AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**OTIMIZAÇÃO DO FEIXE DE IRRADIAÇÃO NA INSTALAÇÃO PARA ESTUDOS EM
BNCT JUNTO AO REATOR IEA-R1**

VINÍCIUS ALEXANDRE DE CASTRO

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear - Reatores**

**Orientador:
Prof. Dr. Paulo de Tarso Dalledone Siqueira**

**São Paulo
2014**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**OTIMIZAÇÃO DO FEIXE DE IRRADIAÇÃO NA INSTALAÇÃO PARA ESTUDOS EM
BNCT JUNTO AO REATOR IEA-R1**

VINÍCIUS ALEXANDRE DE CASTRO

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear - Reatores**

Orientador:
Prof. Dr. Paulo de Tarso Dalledone Siqueira

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2014

*Dedico à minha avó, mãe, meu irmão e sobrinho,
Olinda, Olinda L., Lauro R. e Gabriel
com todo meu amor e carinho*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço a minha avó, minha mãe e ao meu irmão, Olinda, Olinda Lucimar e Lauro Ricardo, por toda forma de apoio e ajuda que recebi durante a execução deste trabalho para que fosse possível a finalização de mais essa etapa na minha vida.

Agradeço à minha família pelo incentivo e força que me deram para que, mesmo sozinho em São Paulo, eu continuasse firme no meu propósito que era concluir o mestrado.

Agradeço aos meus primos e primas em geral, mas em especial a Elimely, Welires, Mariely, Muriel e Veridiane por, além de primos, serem amigos e estarem ao meu lado sempre que precisei.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Paulo de Tarso Dalledone Siqueira, por toda ajuda, incentivo, força e compreensão durante todo o processo de desenvolvimento da minha pesquisa. Além de ser um excelente orientador, se tornou um grande amigo compreendendo algumas dificuldades pessoais que passei no decorrer de todo esse tempo de estudos, pesquisas e desenvolvimento intelectual.

Agradeço ao professor Dr. Paulo Rogério Coelho Pinto por ser o primeiro, em 2010, a me aceitar no IPEN, me inserindo no Grupo de Pesquisas de BNCT e por também me acompanhar e ensinar muitas coisas no decorrer do meu trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Tufic Maddi Filho pelos auxílios, ensinamentos e principalmente pela ajuda que me deu, cedendo seu laboratório e aparelhos para que eu pudesse concluir minha pesquisa.

Agradeço ao professor Dr. Ulysses d'Utra Bitelli pelo auxílio que sempre me deu quanto o assunto era detecção de nêutrons. E agradeço aos professores Dr. Helio Yoriyaz e Rogério Jerez por todos os ensinamentos e irradiações realizadas.

Agradeço ao Sr. Tássio Antonio Cavalieri pela amizade, companheirismo e pelo tempo de convivência compartilhando todas as idéias relacionadas à pesquisa, pelo auxílio nas irradiações e pelas inúmeras risadas (na realização ou não do trabalho).

Agradeço a Srta. Talita Salles Coelho por ter me auxiliado inúmeras vezes quando precisei dentro da minha pesquisa e principalmente pelos conselhos amigos, me dando força e me ajudando a manter o foco no meu objetivo.

Agradeço a todos os bolsistas e amigos do CEN, Paula, Gregório, Gabriel, Jessica, Tiago, Luiza, Fábio, Francine, Eduardo, Murilo, Rafael, Letícia, Felipe Massicano, Felipe Cintra, Rodrigo Viana, Rodrigo Giarola, Francisco, Giuliana, Milena e Pedrinho por todos os momentos compartilhados durante estes anos no IPEN.

Agradeço aos funcionários do IPEN, por manterem o local sempre agradável para a realização de meus trabalhos e estudos.

Agradeço a minha amiga Jaqueline Gadeilho (Jaque) por todo o tempo que passamos juntos dividindo apartamento, compartilhando idéias e planos. E por ela ter sido a melhor das companhias no tempo que fiquei em São Paulo para realização da minha pesquisa.

Agradeço aos meus amigos Fábio Toratti, Camila Mandelli, Marina Rume, Isadora Migliori, Aline Ceron, Carolina Galucci, Amanda Costa, Lady Albino, Jota Jr. e Jorge Alencar pelos passeios, baladas e palavras amigas sempre que precisei, e principalmente as amigas Andréia Dias Marinho e Flávia Almeida Costa por serem mais que amigas e estarem sempre ao meu lado acima de qualquer coisa.

Agradeço ao meu treinador (coach) Roberto Bueno e sua esposa, Maitê Bueno, por me ajudarem a manter minha saúde física e por me incentivarem em diversos momentos.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos fornecida durante o desenvolvimento deste trabalho.

E por ultimo, não menos importante, agradeço ao IPEN e principalmente ao CEN pelo tempo que me acolheu e me deu suporte para que minha pesquisa pudesse ser concluída.

OTIMIZAÇÃO DO FEIXE DE IRRADIAÇÃO NA INSTALAÇÃO PARA ESTUDOS EM BNCT JUNTO AO REATOR IEA-R1

Vinícius Alexandre de Castro

RESUMO

A Terapia por Captura de Nêutrons pelo Boro (BNCT) é uma técnica radioterapêutica, que visa o tratamento de alguns tipos de câncer, em que sua energia útil é proveniente da reação nuclear promovida pela incidência de nêutrons térmicos no isótopo de ^{10}B . No Brasil existe uma instalação, localizada junto ao canal de irradiação número 3 do Reator de Pesquisas IEA-R1 do IPEN, que foi projetada para o desenvolvimento de pesquisas em BNCT. Para uma aplicação adequada da técnica é necessário que o feixe de irradiação na posição de amostra, seja composto predominantemente por nêutrons térmicos com reduzida contaminação dos componentes do feixe, correspondente aos nêutrons epitérmicos e rápidos e à radiação gama. Este trabalho tem como objetivo monitorar e avaliar o feixe de irradiação na posição de irradiação de amostras, através do uso de detectores de ativação (folhas de ativação), e a partir de simulações utilizando o código de transporte de radiação, MCNP, avaliar mudanças na instalação, mais especificamente no conjunto de filtros e moderadores, para que se aprimore as condições de irradiação na instalação. O trabalho propôs uma nova metodologia de cálculo para estudos de otimização do feixe a partir do recurso de redução de variância presente no MCNP, o *wwg (weight window generation)*. Com os resultados obtidos através da adoção de um conjunto maior de folhas de ativação, foi possível a discriminação experimental do feixe de nêutrons em 5 faixas de energia e concluir que a instalação para estudos em BNCT do IPEN possui fluxo de nêutrons térmicos de $10^8 \text{ n/cm}^2.\text{s}$, intensidade suficiente para que os estudos na área possam ser realizados com grande potencial de alteração de suas componentes conforme demanda experimental.

OPTIMIZATION OF THE IRRADIATION BEAM IN THE BNCT RESEARCH FACILITY AT IEA-R1 REACTOR

Vinícius Alexandre de Castro

ABSTRACT

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) is a radiotherapeutic technique for the treatment of some types of cancer whose useful energy comes from a nuclear reaction that occurs when thermal neutron impinges upon a Boron-10 atom. In Brazil there is a research facility built along the beam hole number 3 of the IEA-R1 research reactor at IPEN, which was designed to perform BNCT research experiments. For a good performance of the technique, the irradiation beam should be mostly composed of thermal neutrons with a minimum as possible gamma and above thermal neutron components. This work aims to monitor and evaluate the irradiation beam on the sample irradiation position through the use of activation detectors (activation foils) and also to propose, through simulation using the radiation transport code, MCNP, new sets of moderators and filters which shall deliver better irradiation fields at the irradiation sample position. In this work, a simulation methodology, based on a MCNP card, known as wwg (weight window generation) was studied, and the neutron energy spectrum has been experimentally discriminated at 5 energy ranges by using a new set of activation foils. It also has been concluded that the BNCT research facility has the required thermal neutron flux to perform studies in the area and it has a great potential for improvement for tailoring the irradiation field.

Sumário

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Câncer	1
1.1.1. Estatísticas	1
1.1.2. Tratamentos	1
1.2. BNCT	2
1.2.1. Conceitos e Princípios	2
1.2.1.1. Condições para aplicação	3
1.2.2. Histórico	4
1.2.2.1. Panorama Nacional	5
1.3. A BNCT no IPEN-CNEN/SP	6
2. OBJETIVO	9
2.1. Objetivos Específicos	9
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
3.1. Radiação	10
3.2. Radioatividade	11
3.3. Atividade (A)	11
3.4. Detectores de Ativação (Folhas de Ativação)	12
3.4.1. Atividade de Saturação (A^{∞})	13
3.5. Fluência (φ) e Fluxo (Φ) de Nêutrons	14
3.6. Dose Absorvida (D)	14
3.7. Interações dos Nêutrons com a Matéria	15

3.7.1.	Seção de Choque	16
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1.	Simulações	17
4.1.1.	MCNP - Monte Carlo <i>N-Particle Radiation Transport Code</i>	17
4.2.	Procedimentos Experimentais.....	20
4.2.1.	Detectores de Ativação do Tipo Folha.....	21
4.2.2.	Técnica da Razão de Cádmio	24
4.2.3.	Espectrometria Gama	26
4.2.4.	Fluxos Térmico e Epitérmico.....	28
4.3.	Razão Espectral.....	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1.	Monitoração do feixe (Experimental).....	31
5.1.1.	Monitoramento do fluxo de nêutrons faixas de energia.....	31
5.1.2.	Perfil do Fluxo de Nêutrons	35
5.1.3.	Configuração Bloco por Bloco (Perturbação do Fluxo de Nêutrons)	38
5.1.4.	Alteração do fluxo de nêutrons com a adição de moderadores e refletores (parafina e polietileno).....	41
5.1.5.	Novo conjunto de folhas de ativação para comparação	43
5.2.	Simulações	45
5.2.1.	Validação e Propostas de Mudanças	45
5.2.2.	Simulação com Importâncias Iguais	47
5.2.3.	Simulação com Importâncias Diferentes.....	48
5.2.4.	Simulação com <i>Weight Window Generator</i>	50
5.2.5.	Avaliação dos Filtros.....	52
6.	CONCLUSÕES.....	54
7.	PROPOSIÇÃO DE FUTUROS EXPERIMENTOS	57
8.	BIBLIOGRAFIA.....	58

Anexo A – Propagação das Incertezas relacionadas às medidas experimentais	61
Anexo B – Arquivo de Entrada do MCNP para Simulações das Irradiações na Instalação de Pesquisas em BNCT junto ao Reator IEA-R1	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Visão externa da instalação para estudos em BNCT situada no BH 3 do Reator IEA-R1.....	6
Figura 2 - Sistema para troca das amostras, onde (a) porta-amostra preso à garra que o leva para dentro da blindagem biológica; (b) garra descendo com o porta-amostra pelo trilho; (c) porta-amostra posicionado na cavidade de irradiação e (d) suporte porta-amostra inserido no BH 3 para irradiação [18].....	7
Figura 3 – Esquema da instalação para pesquisa em BNCT no Reator IEA-R1 [25].	8
Figura 4 - Curvas de seção de choque total. Vermelho: $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$; Verde: $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$ [38].	21
Figura 5 – Folha de ^{197}Au e cobertura de cádmio (2 partes) vazia utilizadas neste trabalho	22
Figura 6 – Folha de ^{197}Au posicionada dentro da cobertura de Cádmio	22
Figura 7 – Seções de choque total para nêutrons do ^{197}Au ; ^{45}Sc ; ^{55}Mn ; ^{63}Cu ; ^{115}In e ^{186}W	24
Figura 8 – Curva de Eficiência de detecção utilizando a fonte de ^{152}Eu	28
Figura 9 – Porta-amostras de acrílico utilizado nas irradiações.	32
Figura 10 – Porta-amostra inserido na cavidade.	32
Figura 11 - Esquema da vista superior da instalação em para estudos em BNCT do Reator IEA-R1 com a indicação do posicionamento das folhas de ativação para monitoração do feixe de irradiação.	33
Figura 12 – Porta-amostra confeccionado de isopor com as mesmas dimensões do porta-amostra de acrílico. A haste superior é construída em madeira e serve como suporte para a garra do sistema de movimentação da amostra.	35
Figura 13 – Visualização lateral dos quatro blocos de isopor e de seus posicionamentos no porta-amostras de isopor.....	36
Figura 14 - Variação das atividades de saturação das folhas nuas por bloco.....	37
Figura 15 - Variação das atividades de saturação das folhas cobertas com cádmio por bloco.	37
Figura 16 - Média calculada das atividades de saturação para as folhas nuas e cobertas com cádmio pelas distâncias entre os blocos.....	38

Figura 17 - Comparação entre as variações de atividade de saturação das folhas nuas obtidas pelas 2 configurações de irradiação.	40
Figura 18 - Variação entre as atividades de saturação das folhas de ouro cobertas com cádmio para cada posição dos blocos irradiadas em 2 configurações diferentes.	40
Figura 19 – Representação da geometria base gerada através do MCNP.	46
Figura 20 – Imagem ampliada da posição de irradiação de amostras.	47
Figura 21 – Representação da geometria gerada pelo MCNP com as respectivas importâncias para nêutrons.	49
Figura 22 – Representação da adição de 8 cm de polietileno na parte posterior à posição de irradiação de amostras (caso A).	52
Figura 23 – Representação da adição de 2,5 cm de polietileno na parte anterior à posição de irradiação de amostras (caso B).	53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais usados como folhas de ativação e suas respectivas características.	23
Tabela 2 - Atividades de saturação por núcleos alvo das folhas irradiadas na Configuração Padrão.	34
Tabela 3 – Média das Atividades de saturação por núcleos alvo das folhas irradiadas na Configuração Padrão.	35
Tabela 4 - Atividades de saturação por núcleos alvo das folhas irradiadas nas 2 configurações.	39
Tabela 5 - Valores de atividades de saturação e fluxos de nêutrons calculados para as folhas de Au na configuração padrão quando ocorreram mudanças na configuração experimental dos filtros.	42
Tabela 6 – Valores das atividades de saturação e razões espectrais para 3 instalações para estudos em BNCT.	44
Tabela 7 - Fluxo de Nêutrons térmicos e valor da FOM gerados pelo MCNP.	48
Tabela 8 – Valores calculados do fluxo de nêutrons térmicos nas células 921 e 928 e valor da FOM obtidos para a geometria com importâncias diferentes.	49
Tabela 9 – Fluxo de Nêutrons térmicos e valor da FOM com o uso do cartão WWG...	51
Tabela 10 – Fluxo de nêutrons térmicos e valor da FOM com a incorporação dos resultados gerados pelo cartão WWG com tempo de simulação de 8.000 minutos.	51
Tabela 11 – Valores do Fluxo de Nêutrons térmicos calculados pelo MCNP e o valor da FOM para os casos A e B.	54

1. INTRODUÇÃO

1.1. Câncer

Câncer é o nome dado a um conjunto de mais de 100 doenças que têm em comum o crescimento desordenado (maligno) de células que invadem tecidos e órgãos, podendo espalhar-se (metástase) para outras regiões do corpo [1].

