentar no método escolhido a ferramenta IMP (Modelo 1), um detector esférico representado pelo comando DXTRAN (Modelo 2) e a combinação das duas ferramentas (Modelo 3), com o intuito de aprimorar os resultados.

Tabela 5 - Metodologias desenvolvidas de forma a avaliar o fluxo de nêutrons

| MODELO | MÉTODO    | FERRAMENTA | LOCAL            |
|--------|-----------|------------|------------------|
| 1      | ESCOLHIDO | IMP        | Pote Polietileno |
| 2      | ESCOLHIDO | DXT        | Pote Polietileno |
| 3      | ESCOLHIDO | IMP+DXTRAN | Pote Polietileno |

Acredita-se que a utilização dessas duas ferramentas contribua substancialmente para a diminuição do erro relativo do código e para a obtenção de resultados mais precisos.

Comprovando ou não tal hipótese, a melhor metodologia (Modelo 1-3) será utilizada na etapa seguinte para a análise do fluxo de nêutrons no volume da amostra de Al-(0,1%)Au (Modelo 4).

Com a observação da amostra é possível comparar de forma mais fidedigna o comportamento da normalização do fluxo total de nêutrons, ao longo da Mesa Giratória, com o comportamento da normalização da atividade do  $^{198}\text{Au}$ .

Durante as simulações também será obtido o fluxo de nêutrons térmicos, pois a análise de ativação neutrônica (AAN) se dá pela reação de captura radioativa e o  $^{197}\text{Au}$  possui uma maior seção de choque de captura radioativa para nêutrons térmicos (energias de 0,5 eV ou menores), como podemos observar na figura 10. Com isso, essa análise de fluxo de nêutrons se torna fundamental.

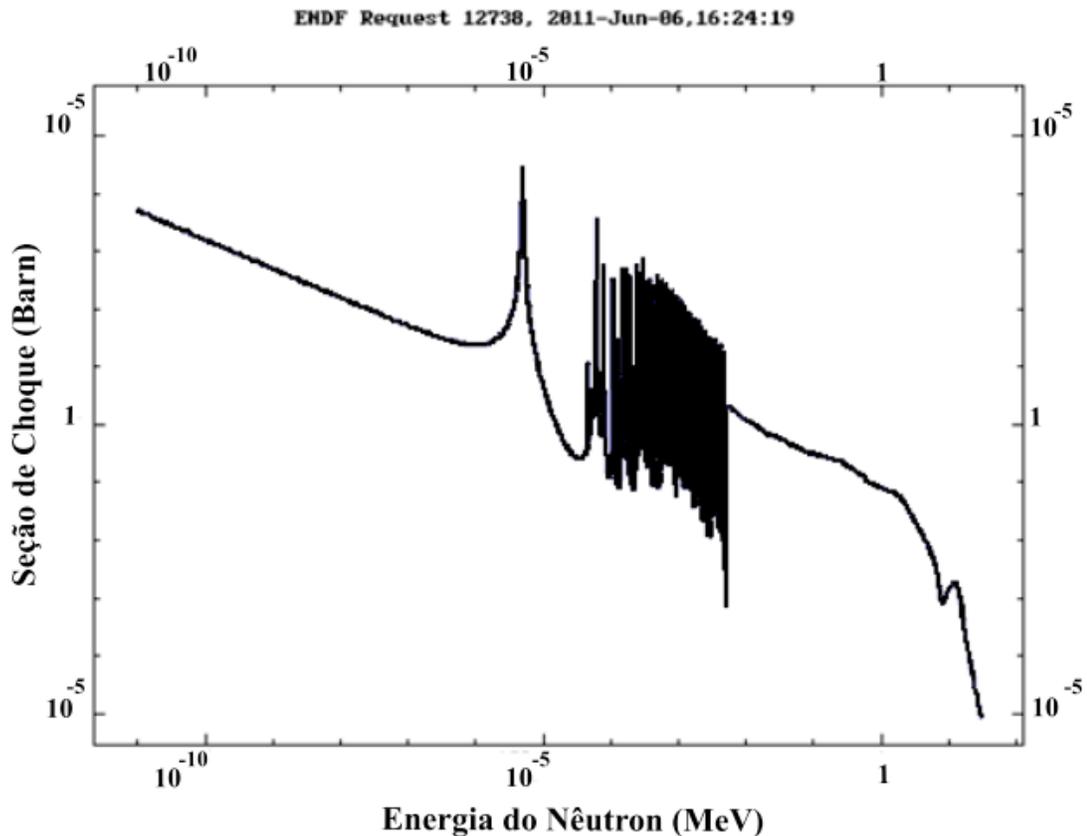


Figura 10 - Seção de choque de captura radioativa ( $n, \gamma$ ) do  $^{197}\text{Au}$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DO FLUXO TOTAL DE NÊUTRONS

Através das simulações no MCNPX2.6.0, foram obtidos os valores de  $\nu=2,437$  e  $Q=201,022000$  MeV em todas as posições. Desta forma, foram utilizados os mesmo valores de  $\nu$  e  $Q$  para todos os cálculos de normalização do fluxo de nêutrons do MCNP5.

Os resultados obtidos do fluxo total de nêutrons em cada posição da Mesa Giratória foram normalizados pela média do fluxo de todas as posições, tanto no MCNPX quanto no MCNP5. A partir disso, comparou-se o comportamento do fluxo de nêutrons com o comportamento da atividade de padrões irradiados nos canais da Mesa Giratória, Figura 11, que foram normalizados pela média das atividades, mencionado anteriormente.

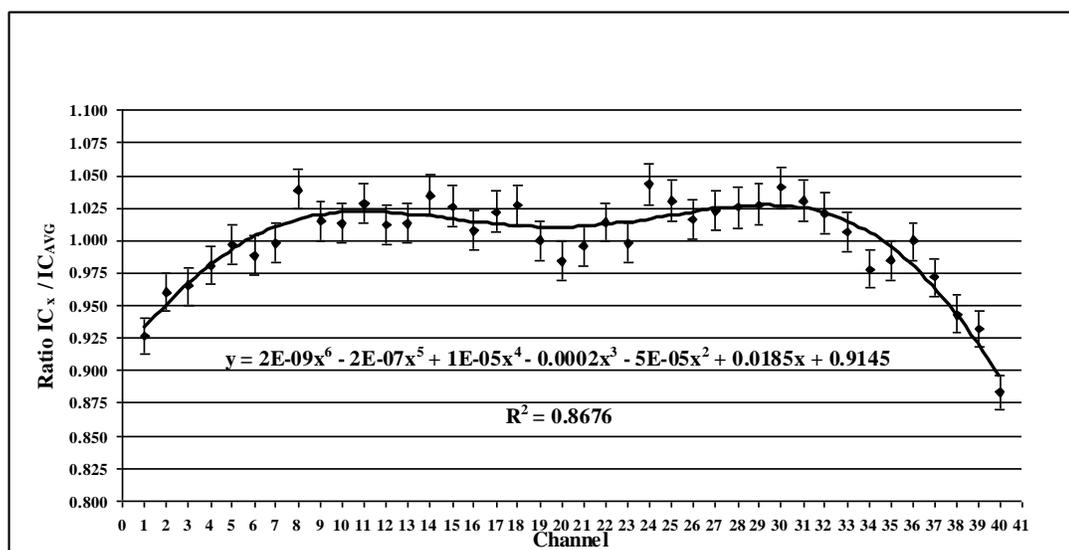


Figura 11 - Taxa de contagem específica normalizada de padrões  $^{198}\text{Au}$ , irradiados nos canais da Mesa Giratória [15]

Além disso, comparou-se o erro relativo do cálculo do fluxo de nêutrons feitos pelos códigos, de forma a se avaliar quais serão os melhores resultados, este erro é calculado utilizando a seguinte equação:

$$ER = \frac{\sigma}{\bar{X}}, \quad (19)$$

onde:

$\sigma$  = desvio padrão;

$\bar{X}$  = média dos valores calculados.

Primeiramente, foi feita uma estimativa do fluxo de nêutrons no volume de ar (20% oxigênio, 80% nitrogênio e densidade  $0.001205 \text{ g.cm}^{-3}$ ) do pote de polietileno para todas as posições, usando o MCNP5 (Método A) e o MCNPX (Método B), representados nas figuras 12, 13 e na tabela 6.

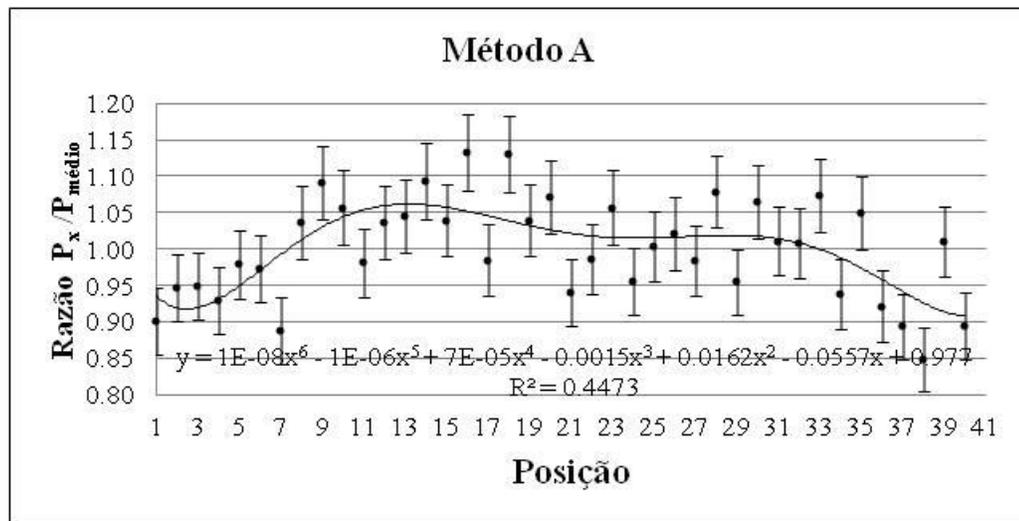


Figura 12 - Fluxo total de nêutrons normalizado pela média do fluxo total nas 40 posições da Mesa Giratória, no pote de polietileno aonde as amostras são irradiadas, utilizando o código MCNP5

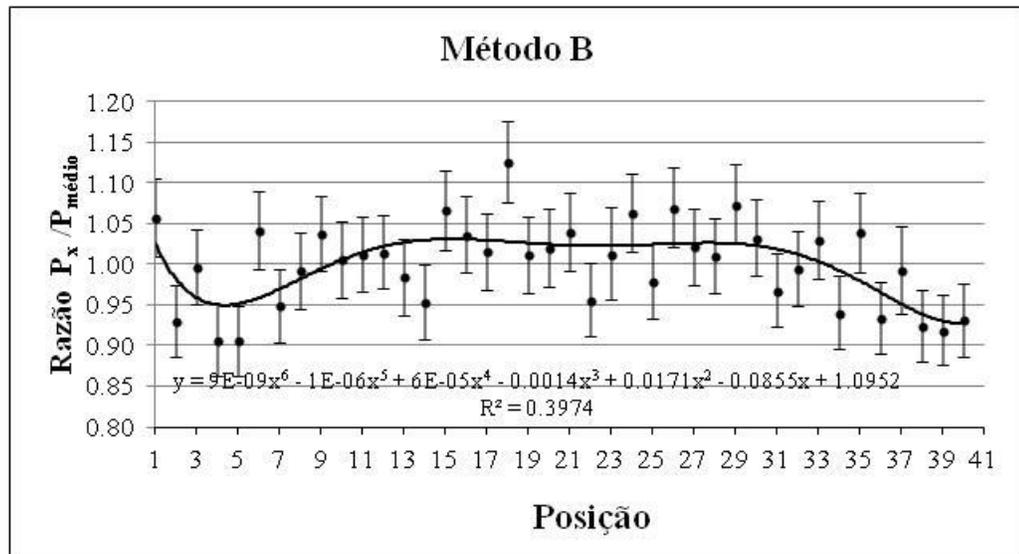


Figura 13 - Fluxo total de nêutrons normalizado pela média do fluxo total nas 40 posições da Mesa Giratória, no pote de polietileno aonde as amostras são irradiadas, utilizando o código MCNPX