Dividindo-se rapidamente, estas células tendem a ser muito agressivas e incontroláveis, determinando a formação de tumores (acúmulo de células cancerosas) ou neoplasias malignas. Por outro lado, um tumor benigno significa simplesmente uma massa localizada de células que se multiplicam vagarosamente e se assemelham às células do tecido original, raramente constituindo um risco de vida.

1.1.1. Estatísticas

O câncer é atualmente a segunda maior causa de morte natural no Brasil e no mundo, segundo o Ministério da Saúde, ficando atrás somente das doenças cardiovasculares. As últimas estatísticas disponíveis informam que cerca de mais de 184 mil mortes por câncer foram registradas no país em 2012 (10 mil casos a mais que os ocorridos no ano anterior) [2].

Conforme uma projeção do Instituto Nacional do Câncer - INCA, serão registrados cerca de 576 mil novos casos de câncer no ano de 2014, número maior do que o previsto em 2013 (520 mil). Segundo a pesquisa realizada, os tipos de câncer que mais serão diagnosticados serão o câncer de pele (180 mil novos casos), seguido pelo câncer de próstata (69 mil) e o de mama (57 mil) [3].

1.1.2. Tratamentos

Algumas técnicas são utilizadas como terapia de tratamento de câncer e têm a finalidade de remover, destruir ou enfraquecer as células cancerígenas

preservando as células sadias, tais como a cirurgia, a radioterapia e a quimioterapia. Buscando maior eficiência de tratamento, mais de uma técnica pode ser empregada no tratamento, dependendo da extensão, gravidade e órgãos acometidos.

Mesmo os tratamentos convencionais, radioterapia e quimioterapia, algumas vezes não conseguem responder satisfatoriamente a certos tipos de câncer e por isso o desenvolvimento de novas pesquisas visando aprimorar o tratamento de câncer se faz necessário.

Desde a descoberta dos nêutrons por Chadwick, em 1932 [4], uma terapia para tratamento de câncer, a Terapia por Captura de Nêutrons pelo Boro (*Boron Neutron Capture Therapy* – BNCT), vem sendo estudada e aplicada.

1.2. BNCT

1.2.1. Conceitos e Princípios

A Terapia por Captura de Nêutrons pelo Boro é uma técnica radioterapêutica para tratamento de alguns tipos de câncer e foi proposta por Locher em 1936 [5]. A proposta sugere a utilização de nêutrons térmicos e boro (^{10}B) para fins terapêuticos, verificando que, se o ^{10}B fosse seletivamente concentrado nas células cancerígenas e o volume do tumor fosse irradiado por nêutrons térmicos, o resultado seria uma maior dose nas células que incorporam o composto borado comparado à dose no tecido sadio que o conteria o B em baixa concentração [6].

Essa terapia se baseia em duas fases, na primeira fase ocorre a administração de um composto borado ao paciente, composto que deve ser preferencialmente absorvido pelas células cancerígenas, e na segunda fase faz-se a irradiação da região, a qual possui as células cancerígenas, com um campo de nêutrons térmicos. Quando a região de tratamento é exposta a um campo de nêutrons térmicos ocorre a seguinte reação nuclear do nêutron com isótopo do boro-10, ^{10}B :

Da reação nuclear surgem dois produtos, a partícula α e o núcleo de ${}^7\text{Li}$. A reação mostrada na Eq. 1 é exotérmica e pode ocorrer de duas formas, liberando energia de 2,79 MeV: na primeira reação, com probabilidade de ocorrência de 93,7%, o átomo de Lítio é gerado no seu estado excitado, acarretando na emissão de um fótons de 0,48 MeV; na segunda reação nuclear o átomo de Lítio é gerado no seu estado fundamental com probabilidade de ocorrência de 6,3% [7].

Como as partículas carregam a energia liberada na reação na forma de energia cinética, esta energia dissipa-se enquanto as partículas se movem. Por terem alto LET (Linear Energy Transfer) elas são freadas dentro em uma região muito próxima onde ocorre a reação nuclear, resultando na deposição de energia (maior que 2 MeV) em pequeno espaço ($\approx 10\mu\text{m}$), diminuindo possíveis danos nas células vizinhas [8].

1.2.1.1. Condições para aplicação

Para o sucesso da aplicação da técnica BNCT é necessário que:

- haja concentração de boro na célula tumoral e no sangue na proporção de 3,5:1 [9] [10], portanto maior concentração nas células cancerígenas e menor concentração nos tecidos saudáveis;
- que exista um número suficiente de nêutrons na faixa de energia dos nêutrons térmicos (energia de até 0,5 eV) [9], para que a reação de captura (Equação 1) aconteça com maior frequência quando incidido nas células cancerígenas. Lembrando que devido à baixa penetração dos nêutrons térmicos, eles são usados para irradiação de tumores superficiais, enquanto os nêutrons epitérmicos (com energias entre 0,5 eV e 100 keV) que possuem maior alcance e são usados na irradiação de tumores mais profundos possuem, eles devem ser usados [7].

Apesar de alguns pesquisadores terem determinado as quantidades máximas da concentração mínima do composto de boro nas células tumorais, esse parâmetro ainda se encontra em estudo, assim como a fluência de nêutrons muda com o tempo de irradiação e com o fluxo de nêutrons.

A intenção das condições da técnica é fazer que na região onde se localizam as células cancerígenas chegue um fluxo de nêutrons predominantemente

térmico, fluxo de 5.10^8 n/cm²s, com uma dose máxima de 1 Gy/h de radiação gama e de 0,5 Gy/h de nêutrons rápidos, com essas características do feixe o tratamento pode ser limitado a poucas horas, cerca de 40 minutos a uma hora de irradiação [7].

Conseguir fazer com que as células normais sejam menos danificadas comparadas com as células cancerígenas que absorveram preferencialmente, o composto borado é a grande vantagem da técnica em relação aos outros tipos de tratamento.

1.2.2. Histórico

A aplicação dos nêutrons para tratamento do câncer vem sendo assunto de pesquisas desde a descoberta dos nêutrons por Chadwick, em 1932 [4].

O conceito NCT (*Neutron Capture Therapy* - Terapia de Captura de Nêutrons) foi proposto por Goldhaber em 1934 [11], que constatou a capacidade do átomo de ¹⁰B absorver nêutrons térmicos. Dois anos após a proposta de Goldhaber, Gordon Locher propôs a BNCT [5].

William Hebert Sweet, neurocirurgião do Massachusetts General Hospital (MGH) juntou-se com físicos do Laboratório Nacional de Brookhaven (BNL) nos EUA, em 1951, demonstrou que o composto químico BORAX tinha boa concentração nas células cancerígenas [12].

Logo depois, o BNCT foi clinicamente testado pela primeira vez, no Laboratório Nacional de Brookhaven, usando o composto BORAX. Na mesma época, no Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), realizou-se o mesmo tipo de experiência, que posteriormente foi cancelada devido à ocorrência de necroses e edemas agudos, sintomas que surgiram devido ao fraco poder de penetração do feixe de nêutrons e ao composto ser pouco seletivo [6].

Devido às experiências mal sucedidas no MIT, vários pesquisadores começaram a estudar compostos mais seletivos e nos anos 60, Hatanaka em conjunto com outros pesquisadores, conseguiram sintetizar um composto mais seletivo, o BSH (*sodium borocaptate*) [6].

Hatanaka realizou o primeiro tratamento de tumor cerebral em agosto de 1968, no Japão [12], usando o BSH e feixe de nêutrons térmicos, e entre esse ano e

1992 foram tratados 120 pacientes usando como composto o BSH. Os resultados foram bastante encorajadores, conseguindo uma taxa de sobrevivência de 5 anos em 20% no grupo tratado [9] [6].

Várias tentativas clínicas foram realizadas em diferentes lugares entre 1994 e 1997, usando diferentes técnicas. No BNL, em 1994, iniciaram tentativas com uso de feixe de nêutrons epitérmicos. Alguns anos depois, em 1996, no MIT realizou experimentos para o tratamento de glioblastomas e de melanoma intracranial. Na instalação do reator de pesquisa de Petten, Holanda, instalação usada pela União Européia, iniciou-se um programa clínico em BNCT para glioblastoma multiforme, usando o composto BSH e feixes de nêutrons epitérmicos.

Na Finlândia, nos últimos anos, a BNCT já foi realizada para alguns tipos de câncer de cabeça e pescoço [13].

Na Itália já se fez irradiação extracorpórea para tratamento de câncer de fígado [14].

Novas instalações e melhorias na técnica vêm sendo estudadas para o desenvolvimento das pesquisas em BNCT no Japão e a Argentina vem avançando em suas pesquisas e se tornando o principal país a fazer pesquisas em BNCT [15] [16].

A busca de novos compostos que tenha melhor seletividade, maior absorção pelas células cancerígenas e que não sejam tóxicos, e a busca de um feixe de nêutrons eficiente para que a reação de captura aconteça, são as áreas de estudos que mais se desenvolvem em busca de um aprimoramento da técnica.

1.2.2.1. Panorama Nacional

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas pelo Grupo de Pesquisa na Área de BNCT do IPEN [17] [18] [19] [20] e também algumas parcerias com outras instituições, como a UNICAMP e o Instituto Butantan, foram firmadas com intuito de desenvolver a técnica nas áreas de dosimetria [21] [22] e estudos biológicos [23] [24].

Em uma das pesquisas realizadas pelo Grupo de Pesquisa na área de BNCT do IPEN descobriu-se que o campo de radiação na instalação construída junto ao reator IEA-R1, é composto por um fluxo de nêutrons rápidos e que a dose de radiação

gama também se encontra elevada [19], o que é indesejável na aplicação em BNCT, mostrando a necessidade de aperfeiçoamento da instalação.

1.3. A BNCT no IPEN-CNEN/SP

Atualmente, no Brasil existe uma instalação experimental em que é possível a realização de estudos em BNCT. Esta instalação que foi projetada e construída somente para desenvolvimento de pesquisas, mas não para aplicação terapêutica da técnica. A instalação está situada ao longo do extrator de feixe, BH 3 (*Beam Hole*) do Reator IEA-R1 no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) [17].

A instalação foi projetada para que a troca de amostras possa ser realizada mesmo quando o reator estiver em funcionamento, pois a instalação possui uma blindagem biológica efetiva, como mostra a Figura 1, para que atendam-se os limites de dose para proteção radiológica, um sistema de abertura e fechamento do BH e um sistema de inserção e retirada das amostras que pode ser visualizado nas Figura 2(a), 2(b) e 2(c).

Figura 1 – Visão externa da instalação para estudos em BNCT situada no BH 3 do Reator IEA-R1.

Figura 2 - Sistema para troca das amostras, onde (a) porta-amostra preso à garra que o leva para dentro da blindagem biológica; (b) garra descendo com o porta-amostra pelo trilho; (c) porta-amostra posicionado na cavidade de irradiação e (d) suporte porta-amostra inserido no BH 3 para irradiação [18].

Na instalação vem sendo desenvolvidos vários trabalhos, como estudos para melhoria e adequação do feixe e modulação do espectro de nêutrons. Os estudos relacionados à modulação do feixe implicam na variação do feixe de nêutrons dependendo da necessidade da sua aplicação.

A instalação é constituída de um canal de irradiação (BH 3) que possui 261,5 cm de comprimento e diâmetro interno de 12,8 cm. Os nêutrons e a radiação gama provenientes do núcleo do reator entram no BH 3 e passam, por 17 cm de Chumbo (na configuração atual), que nesse caso são utilizados como moderadores e filtros, tendo a função de reduzir a energia do feixe de nêutrons e reduzir a radiação gama que chega na posição de irradiação de amostras. Após o feixe atravessar a posição de irradiação de amostras o mesmo atinge a blindagem de chumbo, o Chumbo continua com a função de reduzir a energia do feixe de nêutrons e também reduzir a radiação gama que sobrou após a passagem pelos moderadores e filtros.

Dentro do BH existe o *liner* e dentro do *liner* se encontra a cartola, que encontra-se inteiramente inserida na parede da piscina do reator e serve como "isolante" de segurança no caso do BH ser rompido, assim a cartola não permite que a água da

piscina do reator saia pelo BH. Dentro da cartola estão localizados os filtros e moderadores (em sua parte anterior) e o suporte do porta-amstras (cavidade para inserção do porta-amstras) e a blindagem de chumbo, posicionados na parte posterior. Essas estruturas estão em uma configuração cilíndrica e devem possuir uma folga entre si devido à necessidade de movimentação dos suportes e também ao posicionamento da instalação destas estruturas onde uma se encontra dentro da outra. Como essas estruturas se encontram uma dentro da outra, esse fato diminui significativamente o espaço útil da instalação e cria canais de fuga de radiação. A diminuição do espaço útil implica diretamente na limitação do tamanho das amostras que podem ser irradiadas, como pode ser visto na Figura 3, e a fuga de irradiação implica na qualidade do feixe. No processo de otimização do feixe deve-se avaliar o quanto essa fuga tem influência na qualidade do feixe e após essa avaliação verificar a necessidade de melhorias nas estruturas da instalação para melhor otimização e uso do feixe de irradiação.