Tabela 6 - Fluxo Total de Nêutrons ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $\times 10^{12}$

| <b>Método A</b> |       |                 | <b>Método B</b> |                 |
|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Canal           | Valor | Erro relativo % | Valor           | Erro relativo % |
| 1               | 1,05  | 5,09            | 1,26            | 4,46            |
| 2               | 1,11  | 4,86            | 1,06            | 4,76            |
| 3               | 1,11  | 4,84            | 1,13            | 4,60            |
| 4               | 1,09  | 4,94            | 1,03            | 4,91            |
| 5               | 1,14  | 4,80            | 1,03            | 4,75            |
| 6               | 1,14  | 4,77            | 1,18            | 4,59            |
| 7               | 1,04  | 5,17            | 1,08            | 4,73            |
| 8               | 1,21  | 4,82            | 1,13            | 4,74            |
| 9               | 1,27  | 4,64            | 1,18            | 4,41            |
| 10              | 1,23  | 4,83            | 1,14            | 4,65            |
| 11              | 1,15  | 4,74            | 1,15            | 4,53            |
| 12              | 1,21  | 4,83            | 1,15            | 4,48            |
| 13              | 1,22  | 4,84            | 1,12            | 4,74            |
| 14              | 1,28  | 4,76            | 1,08            | 4,79            |
| 15              | 1,21  | 4,71            | 1,21            | 4,54            |
| 16              | 1,32  | 4,66            | 1,18            | 4,53            |
| 17              | 1,15  | 4,93            | 1,15            | 4,66            |
| 18              | 1,32  | 4,68            | 1,28            | 4,41            |
| 19              | 1,21  | 4,76            | 1,15            | 4,65            |
| 20              | 1,25  | 4,63            | 1,16            | 4,63            |
| 21              | 1,10  | 4,82            | 1,18            | 4,60            |
| 22              | 1,15  | 4,92            | 1,09            | 4,64            |
| 23              | 1,23  | 4,79            | 1,15            | 5,63            |
| 24              | 1,12  | 4,79            | 1,21            | 4,50            |
| 25              | 1,17  | 4,71            | 1,11            | 4,77            |
| 26              | 1,19  | 4,92            | 1,22            | 4,54            |
| 27              | 1,15  | 4,89            | 1,16            | 4,59            |
| 28              | 1,26  | 4,61            | 1,15            | 4,62            |
| 29              | 1,12  | 4,79            | 1,22            | 4,50            |
| 30              | 1,24  | 4,67            | 1,17            | 4,53            |
| 31              | 1,18  | 4,63            | 1,10            | 4,68            |
| 32              | 1,18  | 4,78            | 1,13            | 4,60            |
| 33              | 1,25  | 4,67            | 1,17            | 4,62            |
| 34              | 1,10  | 5,10            | 1,07            | 4,83            |
| 35              | 1,23  | 4,75            | 1,18            | 4,63            |
| 36              | 1,08  | 5,23            | 1,06            | 4,76            |
| 37              | 1,04  | 5,00            | 1,13            | 5,46            |
| 38              | 0,99  | 5,05            | 1,05            | 4,77            |
| 39              | 1,18  | 4,78            | 1,04            | 4,73            |
| 40              | 1,05  | 5,10            | 1,06            | 4,75            |

Em relação às variações ocorridas em cada posição nas figuras 12, 13 e 14, percebe-se que apesar de haver determinadas diferenças, o comportamento é parecido, pois ocorre uma ascendência em direção às posições medianas e um decréscimo nas posições iniciais e finais.

O Método A rodado de forma seqüencial leva em média 120 horas para fornecer os resultados, sendo 3 horas para cada posição. Já o Método B gasta 2 dias em cada posição. Quando a simulação é feita em paralelo, o Método A utiliza 12 núcleos e o tempo gasto é de 40 minutos e o Método B usa 8 núcleos em 6 horas, para cada posição.

Encontrou-se uma margem de erro relativo no cálculo do fluxo dos códigos bem próxima para os dois métodos, em torno de 4,61% a 5,23% para o Método A e 4,41% a 5,63% para o método B. A partir daí, não haveria necessidade em aplicar os dois códigos em todas as análises, pois os resultados são muito parecidos e a diferença do tempo na geração de dados é significativa.

Além disso, a queima de combustível no Método B é avaliada no período de uma hora, o que não representa uma queima considerável para uma flutuação significativa no fluxo de nêutrons nas regiões analisadas. Por outro lado, o Método A é o mais ágil na geração de resultados e atende às demandas dos próximos procedimentos.

A partir daí, o Método A se torna o ponto de partida para as próximas análises, ou seja, será utilizado o MCNP5 para o cálculo do fluxo no volume de ar do pote de polietileno. Com isso, para melhorar os resultados em relação àqueles encontrados no Método A, foi utilizada a ferramenta IMP (Modelo 1).

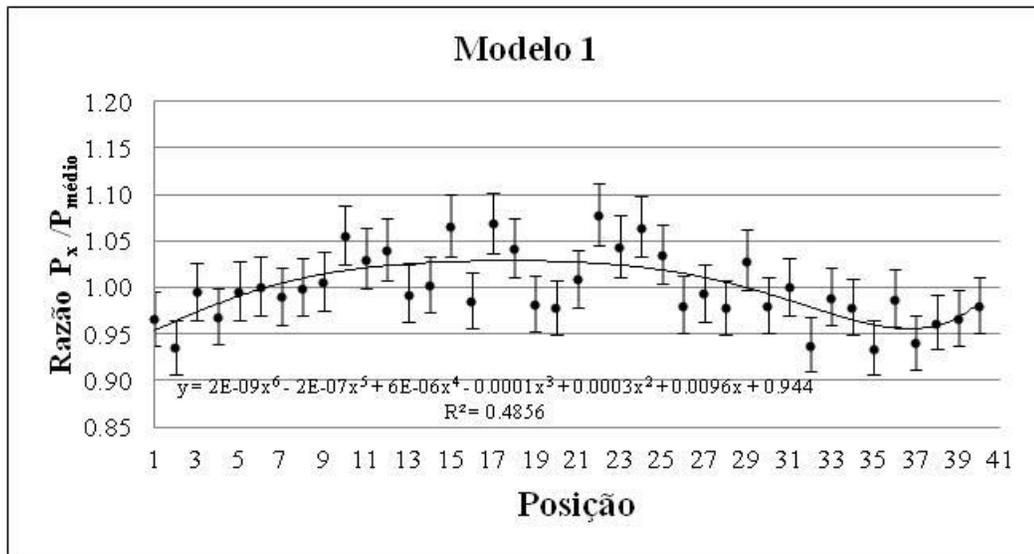


Figura 14 - Fluxo total de nêutrons no pote de polietileno normalizado utilizando o código MCNP5 associado à ferramenta IMP

Conforme a figura 14, os resultados apresentaram uma melhora razoável em relação ao Método A, de forma a se aproximar ainda mais do comportamento padrão. Além disso, houve uma diminuição da margem do erro relativo para a ordem de 3% (tabela 7).

Já o Modelo 2 que utiliza a ferramenta DXTRAN para avaliar o fluxo em pequenos volumes, esta ferramenta apresentou uma melhoria considerável em relação ao Método A, conforme mostra a figura 15 e tabela 7.

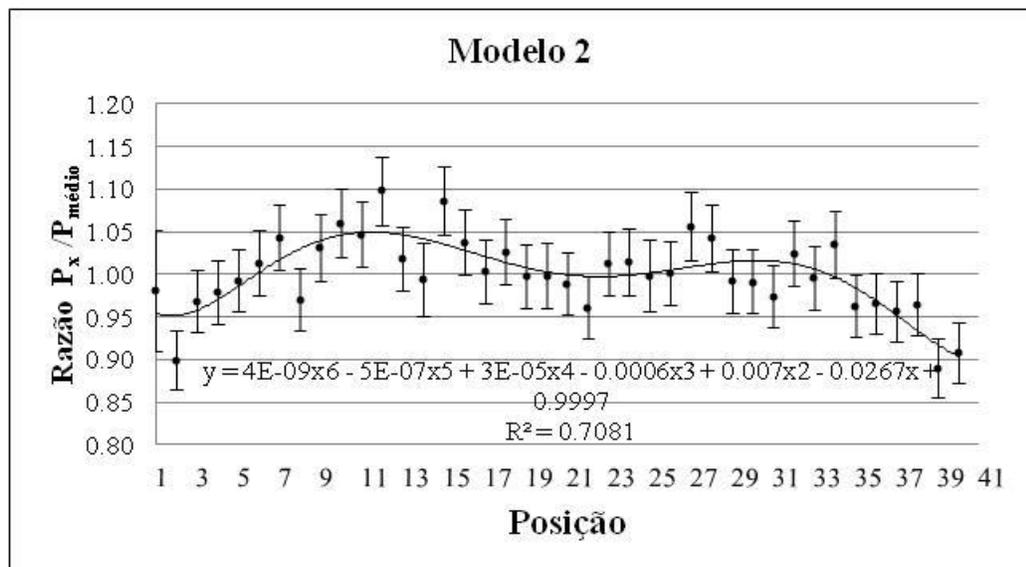


Figura 15 - Fluxo total de nêutrons no pote de polietileno normalizado utilizando o código MCNP5 associado à ferramenta DXTRAN

O erro relativo do código para calcular o fluxo de nêutrons passou para uma média de 3,7% a 4,4%, com apenas um erro relativo atípico de 7,3%, no canal 1 (tabela 7).

Após constatar o aperfeiçoamento dos resultados na aplicação de ambas as ferramentas: IMP e DXTRAN (Modelo 3), parecia viável aplicar as duas ferramentas em conjunto na mesma simulação.

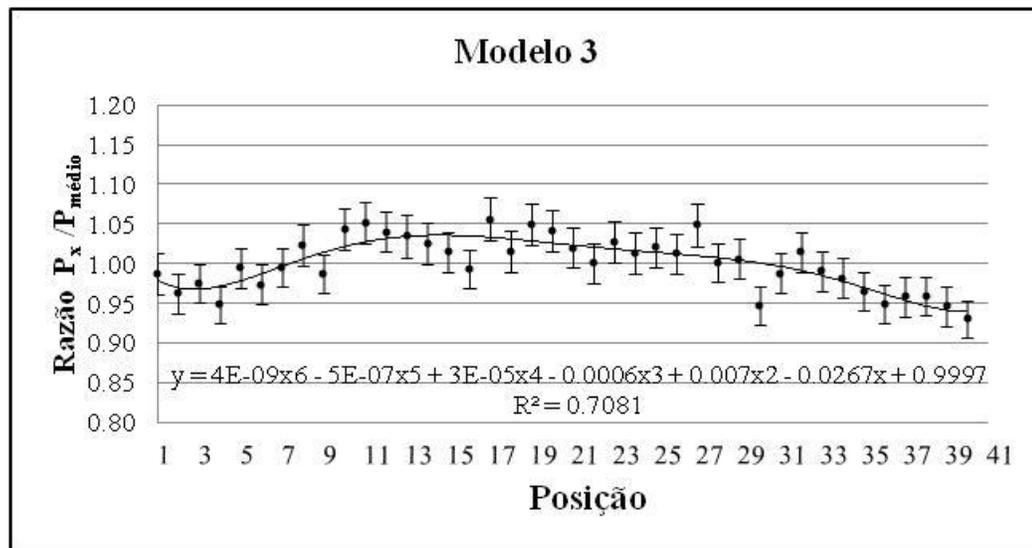


Figura 16 - Fluxo total de nêutrons normalizado utilizando o código MCNP5 associado à ferramenta IMP e DXT

Conforme a figura 16 e tabela 7, os resultados mostraram uma melhora expressiva, tendo sua margem de erro relativo diminuída significativamente para uma média de 2,4% a 2,6%, aproximadamente metade em relação aos dois métodos que não aplicavam ferramenta alguma.