Figura 3 – Esquema da instalação para pesquisa em BNCT no Reator IEA-R1 [25].

Os filtros e moderadores estão posicionados na posição interior do BH (Figura 3) e têm função de adequação do feixe e modulação do espectro de nêutrons para atingir na posição de irradiação das amostras a fluência e intensidade necessária para a aplicação em BNCT. Esses filtros e moderadores não se encontram fixados definitivamente e podem ser trocados conforme a necessidade de aplicação da técnica, portanto existe a possibilidade da troca desses componentes ser efetuada para estudos da

eficácia dos mesmos, visando aumentar a componente do fluxo de nêutrons térmicos, reduzindo a componente de nêutrons epitérmicos e rápidos e também a radiação gama.

O monitoramento do feixe é realizado usando-se folhas de ativação, disponíveis no Centro de Engenharia Nuclear (CEN). Uma das vantagens desta técnica é o tamanho das folhas de ativação, que são pequenas e cabem dentro do arranjo montado, como mostrado na Figura 2 (c).

2. OBJETIVO

A necessidade de avaliar e caracterizar o feixe de irradiação da instalação de BNCT no reator IEA-R1 é o objetivo principal da realização dos estudos, para que posteriormente possam ser alteradas as componentes do feixe de irradiação com intuito de melhorar a aplicação da BNCT e, portanto, melhorar as condições de irradiação. Para que seja possível a melhoria das condições de irradiação é necessário propor um conjunto de filtros e moderadores que otimizem o feixe de irradiação.

A otimização do feixe implica em maximizar a componente de nêutrons térmicos e minimizar as componentes de nêutrons epitérmicos e rápidos e da radiação gama através do uso de filtros e moderadores adequados.

2.1. Objetivos Específicos

O objetivo primordial deste trabalho é aprimorar a qualidade do feixe de irradiação na instalação para estudos em BNCT, para que isso seja possível primeiro deve-se caracterizar o perfil axial do feixe de irradiações na posição de irradiação das amostras, caracterizar o espectro energético com maior detalhamento e propor mudanças nos filtros/moderadores da instalação.

A caracterização e avaliação do feixe de nêutrons na posição de irradiação de amostras da instalação dão-se através da utilização da técnica de ativação de folhas.

Visando definir um melhor conjunto de filtros/moderadores e otimizar o processo na escolha dos mesmos, utiliza-se o código de transporte de radiação, MCNP [26], para realização de simulações.

Um estudo mais profundo do espectro de nêutrons da instalação para estudos em BNCT faz-se necessário, assim para a caracterização de outras regiões do espectro de nêutrons são utilizados diferentes tipos de folhas de ativação.

Outras instalações no mundo realizam pesquisas em BNCT e devido a esse fato, fez-se necessário calcular as razões espectrais da instalação para estudos em BNCT do IPEN com intuito de comparar a instalação do IPEN com as demais instalações de pesquisa em BNCT.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção serão apresentados conceitos físicos relacionados à pesquisa realizada neste trabalho, envolvendo nêutrons, detecção de nêutrons e algumas técnicas para desenvolvimento do trabalho.

3.1. Radiação

Radiação se dá através da propagação de energia no espaço e que produz efeitos quando entram em contato com uma determinada matéria [26]. Podem ser originadas a partir de fontes naturais ou por dispositivos construídos pelo homem.

As radiações podem ser classificadas em dois tipos: as radiações ionizantes e as radiações não ionizantes:

- Radiação ionizante é a radiação que possui energia suficiente para ionizar átomos ou moléculas do meio que essa radiação atravessa. Raios-X, gamas, radiação alfa, elétrons, prótons, nêutrons, íons pesados são alguns tipos de radiações ionizantes e
- Radiações não ionizantes são as radiações que não possuem a capacidade de alterar o estado do átomo ou melhor, não possuem energia

suficiente para arrancar elétrons dos átomos do meio por onde se desloca. As radiações eletromagnéticas de aparelhos micro-ondas, ondas de rádio, do espectro visível e radiação ultravioleta são exemplos de radiações não ionizantes.

3.2. Radioatividade

A radioatividade foi descoberta no século XIX, quando ainda predominava a idéia de que os átomos eram as menores partículas que constituíam a matéria.

Em 1896, o físico Antoine-Henri Becquerel observou que um sal de urânio possuía a capacidade de sensibilizar filmes fotográficos, produzindo sombras de objetos metálicos nesses filmes. Mas somente em 1898 o termo radioatividade foi consolidado, por Marie Curie, a partir da descoberta do elemento rádio [28].

Nem todos os núcleos atômicos são estáveis. Um núcleo instável, que possui excesso de partículas ou de energia, emite um ou mais tipos de radiação até que o mesmo atinja sua configuração estável. Essa característica é chamada de radioatividade.

3.3. Atividade (A)

Atividade é definida pelo número de desintegrações nucleares que ocorrem num determinado material por unidade de tempo. As unidades, geralmente utilizadas, para essa grandeza são o *curie (Ci)* e/ou *becquerel (Bq)* que corresponde a uma desintegração por segundo (dps). 1 *Ci* equivale a $3,7 \cdot 10^{10}$ *Bq*.

A fórmula da Atividade é dada a seguir na Eq. 2:

$$A(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$A(t)$ é a atividade do material,

$dR(t)$ é a variação do número de núcleos radioativos na amostra no intervalo de tempo dt e

dt é o intervalo infinitesimal de tempo onde se observa $dR(t)$.

3.4. Detectores de Ativação (Folhas de Ativação)

A técnica de ativação nuclear é uma técnica onde se faz uso de diferentes materiais, fazendo com que os mesmos se tornem radioativos quando irradiados por um feixe de nêutrons. A radioatividade destes materiais, denominados de detectores de ativação, será proporcional à intensidade do fluxo de nêutrons, ao tempo de irradiação, à seção de choque da reação que promove a reação de ativação a ser monitorada e ao número de átomos alvo (massa) presentes na amostra [29] [30]. Com a escolha de materiais adequados, pode-se monitorar regiões específicas do espectro de nêutrons, pois algumas reações têm probabilidades de ocorrência predominadas, ou restritas, a determinadas faixas de energia.

Os detectores de ativação (folhas de ativação) possuem duas características importantes que os fazem ser bastante usados na caracterização do feixe de nêutrons utilizado em BNCT: o tamanho e a discriminação energética dos nêutrons. O pequeno tamanho das folhas de ativação possibilita tanto o posicionamento das mesmas em qualquer local da instalação, como também reduz as perturbações provocadas no feixe pela presença do detector. A discriminação dos grupos de energia dos nêutrons dá-se a partir da aplicação da técnica com a conjunção de materiais.

Neste trabalho foram utilizadas folhas de ativação para a caracterização do feixe de nêutrons térmicos e epitérmicos, e através da contagem da radioatividade induzida nas folhas, contagem feita através da espectrometria gama, é possível estimar a atividade de saturação e, por sua vez, o fluxo de nêutrons [30] [31].

A técnica de análise de ativação é uma técnica muito conhecida e muito usada pelos pesquisadores ligados à BCNT [16] e também uma técnica bastante difundida pelos pesquisadores do IPEN [29] [30] [31] [32].

3.4.1. Atividade de Saturação (A^∞)

Cada folha de ativação é lida por vez e cada tipo de folha possui um ou mais fotopicos gama característicos, portanto as contagens desses fotopicos é que possibilitará o cálculo da atividade de saturação da folha.

Quando o tempo de irradiação for muito longo ($t \rightarrow \infty$), o detector de ativação atingirá sua atividade máxima sob a ação do fluxo neutrônico a que está submetido. Essa atividade é denominada Atividade de Saturação (A^∞) e é numericamente igual ao valor da taxa de reação nuclear [30].

Cada tipo de folha possui suas características específicas como seções de choque, massa e meia-vida que são levados em consideração na hora da escolha para detecção de regiões diferentes do espectro de nêutrons.

Após obtenção das contagens do pico energético da folha de ativação escolhida é necessário realizar o cálculo da atividade de saturação ao final da irradiação e esse cálculo é obtido pela seguinte equação:

$$A^\infty = \frac{\lambda C e^{\lambda t_e}}{\varepsilon I (1 - e^{-\lambda t_c})(1 - e^{-\lambda t_i})} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

λ é constante de decaimento do radioisótopo formado;

C é a contagem líquida do fotopico específico (descontando o BG – radiação de fundo) obtida na espectrometria gama;

t_e é tempo decorrido entre o final da irradiação e o início da contagem;

ε é eficiência de detecção do fotopico de interesse;

I é probabilidade de emissão gama do radioisótopo formado,

t_c é o intervalo de contagem ($t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}$) na espectrometria gama

e

t_i é o tempo de irradiação.

3.5. Fluência (φ) e Fluxo (Φ) de Nêutrons

Fluência é definida pelo número de partículas que incidem numa seção de área [33]. A unidade de fluência é m^{-2} e sua fórmula é dada pela equação 4, a seguir [33]. A unidade de fluência é m^{-2} e sua fórmula é dada pela equação a seguir:

$$\Phi = \frac{dNR}{da} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

dNR é a variação do número de núcleos radioativos na amostra na seção de área da e

da é a seção da área.

Fluxo é dado pela razão entre a variação da fluência (Φ) e o tempo decorrido (dt). Sua unidade é dada em $m^{-2}.s^{-1}$ e pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Equação 5}$$

3.6. Dose Absorvida (D)

A energia depositada na matéria por unidade de massa em um ponto de interesse é a definição de dose absorvida.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad \text{Equação 6}$$

Onde dE é a energia depositada em uma quantidade de massa dm .

A unidade da dose absorvida é o *gray* (Gy) que equivale à deposição de 1 J em 1 kg [34] .

3.7. Interações dos Nêutrons com a Matéria

A interação dos nêutrons com a matéria ocorre através da interação direta com os núcleos, pois os nêutrons ignoram a presença dos elétrons da camada eletrônica e não são afetados pelos campos eletrostáticos produzidos pela eletrosfera. Dessa forma, os nêutrons passam através das camadas eletrônicas dos átomos e interagem diretamente com os núcleos dos átomos [35].

Devido à ausência de carga elétrica, mesmo os nêutrons de pouca energia podem induzir reações nucleares e sua penetração é bem maior que a de outros tipos de radiação [35].

Os tipos de interações dos nêutrons com o núcleo dependem da classificação energética dos mesmos. A divisão energética dos nêutrons varia conforme pesquisadores e autores, nesse trabalho a divisão foi feita da seguinte forma [19][20]:

- Nêutrons Térmicos: $E < 0,5 \text{ eV}$;
- Nêutrons Epitérmicos: $0,5 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$ e
- Nêutrons Rápidos: $E > 10 \text{ keV}$.

Paras os nêutrons térmicos (de energia até 0,5 eV) as interações podem ser de espalhamento elástico com o núcleo. Por possuírem baixa energia, esses nêutrons entram em equilíbrio térmico com o material do meio, tornando-se nêutrons térmicos (com energia média de 0,025 eV). Para nêutrons que possuem energias maiores (energia acima de 0,5 eV), a interação que preponderará será de espalhamento inelástico com o núcleo, que recua e passa a um estado excitado e posteriormente o núcleo perder energia emitindo radiação gama secundária. Com a ocorrência frequente dos choques inelásticos os nêutrons perdem mais energia se tornando lentos.

Resumidamente, as interações que o nêutron pode sofrer são:

- Espalhamento elástico, onde o nêutron é espalhado e a energia do sistema nêutron + núcleo alvo se conserva;

- Espalhamento inelástico, onde o nêutron é espalhado, a energia do sistema nêutron + núcleo não se conserva e o núcleo alvo atinge estados excitados;
- Reação de Limiar, onde o nêutron é absorvido e o núcleo emite uma partícula carregada pesada de alto LET e pequeno alcance, como partículas α ou prótons. Nessa reação existe uma energia mínima para que ela ocorra;
- Captura radioativa, onde o nêutron é absorvido, o núcleo alvo se transmuta em um novo isótopo e raios gama de decaimentos são emitidos;
- Emissão de nêutrons, onde o nêutron é absorvido e o núcleo alvo libera um ou mais nêutrons e
- Fissão nuclear, onde o nêutron provoca a fissão do núcleo alvo e ocorre liberação de dois ou três nêutrons.

3.7.1. Seção de Choque

A seção de choque microscópica (σ) é uma medida de probabilidade de ocorrência de uma determinada reação nuclear. Pode ser encontrada na unidade *barns* (*b*) ou cm^2 , onde 1 *b* equivale a $10^{-24} cm^2$.

A seção de choque macroscópica (Σ) é quantificada pelo número de núcleos presentes por unidade de volume (η) multiplicado pela seção de choque microscópica (σ). Sua unidade é o inverso do comprimento percorrido pelo nêutron e nos dá uma idéia da probabilidade de interação do nêutron por unidade de comprimento de sua trajetória no material percorre.

$$\Sigma = \eta \cdot \sigma$$

Equação 7

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados neste trabalho e a metodologia empregada para obtenção dos resultados.

4.1. Simulações

Nesta seção serão dispostos os materiais e métodos utilizados para a realização das simulações conduzidas no trabalho.

4.1.1. MCNP - Monte Carlo *N-Particle Radiation Transport Code*

O MCNP é um código de transporte de radiação, baseado no Método de Monte Carlo, que utiliza uma sequência de números aleatórios para realizar simulações de fenômenos físicos que podem ser descritos por funções de densidades de probabilidades [26].

O MCNP é muito usado em pesquisas na área Nuclear (devido à dificuldade de se realizar experimentos na área nuclear). Utiliza-se essa ferramenta para realizar simulações de transporte de radiações (nêutrons, fótons e elétrons). O MCNP tem a flexibilidade na reconstrução de sistemas com geometrias complexas.