Tabela 7 - Fluxo Total de Nêutrons ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $\times 10^{12}$ 

| Canal | Modelo 1 |                 | Modelo 2 |                 | Modelo 3 |                 |
|-------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|
|       | Valor    | Erro relativo % | Valor    | Erro relativo % | Valor    | Erro relativo % |
| 1     | 1,13     | 3,05            | 1,13     | 7,28            | 1,15     | 2,59            |
| 2     | 1,09     | 3,11            | 1,04     | 3,85            | 1,12     | 2,59            |
| 3     | 1,16     | 3,11            | 1,12     | 3,84            | 1,14     | 2,49            |
| 4     | 1,13     | 3,16            | 1,13     | 3,85            | 1,11     | 2,52            |
| 5     | 1,16     | 3,10            | 1,15     | 3,68            | 1,16     | 2,49            |
| 6     | 1,17     | 3,15            | 1,17     | 3,77            | 1,14     | 2,50            |
| 7     | 1,16     | 3,09            | 1,21     | 3,68            | 1,16     | 2,49            |
| 8     | 1,17     | 3,13            | 1,12     | 3,84            | 1,19     | 2,55            |
| 9     | 1,17     | 3,07            | 1,19     | 3,84            | 1,15     | 2,43            |
| 10    | 1,23     | 3,00            | 1,22     | 3,78            | 1,22     | 2,49            |
| 11    | 1,20     | 3,18            | 1,21     | 3,68            | 1,23     | 2,49            |
| 12    | 1,21     | 3,21            | 1,27     | 3,69            | 1,21     | 2,47            |
| 13    | 1,16     | 3,12            | 1,18     | 3,66            | 1,21     | 2,53            |
| 14    | 1,17     | 3,01            | 1,15     | 4,37            | 1,20     | 2,53            |
| 15    | 1,24     | 3,10            | 1,25     | 3,70            | 1,18     | 2,51            |
| 16    | 1,15     | 3,10            | 1,20     | 3,66            | 1,16     | 2,46            |
| 17    | 1,25     | 3,01            | 1,16     | 3,75            | 1,23     | 2,51            |
| 18    | 1,22     | 3,04            | 1,19     | 3,76            | 1,19     | 2,51            |
| 19    | 1,15     | 3,13            | 1,15     | 3,77            | 1,22     | 2,46            |
| 20    | 1,14     | 3,05            | 1,15     | 3,76            | 1,22     | 2,53            |
| 21    | 1,18     | 3,06            | 1,14     | 3,72            | 1,19     | 2,48            |
| 22    | 1,26     | 3,09            | 1,11     | 3,78            | 1,17     | 2,47            |
| 23    | 1,22     | 3,16            | 1,17     | 3,73            | 1,20     | 2,56            |
| 24    | 1,24     | 3,10            | 1,17     | 3,82            | 1,18     | 2,52            |
| 25    | 1,21     | 3,08            | 1,15     | 4,24            | 1,19     | 2,50            |
| 26    | 1,15     | 3,11            | 1,16     | 3,72            | 1,18     | 2,56            |
| 27    | 1,16     | 3,10            | 1,22     | 3,81            | 1,22     | 2,55            |
| 28    | 1,14     | 3,04            | 1,20     | 3,73            | 1,17     | 2,48            |
| 29    | 1,20     | 3,13            | 1,15     | 3,76            | 1,17     | 2,50            |
| 30    | 1,15     | 3,11            | 1,15     | 3,79            | 1,10     | 2,52            |
| 31    | 1,17     | 3,12            | 1,13     | 3,74            | 1,15     | 2,54            |
| 32    | 1,10     | 3,06            | 1,18     | 3,76            | 1,18     | 2,54            |
| 33    | 1,16     | 3,08            | 1,15     | 3,81            | 1,16     | 2,55            |
| 34    | 1,14     | 3,09            | 1,20     | 3,73            | 1,15     | 2,55            |
| 35    | 1,09     | 3,13            | 1,11     | 3,79            | 1,13     | 2,53            |
| 36    | 1,15     | 3,09            | 1,12     | 3,73            | 1,11     | 2,49            |
| 37    | 1,10     | 3,15            | 1,10     | 3,73            | 1,12     | 2,55            |
| 38    | 1,12     | 3,07            | 1,11     | 3,83            | 1,12     | 2,54            |
| 39    | 1,13     | 3,15            | 1,03     | 3,91            | 1,10     | 2,61            |
| 40    | 1,15     | 3,08            | 1,05     | 3,93            | 1,09     | 2,52            |

O próximo cálculo passa a analisar o fluxo no volume da amostra de Al-(0,1%)Au (Modelo 4), que se encontra dentro do tubo de polietileno. Partindo dos resultados anteriores, foram utilizadas as ferramentas IMP e DXTRAN.

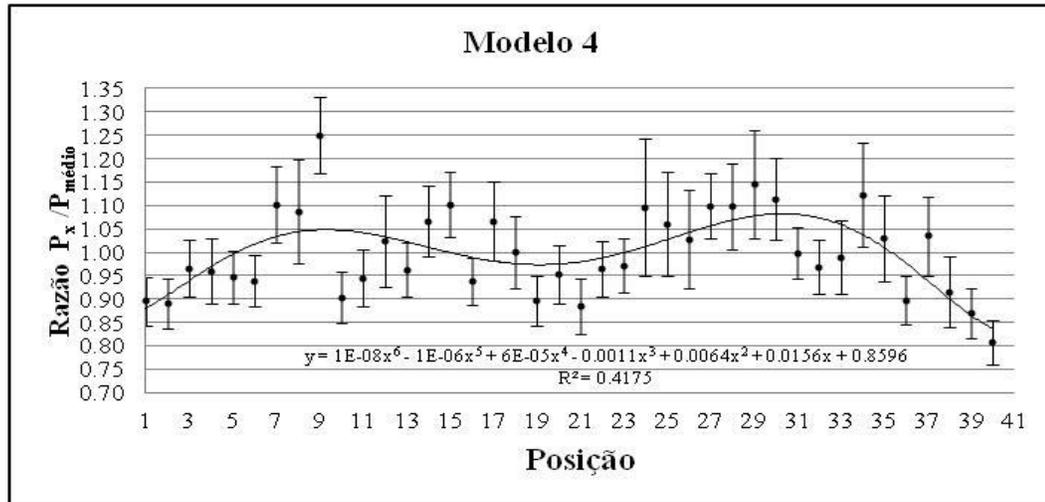


Figura 17 - Fluxo total de nêutrons normalizado utilizando o código MCNP5, na amostra de Al-(0,1%)Au, associado ao IMP e ao DXT

Ao se comparar o comportamento do fluxo de nêutrons na amostra de Al-(0,1%)Au (Modelo 4), ilustrado na figura 17 e tabela 8, com o comportamento da atividade do  $^{198}\text{Au}$  na figura 11, percebe-se uma grande semelhança. Apenas o resultado do canal 9 se apresentou atípico dos outros resultados.

As variações de erro relativo no cálculo do fluxo de nêutrons foram de 5,5% a 9,9%. Algumas situações pontuais apresentaram um erro expressivo, chegando até 13,4%. Apesar disso, essa é uma situação já esperada, pois se tratando de um procedimento estatístico e de um volume muito pequeno, a margem de erro tende a ser bem mais significativa do que na análise do pote de polietileno, por exemplo.

Tabela 8 - Fluxo Total de Nêutrons ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $\times 10^{12}$

| <b>Modelo 4</b> |       |                 |
|-----------------|-------|-----------------|
| Canal           | Valor | Erro relativo % |
| 1               | 1,06  | 5,74            |
| 2               | 1,05  | 6,01            |
| 3               | 1,14  | 6,21            |
| 4               | 1,14  | 7,19            |
| 5               | 1,12  | 5,99            |
| 6               | 1,11  | 5,83            |
| 7               | 1,31  | 7,33            |
| 8               | 1,29  | 10,09           |
| 9               | 1,48  | 6,52            |
| 10              | 1,07  | 5,93            |
| 11              | 1,12  | 6,48            |
| 12              | 1,21  | 9,48            |
| 13              | 1,14  | 6,10            |
| 14              | 1,26  | 7,12            |
| 15              | 1,31  | 6,35            |
| 16              | 1,11  | 5,47            |
| 17              | 1,26  | 7,95            |
| 18              | 1,19  | 7,73            |
| 19              | 1,06  | 5,98            |
| 20              | 1,13  | 6,61            |
| 21              | 1,05  | 6,82            |
| 22              | 1,14  | 6,16            |
| 23              | 1,15  | 5,86            |
| 24              | 1,30  | 13,37           |
| 25              | 1,26  | 10,41           |
| 26              | 1,22  | 10,19           |
| 27              | 1,30  | 6,31            |
| 28              | 1,30  | 8,38            |
| 29              | 1,36  | 10,10           |
| 30              | 1,32  | 7,77            |
| 31              | 1,18  | 5,51            |
| 32              | 1,15  | 6,08            |
| 33              | 1,17  | 7,85            |
| 34              | 1,33  | 9,90            |
| 35              | 1,22  | 8,89            |
| 36              | 1,06  | 5,81            |
| 37              | 1,23  | 8,17            |
| 38              | 1,08  | 8,38            |
| 39              | 1,03  | 6,16            |
| 40              | 9,57  | 5,82            |

## 4.2 ANÁLISE DO FLUXO DOS NÊUTRONS TÉRMICOS

Em todas as simulações com o MCNP5 foi obtido, em paralelo, o fluxos dos nêutrons térmicos, objetivo principal desta pesquisa. Neste caso, a comparação dos resultados se torna mais clara e precisa devido aos valores experimentais adquiridos na pesquisa [16].

Dessa forma, a Tabela 9 ilustra os valores estimados para o fluxo dos nêutrons térmicos no volume de ar do pote de polietileno e destaca a diferença em relação aos valores experimentais [16]. Esta diferença é calculada utilizando a equação 20:

$$\text{Dif} = \left| \frac{V_e - V_c}{V_e} \right| \cdot 100 \quad (20)$$

onde:

$V_e$  = valor experimental;

$V_c$  = valor calculado pelo código MCNP.

Tabela 9 - Fluxo de Nêutrons térmicos ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $\times 10^{11}$

| Posição | Valor Experimental [16] | Método A |          | Modelo 1 |          | Modelo 2 |          | Modelo 3 |          |
|---------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|         |                         | Valor    | Dif. (%) |
| 1       | 6,69                    | 6,11     | 8,67     | 6,90     | 3,17     | 7,37     | 10,14    | 6,58     | 1,66     |
| 3       | 6,55                    | 6,6      | 0,76     | 6,94     | 5,91     | 6,52     | 0,45     | 6,72     | 2,65     |
| 7       | 6,35                    | 5,79     | 8,82     | 6,46     | 1,79     | 6,74     | 6,10     | 6,56     | 3,27     |
| 10      | 5,99                    | 6,44     | 7,51     | 6,78     | 13,13    | 6,67     | 11,36    | 6,88     | 14,79    |
| 24      | 6,94                    | 6,33     | 8,79     | 6,74     | 2,95     | 6,49     | 6,44     | 6,60     | 4,91     |
| 25      | 6,45                    | 6,91     | 7,13     | 6,71     | 3,97     | 6,77     | 4,89     | 6,41     | 0,56     |
| 29      | 7,32                    | 6,57     | 10,25    | 6,63     | 9,49     | 6,42     | 12,35    | 6,61     | 9,66     |
| 34      | 7,3                     | 5,9      | 19,18    | 6,32     | 13,40    | 6,85     | 6,20     | 6,37     | 12,78    |
| 35      | 7,18                    | 7,0      | 2,51     | 6,20     | 13,70    | 6,69     | 6,87     | 6,58     | 8,30     |
| 38      | 6,58                    | 5,76     | 12,46    | 7,17     | 9,03     | 6,57     | 0,14     | 6,65     | 1,07     |
| 40      | 6,16                    | 5,91     | 4,06     | 6,76     | 9,78     | 6,43     | 4,42     | 6,47     | 5,08     |

No Método A, a diferença em relação aos valores experimentais varia de 0,8% a 19,2%, já com o acréscimo da ferramenta IMP (Modelo 1) a margem de diferença passou de

1,8% a 13,7%. Com o uso da ferramenta DXTRAN (Modelo 2) a variação ficou entre 0,1% a 12,4% e com a combinação das duas ferramentas IMP+DXTRAN (Modelo 3) a diferença passou para 0,6% a 14,8%.