O usuário do MCNP descreve o sistema a ser simulado a partir da criação de arquivo de entrada (*INPUT*) que é executado pelo MCNP. Este arquivo de entrada deve conter informações sobre o problema a ser resolvido, como a especificação da geometria e da fonte a serem simuladas, a descrição dos materiais utilizados na construção da geometria, as seções de choque a serem utilizadas, o tipo de radiação a ser simulada (fótons, elétrons, nêutrons) e o tipo de resposta desejada pelo usuário (*tallies*) que será registrada no arquivo de saída (*OUTPUT*).

A utilização do MCNP neste trabalho se deu devido à forma com que se pode trabalhar com o programa. Além da geometria da instalação e do reator (ou espectro energético do reator) serem geometrias complexas para a realização da simulação, é possível através do MCNP otimizar o processo de amostragem

selecionando as importâncias necessárias para solução do problema proposto. Existem outros códigos de transporte de radiação que poderiam ser utilizados no trabalho, porém a maioria dos códigos determinísticos obtém suas respostas através de soluções integrais enquanto no MCNP é possível que o usuário forneça o tipo de resposta desejada e após a finalização da simulação ainda é possível o usuário verificar no arquivo de saída informações sobre o comportamento das partículas no decorrer da simulação. Com as respostas obtidas através do arquivo de saída é possível analisar e verificar se essas estão com uma estatística de cálculo aceitável e dessa forma o usuário pode alterar a forma de obtenção dos resultados, com o objetivo de adquirir melhores respostas na aquisição dos mesmos, como otimizar o tempo de simulação e mudar as importâncias das partículas desejadas.

Neste trabalho foi utilizado o MCNP para a simulação da configuração da instalação para estudos em BNCT do IPEN e validá-la com os resultados experimentais realizados através das atividades de saturação dos detectores de ativação do tipo folha e em seguida propor um conjunto de moderadores que otimize as condições de irradiação, aumentando o fluxo de nêutrons térmicos e diminuindo as demais componentes do feixe.

A razão de se utilizar o MCNP no trabalho deveu-se à possibilidade de conseguir representar detalhadamente a instalação para estudos em BNCT permitindo avaliar os efeitos de cada estrutura na formação do campo de irradiação e a partir de simulações de diferentes configurações de irradiação otimizar o arranjo de filtros e moderadores que deve ser utilizados na instalação, para que posteriormente esses componentes sejam aplicados na instalação física.

Através da representação geométrica da instalação utilizada foi possível realizar as simulações para verificar o tempo de simulação necessário para cada mudança efetuada em seu arquivo de entrada, tanto nos testes iniciais para entendimento do que ocorria nos erros de simulação quanto na verificação do número de partículas que chegava até a posição de irradiação de amostras, foi assim que verificou-se a necessidade de otimizar o tempo de simulação e de realizar melhorias no arquivo de entrada a fim de se obter melhores resultados.

Como padrão as respostas obtidas pelo MCNP são normalizadas pelo número de histórias das partículas e são dispostas no arquivo de saída como erro relativo. Esse erro é um número que representa a precisão estatística dos resultados em

relação à média estimada e pode ser representado por duas componentes, o R_{int} que está relacionado à distribuição dos valores amostrados e o R_{eff} que leva em conta a eficiência de amostragem, ou melhor, relacionado à ineficiência da amostragem, pois está relacionado às histórias de partículas com contribuição nula para o estimador.

Na metodologia usada para uso do MCNP fez-se necessário uma boa interpretação do arquivo de saída que levou em conta, inicialmente, a FOM (*Figure of Merit*) [26]. A princípio, quando o processo de amostragem ocorre com boa eficiência o valor da FOM deve ser alto, já no caso do valor ser baixo, representa uma ineficiência na amostragem que deve ser corrigida para que possa melhorar a contribuição da FOM, portanto quanto maior o valor da FOM, melhor é a eficiência na amostragem e menores estarão às incertezas relacionadas à amostragem.

A FOM é um dos testes estatísticos que o MCNP apresenta para cada *tally*, apresentando, uma tabela da variação do valor de FOM ao longo da simulação. Para aceitação do resultado desse teste estatístico, a FOM deve ser constante durante a segunda metade da simulação, o que significa que o espaço de fase está sendo devidamente amostrado, de acordo com a Equação 8 abaixo, onde R é a incerteza relativa estimada, T é o tempo computacional e P o número de partículas simuladas.

$$FOM = \frac{1}{P^2 T} \quad \text{Equação 8}$$

Onde,

$R = k.P^{-2}$ (incerteza é inversamente proporcional ao quadrado do número de partículas simuladas) e

$T = k'.P$ (tempo de simulação é proporcional ao número de partículas simuladas).

Portanto para uma dada simulação $FOM = 1/k.k' = \text{cte.}$

Para obtenção de resultados melhores nas simulações buscou-se obter valores de FOM maiores, pois quanto maior a FOM, maior a eficiência na amostragem dos eventos de interesse e consequentemente, a obtenção de resultados estatisticamente mais precisos por unidade de tempo de simulação. Uma forma de aumentar a FOM é aumentar o número de partículas na região de interesse (região de irradiação de

amostras), ou seja, fazer com que o tempo de simulação seja priorizado no acompanhamento das histórias que efetivamente contribuam na avaliação do resultado solicitado, i.e com as partículas que amostram os eventos de interesse, deixando de perder tempo com a simulação de partículas que não contribuirão na avaliação da grandeza de interesse. Para tal realização, o MCNP disponibiliza um conjunto de ferramentas conhecido como Métodos de Redução de Variância, que busca aumentar o número de eventos desejáveis sem o aumento do número de histórias ou do tempo de simulação. Os métodos de redução de variância baseiam-se na imposição de cortes ou a partir de amostragens direcionadas. Estas ferramentas possibilitam a utilização de diversas estratégias de otimização da simulação, na busca por diminuição do tempo de simulação versus resultados com boa estatística.

No nosso caso, ocorre uma perda enorme de partículas entre a fonte de nêutrons (reator) e a superfície correspondente à parede interna da piscina. O MCNP usa boa parte do seu tempo de simulação para acompanhar a história dessas partículas que não contribuirão para o cálculo da grandeza de interesse (cálculo de fluxo de nêutrons na região de irradiação de amostras), por isso a necessidade de diminuir o tempo gasto com essas partículas sem importância se faz necessário. Um dos métodos que podemos usar é o *Weight Window Generator* (WWG), onde é possível aumentar as importâncias das partículas nas áreas de interesse, que são as áreas onde as partículas contribuem com o resultado do *tally*, e diminuir as importâncias das partículas nas áreas indesejadas, portanto esse método otimiza a amostragem das partículas nas áreas de interesse. O WWG verifica por amostragem qual a contribuição de uma célula na formulação do resultado final, ou melhor, o WWG gera um arquivo de saída, o arquivo WWN, que é um arquivo de importância das células, cujos valores são estimados por suas contribuições na formulação do resultado final.

4.2. Procedimentos Experimentais

Nesta seção são apresentados os materiais e métodos utilizados para realização experimental do trabalho.

4.2.1. Detectores de Ativação do Tipo Folha

Os detectores de ativação utilizados nas irradiações foram os do tipo folhas metálicas circulares, a fim de conseguir estimar o campo de nêutrons existente na instalação. Cada folha é pesada antes das irradiações. Nas irradiações as folhas de ativação são colocadas no porta-amstras que é levado até a posição de irradiação de amostras e irradiadas por um determinado intervalo de tempo, já que os tempos de irradiação e leitura variam conforme o tipo de material da folha devido suas características (seção de choques, meia-vidas e massa da folha).

A princípio escolheu-se utilizar as folhas de ouro hiper-puro (^{197}Au) que possuem dimensões de $(1 \pm 5\%)$ cm de diâmetro e $(0,0013 \pm 1\%)$ cm de espessura.

O ^{197}Au foi escolhido devido à característica de sua seção de choque de interação com nêutrons, apresentando respostas intensas para nêutrons térmicos e epitérmicos, o que ajuda na caracterização das componentes térmicas e epitérmicas do feixe, caracterização que só pode ser feita através do uso da cobertura de Cádmio, como pode ser visto através da seção de choque na Figura 4.

Figura 4 - Curvas de seção de choque total. Vermelho: $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$; Verde: $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$ [38].

Quando irradiadas duas folhas de ^{197}Au nas mesmas condições, a diferenciação das componentes térmicas e epitérmicas pode ser obtida com o uso de uma cobertura de cádmio usada em uma das folhas (Técnica da Razão de Cádmio). A cobertura de cádmio absorve a componente térmica do feixe deixando passar principalmente a componente epitérmica enquanto a folha que se encontra nua, sem a cobertura de Cd, sofre interação das duas componentes do feixe, fato que pode ser observado através das curvas de seções de choque total do Cádmio, com e sem a cobertura de Cd exibida na Figura 4.

Na Figura 5 é possível visualizar uma folha de ativação de ^{197}Au e as 2 caixas cilíndricas que formam a cobertura de cádmio, que encapsula a folha de ouro. Na Figura 6 é possível ver uma folha de ^{197}Au inserida dentro de uma das caixas cilíndricas que compõe a cobertura de cádmio. Para o completo encapsulamento da folha de ouro, a outra caixa cilíndrica deve se sobrepor à primeira.

Figura 5 – Folha de ^{197}Au e cobertura de cádmio (2 partes) vazia utilizadas neste trabalho

Figura 6 – Folha de ^{197}Au posicionada dentro da cobertura de Cádmio

Com a intenção de caracterizar energeticamente outras regiões do feixe de irradiação na posição de irradiação de amostras, usou-se outros materiais; ^{46}Sc , ^{56}Mn , ^{63}Cu , $^{115\text{m}}\text{In}$ e ^{187}W . A escolha por estes materiais pautou-se nas curvas de seções de choque, no valor das meia-vidas e na facilidade de detecção do fotopico

característico dos produtos de ativação. A Tabela 1 e as Figura 7 (a - f) apresentam resumidamente estas informações.

Tabela 1 – Materiais usados como folhas de ativação e suas respectivas características.

Material	Energia do Fotopico Principal (keV)	Energia de Ressonâncias (eV)	Meia-Vida	Reação
^{115}In	1097,29	1,457	54,15 m	$^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$
^{197}Au	411,8	5	2,70 d	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$
^{186}W	479,57	18	23,9 h	$^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$
^{55}Mn	1810,72	340	2,58 h	$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$
^{63}Cu	511	580	12,7 h	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$
^{45}Sc	889,28	5000	83,81 d	$^{45}\text{Sc}(n, \gamma)^{46}\text{Sc}$

Após a irradiação das folhas, as atividades induzidas nas mesmas foram medidas num sistema de espectrometria gama para a obtenção das taxas de contagem dos fotopicos gama característicos para posterior cálculo das atividades de saturação e fluxos.

Figura 7 – Seções de choque total para nêutrons do ^{197}Au ; ^{45}Sc ; ^{55}Mn ; ^{63}Cu ; ^{115}In e ^{186}W .

4.2.2. Técnica da Razão de Cádmiu

Especificamente para BNCT, as principais componentes do feixe útil, componentes térmica e epitérmica do feixe de nêutrons, são quantificadas com propriedade usando-se a razão de cádmio.

Essa técnica é usada para determinação do fluxo térmico e epitérmico, utilizando folhas de ativação. As folhas de ativação devem ser irradiadas nas mesmas condições, porém uma folha de ativação estará coberta com cádmio e a outra estará “nua” (sem a cobertura de cádmio) [31]. O cádmio possui alta seção de choque de

absorção na região térmica, como visto na Figura 4, e é utilizado como absorvedor de nêutrons térmicos, portanto a folha de ativação que estiver coberta por cádmio sofrerá principalmente reações devido aos nêutrons epitérmicos.

Os fluxos de nêutrons térmicos e epitérmicos são obtidos fazendo a razão entre as atividades induzidas nas folhas de ativação com e sem cobertura de cádmio.

A razão de cádmio para detectores de massas diferentes pode ser expressa pela seguinte equação [30]:

$$R_{Cd} = \left[\frac{A_{nua}^{\infty}}{A_{Cd}^{\infty}} \right] \frac{m_{Cd}}{m_{nua}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde,

R_{Cd} é a razão de cádmio,

A_{nua}^{∞} é a atividade de saturação da folha nua,

m_{Cd} é a massa da folha de Au coberta com Cd,

A_{Cd}^{∞} é a atividade de saturação da folha coberta com cádmio e

m_{nua} é a massa da folha de Au sem o Cd.

A Eq. 9 somente é válida para folhas infinitamente diluídas (1% Au – 99% Al).

A razão de cádmio para folhas hiperpuras (99% Au) pode ser calculada através da Equação 10, apresentada abaixo [30]:

$$R_{Cd} = \left[\frac{A_{nua}^{\infty}}{A_{Cd}^{\infty}} \frac{G_{ep}}{G_t} + F_{Cd} \left(1 - \frac{G_{ep}}{G_t} \right) \right] \frac{m_{Cd}}{m_{nua}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

G_{ep} é o fator de auto-blindagem para nêutrons epitérmicos,

G_t é o fator de auto-blindagem para nêutrons térmicos e

F_{Cd} é o fator de cádmio.

O efeito de auto-blindagem ocorre devido à atenuação do fluxo neutrônico das camadas externas da folha de ativação para as internas, provocando uma distribuição de fluxo diferente em cada região da folha, tendo como consequência uma diminuição na ativação da folha causada pela depressão do fluxo neutrônico em seu interior [30].

O fator de cádmio (F_{Cd}) depende da espessura da camada de cádmio utilizado como cobertura de cádmio e das características do detector utilizado, e restaura a contribuição devido aos nêutrons epitérmicos absorvidos pelo cádmio.

Os fatores de auto-blindagem para nêutrons epitérmicos e térmicos, assim como o fator de cádmio, são parâmetros que são avaliados através do MCNP.

4.2.3. Espectrometria Gama

A espectrometria gama das folhas é feita através de um sistema de detecção constituído por um detector semicondutor de germânio hiper puro, fonte de alta tensão, amplificador, multicanal que é acoplado a um computador, onde um programa específico, MAESTRO [39], faz o controle de aquisição de dados e possibilita a análise dos mesmos, mostrando o espectro obtido na tela do computador e com isso seleciona-se o fotopico para a análise a partir da sua identificação energética.