Além disso, em cada uma dessas metodologias foi considerado o erro relativo do código para o cálculo de fluxo de nêutrons térmicos, gerado nos dados de saída do código. No Método A o erro relativo fica entre 5,5% e 6,4%, já no Modelo 1 a margem de erro relativo é de 3,1% a 3,4%. No Modelo 2 a variação é de 4,4% a 6,2% com apenas um erro relativo atípico de 10,6% no canal 1. Por fim, no modelo 3 oscilou entre 2,6% e 2,8%.

Após avaliar a diferença dos dados do fluxo de nêutrons térmicos em relação aos valores experimentais e o erro relativo do cálculo feito pelo código para obter esses resultados, foi possível perceber a grande contribuição trazida pelo uso da ferramenta IMP e da DXTRAN. Isso pode ser constatado pela diminuição na margem de erro relativo do código observada pela comparação do método A com o modelo 3, o que vai de 5,5% a 6,4% para 2,6% a 2,8%. O mesmo ocorre quando se faz a mesma comparação em relação aos valores experimentais, com uma variação de 0,8% a 19,2% para 0,6% a 14,8%.

Novamente foi confirmada a eficiência da combinação IMP e DXTRAN para o cálculo do fluxo de nêutrons e, por fim, foi utilizado esse recurso para se obter o fluxo de nêutrons térmicos no volume da amostra Al-(0,1%)Au inserida dentro do pote de polietileno (Modelo 4).

Tabela 10 - Fluxo de Nêutrons térmicos ( $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $\times 10^{11}$

| Posição | Valor Experimental [16] | Model 4 |          |
|---------|-------------------------|---------|----------|
|         |                         | Valor   | Dif. (%) |
| 1       | 6,69                    | 6,05    | 9,60     |
| 3       | 6,55                    | 6,79    | 3,62     |
| 7       | 6,35                    | 6,62    | 4,29     |
| 10      | 5,99                    | 6,23    | 4,00     |
| 24      | 6,94                    | 6,56    | 5,41     |
| 25      | 6,45                    | 7,00    | 8,47     |
| 29      | 7,32                    | 7,09    | 3,11     |
| 34      | 7,3                     | 6,59    | 9,77     |
| 35      | 7,18                    | 7,46    | 3,85     |
| 38      | 6,58                    | 6,80    | 3,37     |
| 40      | 6,16                    | 5,96    | 3,31     |

Com o uso das ferramentas IMP e DXTRAN a diferença dos resultados teóricos deste estudo em relação aos valores experimentais [16] de 11 canais da Mesa Giratória ficaram abaixo de 10%, ou seja, dentro de uma margem de erro aceitável, de acordo com diversos autores [1, 8, 16]. Já em relação ao erro relativo do código para estimar o fluxo de nêutrons térmicos desses 11 canais, a margem foi de 5,1% a 16,2%.

O canal 25 foi o que obteve a maior margem de erro relativo no cálculo feito pelo código, de 16,2%, enquanto na maioria dos canais a margem ficou de 5,1% a 7,8%. Mesmo com este erro elevado, o fluxo de nêutrons térmicos no canal 25 teve um erro de 8,5% em relação ao fluxo experimental, ou seja, seu erro esta dentro da margem de confiabilidade.

## 5 CONCLUSÃO

Os modelos computacionais desenvolvidos neste trabalho contaram com alguns recursos fundamentais, como por exemplo, o modelo desenvolvido por Dalle [3] e os dados experimentais obtidos através de informações obtidas dos operadores do CDTN/CNEN, pois estas não terem no manual e nem foram fornecidas pelo fabricante.

Após uma melhor caracterização do reator TRIGA IPR-R1, através do detalhamento da geometria e da composição da Mesa Giratória, foi feita uma avaliação dos códigos MCNP5 e MCNPX 2.6.0 em relação a análise do fluxo de nêutrons na Mesa Giratória. Não houve uma diferença significativa em seus resultados e nem no erro de cada um. Já o tempo de processamento do MCNP5 foi bem menor que o tempo gasto pelo MCNPX 2.6.0. Desta forma, constatou-se que para este tipo de análise desenvolvida neste trabalho, o MCNP5 mostrou-se mais viável.

Foi encontrada uma nova forma de melhorar os resultados de fluxo de nêutrons total e térmicos no MCNP5, através das ferramentas IMP e DXTRAN, que já apresentaram uma melhora em seu uso individual, mas de forma expressiva quando usadas em conjunto.

Com o uso combinado destas duas ferramentas no código MCNP5, foi possível desenvolver uma metodologia eficiente para o cálculo de fluxo de nêutrons total e térmico no volume de amostras (com massa de 200 mg) utilizadas para a AAN, quando irradiadas na Mesa Giratória do reator TRIGA Mark I IPR-R1.

É importante destacar que por se tratar de resultados estatísticos e teóricos, algumas falhas pontuais são encontradas. Isso aponta para uma possível demanda de pesquisa nesta metodologia, na busca de entender esse comportamento atípico.

Mesmo com essas falhas pontuais, esta metodologia foi validada, pois os valores encontrados estão dentro de uma margem de erro aceitável. Com isso, esta ferramenta tem um caráter relevante na determinação do fluxo de nêutrons da Mesa Giratória e também tem um papel essencial na determinação do fluxo neutrônico em locais inacessíveis experimentalmente no reator TRIGA.

## 5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

Através da metodologia desenvolvida nesta pesquisa poderão ser feitos os seguintes estudos:

- Caracterização axial do fluxo de nêutrons na Mesa Giratória do reator IPR-R1.
- Análise da variação do fluxo de nêutrons ao longo do volume de amostras não-pontuais.
- Determinação da auto-absorção de nêutrons e na auto-atenuação da radiação gama, decorrentes na amostra, para que seja possível analisar as amostras não pontuais.
- Melhoria da aplicação da técnica por ativação neutrônica ao explorar a sua versatilidade sem alterar a infra-estrutura existente. Isso melhorará a qualidade dos resultados analíticos e permitirá uma maior diversificação nas matrizes e tipos de amostras que possam ser analisadas por essa técnica.
- Validação da Técnica AAN feita no reator IPR-R1, quando esta passar a funcionar a uma potência de 250 kW.

## 6 REFERÊNCIAS

1. Briesmeister, J. F. **MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C**, Los Alamos National Laboratory, Report LA-13709-M (2000).
2. Briesmeister, J. F. **MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5**. Los Alamos National Laboratory, 2003.
3. Dalle, H. M. **Simulação do reator TRIGA IPR-R1 utilizando métodos de transporte por Monte Carlo**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
4. Dalmázio, Ilza. **Avaliação do potencial de contaminação do lixo do Cururupe utilizando a análise por ativação neutrônica instrumental (AANI) e espectrometria de massa com fonte de plasma induzido (ICP-MS)**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares), Curso de Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
5. De Corte, F., Van Sluijs, R., Simonits, A., Kučera, J., Smodiš, B., Byrne, A. R., De Wispelare, Bossus, A. D., Frána, J., Horák, Z. Jaćimović, R. **Installation and calibration of Kayzero-assisted NAA in three Central European countries via a Copernicus project**. Applied Radiation and Isotopes, 2001.
6. Denise, B. Pelowitz. **MCNPX User's Manual, Version 2.6.0**, Los Alamos National Laboratory, Report LA-CP-07-1473, 2008.
7. Duderstadt, J.J., Hamilton L. J., **Nuclear reactor analysis**, 1976.
8. Filho, T. M., Lima R. B. de, Yoriyaz, H., Hernandez A. C., **Experimental and Monte Carlo evaluation of the neutron flux of AN assembly with two AmBe sources**. Radiation Protection Dosimetry, vol. 115, 412-414, 2005.
9. Jaćimović, R., Maučec, M., Trkov, A. **Verification of Monte Carlo calculations of the neutron flux in the carousel channels of the TRIGA MARK II reactor, Ljubljana**. Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe 2002, Kranjska Gora, Slovenia, p. 0309.1-0309.6, 2003.
10. Jaćimović, R., Maučec, M., Trkov, A. **Verification of Monte Carlo calculations of the neutron flux in typical channels of the TRIGA reactor, Ljubljana**. J. Radioanal. Nucl. Chem., 2003.

11. Lamarsh, J. R., Baratta, A. J. **Introduction to Nuclear Engineering**. 2001.
12. Menezes, M. A. B. C., Palmieri, H. E. L., Leonel, L. V., Nalini Junior, H. A., Jaćimović, R. **Iron Quadrangle, Brazil, elemental concentration determined by  $k_0$ -instrumental neutron activation analysis, Part I: Soil samples**. J. Radioanal. Nucl. Chem., 2006.
13. Menezes, M. A. B. C., Palmieri, H. E. L., Leonel, L. V., Nalini Junior, H. A., Jaćimović, R. **Iron Quadrangle, Brazil, elemental concentration determined by  $k_0$ -instrumental neutron activation analysis, part II: kale samples**. J. Radioanal. Nucl. Chem., 2006.
14. Menezes, M. A. B. C., Sabino, C. de V. S., Franco, M. B., Kastner, G. F., Montoya Rossi, E. H.  **$K_0$ -Instrumental Neutron Activation Analysis Establishment at CDTN, Brazil: A successful story**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2003.
15. Menezes, M.A.B.C., JAĆIMOVIĆ. R. **Optimised  $K_0$ -instrumental neutron activation method using the TRIGA MARK I IPR-R1 reactor at CDTN/CNEN, Belo Horizonte, Brazil**. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 2006.
16. Menezes, M.A.B.C., Jaćimović. R., Sebastião, R. C. O., Leal, A. S., Souza, R. M. G. P. **Experimental and modelling thermal neutron fluxes characterization of the carousel irradiation channels in the TRIGA MARK I IPR-R1 reactor, Brazil. (em construção)**
17. Mesquita, A. Z. **Experimental investigation on temperatures distributions in a research nuclear reactor TRIGA IPR-R1 (in Portuguese)**. Campinas, UNICAMP, Brazil, PhD Thesis, 183p, 2005.
18. Tzika, F., Stamatelatos, I. E., **Monte Carlo simulations for non-destructive elemental analysis of large samples by neutron activation analysis**. Institute of Nuclear Technology and Radiation Protection, NCSR 'Demokritos', Greece, 4<sup>th</sup> International Conference On NDT, 2007.
19. Zamboni, C. B. **Fundamentos da física de nêutrons**. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2007.
20. Zangirolami, D. M. **Fluxo Neutrônico a 100kw nos Terminais de Irradiação do Reator TRIGA IPR-R1**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares), Curso de Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
21. Zangirolami, D. M., Ferreira, A.V., Oliveira A.H. **Thermal and Epithermal Neutron Fluence Rates in the Irradiation Facilities of the TRIGA**. Brazilian Journal of Physics, vol. 40, no. 1, March, 2010.

## APÊNDICE

### Arquivo de Entrada no MCNP5

TRIGA IPR R-1 REACTOR. MCNP MODEL

c CELLS

c -----

c ALUMINUM FUEL ELEMENT (20%, 8 w/o)

c -----

|     |               |                             |               |
|-----|---------------|-----------------------------|---------------|
| 103 | 0             | 102 -103 -106 107           | u=1 imp:n=1   |
| 104 | 15 -2.67996   | -150 -107 108               | u=1 imp:n=1   |
| 190 | 0             | 150 -103 -107 108           | u=1 imp:n=1   |
| 105 | 14 8.3728e-02 | -105 101 -109               | u=1 imp:n=1   |
| 106 | 0             | 105 -103 101 -109           | u=1 imp:n=1   |
| 107 | 14 8.3728e-02 | -105 -108 110               | u=1 imp:n=1   |
| 108 | 0             | 105 -103 -108 110           | u=1 imp:n=1   |
| 101 | 15 -2.67996   | -150 106 -101               | u=1 imp:n=1   |
| 192 | 0             | 150 -103 106 -101           | u=1 imp:n=1   |
| 109 | 32 6.0261e-02 | 103 -104 -109 110           | u=1 imp:n=1   |
| 110 | 32 6.0261e-02 | -104 109 -111               | u=1 imp:n=1   |
| 111 | 32 6.0261e-02 | -104 -110 112               | u=1 imp:n=1   |
| 112 | 41 1.0003e-01 | -104 111                    | u=1 imp:n=1   |
| 113 | 41 1.0003e-01 | -104 -112                   | u=1 imp:n=1   |
| 501 | 51 -6.28712   | -122 -123 124 vol=353.96471 | u=101 imp:n=1 |
| 901 | 0             | -125 #501 fill=1            | u=101 imp:n=1 |
| 502 | 52 -6.28748   | -122 -123 124 vol=353.96471 | u=102 imp:n=1 |
| 902 | 0             | -125 #502 fill=1            | u=102 imp:n=1 |
| 503 | 53 -6.28804   | -122 -123 124 vol=353.96471 | u=103 imp:n=1 |
| 903 | 0             | -125 #503 fill=1            | u=103 imp:n=1 |
| 504 | 54 -6.28836   | -122 -123 124 vol=353.96471 | u=104 imp:n=1 |
| 904 | 0             | -125 #504 fill=1            | u=104 imp:n=1 |
| 505 | 55 -6.28859   | -122 -123 124 vol=353.96471 | u=105 imp:n=1 |
| 905 | 0             | -125 #505 fill=1            | u=105 imp:n=1 |
| 506 | 56 -6.28866   | -122 -123 124 vol=353.96471 | u=106 imp:n=1 |
| 906 | 0             | -125 #506 fill=1            | u=106 imp:n=1 |
| 507 | 57 -6.28862   | -122 -123 124 vol=353.96471 | u=107 imp:n=1 |
| 907 | 0             | -125 #507 fill=1            | u=107 imp:n=1 |
| 508 | 58 -6.28974   | -122 -123 124 vol=353.96471 | u=108 imp:n=1 |
| 608 | 0             | -125 #508 fill=1            | u=108 imp:n=1 |

c -----

c STAINLESS STEEL FUEL ELEMENT (20%, 8,5 w/o)

c -----

|     |               |                   |              |
|-----|---------------|-------------------|--------------|
| 150 | 45 4.2843e-02 | -151 -156 157     | u=20 imp:n=1 |
| 151 | 0             | 152 -153 -156 157 | u=20 imp:n=1 |
| 152 | 14 8.3728e-02 | -155 156 -158     | u=20 imp:n=1 |

```

153 0      155 -153 156 -158      u=20 imp:n=1
154 14 8.3728e-02 -155 -157 159    u=20 imp:n=1
155 0      155 -153 -157 159      u=20 imp:n=1
156 46 8.7865e-02 153 -154 -158 159 u=20 imp:n=1
157 46 8.7865e-02 -154 158 -160    u=20 imp:n=1
158 46 8.7865e-02 -154 -159 161    u=20 imp:n=1
159 41 1.0003e-01 -154 160          u=20 imp:n=1
160 41 1.0003e-01 -154 -161        u=20 imp:n=1
509 59 -6.06002 162 -163 -164 165 vol=384.51861 u=109 imp:n=1
909 0      -166 #509 fill=20        u=109 imp:n=1

```

c -----

c CONTROL RODS

c -----

```

257 32 6.0261e-02 -253 259 -261      u=4 imp:n=1
258 31 1.3690e-01 -252 258 -259      u=4 imp:n=1
259 0      -250 252 258 -259        u=4 imp:n=1
260 32 6.0261e-02 -253 255 -258      u=4 imp:n=1
263 32 6.0261e-02 250 -253 258 -259 u=4 imp:n=1
264 41 1.0003e-01 253 -254 255 -261 u=4 imp:n=1
265 41 1.0003e-01 -254 261          u=4 imp:n=1
266 41 1.0003e-01 -254 -255          u=4 imp:n=1

```

c -----

c PNEUMATIC TUBE

c -----

```

301 32 6.0261e-02 -303 305 -306      u=5 imp:n=1
302 42 5.4347e-05 -302 306 -307      u=5 imp:n=1
309 32 6.0261e-02 302 -303 306 -307 u=5 imp:n=1
310 41 1.0003e-01 303 -304 305 -307 u=5 imp:n=1
311 41 1.0003e-01 -304 307          u=5 imp:n=1
312 41 1.0003e-01 -304 -305          u=5 imp:n=1

```

c -----

c GRAPHITE ELEMENT

c -----

```

601 32 6.0261e-02 -603 605 -607      u=2 imp:n=1
602 32 6.0261e-02 -603 -604 606      u=2 imp:n=1
603 14 8.3728e-02 -602 604 -605      u=2 imp:n=1
604 32 6.0261e-02 602 -603 604 -605 u=2 imp:n=1
605 41 1.0003e-01 -603 607          u=2 imp:n=1
606 41 1.0003e-01 -603 -606          u=2 imp:n=1

```

c -----

c SOURCE ELEMENT

c -----

```

351 32 6.0261e-02 -351 -352 353      u=6 imp:n=1
352 41 1.0003e-01 -351 352          u=6 imp:n=1
353 41 1.0003e-01 -351 -353          u=6 imp:n=1

```

c -----

c WATER ELEMENT (empty position)

c -----  
451 41 1.0003e-01 -451 u=9 imp:n=1

c -----  
c CENTRAL THIMBLE (WATER)

c -----  
990 41 1.0003e-01 -451 -106 107 u=3 imp:n=1  
991 41 1.0003e-01 -451 106 u=3 imp:n=1  
992 41 1.0003e-01 -451 -107 u=3 imp:n=1

c -----  
c ELEMENTS FILLED INTO THE CORE

1 0 -1 fill=3 u=10 imp:n=1  
2 like 1 but trcl= 2 fill=101 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
3 like 1 but trcl= 3 fill=101 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
4 like 1 but trcl= 4 fill=101 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
5 like 1 but trcl= 5 fill=101 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
6 like 1 but trcl= 6 fill=101 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
7 like 1 but trcl= 7 fill=101 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
8 like 1 but trcl= 8 fill=9 u=10 imp:n=1  
9 like 1 but trcl= 9 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
10 like 1 but trcl=10 fill=109 vol=384.51861 u=10 imp:n=1  
11 like 1 but trcl=11 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
12 like 1 but trcl=12 fill=109 vol=384.51861 u=10 imp:n=1  
13 like 1 but trcl=13 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
14 like 1 but trcl=14 fill=9 u=10 imp:n=1  
15 like 1 but trcl=15 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
16 like 1 but trcl=16 fill=109 vol=384.51861 u=10 imp:n=1  
17 like 1 but trcl=17 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
18 like 1 but trcl=18 fill=109 vol=384.51861 u=10 imp:n=1  
19 like 1 but trcl=19 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
20 like 1 but trcl=20 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
21 like 1 but trcl=21 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
22 like 1 but trcl=22 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
23 like 1 but trcl=23 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
24 like 1 but trcl=24 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
25 like 1 but trcl=25 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
26 like 1 but trcl=26 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
27 like 1 but trcl=27 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
28 like 1 but trcl=28 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
29 like 1 but trcl=29 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
30 like 1 but trcl=30 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
31 like 1 but trcl=31 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
32 like 1 but trcl=32 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
33 like 1 but trcl=33 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
34 like 1 but trcl=34 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
35 like 1 but trcl=35 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1

36 like 1 but trcl=36 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
37 like 1 but trcl=37 fill=103 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
38 like 1 but trcl=38 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
39 like 1 but trcl=39 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
40 like 1 but trcl=40 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
41 like 1 but trcl=41 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
42 like 1 but trcl=42 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
43 like 1 but trcl=43 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
44 like 1 but trcl=44 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
45 like 1 but trcl=45 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
46 like 1 but trcl=46 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
47 like 1 but trcl=47 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
48 like 1 but trcl=48 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
49 like 1 but trcl=49 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
50 like 1 but trcl=50 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
51 like 1 but trcl=51 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
52 like 1 but trcl=52 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
53 like 1 but trcl=53 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
54 like 1 but trcl=54 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
55 like 1 but trcl=55 fill=105 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
56 like 1 but trcl=56 fill=107 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
57 like 1 but trcl=57 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
58 like 1 but trcl=58 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
59 like 1 but trcl=59 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
60 like 1 but trcl=60 fill=106 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
61 like 1 but trcl=61 fill=104 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
62 like 1 but trcl=62 fill=108 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
63 like 1 but trcl=63 fill=2 u=10 imp:n=1  
64 like 1 but trcl=64 fill=2 u=10 imp:n=1  
65 like 1 but trcl=65 fill=2 u=10 imp:n=1  
66 like 1 but trcl=66 fill=2 u=10 imp:n=1  
67 like 1 but trcl=67 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
68 like 1 but trcl=68 fill=2 u=10 imp:n=1  
69 like 1 but trcl=69 fill=6 u=10 imp:n=1  
70 like 1 but trcl=70 fill=2 u=10 imp:n=1  
71 like 1 but trcl=71 fill=2 u=10 imp:n=1  
72 like 1 but trcl=72 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1  
73 like 1 but trcl=73 fill=2 u=10 imp:n=1  
74 like 1 but trcl=74 fill=2 u=10 imp:n=1  
75 like 1 but trcl=75 fill=2 u=10 imp:n=1  
76 like 1 but trcl=76 fill=2 u=10 imp:n=1  
77 like 1 but trcl=77 fill=9 u=10 imp:n=1  
78 like 1 but trcl=78 fill=2 u=10 imp:n=1  
79 like 1 but trcl=79 fill=2 u=10 imp:n=1  
80 like 1 but trcl=80 fill=2 u=10 imp:n=1  
81 like 1 but trcl=81 fill=2 u=10 imp:n=1