Antes da realização das contagens das folhas de ativação é necessária a realização da calibração do sistema de contagens. Essa calibração é realizada utilizando-se duas fontes com fotopicos característicos bem definidos, ^{137}Cs (661 keV) e ^{60}Co (1173 e 1332 keV). Calibração que poderia ter sido efetuada com outras fontes radioativas diferentes, porém escolheu-se utilizar o ^{137}Cs e ^{60}Co devido aos seus fotopicos característicos serem muito bem definidos.

Após a realização da calibração também é necessário fazer uma curva de eficiência global de detecção do sistema. A eficiência do sistema deve ser feita com intuito de obter resultados absolutos da detecção de radiação visto que a maioria dos sistemas de detecção não consegue captar toda a radiação emitida pela fonte em questão. A eficiência em função da energia de um sistema de detecção é definida como

a razão entre o número de contagens (descontado o BG – *background*) com determinada energia pelo número de partículas emitidas pela fonte com a mesma energia. Assim, se o número de contagens for igual ao número de partículas emitidas pela fonte em um intervalo de tempo a eficiência de detecção será 100%.

Para cálculo da curva de eficiência global de detecção do sistema utilizamos uma fonte padrão de ^{152}Eu de $13,3 \pm 0,6$ kBq (13 de Abril de 1991), colocada na terceira bandeja do detector (pois seria bandeja utilizada ao longo de toda a pesquisa) que emite fótons com energias bem definidas que vão desde 121 keV até 1769 keV, e a Equação 11 [31]. Para contagem de outros tipos de folha de ativação existe a possibilidade de alteração da bandeja do detector, podendo deixar a bandeja mais próxima ou mais distante do detector, assim ocorre alteração na eficiência global de detecção que deve ser recalculada.

$$\varepsilon(E) = \frac{C(E)e^{\lambda_e}}{A.I(E).LT} \quad \text{Equação 11}$$

Onde,

$\varepsilon(E)$ é a eficiência global do sistema para detecção de fótons com energia E ,

$C(E)$ é a contagem líquida do fotopico de energia E (descontando o BG) obtida na espectrometria gama;

t_e é tempo decorrido entre o calibração da fonte e o início da contagem;

λ é a constante de decaimento da fonte de calibração,

A é a atividade nominal da fonte no momento de sua calibração,

$I(E)$ é probabilidade de emissão do fotopico característico de energia E

LT (Tempo Vivo) é o intervalo de tempo de detecção descontando o tempo em que o sistema esta ocupado na aquisição e no processamento de sinais.

Com os pontos da curva de eficiência ajusta-se uma função, no caso o melhor ajuste obtido foi o de potência, como pode ser visto na Figura 8, que permite estimar o valor de eficiência referente a cada valor de energia.

Figura 8 – Curva de Eficiência de detecção utilizando a fonte de ^{152}Eu .

A curva de eficiência adotada na caracterização do sistema de detecção foi obtida pelo conjunto de dados apresentados na figura acima e é dada por:

$$\varepsilon(E) = 0,1122 \cdot E^{-0,785}$$

4.2.4. Fluxos Térmico e Epitérmico

No cálculo dos fluxos de nêutrons térmicos e epitérmicos são utilizadas as Equações 12 e 13 repectivamente:

O fluxo de nêutrons térmicos é obtido por [31]:

$$\varphi_t = \frac{A_{nua}^{\infty}}{dN\sigma_{act}k_t} \left(1 - \frac{F_{Cd}}{R_{Cd}} \right) \quad \text{Equação 12}$$

Onde,

φ_t é o fluxo de nêutrons térmicos,

A_{nua}^{∞} é a atividade de saturação da folha nua,

dN é o número de núcleos contidos na amostra,

σ_{act} é a seção de choque microscópica média de ativação,

k_t é o fator de perturbação do fluxo térmico,

F_{Cd} é o fator de cádmio e

R_{Cd} é a razão de cádmio.

E o fluxo de nêutrons epitérmico é obtido por [31]:

$$\varphi_{ep} = \frac{A_{nua}^{\infty} F_{Cd}}{N_t I_R^{\infty} R_{Cd} k_{ep}} \mu \quad \text{Equação 13}$$

Onde,

φ_{ep} é o fluxo de nêutrons epitérmicos,

I_R^{∞} é a integral de ressonância,

k_{ep} é o fator de perturbação do fluxo epitérmico e

μ é o logaritmo da razão da energia máxima considerada no sistema, definida pela energia de ressonância dividida pela energia de corte do cádmio.

Devido a seção de choque variar bruscamente com a energia e a distribuição dos nêutrons epitérmicos nesse caso, não respeita mais uma distribuição determinada, o valor do fluxo de nêutrons epitérmicos pode ser aproximado por uma constante chamada de Integral de ressonância (I_R^{∞}).

O Fator de Cádmio (F_{Cd}) está diretamente ligado à espessura do Cádmio utilizado como cobertura das folhas de ativação e das características do detector ativado, que restaura a contribuição devido aos nêutrons epitérmicos absorvidos pelo Cádmio [30].

4.3. Razão Espectral

Para que fosse possível a comparação do feixe de irradiação entre diferentes instalações onde se desenvolvem estudos em BNCT excluindo-se uma das variáveis que apresenta-se como a maior fonte de erro sistemático no cálculo do fluxo de nêutrons, as seções de choque média de ativação, que variam conforme o valor do fluxo de nêutrons incidente, foi utilizado o conceito de razão espectral [16].

Com os resultados devidamente calculados das atividades de saturação das folhas de Au subtraiu-se o valor da atividade de saturação da folha coberta com cádmio (A_{Cd}^{∞}) da folha nua (A_{nua}^{∞}). Esse valor foi chamado de atividade de saturação térmica (A_{th}^{∞}). Portanto:

$$A_{th}^{\infty} = A_{nua}^{\infty} - A_{Cd}^{\infty} \quad \text{Equação 14}$$

A A_{th}^{∞} foi usada como parâmetro na obtenção da razão de atividade de saturação para todas as outras folhas de ativação de materiais diferentes irradiadas. Ou seja, após o cálculo das atividades de saturação das outras folhas, o valor encontrado foi dividido por A_{th}^{∞} e essa razão foi chamada de razão espectral. Sendo, portanto:

$$RE = \frac{A_x^{\infty}}{A_{th}^{\infty}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde,

RE é a razão espectral,

A_x^{∞} é a atividade de saturação da folha escolhida e

A_{th}^{∞} é a atividade de saturação térmica.

Usando a definição de razão espectral excluiu-se a dependência da seção de choque que existia quando se comparavam os resultados através dos fluxos térmico e

epitérmico. Portanto com o uso da razão espectral para comparação de resultados entre diferentes instalações de pesquisa em BNCT ocorre a exclusão de um problema, deixando o resultado com valor bruto, diminuindo incertezas nos resultados apresentados. Excluindo-se a dependência da seção de choque, que varia conforme o espectro de nêutrons para cada instalação, os resultados podem ser comparados entre si.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentadas as descrições dos experimentos e das simulações realizadas ao longo deste trabalho. Os resultados e discussões de cada etapa são apresentados em seguida a sua exposição.

5.1. Monitoração do feixe (Experimental)

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais realizados na instalação para estudos em BNCT junto ao reator IEA-R1 com o uso dos detectores de ativação (folhas de ativação).

5.1.1. Monitoramento do fluxo de nêutrons faixas de energia

O objetivo é monitorar o fluxo de nêutrons na posição anterior e posterior do porta-amstras sendo a parte central do porta-amstras a posição em que as amostras são colocadas. Assim quando alguma amostra for irradiada é possível monitorar e comparar os resultados das atividades de saturação com o porta-amostra (cesta) sem amostra e com as amostras.

A Figura 9 mostra o porta-amostra usado nas irradiações do monitoramento do fluxo de nêutrons em duas bandas de energia. O porta-amostra é feito de acrílico, possui 15 cm de comprimento, possui uma base plana para posicionamento da amostra, uma haste na porção superior para que possa ser manipulada pela garra de movimentação e ser levada até o suporte do porta-amostra, que também é feito de

acrílico, presente na cavidade de posicionamento do porta-amostra, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 9 – Porta-amostras de acrílico utilizado nas irradiações.

Figura 10 – Porta-amostra inserido na cavidade.

Tendo em vista que o posicionamento das amostras é sempre no meio do porta-amostra, a monitoração do feixe de nêutrons da parte anterior do porta-amostra não sofreria interferência, porém as atividades de saturação das folhas de ativação da parte posterior do porta-amostra sofreriam interferência devido ao tipo de amostra que se encontra sendo irradiada. Dependendo da composição e espessura da amostra, o feixe sofre uma maior ou menor perturbação e, portanto, na posição posterior do porta-amostra ocorre uma mudança na atividade de saturação.

Nesta etapa foram irradiados dois pares de folhas de ouro por vez, um par na posição frontal da posição do porta-amostras e outro par na parte traseira, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Esquema da vista superior da instalação em para estudos em BNCT do Reator IEA-R1 com a indicação do posicionamento das folhas de ativação para monitoração do feixe de irradiação.

Esta configuração, onde sempre dois pares de folhas são irradiadas, um par na posição frontal, onde a folha nua se posicionava a direita e a folha coberta com cádmio a esquerda, e outro na parte traseira do porta-amostra, onde agora as folhas se posicionavam ao contrário das folhas da posição frontal, foi chamada de Configuração Padrão, lembrando-se que, em cada posição, uma folha de ouro está coberta com cádmio e outra está nua (sem a cobertura de cádmio) e também que sempre existe a alternância no posicionamento das folhas em relação as folhas da posição frontal. Esta configuração foi adotada para comparações e monitoramento dos valores de atividades de saturação e fluxos quando realizam-se experimentos na instalação. Portanto foram realizadas várias irradiações nessa configuração padrão para que as atividades de saturação pudessem ser medidas e verificar se a diferença entre a atividade das folhas da frente e as folhas de trás, indicando a variação na intensidade do fluxo de nêutrons.

A Tabela 2 apresenta os resultados das atividades de saturação obtidos em experimentos realizados em dias diferentes.

Tabela 2 - Atividades de saturação por núcleos alvo das folhas irradiadas na Configuração Padrão.

Número da Irradiação	Frente	Atrás		
	Asat Nuas (dps)*	Asat Cd (dps)*	Asat Nuas (dps)*	Asat Cd (dps)*
1	1,08(04)x10 ⁶	1,60(06)x10 ⁵	5,28(19)x10 ⁵	7,93(33)x10 ⁴
2	1,11(04)x10 ⁶	1,61(06)x10 ⁵	5,58(20)x10 ⁵	8,17(34)x10 ⁴
3	1,18(04)x10 ⁶	1,69(08)x10 ⁵	5,45(21)x10 ⁵	8,87(46)x10 ⁴
4	1,35(05)x10 ⁶	1,90(08)x10 ⁵	6,27(24)x10 ⁵	9,63(49)x10 ⁴
5	1,15(05)x10 ⁶	1,47(07)x10 ⁵	5,76(29)x10 ⁵	8,82(46)x10 ⁴
6	1,35(02)x10 ⁶	1,65(08)x10 ⁵	5,15(20)x10 ⁵	8,55(45)x10 ⁴
7	1,19(04)x10 ⁶	1,74(08)x10 ⁵	6,77(25)x10 ⁵	9,16(46)x10 ⁴
8	1,29(05)x10 ⁶	1,75(08)x10 ⁵	5,70(22)x10 ⁵	8,88(46)x10 ⁴
9	1,32(05)x10 ⁶	1,61(08)x10 ⁵	5,17(21)x10 ⁵	8,26(47)x10 ⁴
10	1,33(05)x10 ⁶	2,06(10)x10 ⁵	6,36(27)x10 ⁵	1,03(70)x10 ⁵
11	1,34(05)x10 ⁶	1,85(08)x10 ⁵	6,10(24)x10 ⁵	9,31(51)x10 ⁴
12	1,18(04)x10 ⁶	1,67(08)x10 ⁵	5,86(22)x10 ⁵	8,96(48)x10 ⁴

*Incertezas relacionadas às atividades de saturação foram calculadas conforme procedimento apresentado no ANEXO A.

Com as atividades de saturação calculadas é possível verificar que, na posição frontal das irradiações, as atividades de saturação são maiores em relação às atividades das posições traseiras. Isso era de se esperar, já que existe uma distância (15 cm) entre as duas posições e o feixe perde intensidade conforme a distância aumenta. As atividades de saturação das folhas posicionadas na parte traseira do porta-amostra caem em torno de 50% em relação aos valores das folhas frontais.

Sintetizando os dados da Tabela 2 em uma nova tabela (Tabela 3), fica mais fácil a observação da afirmação feita no parágrafo anterior, onde verifica-se o maior valor nas atividades de saturação das folhas na posição frontal em relação às atividades de saturação das folhas na posição traseira.

Tabela 3 – Média das Atividades de saturação por núcleos alvo das folhas irradiadas na Configuração Padrão.

Frente		Atrás	
Asat Nuas (dps)*	Asat Cd (dps)*	Asat Nuas (dps)*	Asat Cd (dps)*
$(1,24 \pm 0,01) \times 10^6$	$(1,68 \pm 0,02) \times 10^5$	$(5,73 \pm 0,05) \times 10^5$	$(8,88 \pm 0,07) \times 10^4$

5.1.2. Perfil do Fluxo de Nêutrons

O objetivo dessa parte da pesquisa foi caracterizar o perfil do fluxo de nêutrons para verificar como o perfil do fluxo variava ao longo de todo o porta-amostra.

Nessa etapa foi utilizado um porta-amostra nas mesmas dimensões do porta-amostra de acrílico, porém feito de isopor, material que possui menor densidade (Figura 12).

Figura 12 – Porta-amostra confeccionado de isopor com as mesmas dimensões do porta-amostra de acrílico. A haste superior é construída em madeira e serve como suporte para a garra do sistema de movimentação da amostra.