- 82 like 1 but trcl=82 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1
- 83 like 1 but trcl=83 fill=2 u=10 imp:n=1
- 84 like 1 but trcl=84 fill=2 u=10 imp:n=1
- 85 like 1 but trcl=85 fill=2 u=10 imp:n=1
- 86 like 1 but trcl=86 fill=2 u=10 imp:n=1
- 87 like 1 but trcl=87 fill=102 vol=353.96471 u=10 imp:n=1
- 88 like 1 but trcl=88 fill=2 u=10 imp:n=1
- 89 like 1 but trcl=89 fill=2 u=10 imp:n=1
- 90 like 1 but trcl=90 fill=2 u=10 imp:n=1
- 91 like 1 but trcl=91 fill=2 u=10 imp:n=1

c -----

c WATER AROUND ELEMENTS

c -----

- 92 41 1.0003e-01 1 2001 3001 4001 5001 6001 7001 8001 9001 10001  
 11001 12001 13001 14001 15001 16001 17001 18001 19001 20001  
 21001 22001 23001 24001 25001 26001 27001 28001 29001 30001  
 31001 32001 33001 34001 35001 36001 37001 38001 39001 40001  
 41001 42001 43001 44001 45001 46001 47001 48001 49001 50001  
 51001 52001 53001 54001 55001 56001 57001 58001 59001 60001  
 61001 62001 63001 64001 65001 66001 67001 68001 69001 70001  
 71001 72001 73001 74001 75001 76001 77001 78001 79001 80001  
 81001 82001 83001 84001 85001 86001 87001 88001 89001 90001  
 91001 -2 (501 -503) u=10 imp:n=1
- 93 41 1.0003e-01 1 2001 3001 4001 5001 6001 7001 8001 9001 10001  
 11001 12001 13001 14001 15001 16001 17001 18001 19001 20001  
 21001 22001 23001 24001 25001 26001 27001 28001 29001 30001  
 31001 32001 33001 34001 35001 36001 37001 38001 39001 40001  
 41001 42001 43001 44001 45001 46001 47001 48001 49001 50001  
 51001 52001 53001 54001 55001 56001 57001 58001 59001 60001  
 61001 62001 63001 64001 65001 66001 67001 68001 69001 70001  
 71001 72001 73001 74001 75001 76001 77001 78001 79001 80001  
 81001 82001 83001 84001 85001 86001 87001 88001 89001 90001  
 91001 -2 (-502) u=10 imp:n=1
- 94 41 1.0003e-01 1 2001 3001 4001 5001 6001 7001 8001 9001 10001  
 11001 12001 13001 14001 15001 16001 17001 18001 19001 20001  
 21001 22001 23001 24001 25001 26001 27001 28001 29001 30001  
 31001 32001 33001 34001 35001 36001 37001 38001 39001 40001  
 41001 42001 43001 44001 45001 46001 47001 48001 49001 50001  
 51001 52001 53001 54001 55001 56001 57001 58001 59001 60001  
 61001 62001 63001 64001 65001 66001 67001 68001 69001 70001  
 71001 72001 73001 74001 75001 76001 77001 78001 79001 80001  
 81001 82001 83001 84001 85001 86001 87001 88001 89001 90001  
 91001 -2 (504) u=10 imp:n=1

c -----

c SUPPORTING GRIDS

c -----

95 43 6.0261e-02 1 2001 3001 4001 5001 6001 7001 8001 9001 10001  
11001 12001 13001 14001 15001 16001 17001 18001 19001 20001  
21001 22001 23001 24001 25001 26001 27001 28001 29001 30001  
31001 32001 33001 34001 35001 36001 37001 38001 39001 40001  
41001 42001 43001 44001 45001 46001 47001 48001 49001 50001  
51001 52001 53001 54001 55001 56001 57001 58001 59001 60001  
61001 62001 63001 64001 65001 66001 67001 68001 69001 70001  
71001 72001 73001 74001 75001 76001 77001 78001 79001 80001  
81001 82001 83001 84001 85001 86001 87001 88001 89001 90001  
91001 -2 (-501 502) u=10 imp:n=1

96 43 6.0261e-02 1 2001 3001 4001 5001 6001 7001 8001 9001 10001  
11001 12001 13001 14001 15001 16001 17001 18001 19001 20001  
21001 22001 23001 24001 25001 26001 27001 28001 29001 30001  
31001 32001 33001 34001 35001 36001 37001 38001 39001 40001  
41001 42001 43001 44001 45001 46001 47001 48001 49001 50001  
51001 52001 53001 54001 55001 56001 57001 58001 59001 60001  
61001 62001 63001 64001 65001 66001 67001 68001 69001 70001  
71001 72001 73001 74001 75001 76001 77001 78001 79001 80001  
81001 82001 83001 84001 85001 86001 87001 88001 89001 90001  
91001 -2 (503 -504) u=10 imp:n=1

97 0 -3 -552 553 fill=10 imp:n=1

c -----

c Pote de polietileno pequeno

c -----

403 42 5.4347e-05 -404 407 -408 trcl (-33.58144 5.31853 3.55) &  
imp:n=4096

404 60 -9.40000e-01 -405 406 -409 #403 trcl (-33.58144 5.31853 3.55) &  
imp:n=1024

c -----

c Pote de poliestireno

c -----

407 42 5.4347e-05 -416 419 -420 #403#404 &  
trcl (-33.58144 5.31853 4.83) imp:n=256

408 61 -1.06 -417 418 -421 #403#404#407 &  
trcl (-33.58144 5.31853 4.83) imp:n=64

c -----

c Receptáculo de Alumínio

c -----

409 42 5.43466e-05 -427 428 -429 #403#404#407#408 &  
trcl (-33.58144 5.31853 15) imp:n=16

410 32 6.0261e-02 -430 431 -432 #403#404#407#408#409 &  
trcl (-33.58144 5.31853 15) imp:n=4

c -----

c GRAPHITE REFLECTOR

c -----

700 42 5.43466e-05 521 -522 523 -514 #403#404#407#408#409#410 &  
 imp:n=1  
 411 32 6.0261e-02 524 -527 -525 526 (-521:522:-523:514) imp:n=1  
 702 44 8.3728e-02 511 -512 513 -514 (-521:522:-523)(-524:527:525:-526) &  
 imp:n=1  
 703 32 6.0261e-02 3 -517 518 -519 (-511:512:-513:514) imp:n=1  
 704 41 1.0003e-01 3 -551 -552 553 (517:-518:519) imp:n=1

c -----

c OUTSIDE WORLD

c -----

900 0 552:-553:551 imp:n=0

=====

c SURFACES

=====

c -----

c BASIC DIMENSIONS OF A CORE ELEMENT

c -----

1 cz 1.86500  
 2 cz 22.09801  
 3 cz 22.098

c -----

c ALUMINUM FUEL ELEMENT (20%, 8 w/o)

c -----

102 cz 1.7900  
 103 cz 1.7990  
 104 cz 1.865002  
 105 cz 1.7900  
 106 pz 17.7800  
 107 pz -17.7800  
 108 pz -17.9070  
 101 pz 17.9070  
 109 pz 27.9400  
 110 pz -27.9400  
 111 pz 36.38  
 112 pz -35.86  
 122 cz 1.79001  
 123 pz 17.7801  
 124 pz -17.7801  
 125 cz 1.865001  
 150 cz 1.7000

c -----

c STAINLESS STEEL FUEL ELEMENT (20%, 8,5 w/o)

c -----

151 cz 0.286  
152 cz 1.815  
153 cz 1.829  
154 cz 1.865002  
155 cz 1.815  
156 pz 19.05  
157 pz -19.05  
158 pz 27.86  
159 pz -27.86  
160 pz 36.03  
161 pz -36.03  
162 cz 0.28599  
163 cz 1.81501  
164 pz 19.0501  
165 pz -19.0501  
166 cz 1.865001

c -----

c CONTROL RODS

c -----

250 cz 1.0600  
252 cz 0.9525  
253 cz 1.1113  
254 cz 1.865001  
255 pz -34.29  
258 pz -19.05  
259 pz 19.05  
261 pz 21.05

c -----

c PNEUMATIC TUBE

c -----

302 cz 1.400  
303 cz 1.600  
304 cz 1.865001  
305 pz -21.05  
306 pz -19.05  
307 pz 19.05

c -----

c GRAPHITE ELEMENT

c -----

602 cz 1.7990  
603 cz 1.865001  
604 pz -28.07  
605 pz 28.07  
606 pz -35.86  
607 pz 36.38

c -----

c SOURCE ELEMENT

c -----

351 cz 1.865001

352 pz 36.38

353 pz -35.86

c -----

c EMPTY ELEMENT (water)

c -----

451 cz 1.865001

c

c -----

c SUPPORTING GRIDS

c -----

501 pz -34.295

502 pz -36.20

503 pz 28.88

504 pz 30.785

c -----

c GRAPHITE REFLECTOR

c -----

511 cz 23.098

512 cz 53.14

513 pz -32.99

514 pz 26.61

516 cz 22.098

517 cz 54.14

518 pz -33.99

519 pz 27.61

521 cz 30.698

522 cz 36.957

523 pz 0.61

524 cz 29.098

525 pz 26.61

526 pz -0.99

527 cz 38.557

c -----

c Receptáculo de Alumínio

c -----

427 cz 1.5

428 pz -8.29

429 pz 11.51

430 cz 1.6

431 pz -8.39

432 pz 11.61

c -----

c WATER TANK

c -----  
551 cz 96.0  
552 pz 90  
553 pz -90

c -----  
c Pote de polietileno pequeno

c -----  
404 cz 0.48  
405 cz 0.55  
406 pz 3.504  
407 pz 3.564  
408 pz 3.994  
409 pz 4.054

c -----  
c Pote de poliestireno

c -----  
416 cz 1.1  
417 cz 1.4  
418 pz 2.0  
419 pz 2.2  
420 pz 9.7  
421 pz 9.9

=====

c GENERAL

=====

\*TR77 19.88 0 0 360 90 90 450 360 90 90 90 0 -1  
\*TR20 11.94 0 0 540 -90 90 630 540 90 90 90 0 -1  
\*TR29 11.94 0 0 360 90 90 450 360 90 90 90 0 -1  
\*TR2 4.05 0 0 540 -90 90 630 540 90 90 90 0 -1  
\*TR3 4.05 0 0 480 -30 90 570 480 90 90 90 0 -1  
\*TR4 4.05 0 0 420 30 90 510 420 90 90 90 0 -1  
\*TR5 4.05 0 0 360 90 90 450 360 90 90 90 0 -1  
\*TR6 4.05 0 0 300 150 90 390 300 90 90 90 0 -1  
\*TR7 4.05 0 0 240 210 90 330 240 90 90 90 0 -1  
\*TR8 7.98 0 0 540 -90 90 630 540 90 90 90 0 -1  
\*TR9 7.98 0 0 510 -60 90 600 510 90 90 90 0 -1  
\*TR10 7.98 0 0 480 -30 90 570 480 90 90 90 0 -1  
\*TR11 7.98 0 0 450 0 90 540 450 90 90 90 0 -1  
\*TR12 7.98 0 0 420 30 90 510 420 90 90 90 0 -1  
\*TR13 7.98 0 0 390 60 90 480 390 90 90 90 0 -1  
\*TR14 7.98 0 0 360 90 90 450 360 90 90 90 0 -1  
\*TR15 7.98 0 0 330 120 90 420 330 90 90 90 0 -1  
\*TR16 7.98 0 0 300 150 90 390 300 90 90 90 0 -1  
\*TR17 7.98 0 0 270 180 90 360 270 90 90 90 0 -1  
\*TR18 7.98 0 0 240 210 90 330 240 90 90 90 0 -1  
\*TR19 7.98 0 0 210 240 90 300 210 90 90 90 0 -1

|       |       |     |     |     |    |     |     |    |    |    |      |
|-------|-------|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|----|------|
| *TR21 | 11.94 | 0 0 | 520 | -70 | 90 | 610 | 520 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR22 | 11.94 | 0 0 | 500 | -50 | 90 | 590 | 500 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR23 | 11.94 | 0 0 | 480 | -30 | 90 | 570 | 480 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR24 | 11.94 | 0 0 | 460 | -10 | 90 | 550 | 460 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR25 | 11.94 | 0 0 | 440 | 10  | 90 | 530 | 440 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR26 | 11.94 | 0 0 | 420 | 30  | 90 | 510 | 420 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR27 | 11.94 | 0 0 | 400 | 50  | 90 | 490 | 400 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR28 | 11.94 | 0 0 | 380 | 70  | 90 | 470 | 380 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR30 | 11.94 | 0 0 | 340 | 110 | 90 | 430 | 340 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR31 | 11.94 | 0 0 | 320 | 130 | 90 | 410 | 320 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR32 | 11.94 | 0 0 | 300 | 150 | 90 | 390 | 300 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR33 | 11.94 | 0 0 | 280 | 170 | 90 | 370 | 280 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR34 | 11.94 | 0 0 | 260 | 190 | 90 | 350 | 260 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR35 | 11.94 | 0 0 | 240 | 210 | 90 | 330 | 240 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR36 | 11.94 | 0 0 | 220 | 230 | 90 | 310 | 220 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR37 | 11.94 | 0 0 | 200 | 250 | 90 | 290 | 200 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR38 | 15.91 | 0 0 | 540 | -90 | 90 | 630 | 540 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR39 | 15.91 | 0 0 | 525 | -75 | 90 | 615 | 525 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR40 | 15.91 | 0 0 | 510 | -60 | 90 | 600 | 510 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR41 | 15.91 | 0 0 | 495 | -45 | 90 | 585 | 495 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR42 | 15.91 | 0 0 | 480 | -30 | 90 | 570 | 480 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR43 | 15.91 | 0 0 | 465 | -15 | 90 | 555 | 465 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR44 | 15.91 | 0 0 | 450 | 0   | 90 | 540 | 450 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR45 | 15.91 | 0 0 | 435 | 15  | 90 | 525 | 435 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR46 | 15.91 | 0 0 | 420 | 30  | 90 | 510 | 420 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR47 | 15.91 | 0 0 | 405 | 45  | 90 | 495 | 405 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR48 | 15.91 | 0 0 | 390 | 60  | 90 | 480 | 390 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR49 | 15.91 | 0 0 | 375 | 75  | 90 | 465 | 375 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR50 | 15.91 | 0 0 | 360 | 90  | 90 | 450 | 360 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR51 | 15.91 | 0 0 | 345 | 105 | 90 | 435 | 345 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR52 | 15.91 | 0 0 | 330 | 120 | 90 | 420 | 330 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR53 | 15.91 | 0 0 | 315 | 135 | 90 | 405 | 315 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR54 | 15.91 | 0 0 | 300 | 150 | 90 | 390 | 300 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR55 | 15.91 | 0 0 | 285 | 165 | 90 | 375 | 285 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR56 | 15.91 | 0 0 | 270 | 180 | 90 | 360 | 270 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR57 | 15.91 | 0 0 | 255 | 195 | 90 | 345 | 255 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR58 | 15.91 | 0 0 | 240 | 210 | 90 | 330 | 240 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR59 | 15.91 | 0 0 | 225 | 225 | 90 | 315 | 225 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR60 | 15.91 | 0 0 | 210 | 240 | 90 | 300 | 210 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR61 | 15.91 | 0 0 | 195 | 255 | 90 | 285 | 195 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR62 | 19.88 | 0 0 | 540 | -90 | 90 | 630 | 540 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR63 | 19.88 | 0 0 | 528 | -78 | 90 | 618 | 528 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR64 | 19.88 | 0 0 | 516 | -66 | 90 | 606 | 516 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR65 | 19.88 | 0 0 | 504 | -54 | 90 | 594 | 504 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR66 | 19.88 | 0 0 | 492 | -42 | 90 | 582 | 492 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |
| *TR67 | 19.88 | 0 0 | 480 | -30 | 90 | 570 | 480 | 90 | 90 | 90 | 0 -1 |

```

*TR68 19.88 0 0 468 -18 90 558 468 90 90 90 0 -1
*TR69 19.88 0 0 456 -6 90 546 456 90 90 90 0 -1
*TR70 19.88 0 0 444 6 90 534 444 90 90 90 0 -1
*TR71 19.88 0 0 432 18 90 522 432 90 90 90 0 -1
*TR72 19.88 0 0 420 30 90 510 420 90 90 90 0 -1
*TR73 19.88 0 0 408 42 90 498 408 90 90 90 0 -1
*TR74 19.88 0 0 396 54 90 486 396 90 90 90 0 -1
*TR75 19.88 0 0 384 66 90 474 384 90 90 90 0 -1
*TR76 19.88 0 0 372 78 90 462 372 90 90 90 0 -1
*TR78 19.88 0 0 348 102 90 438 348 90 90 90 0 -1
*TR79 19.88 0 0 336 114 90 426 336 90 90 90 0 -1
*TR80 19.88 0 0 324 126 90 414 324 90 90 90 0 -1
*TR81 19.88 0 0 312 138 90 402 312 90 90 90 0 -1
*TR82 19.88 0 0 300 150 90 390 300 90 90 90 0 -1
*TR83 19.88 0 0 288 162 90 378 288 90 90 90 0 -1
*TR84 19.88 0 0 276 174 90 366 276 90 90 90 0 -1
*TR85 19.88 0 0 264 186 90 354 264 90 90 90 0 -1
*TR86 19.88 0 0 252 198 90 342 252 90 90 90 0 -1
*TR87 19.88 0 0 240 210 90 330 240 90 90 90 0 -1
*TR88 19.88 0 0 228 222 90 318 228 90 90 90 0 -1
*TR89 19.88 0 0 216 234 90 306 216 90 90 90 0 -1
*TR90 19.88 0 0 204 246 90 294 204 90 90 90 0 -1
*TR91 19.88 0 0 192 258 90 282 192 90 90 90 0 -1

```

c

c P H Y S I C S

c -----

MODE n

c

c S O U R C E

c -----

KCODE 10000 1.0 15 515

KSRC 0 0 0

c -----

c T A L L I E S

c -----

f4:n 403

E4 5e-7 1.5e+1

dxt:n -33.58144 5.31853 7.329 0.10749995 0.2149999

c \*\*\*\*\*

c \*\*\* END OF PROGRAM \*\*\*

c \*\*\*\*\*

print

c

c M A T E R I A L S

c -----

c

MT51 h/zr.01t  
zr/h.01t  
MT52 h/zr.01t  
zr/h.01t  
MT53 h/zr.01t  
zr/h.01t  
MT54 h/zr.01t  
zr/h.01t  
MT55 h/zr.01t  
zr/h.01t  
MT56 h/zr.01t  
zr/h.01t  
MT57 h/zr.01t  
zr/h.01t  
MT58 h/zr.01t  
zr/h.01t  
MT59 h/zr.01t  
zr/h.01t  
M14 6000.60c 8.3728e-02  
MT14 grph.01t  
M31 5010.60c 2.3432e-02  
5011.60c 8.5779e-02  
6000.60c 2.7686e-02  
M32 13027.60c 6.0261e-02  
M41 1001.60c 6.6689e-02  
8016.60c 3.3344e-02  
MT41 lwtr.01t  
M42 8016.60c 1.0868e-05  
7014.60c 4.3479e-05  
M43 13027.60c 6.0261e-02  
M44 6000.60c 8.3728e-02  
MT44 grph.01t  
M45 40000.60c 4.2843e-02  
M46 26054.60c 3.3547e-03  
26056.60c 5.2152e-02  
26057.60c 1.1941e-03  
26058.60c 1.5921e-04  
24050.60c 7.5430e-04  
24052.60c 1.4546e-02  
24053.60c 1.6492e-03  
24054.60c 4.1057e-04  
28058.60c 5.5263e-03  
28060.60c 2.1127e-03  
28061.60c 9.1471e-05  
28062.60c 2.9060e-04  
28064.60c 7.3663e-05

25055.60c 1.7295e-03  
14000.60c 3.3831e-03  
6000.60c 3.1643e-04  
15031.60c 6.1353e-05  
16000.60c 5.9256e-05  
m15  
13027.60c -9.9000E-01  
8016.60c -3.7090E-03  
m51  
1001.60c -1.0063E-02  
40000.60c -9.1101E-01  
40093.50c -4.3981E-05  
43099.60c -2.2016E-05  
45103.50c -1.1749E-05  
53127.60c -6.2084E-07  
53129.60c -3.1232E-06  
54131.50c -1.3478E-05  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -3.3151E-05  
55135.60c -2.7622E-05  
55137.60c -2.1923E-05  
60143.50c -3.0817E-05  
60145.50c -2.0798E-05  
61147.50c -9.5110E-07  
62149.50c -7.2327E-07  
62151.50c -1.3207E-06  
92235.60c -1.4710E-02  
92236.60c -1.6034E-04  
92238.60c -6.3576E-02  
93237.60c -4.9784E-07  
93239.60c -7.1775E-18  
94239.60c -8.0550E-05  
94240.60c -1.9180E-06  
94241.60c -5.3931E-08  
94242.60c -8.1103E-10  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -3.1574E-17  
95241.60c -3.2658E-08  
95243.60c -8.3520E-12  
96241.60c -1.1798E-23  
96242.60c -1.5335E-11  
96243.60c -3.2883E-14  
96244.60c -6.2085E-14  
96245.60c -7.0839E-17  
96246.60c -3.0559E-19  
96247.60c -9.7859E-21

1002.60c -5.3745E-07  
36083.50c -1.5985E-06  
39089.60c -1.2477E-05  
42095.50c -2.6689E-05  
44101.50c -1.6860E-05  
46105.50c -3.1588E-06  
54134.42c -3.0036E-05  
56138.60c -2.7529E-05  
59141.50c -2.7393E-05  
62147.50c -1.0979E-05  
62150.50c -4.6725E-06  
62152.50c -2.3400E-06  
63151.60c -1.1709E-07  
63153.60c -8.7169E-07  
63155.50c -2.9596E-08  
64155.60c -6.5464E-08  
64157.60c -2.2379E-09

m52

1001.60c -1.0082E-02  
40000.60c -9.1241E-01  
40093.50c -3.8337E-05  
43099.60c -1.8763E-05  
45103.50c -1.0025E-05  
53127.60c -5.2848E-07  
53129.60c -2.6619E-06  
54131.50c -1.1499E-05  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -2.8265E-05  
55135.60c -2.4040E-05  
55137.60c -1.8643E-05  
60143.50c -2.6320E-05  
60145.50c -1.7732E-05  
61147.50c -7.7136E-07  
62149.50c -7.1302E-07  
62151.50c -1.1910E-06  
92235.60c -1.4569E-02  
92236.60c -1.3731E-04  
92238.60c -6.2397E-02  
93237.60c -3.9612E-07  
93239.60c -3.8605E-18  
94239.60c -7.1586E-05  
94240.60c -1.4931E-06  
94241.60c -3.6502E-08  
94242.60c -4.8162E-10  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -1.4798E-17

95241.60c -2.2705E-08  
95243.60c -4.4921E-12  
96241.60c -5.0217E-24  
96242.60c -8.0025E-12  
96243.60c -1.7130E-14  
96244.60c -2.9245E-14  
96245.60c -3.0531E-17  
96246.60c -1.2273E-19  
96247.60c -9.7840E-21  
36083.50c -1.3643E-06  
42095.50c -2.2918E-05  
44101.50c -1.4362E-05  
46105.50c -2.6880E-06  
54134.42c -2.5581E-05  
56138.60c -2.3450E-05  
59141.50c -2.3340E-05  
62147.50c -9.4216E-06  
62150.50c -3.9234E-06  
62152.50c -1.9224E-06  
63151.60c -1.1100E-07  
63153.60c -6.4093E-07  
63155.50c -2.4708E-08  
64155.60c -6.1620E-08  
64157.60c -2.1901E-09

m53

1001.60c -1.0090E-02  
40000.60c -9.1308E-01  
40093.50c -3.2516E-05  
43099.60c -1.5999E-05  
45103.50c -8.5532E-06  
53127.60c -4.4964E-07  
53129.60c -2.2683E-06  
54131.50c -9.8102E-06  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -2.4104E-05  
55135.60c -2.0881E-05  
55137.60c -1.5915E-05  
60143.50c -2.2479E-05  
60145.50c -1.5118E-05  
61147.50c -6.8450E-07  
62149.50c -7.0665E-07  
62151.50c -1.0694E-06  
92235.60c -1.4556E-02  
92236.60c -1.1690E-04