No novo porta-amostra foi colocado quatro blocos de isopor, de aproximadamente $(2,5 \times 2,5 \times 7) \text{ cm}^3$ (Figura 13), e colocar um par de folhas entre cada bloco e nas extremidades anterior do primeiro bloco (A1) e posterior do último (A4), com isso foi possível irradiar cinco pares de folhas ao mesmo tempo. Essa configuração foi chamada de Configuração Perfil. O objetivo de mensurar as atividades de saturação com essa configuração foi verificar como o perfil do fluxo de nêutrons variava nas cinco posições ao longo do porta-amostras.

Figura 13 – Visualização lateral dos quatro blocos de isopor e de seus posicionamentos no porta-amostras de isopor.

Com a utilização da configuração perfil foi possível verificar a variação das atividades de saturação (A^∞) por bloco, como pode ser visto nas Figura 14 e Figura 15, onde a Figura 14 apresenta a variação das atividades de saturação das folhas nuas e a Figura 15 a variação das atividades de saturação das folhas cobertas com cádmio.

As médias dos valores das atividades de saturação para as folhas nuas e cobertas com cádmio foram calculadas. A Figura 16 apresenta estes resultados além das curvas ajustadas.

Tanto para a Figura 14 quanto para a Figura 15, a variação foi calculada em relação ao primeiro bloco, portanto as variações foram calculadas pela normalização em relação ao primeiro bloco. É possível ver na Figura 14 que a última irradiação, realizada no dia 31/12/2012, mostrou maior variação em relação às outras, isso se deve ao posicionamento das folhas que por sua vez podem ter mudado de posição ao serem colocadas na posição de irradiação de amostras. O mesmo é notado na Figura 15 para a mesma irradiação.

Figura 14 - Variação das atividades de saturação das folhas nuas por bloco.

Figura 15 - Variação das atividades de saturação das folhas cobertas com cádmio por bloco.

Figura 16 - Média calculada das atividades de saturação para as folhas nuas e cobertas com cádmio pelas distâncias entre os blocos.

Quando foram comparados os resultados entre as atividades de saturação nas configurações padrão e perfil, foi possível notar uma pequena variação nas atividades de saturação, onde as atividades de saturação para a configuração perfil são maiores nas posições frente e atrás da cesta do que as da configuração padrão, isso se deve ao material de confecção das cestas. A densidade do acrílico é maior do que a densidade do isopor interferindo no feixe. Porém essa variação é muito pequena e não tem importância significativa tendo em vista a dificuldade de confeccionar-se e manusear-se o suporte de isopor.

5.1.3. Configuração Bloco por Bloco (Perturbação do Fluxo de Nêutrons)

Utilizando a nova cesta feita de isopor foi realizada uma nova irradiação, a fim de verificar a perturbação que as folhas exercem uma nas outras. Este arranjo foi nomeado de configuração bloco por bloco. Nessa configuração foram irradiadas, por 10 minutos, cinco pares de folhas, uma por vez e em posições diferentes da cesta. Essas irradiações foram realizadas para compararmos as atividades de saturação desta

configuração com as obtidas pela configuração perfil. Esta irradiação foi realizada no mesmo dia por 10 minutos, onde todos os pares de folhas foram irradiados simultaneamente. Os valores das atividades de saturação de cada par de folhas irradiado individualmente, é apresentado na Tabela 4 juntamente com os respectivos valores obtidos pela configuração perfil. As figuras 17 e 18, apresentadas a seguir, permitem a comparação das alterações observadas nas estimativas de atividade de saturação para as folhas de Au nuas e, cobertas por Cd. Para o ajuste da intensidade relativa das figuras 17 e 18, os valores estimados da atividade de saturação do par de folhas posicionado na face anterior do bloco um foram utilizados como referência, portanto a intensidade relativa foi calculada pela normalização em relação ao primeiro bloco. Essa escolha foi feita devido ao fato de saber-se que a atividade de saturação do primeiro bloco é maior que as atividades de saturação dos blocos posteriores.

Tabela 4 - Atividades de saturação por núcleos alvo das folhas irradiadas nas 2 configurações.

Posição	Atividades de Saturação (dps)			
	Configuração Perfil		Configuração Bloco por bloco	
	Folhas Nuas	Folhas com Cd	Folhas Nuas	Folhas com Cd
1	$9,17(34) \times 10^5$	$1,48(68) \times 10^5$	$9,72(36) \times 10^5$	$1,61(73) \times 10^5$
2	$7,65(29) \times 10^5$	$1,34(64) \times 10^5$	$8,48(32) \times 10^5$	$1,41(65) \times 10^5$
3	$6,61(25) \times 10^5$	$1,11(55) \times 10^5$	$7,19(27) \times 10^5$	$1,12(57) \times 10^5$
4	$5,65(22) \times 10^5$	$9,35(47) \times 10^4$	$5,72(22) \times 10^5$	$9,97(50) \times 10^4$
5	$4,90(19) \times 10^5$	$8,60(45) \times 10^4$	$5,42(21) \times 10^5$	$8,87(46) \times 10^4$

Figura 17 - Comparação entre as variações de atividade de saturação das folhas nuas obtidas pelas 2 configurações de irradiação.

Figura 18 - Variação entre as atividades de saturação das folhas de ouro cobertas com cádmio para cada posição dos blocos irradiadas em 2 configurações diferentes.

Analisando a Tabela 4, as Figura 17 e Figura 18 foi possível verificar que na configuração bloco por bloco as atividades de saturação (A^∞), tanto para as folhas nuas quanto para as folhas com cádmio, foram maiores, isso devido à menor

perturbação no campo de nêutrons exercida pelas folhas de ouro e pelas coberturas de cádmio.

5.1.4. Alteração do fluxo de nêutrons com a adição de moderadores e refletores (parafina e polietileno)

Ao mesmo tempo em que foram adicionados os novos detectores de ativação foram feitas algumas mudanças nas configurações de irradiação da instalação, e elas foram:

- Primeira mudança: foram adicionados 8 cm de polietileno na parte traseira da posição de irradiação de amostras, com a finalidade de termalizar mais nêutrons levando-os para a faixa dos nêutrons térmicos e
- Segunda mudança: além dos 8 cm de polietileno adicionados na parte traseira da posição de irradiação de amostras adicionou-se mais 2,5 cm de polietileno na parte da frente da posição de irradiação de amostras e blocos de parafina na parte que é apoio do porta amostras, com o mesmo objetivo.

Essas adições de novos componentes para estudos na variação do feixe só foram possíveis, pois a suporte para posicionamento do porta-amostras possui cerca de 15 cm comprimento, enquanto a cavidade de irradiação de amostras, posição onde este suporte é fixado, tem cerca de 40 cm, permitindo que colocação de filtros a jusante (antes) e a montante (depois) do suporte.

A cada vez que foram irradiados os novos tipos de detectores de ativação também foram irradiadas as folhas de Au na configuração padrão e, portanto foi possível verificar se as mudanças realizadas no adicionamento de filtros na instalação provocaram também mudanças nos valores das atividades de saturação. A comparação foi feita usando as atividades das folhas de Au ainda sem adicionarmos nenhum filtro, com o acréscimo de 8 cm de polietileno na parte traseira da posição de irradiação de amostras e com um posterior acréscimo de 2,5 cm de polietileno na parte anterior da posição de irradiação de amostras e parafina abaixo do suporte do porta-amostras. Os

valores das atividades de saturação e fluxos para estas configurações de filtros/moderadores são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de atividades de saturação e fluxos de nêutrons calculados para as folhas de Au na configuração padrão quando ocorreram mudanças na configuração experimental dos filtros.

Configuração		Folhas da Frente		Folhas Atras	
		Nua	Cd	Nua	Cd
Normal	Atividades de Saturação (dps)*	1,18(44)x10 ⁶	1,67(46)x10 ⁵	5,86(22)x10 ⁵	8,96(48)x10 ⁴
	Φ_{th} (n/cm ² s)	2,50(17)x10 ⁸		1,24(95)x10 ⁸	
	Φ_{epit} (n/cm ² s)	6,53(45)x10 ⁷		3,56(27)x10 ⁷	
8cm de polietileno	Atividades de Saturação (dps)*	6,06(12)x10 ⁶	8,65(48)x10 ⁵	3,39(89)x10 ⁶	4,90(37)x10 ⁵
	Φ_{th} (n/cm ² s)	1,36(43)x10 ⁹		7,71(33)x10 ⁸	
	Φ_{epit} (n/cm ² s)	3,56(12)x10 ⁸		2,07(89)x10 ⁸	
8cm + 2,5cm + parafina	Atividades de Saturação (dps)*	3,69(15)x10 ⁶	5,45(72)x10 ⁵	1,62(11)x10 ⁶	3,06(64)x10 ⁵
	Φ_{th} (n/cm ² s)	8,49(10)x10 ⁸		3,56(41)x10 ⁸	
	Φ_{epit} (n/cm ² s)	2,28(29)x10 ⁸		1,29(15)x10 ⁸	

*Incertezas relacionadas às atividades de saturação foram calculadas conforme o ANEXO A.

Analisando os dados da Tabela 5 verifica-se que nas duas novas mudanças de configuração dos moderadores ocorreu aumento nos valores de atividade de saturação tanto para as folhas de ouro cobertas com cádmio quanto para as folhas de ouro nuas. Isto se deve ao polietileno que consegue diminuir a energia dos nêutrons rápidos aumentando o fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos.

Observa-se um aumento maior nas folhas traseiras quando se adicionou somente 8 cm na parte traseira da posição de irradiação. Esse aumento deve-se aos nêutrons que são refletidos pelo disco de polietileno, que voltam e atingem as folhas que se encontram na parte de trás do porta-amostra. O adicionamento do disco de 8 cm criou um *Neutron Flux Trap*, ou armadilha de nêutrons, que com as colisões dos nêutrons rápidos com os átomos de hidrogênio do polietileno funcionam como armadilhas, impedindo a fuga dos nêutrons rápidos aumentando o fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos na região.

Ao adicionar-se, além dos 8 cm na parte traseira, 2,5 cm de polietileno na parte frontal da posição de irradiação, o fluxo de nêutrons térmicos também aumenta, porém em menor quantidade em relação ao adicionamento de somente 8 cm na posição traseira, isso ocorre devido à redução do fluxo de nêutrons causado pela remoção dos nêutrons do feixe original, que é causado pelo disco de 2,5 cm de polietileno colocados na posição frontal.

Na configuração com somente 8 cm de polietileno na parte traseira da posição de irradiação ocorreu um aumento de aproximadamente 6 % no fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos nas folhas traseiras e de 5 % nas folhas frontais e na configuração com 8 cm e adicionalmente de mais 2,5 cm na parte frontal e parafina abaixo do suporte, ocorreu um aumento de 3 % no fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos nas folhas traseiras e de 3,5 % nas folhas frontais.

Através desse resultado conclui-se que o adicionamento do disco de 8 cm na parte de traz do porta-amostra aumenta o fluxo e portanto, a variação da espessura do material pode causar um aumento maior no fluxo e com isso melhoria no espectro energético na posição posterior da posição de irradiação de amostras.

5.1.5. Novo conjunto de folhas de ativação para comparação

Alguns estudos em BNCT na instalação do IEA-R1 têm como prioridade o aperfeiçoamento do feixe para fins experimentais. A necessidade de se conhecer o feixe proveniente do reator existe para que se possam mudar os filtros a fim de se obter, na posição de irradiação das amostras, o fluxo de nêutrons necessários dependendo da necessidade do tipo de experimento a ser realizado. Devido a isto, decidiu-se comparar os resultados de atividade de saturação de algumas folhas de ativação com os resultados experimentais de outras instalações [16].

Para que fosse possível a comparação da qualidade do feixe com outras instalações, optou-se pela utilização das mesmas folhas usadas no experimento de Pozzi et al. [16]. Foram usadas as folhas de ^{56}Mn , ^{63}Cu , ^{187}W e ^{198}Au . A atividade de saturação e a razão espectral foram utilizados como parâmetros de análise para a comparação entre outras duas instalações que realizam pesquisas na área de BNCT, os reatores RA3 e o MURR [16].

As folhas de ativação foram posicionadas seguindo a configuração padrão, na posição anterior e posterior do porta-amostra. Após a irradiação, as folhas de ativação foram analisadas por espectrometria gama para o cálculo das atividades de saturação de cada folha. Foram irradiadas duas folhas de Au (uma coberta com Cd e outra nua) e as outras folhas (Mn, Cu e W) foram irradiadas com a capa de Cd.

Através dos valores de atividade de saturação das folhas de Au foi realizado a subtração da atividade de saturação da folha de ouro nua (A_{nua}) da folha de ouro coberta com cádmio (A_{Cd}). Este valor foi chamado de atividade de saturação térmica (A_{th}). A A_{th} foi usada como parâmetro de cálculo na obtenção da razão espectral para todos os outros tipos de folhas irradiadas, i.e., o valor encontrado para as atividades de saturação de cada folha foi dividido por A_{th} . As razões espectrais obtidas na instalação para estudos em BNCT são apresentadas na Tabela 6 juntamente com os valores correspondentes às 2 instalações analisadas por Pozzi et al.[16]. Usando esta definição para calcular o razão espectral excluiu-se um dos grandes erros para comparação dos valores experimentais entre instalações diferentes, as seções de choque. O cálculo da razão espectral independe das seções de choque e por isto os valores comparados são valores brutos, o que é uma grande vantagem, pois assim, diminuem-se as fontes de erros sendo que as seções de choque variam com o espectro energético de cada instalação.

Tabela 6 – Valores das atividades de saturação e razões espectrais para 3 instalações para estudos em BNCT.