92238.60c -6.1821E-02  
93237.60c -3.0005E-07  
93239.60c -1.7794E-18  
94239.60c -6.1326E-05  
94240.60c -1.0873E-06  
94241.60c -2.3025E-08  
94242.60c -2.5341E-10  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -5.7575E-18  
95241.60c -1.3885E-08  
95243.60c -2.0706E-12  
96241.60c -3.5367E-24  
96242.60c -4.7400E-12  
96243.60c -7.8069E-15  
96244.60c -1.1572E-14  
96245.60c -9.9128E-18  
96246.60c -4.0294E-20  
96247.60c -9.8058E-21  
36083.50c -1.0514E-06  
42095.50c -1.9507E-05  
44101.50c -1.0795E-05  
46105.50c -2.2908E-06  
54134.42c -2.1834E-05  
56138.60c -2.0019E-05  
59141.50c -1.7550E-05  
62147.50c -8.0333E-06  
62150.50c -3.2794E-06  
62152.50c -1.5796E-06  
63151.60c -1.0206E-07  
63153.60c -5.4386E-07  
63155.50c -2.1675E-08  
64155.60c -5.2406E-08  
64157.60c -2.1731E-09

m54

63155.50c -7.4058E-09  
1001.60c -1.0100E-02  
40000.60c -9.1405E-01  
40093.50c -2.6036E-05  
43099.60c -1.3492E-05  
45103.50c -7.2179E-06  
53127.60c -3.7812E-07  
53129.60c -1.9118E-06  
54131.50c -8.2807E-06  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -2.0334E-05  
55135.60c -1.7896E-05

55137.60c -1.3412E-05  
60143.50c -1.8988E-05  
60145.50c -1.2753E-05  
61147.50c -5.7464E-07  
62149.50c -6.9645E-07  
62151.50c -9.3926E-07  
92235.60c -1.4462E-02  
92236.60c -9.7277E-05  
92238.60c -6.1009E-02  
93237.60c -1.9760E-07  
93239.60c -5.0667E-19  
94239.60c -4.6108E-05  
94240.60c -6.7167E-07  
94241.60c -1.0877E-08  
94242.60c -9.9105E-11  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -1.3098E-18  
95241.60c -6.4964E-09  
95243.60c -5.8959E-13  
96241.60c -1.7805E-24  
96242.60c -1.8061E-12  
96243.60c -2.3781E-15  
96244.60c -2.5532E-15  
96245.60c -1.6834E-18  
96246.60c -1.4256E-20  
96247.60c -9.8425E-21  
36083.50c -8.8753E-07  
42095.50c -1.6173E-05  
44101.50c -9.0966E-06  
46105.50c -1.9246E-06  
54134.42c -1.8399E-05  
56138.60c -1.6873E-05  
59141.50c -1.4795E-05  
62147.50c -6.5825E-06  
62150.50c -2.6881E-06  
62152.50c -1.2902E-06  
63151.60c -9.4366E-08  
63153.60c -4.5452E-07  
64155.60c -4.6304E-08  
64157.60c -2.0708E-09

m55

63155.50c -7.4367E-09  
1001.60c -1.0100E-02  
40000.60c -9.1403E-01  
40093.50c -2.4422E-05

43099.60c -1.2539E-05  
45103.50c -6.7141E-06  
53127.60c -3.5110E-07  
53129.60c -1.7776E-06  
54131.50c -7.7018E-06  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -1.8901E-05  
55135.60c -1.6531E-05  
55137.60c -1.2674E-05  
60143.50c -1.7660E-05  
60145.50c -1.1860E-05  
61147.50c -5.8515E-07  
62149.50c -6.9661E-07  
62151.50c -8.9710E-07  
92235.60c -1.4504E-02  
92236.60c -9.0890E-05  
92238.60c -6.1007E-02  
93237.60c -1.8247E-07  
93239.60c -3.9038E-19  
94239.60c -4.3133E-05  
94240.60c -5.8324E-07  
94241.60c -9.2418E-09  
94242.60c -7.6045E-11  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -9.4281E-19  
95241.60c -5.1988E-09  
95243.60c -4.5426E-13  
96241.60c -1.6401E-24  
96242.60c -1.4648E-12  
96243.60c -1.8561E-15  
96244.60c -1.7935E-15  
96245.60c -9.8869E-19  
96246.60c -1.2217E-20  
96247.60c -9.8424E-21  
36083.50c -8.9805E-07  
42095.50c -1.4725E-05  
44101.50c -9.1812E-06  
46105.50c -1.9391E-06  
54134.42c -1.8572E-05  
56138.60c -1.7034E-05  
59141.50c -1.4936E-05  
62147.50c -6.1822E-06  
62150.50c -2.5942E-06  
62152.50c -1.1620E-06  
63151.60c -8.4918E-08  
63153.60c -4.5809E-07

64155.60c -4.5729E-08  
64157.60c -2.0819E-09  
m56  
63155.50c -7.3499E-09  
1001.60c -1.0101E-02  
40000.60c -9.1402E-01  
40093.50c -2.3562E-05  
43099.60c -1.2123E-05  
45103.50c -6.4967E-06  
53127.60c -3.3942E-07  
53129.60c -1.7197E-06  
54131.50c -7.4512E-06  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -1.8284E-05  
55135.60c -1.5984E-05  
55137.60c -1.2309E-05  
60143.50c -1.7089E-05  
60145.50c -1.1475E-05  
61147.50c -5.8809E-07  
62149.50c -6.9962E-07  
62151.50c -8.7546E-07  
92235.60c -1.4523E-02  
92236.60c -8.7751E-05  
92238.60c -6.1007E-02  
93237.60c -1.6929E-07  
93239.60c -3.1994E-19  
94239.60c -4.2275E-05  
94240.60c -5.6062E-07  
94241.60c -8.5968E-09  
94242.60c -6.6778E-11  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -7.3174E-19  
95241.60c -4.6634E-09  
95243.60c -3.7229E-13  
96241.60c -1.6271E-24  
96242.60c -1.3542E-12  
96243.60c -1.6048E-15  
96244.60c -1.3894E-15  
96245.60c -7.2489E-19  
96246.60c -1.1520E-20  
96247.60c -9.8609E-21  
36083.50c -8.8514E-07  
42095.50c -1.4487E-05  
44101.50c -9.0868E-06  
46105.50c -1.9189E-06  
54134.42c -1.8381E-05

56138.60c -1.6859E-05  
59141.50c -1.4784E-05  
62147.50c -6.0492E-06  
62150.50c -2.2280E-06  
62152.50c -1.1336E-06  
63151.60c -8.2766E-08  
63153.60c -4.5299E-07  
64155.60c -4.5116E-08  
64157.60c -2.0705E-09  
m57  
63155.50c -7.5255E-09  
1001.60c -1.0080E-02  
40000.60c -9.1225E-01  
40093.50c -2.1273E-05  
43099.60c -1.0959E-05  
45103.50c -5.8737E-06  
53127.60c -3.0601E-07  
53129.60c -1.5535E-06  
54131.50c -6.7335E-06  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -1.6507E-05  
55135.60c -1.4293E-05  
55137.60c -1.1294E-05  
60143.50c -1.5446E-05  
60145.50c -1.0367E-05  
61147.50c -5.9211E-07  
62149.50c -7.1068E-07  
62151.50c -8.2189E-07  
92235.60c -1.4927E-02  
92236.60c -7.9482E-05  
92238.60c -6.2420E-02  
93237.60c -1.4184E-07  
93239.60c -2.1854E-19  
94239.60c -4.0131E-05  
94240.60c -4.6897E-07  
94241.60c -6.5331E-09  
94242.60c -4.3668E-11  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -4.5444E-19  
95241.60c -3.3008E-09  
95243.60c -2.5429E-13  
96241.60c -1.4037E-24  
96242.60c -9.3171E-13  
96243.60c -1.0768E-15  
96244.60c -8.9111E-16  
96245.60c -3.8965E-19

96246.60c -6.2305E-22  
96247.60c -9.9716E-21  
36083.50c -8.0027E-07  
42095.50c -1.3348E-05  
44101.50c -9.2946E-06  
46105.50c -1.9586E-06  
54134.42c -1.8804E-05  
56138.60c -1.7247E-05  
59141.50c -1.5121E-05  
62147.50c -5.4086E-06  
62150.50c -2.2732E-06  
62152.50c -9.9576E-07  
63151.60c -7.5737E-08  
63153.60c -4.6245E-07  
64155.60c -4.6508E-08  
64157.60c -2.1347E-09

m58

1001.60c -1.0098E-02  
40000.60c -9.1386E-01  
40093.50c -5.7774E-06  
43099.60c -3.1383E-06  
45103.50c -1.6552E-06  
53127.60c -8.6988E-08  
53129.60c -4.3651E-07  
54131.50c -1.8987E-06  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -4.6575E-06  
55135.60c -4.2120E-06  
55137.60c -3.8306E-06  
60143.50c -4.3774E-06  
60145.50c -2.9166E-06  
61147.50c -5.4438E-07  
62149.50c -4.9453E-07  
62151.50c -2.9086E-07  
92235.60c -1.4938E-02  
92236.60c -2.2194E-05  
92238.60c -6.1031E-02  
93237.60c -2.1171E-08  
93239.60c -2.4870E-22  
94239.60c -1.0398E-05  
94240.60c -3.4194E-08  
94241.60c -1.6473E-10  
94242.60c -2.6522E-13  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -3.3176E-22  
95241.60c -2.6424E-11

95243.60c -2.8941E-16  
96241.60c -1.0733E-24  
96242.60c -4.1043E-15  
96243.60c -1.2760E-18  
96244.60c -3.6430E-19  
96245.60c -5.0384E-23  
96246.60c -9.9903E-21  
96247.60c -9.9755E-21  
36083.50c -1.2905E-07  
42095.50c -3.4791E-06  
62147.50c -9.3502E-07  
62152.50c -2.3311E-07  
63151.60c -1.0655E-08  
64155.60c -5.3874E-09  
64157.60c -1.8637E-09

m59

1001.60c -1.6218E-02  
40000.60c -9.0629E-01  
40093.50c -1.7620E-06  
43099.60c -9.2199E-07  
45103.50c -4.8266E-07  
53127.60c -2.4621E-08  
53129.60c -1.2717E-07  
54131.50c -5.5366E-07  
54135.50c -1.0000E-20  
55133.60c -1.3578E-06  
55135.60c -1.1237E-06  
55137.60c -1.2175E-06  
60143.50c -1.2769E-06  
60145.50c -8.5007E-07  
61147.50c -3.6190E-07  
62149.50c -2.0964E-07  
62151.50c -9.2018E-08  
92235.60c -1.5218E-02  
92236.60c -6.5637E-06  
92238.60c -6.2253E-02  
93237.60c -5.9166E-09  
93239.60c -3.2591E-25  
94239.60c -3.9414E-06  
94240.60c -3.6553E-09  
94241.60c -6.1802E-12  
94242.60c -2.6615E-15  
94243.60c -1.0000E-20  
94244.60c -1.3258E-24  
95241.60c -3.7357E-13  
95243.60c -3.8077E-19

|     |           |             |                 |
|-----|-----------|-------------|-----------------|
|     | 96241.60c | -1.0000E-20 |                 |
|     | 96242.60c | -7.3363E-19 |                 |
|     | 96243.60c | -7.7172E-23 |                 |
|     | 96244.60c | -1.6229E-22 |                 |
|     | 96245.60c | -2.7802E-27 |                 |
|     | 96246.60c | -1.0000E-20 |                 |
|     | 96247.60c | -1.0000E-20 |                 |
|     | 62147.50c | -1.3539E-07 |                 |
|     | 64155.60c | -1.1949E-09 |                 |
|     | 64157.60c | -1.0974E-09 |                 |
| m60 | 6000.60c  | -0.856289   | \$ polietileno  |
|     | 1001.60c  | -0.143711   |                 |
| m61 | 6000.60c  | -0.922582   | \$ poliestireno |
|     | 1001.60c  | -0.077418   |                 |