Energia	Instalação de BNCT			
		RA3	MURR	IEA-R1
	Atividade de Saturação			
Térmico	Au(n,γ) _{th}	9,78x10 ⁻¹³	8,04x10 ⁻¹⁴	1,06x10 ⁻¹³
	Razão Espectral			
5 eV	Au(n,γ) _{res} /Au(n,γ) _{th}	2,14x10 ⁻⁰⁴	8,06x10 ⁻⁰³	1,83x10 ⁻⁰¹
18 eV	W(n,γ) _{res} /Au(n,γ) _{th}	9,72x10 ⁻⁰⁵	4,97x10 ⁻⁰³	1,12x10 ⁻⁰²
340 eV	Mn(n,γ) _{res} /Au(n,γ) _{th}	3,85x10 ⁻⁰⁶	1,77x10 ⁻⁰⁴	1,71x10 ⁻⁰³
1 keV	Cu(n,γ) _{res} /Au(n,γ) _{th}	1,73x10 ⁻⁰⁶	8,62x10 ⁻⁰⁵	2,29x10 ⁻⁰³

A partir dos resultados apresentados na tabela acima, é possível verificar que o fluxo de nêutrons térmicos é da mesma ordem de grandeza das outras instalações,

apresentando um valor inferior ao apresentado no RA3 que é uma instalação construída junta à uma coluna térmica e ligeiramente superior ao fluxo do MURR, onde o campo de irradiação também é dado por um feixe.. Quanto aos índices espectrais observamos que a contaminação por nêutrons de energias mais altas é superior aquela encontrada nas outras instalações. Estes dados reforçam a necessidade de otimização do conjunto de moderadores utilizados na instalação para estudos em BCNT do IPEN, para a redução da energia do feixe de nêutrons.

5.2. Simulações

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelas simulações realizadas através do MCNP.

5.2.1. Validação e Propostas de Mudanças

Para a proposição de mudanças na configuração de filtros neutrônicos da instalação, a realização simulações com base nos experimentos realizados na instalação para estudos em BNCT apresenta-se com a metodologia mais eficiente.

De início, foi representada a geometria da instalação com todas suas composições de materiais, que compreende um cilindro que se estende da face do núcleo do reator, onde é definida a fonte superficial, até a parede externa da piscina (incluindo o bocal do BH).

Na Figura 19 é ilustrada a geometria gerada através do MCNP. Nesta figura existe uma enumeração onde: 1 - corresponde à superfície externa do núcleo do reator (plano onde se define a fonte de nêutrons), 2 – água da piscina do reator, 3 – BH (parte interna a piscina), 4 – posição dos filtros e moderadores do feixe de irradiação, 5 – posição de irradiação de amostras, 6 – blindagem externa (chumbo), 7 – Bocal do BH e 8 – parede da piscina do reator.

Figura 19 – Representação da geometria base gerada através do MCNP.

Em seguida realizaram-se algumas simulações variando algumas características para aquisição do arquivo de saída, a fim de obterem-se resultados onde fosse possível concluir a melhor forma para realização das simulações utilizando um tempo viável e também uma eficiência de cálculo melhor. O arquivo de entrada produzido para tais simulações encontra-se no ANEXO B deste trabalho.

A Figura 19 foi ampliada, na posição de irradiação de amostras, para mostrar a localização das células 921 e 928, onde foram calculados os fluxos de nêutrons através do MCNP. Na Figura 20, onde a representação da cavidade de irradiação apresenta-se ampliada em relação à figura anterior, pode-se observar com maior clareza a representação das regiões (células 921 e 928 da figura) onde foram calculados os fluxos de nêutrons nas simulações.

As células 921 e 928 têm o formato cilíndrico com as dimensões de 4 cm de espessura com 12,8 cm de diâmetro e buscaram representar os cilindros de polietileno utilizados como moderadores na parte experimental.

Figura 20 – Imagem ampliada da posição de irradiação de amostras.

5.2.2. Simulação com Importâncias Iguais

As importâncias são valores que atribuímos para cada unidade de volume (célula) representada na simulação. A partir da importância pode-se alterar os pesos estatísticos das partículas transportadas, alterando-se o processo de amostragem do espaço de fase sem alterar o resultado final. Numa primeira representação do sistema atribuíram-se importâncias para as partículas (nêutrons) iguais em todas as células utilizadas na representação da instalação. Com esse arquivo de entrada (input) foi efetuada a simulação do transporte de nêutrons onde foi usado o *tally* F4 para obtenção do fluxo de nêutrons na posição de irradiação de amostras simulada.

A simulação foi realizada com tempo computacional de 8.000 minutos e gerou os resultados apresentados na Tabela 7, que mostra os valores das estimativas de fluxo de nêutrons térmicos, obtidos através do *tally* F4 nas células 921 e 928 e da FOM.

Foi solicitado o fluxo de nêutrons nas células citadas para posterior comparação com o procedimento experimental e também para obtenção da FOM no cálculo do *tally* F4.

Tabela 7 - Fluxo de Nêutrons térmicos e valor da FOM gerados pelo MCNP.

Célula	Fluxo de Nêutrons Térmicos (n.cm ⁻² .partícula da fonte ⁻¹)	FOM
921	(9,24 ± 0,32)x10 ⁻⁰⁸	7,95x10 ⁻⁰²
928	(3,19 ± 0,12)x10 ⁻⁰⁸	

Analisando a Tabela 7 verificamos que na posição anterior da cavidade porta-amostra em sua posição de irradiação (célula 921) o fluxo de nêutrons térmicos, é maior que na posição na sua porção posterior (célula 928), assim como ocorre na parte experimental. A verificação do aumento do fluxo de nêutrons térmicos nas células 921 e 928 só foi possível, devido à distinção energética do fluxo de nêutrons feita no arquivo de entrada do MCNP, onde separou-se o fluxo de nêutrons em três partes (energia térmica, epitérmica e rápida). A FOM gerada no processo foi de valor pequeno devido à amostragem do sistema onde ocorre uma perda enorme de partículas entre a fonte de nêutrons (reator) e uma área localizada com o plano da parede interna da piscina. O baixo valor da FOM mostra a ineficiência no processo de amostragem, onde o MCNP gasta parte do tempo de simulação gerando essas partículas perdidas contribuindo para a diminuição no valor da FOM.

Apesar do baixo valor da FOM pode-se observar as incertezas relativas dos fluxos de nêutrons referentes as células 921 e 928 são de 3,5% e 3,8%, respectivamente, e são valores baixos tendo em vista o tempo de simulação usado.

O resultado da FOM do *tally* F4 indica qual o próximo passo a ser dado para que se possa aumentar o seu próprio valor dando importâncias às regiões de maior interesse na simulação.

5.2.3. Simulação com Importâncias Diferentes

Devido ao resultado extremamente baixo da FOM obtido na primeira simulação, escolheu-se mudar as importâncias dos nêutrons na geometria simulada, com isso foram selecionadas regiões mais próximas à posição de irradiação de amostras, dando maior importância para essas posições, pois as partículas geradas nelas podem

contribuir para uma maior amostragem de partículas e no resultado final do fluxo desejado, contribuindo para uma melhora no valor da FOM. Portanto para a posição de irradiação de amostras a importância para nêutrons foi maior por ser esta a região em que se deve obter uma melhor amostragem e nas demais regiões as importâncias escolhidas foram menores conforme a região se afastava da região de interesse.

As importâncias dadas são mostradas na Figura 21.

Figura 21 – Representação da geometria gerada pelo MCNP com as respectivas importâncias para nêutrons.

Com o arquivo de entrada alterado e com suas respectivas importâncias para nêutrons determinadas, foi realizada a simulação com o mesmo tempo computacional que a primeira simulação, 8.000 minutos, que foi mantido para uma comparação mais fácil dos resultados. O *tally* utilizado foi o F4, nas células 921 e 928, e através dele obtiveram-se os resultados do fluxo de nêutrons na posição de irradiação de amostras e do valor da figura de mérito para esse *tally*, valores que são exibidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores calculados do fluxo de nêutrons térmicos nas células 921 e 928 e valor da FOM obtidos para a geometria com importâncias diferentes.

Célula	Fluxo de Nêutrons Térmicos (n.cm ⁻² .partícula da fonte ⁻¹)	FOM
921	(9,23 ± 0,31) x10 ⁻⁰⁸	7,98x10 ⁻⁰²
928	(3,20 ± 0,12) x10 ⁻⁰⁸	

Com os resultados gerados pela simulação verificou-se um ligeiro aumento no valor da FOM, porém nada significativo, aumento de $0,03 \times 10^{-2}$, o que indica que outras medidas devem ser tomadas para que seja possível aumentar a amostragem nas posições de importância (posição de irradiação de amostras e regiões próximas). Nessa fase faz-se necessário recorrer a outro método de redução de variância, pois o método usado até agora, as alterações das importâncias, não foi eficiente. A intenção na introdução de outro método de redução de variância no caso é que seja possível aumentar o número de nêutrons nas regiões mais importantes com o objetivo de aumentar o valor da FOM sem a necessidade de aumentar o tempo de simulação.

5.2.4. Simulação com *Weight Window Generator*

No terceiro arquivo de entrada foi utilizado o cartão WWG (*Weight Window Generator*) que é um dos métodos de redução de variância disponível no MCNP. Foi escolhido utilizar esse tipo de redução de variância onde são criadas janelas de importâncias fazendo com que o tempo gasto com partículas simuladas, que não são importantes na região desejada, seja diminuído, dando ênfase na amostragem de eventos de interesse (fluxo de partículas nas regiões de interesse).

O método de redução de variância WWG possui vantagem em relação ao método utilizado anteriormente, variação de importâncias, pois indicando a região de interesse o método WWG enfatiza a amostragem de eventos dentro dessa região, privilegiando a simulação das partículas que contribuem com a melhora nos resultados, já o método de variação de importâncias somente consegue dar maior ênfase às regiões escolhidas, porém gasta parte do tempo de simulação com as partículas indesejadas geradas.

Além da inserção do cartão WWG nessa nova etapa, continuou-se utilizando o *tally* F4 para obtenção do fluxo de nêutrons e comparação da FOM desse *tally* com as demais simulações. Na Tabela 9 são exibidos os valores dos fluxos simulados e o valor da FOM para o tempo de simulação de 8.000 minutos. Novamente o tempo de simulação usado foi o mesmo, para facilitar a comparação dos resultados

finais, porém nesse caso, quanto maior o tempo de simulação melhor serão os valores obtidos no arquivo de saída.

Tabela 9 – Fluxo de Nêutrons térmicos e valor da FOM com o uso do cartão WWG.

Célula	Fluxo de Nêutrons Térmicos (n.cm⁻².partícula da fonte⁻¹)	FOM
921	$(9,16 \pm 0,33) \times 10^{-08}$	1,12x10 ⁻⁰¹
928	$(3,14 \pm 0,12) \times 10^{-08}$	

O input com o WWG incorporado, além de gerar um arquivo de saída como qualquer outra simulação, gera um arquivo de resposta com as importâncias que foram geradas (WWN). Tais importâncias geradas são incorporadas no próximo arquivo de entrada e a simulação é novamente efetuada, assim o cartão WWN incorporado dará ênfase na amostragem de eventos de interesse,. Após o término da simulação, mais um arquivo de saída será gerado, porém nesse novo output, o resultado solicitado (pelo *tally*) terá sua resposta de acordo com o cartão WWN adicionado, ampliando e dando importâncias para as partículas nas posições desejadas.

Os resultados obtidos com a incorporação dos resultados do arquivo WWN são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Fluxo de nêutrons térmicos e valor da FOM com a incorporação dos resultados gerados pelo cartão WWG com tempo de simulação de 8.000 minutos.

Célula	Fluxo de Nêutrons Térmicos (n.cm⁻².partícula da fonte⁻¹)	FOM
921	$(8,95 \pm 0,05) \times 10^{-08}$	4,36
928	$(3,12 \pm 0,03) \times 10^{-08}$	

Com os resultados gerados pelo WWG adicionados ao arquivo de entrada, obteve-se outro arquivo de saída onde o valor da FOM aumentou de forma significativa com um valor 40 vezes maior do que no caso anterior. Reforçando que o uso desse método de redução de variância é de suma importância para aprimoramento dos resultados e otimização do tempo de simulação.

5.2.5. Avaliação dos Filtros

Após as simulações para verificação do tempo de simulação, importâncias das partículas, redução de variância e conclusão de qual melhor forma para obtenção de melhores resultados nas simulações resolveu-se efetuar duas avaliações de mudanças de filtros na instalação.

As mudanças efetuadas tiveram como base, mais uma vez, o procedimento experimental realizado na instalação para estudos em BNCT, onde foram adicionados 8 cm de polietileno na parte posterior posição de irradiação de amostras (caso A), como mostra a Figura 22, e na segunda mudança foram adicionados (mantendo-se os 8 cm anteriores) 2,5 cm de polietileno na parte anterior da posição de irradiação de amostras, como mostra a Figura 23.

Figura 22 – Representação da adição de 8 cm de polietileno na parte posterior à posição de irradiação de amostras (caso A).

Figura 23 – Representação da adição de 2,5 cm de polietileno na parte anterior à posição de irradiação de amostras (caso B).

Como o uso do cartão WWG mostrou melhora significativa no aumento da FOM, o mesmo será usado nos casos A e B, sendo que é necessário simular os casos com o cartão WWG e em seguida, com a resposta gerada pela simulação o cartão WWN será incorporado no arquivo de entrada para que seja novamente simulado com as importâncias a serem geradas. O cartão WWN contém as estimativas de importâncias para células geradas pela simulação anterior sendo esse o cartão que indicará ao MCNP quais são as células pelas quais as partículas contribuem no resultado final, a partir da amostragem do evento de interesse, e que, portanto devem ter a amostragem privilegiada, i.e. importância maior. Portanto a inserção do cartão WWN faz com que o MCNP faça uma nova amostragem utilizando as partículas que realmente contribuem para um melhor resultado final, assim exclui-se a amostragem de partículas indesejadas na simulação.

Na Tabela 11 encontram-se os valores dos fluxos de nêutrons térmicos e FOM para cada caso, com e sem o cartão WWN.

Tabela 11 – Valores do Fluxo de Nêutrons térmicos calculados pelo MCNP e o valor da FOM para os casos A e B.

Fluxo de Nêutrons Térmicos (n.cm⁻².partícula da fonte⁻¹)			
	Célula 921	Célula 928	FOM
Caso A	$(7,17 \pm 0,26) \times 10^{-08}$	$(2,95 \pm 0,12) \times 10^{-08}$	$9,29 \times 10^{-02}$
Caso B	$(6,69 \pm 0,25) \times 10^{-08}$	$(2,93 \pm 0,14) \times 10^{-08}$	$5,38 \times 10^{-02}$
Caso A*	$(7,32 \pm 0,04) \times 10^{-08}$	$(2,91 \pm 0,02) \times 10^{-08}$	3,68

* Indica o caso onde houve uso do WWN.

O caso A foi simulado com o uso do WWN e o valor da FOM aumentou de $9,29 \times 10^{-2}$ para 3,68. Aumento justamente feito pelas importâncias dadas pelo método de redução de variância (WWG) onde os nêutrons são gerados pelas importâncias e não são oriundos da fonte. Verifica-se também que as incertezas nos valores dos fluxos de nêutrons, ou seja, a precisão estatística dos resultados gerados, tanto para a célula 921 quanto para a célula 928, são menores quando o uso do WWN é incorporado no arquivo de entrada do MCNP, o que conclui que a amostragem na região de interesse está sendo muito maior e quanto maior a amostragem melhor a estatística dos resultados.

6. CONCLUSÕES

Foram realizados diversos estudos com o objetivo de caracterizar o feixe de irradiação proveniente do BH#3 da instalação para estudos em BNCT junto ao Reator de Pesquisas IEA-R1.

Esta caracterização visou à realização de mudanças físicas nos filtros/moderadores localizados na parte interior do BH#3 com intuito de melhorar o fluxo na instalação de estudos em BNCT, tentando aumentar a componente térmica do feixe e ao mesmo tempo diminuir as componentes epitérmicas, rápidas e radiação gama.

De acordo com cada tipo de folha de ativação, cada tipo de material, a demanda de irradiações e leituras diferentes para cada tipo, pode-se aprimorar os conhecimentos e aprendizado relacionados às mesmas. Quando a folha possuía alta seção de choque e meia-vida curta, o tempo de irradiação podia ser menor, pois se a folha ficasse muito tempo exposta ao feixe de irradiação, ela atingiria sua atividade de saturação rapidamente e na hora de aquisição de suas contagens, como a folha estaria

com uma atividade muito alta a mesma causaria um aumento no tempo morto do detector, dificultando sua leitura, portanto deve-se ficar atento as seções de choque e meias-vidas de cada material. Algumas folhas possuíam meia-vidas muito curtas o que dificultava sua contagem, por isso foram escolhidas folhas que possuíam meia-vidas com tempo razoavelmente mensurável (de 5 minutos a alguns dias de meia-vida) já que perdia-se tempo entre retirar as folhas da posição de irradiação até chegar ao detector de HPGe onde foram realizadas as respectivas espectrometrias gama das folhas irradiadas.

Algumas outras dificuldades em relação às folhas de ativação foram encontradas no decorrer da pesquisa para conseguir caracterizar o feixe de irradiação da instalação de BNCT, assim como, mais uma vez, a meia-vida de outros tipos de folha. Desta vez a meia-vida muito longa é que atrapalharia as medidas. Algumas das folhas possuíam meia-vida de mais de 80 dias, portanto para usá-las era necessário fazer uma leitura de sua atividade antes de irradiá-las e após a irradiação, mais uma vez, foi realizada a espectrometria gama, descontado-se a contagem obtida antes da irradiação.

A cesta de acrílico continua sendo mais utilizada do que a cesta feita com isopor, pois a variação dos resultados das atividades de saturação não demonstraram ser muito grandes e também por ter maior resistência mecânica o que facilita o seu manuseio.

Adicionar polietileno e parafina na posição de irradiação de amostras (na frente e atrás) causou aumento nas atividades de saturação mostrando que os mesmos podem ser mais bem estudados em suas dimensões e composições. Posteriormente pode-se usar novos materiais com tamanhos diferentes. E é aqui que as simulações, através do MCNP, tomam maior proporção. Devido às dificuldades operacionais do reator, as mudanças físicas desses componentes ficam restritas e através do MCNP serão simuladas as mudanças dos filtros/moderadores. Nas simulações serão alteradas dimensões e composições desses componentes e assim que possível os filtros/moderadores serão trocados na instalação.

Utilização de parafina e polietileno na tentativa de criar um “*flux trap*” apresentou-se como uma possibilidade de aumento do fluxo de nêutrons térmicos na posição de irradiação de amostras.

Com o MCNP foi possível realizar testes para verificação de tempo de simulação versus variância dos resultados. Foi confirmado que com o uso de técnicas de redução de variância, no caso *Weight Window Generator* (WWG) conseguiu-se

diminuir o tempo gasto com partículas em áreas de pouca importância para o cálculo solicitado. Portanto o tempo de simulação pôde ser otimizado aumentando as importâncias eventos de interesse, gerando resultados com menor tempo de simulação e com incertezas menores.

Em alguns casos o uso do WWG mostrou aumento na FOM de quase 4.000% (40 x) o que deixa claro que seu uso em simulações com geometrias complexas, onde a perda de partículas no caminho é grande e existe a necessidade de adicionar importâncias diferentes para cada região amostrada, é de suma importância devido à otimização do tempo de simulação e também de melhorias nos resultados.

Nos cálculos de fluxos térmicos e epitérmicos levam-se em consideração as seções de choque e ressonância para cada tipo de folha, porém quando é usado um valor exato para a seção de choque e ressonância, estima-se, para mais ou menos, os fluxos de nêutrons tendo em consideração que não conhecemos a verdadeira seção de choque e ressonância na instalação de BNCT devido às variações de queima de combustível e diversas outras variações que temos em relação ao Reator de Pesquisas IEA-R1. Por isso optou-se por calcular as atividades de saturação e usá-las como dados brutos, razões espectrais, assim foi possível compararmos os resultados da nossa instalação com os de outras instalações que fazem o mesmo tipo de estudo.

Através dos resultados de comparação das razões espectrais da instalação do IPEN com as outras duas instalações citadas, vistos na Tabela 6, ficou claro que existe a necessidade de aperfeiçoamento do feixe de irradiação da instalação para estudos em BNCT do IPEN já que apesar de ter um fluxo de nêutrons térmicos suficientemente alto ($2 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$), com valor intermediário aos reatores RA3 e MURR, apresenta uma contaminação de nêutrons epitérmicos e rápidos maior que estas instalações.

Na instalação para pesquisa em BNCT do IPEN o fluxo de nêutrons térmico necessário para uma boa aplicação da técnica é atingido. Os experimentos podem ser realizados, pois existe a componente térmica do feixe, porém para que se atinja uma boa fluência de nêutrons é necessário que o tempo de irradiação seja maior, já que a fluência é o quociente do fluxo de nêutrons pelo tempo de irradiação. Na forma em que o feixe se encontra é necessário que o tempo de irradiação seja muito maior para que a fluência de nêutrons desejada seja atingida (10^{13} n/cm^2) na posição de irradiação das amostras. Portanto existe a necessidade de melhora do feixe de irradiação,

aumentando o fluxo de nêutrons térmicos, diminuindo principalmente o fluxo de nêutrons rápidos e epitérmicos e a radiação gama.

A instalação para estudos em BNCT do IPEN possui flexibilidade na troca de filtros e moderadores. Portanto novos estudos em relação a esses componentes devem ser feitos tendo em vista a variação em composição/dimensão dos mesmos dependendo do experimento a ser realizado na instalação, o que facilitará que outros pesquisadores possam realizar seus experimentos com maior eficiência usando a instalação de BNCT.

7. PROPOSIÇÃO DE FUTUROS EXPERIMENTOS

No decorrer da realização deste trabalho, vários experimentos foram imaginados em busca de aprimorar os estudos em BNCT, principalmente na produção e elaboração de mudanças na instalação de pesquisas em BNCT junto ao reator IEA-R1.

Alguns trabalhos já vieram a ser testados, como irradiação de folhas de ativação de limiar, folhas de ativação com meia-vida curta e outros teste com materiais diferentes.

A inserção das mudanças propostas nos filtros/moderadores, no âmbito experimental, é o próximo estudo que será feito para validar ainda mais os resultados obtidos até então.

Com o MCNP também poderão ser feitas mais simulações com o intuito de verificação de materiais mais adequados, com composições e dimensões diversas, para que posteriormente possam ser produzidos e testados no procedimento experimental na instalação para estudos em BNCT.

Para melhor verificação da variação do feixe de nêutrons na posição de irradiação de amostras pode-se fazer o uso de fios de ativação, fio que assim como as folhas de ativação, se torna ativo com o feixe de nêutrons e sendo o fio contínuo pode-se analisar melhor o perfil de fluxo de nêutrons ao longo do eixo do fio.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Instituto Nacional do Câncer, “INCA - Instituto Nacional do Câncer,” 2013. [Online]. Available:
http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/agencianoticias/site/home/noticias/2013/inca_ministerio_saude_apresentam_estimativas_cancer_2014. [Acesso em 25 Fevereiro 2014].
- [2] Instituto Nacional do Câncer, 2013. [Online]. Available:
<http://www.inca.gov.br/wcm/dncc/2013/dia-nacional-combate-cancer.asp>. [Acesso em 25 Janeiro 2014].
- [3] Instituto Nacional do Câncer, 2014. [Online]. Available:
http://www1.inca.gov.br/conteudo_view.asp?id=322. [Acesso em 25 Fevereiro 2014].
- [4] J. Chadwick, “The Existence of a Neutron,” *Proc. Roy. Soc. Lond. A.*, vol. 136, pp. 692-708, 1932.
- [5] G. L. Locher, “Biological Effects and Therapeutic Possibilities of Neutrons,” *The American Journal of Roentgenology and Radium Therapy*, vol. 36, n. 1, 1936.
- [6] W. H. Sweet, “Early History of Development of Boron Neutron Capture Therapy of Tumors,” pp. 19-26, 1997.
- [7] R. Moss, O. Aizawa, D. Beynon, R. Brugger, G. Constantine, O. Harling, H. Liu e P. Watkins, “The Requirements and Development of Neutron Beams for Neutron Capture Therapy of Brain Cancer,” *Journal of Neuro-Oncology*, 33, pp. 27-40, 1997.
- [8] S. J. Walker, “Boron Neutron Capture Therapy: Principles and Prospects,” *Radiography*, vol. 4, n. 3, pp. 211-219, 1998.
- [9] D. N. Slatkin, “A History Of Boron Neutron Capture Therapy Of Brain Tumours,” *Brain*, vol. 114, pp. 1609-1629, 1991.
- [10] S. Savolainen, Sauli et al., “Boron neutron capture therapy (BNCT) in Finland: Technological and physical prospects after 20 years of experiences,” *Physica Medica*, vol. 29, pp. 233-248, 2003.
- [11] M. Goldhaber, “Disintegration by Slow Neutron,” *Nature*, vol. 135, p. S65, 1935.
- [12] G. E. Laramore e A. M. Spence, “Boron neutron capture therapy (BNCT) for high-grade gliomas of the brain: a cautionary note,” *J. Radiation OncologyBiol. Phys.*, vol. 36, pp. 241-246, 1996.
- [13] BONECA, “BONECA | BNCT - A new method to treat cancer,” BONECA, 2010. [Online]. Available: <http://www.boneca.fi/>. [Acesso em 25 Maio 2012].

- [14] A. Zonta, T. Pinelli, U. Prati, L. Roveda, C. Ferrari, A. Clerici, C. Zonta, G. Mazzini, P. Dionigi, S. Altieri, S. Bortolussi, P. Bruschi e F. Fossati, "Extra-Corporeal Liver BNCT for the Treatment of Diffuse Metastase: What Was Learned and What Is Still To Be Learned," *Applied Radiation Isotopes*, vol. 67, n. S67-S75, 2009.
- [15] M. Herrera, S. González, A. Burlon, D. Minsky e A. Kreinsotopes, "Treatment Planning Capability Assessment of a Beam Shaping Assembly for Accelerator-Based BNCT," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 69, n. 1870-1873, 2011.
- [16] E. Pozzi, S. Thorp, J. Brockman, M. Miller, D. Nigg e M. Hawthorne, "Intercalibration of Physical Neutron Dosimetry for the RA-3 and MURR Thermal Neutron Source for BNCT Small-Animal Research," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 69, n. 1921-1923, 2011.
- [17] M. Camillo e e. al., "Design of a facility for NCT research in the IEA-R1 reactor," *Advances in Neutron Capture Therapy, Medicine and Physics*, pp. 367-369, 1997.
- [18] R. Muniz, Desenvolvimento de um Simulador Antropomórfico para Simulação e Medida de Dose e Fluxo de Nêutrons na Instalação para Estudos em BNCT (Mestrado), São Paulo/SP, Brasil: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN, 2010.
- [19] G. S. d. Souza, Projeto e Implementação de Melhorias na Blindagem Biológica da Instalação para Estudos em BNCT (Mestrado), São Paulo/SP, Brasil: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN, 2011.
- [20] T. A. Cavalieri, "Emprego do MCNP no estudo dos TLDs 600 e 700 visando a implementação da caracterização do feixe de radiação na instalação de BNCT do IEA-R1," São Paulo, 2013.
- [21] S. Guedes, B. Smilgys, H. Vasconcellos, J. Hadler, A. Lixandrao, P. Coelho e P. Siqueira, "Thermal, Epithermal and Fast Neutron Dosimetry in BNCT Using Boron Thin Films and PADC Detector," em *15th International Congress on Neutron Capture Therapy*, Tsukuba, Japão, 2012.
- [22] B. Smilgys, H. Vasconcellos, S. Guedes, J. Hadler, R. Palissari, I. Alencar, P. Coelho e P. Siqueira, "Track Annealing Studies of PADC Track Etch Detector for the $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ Reaction Rate Measurement," em *15th International Congress on Neutron Capture Therapy*, Tsukuba, Japão, 2012.
- [23] F. Faião-Flores, P. R. P. Coelho, J. Arruda-Neto e D. A. Maria, "Boron Neutron Capture Therapy Induces Cell Cycle Arrest and DNA Fragmentation in Murine Melanoma Cells," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 69, pp. 1741-1744, 2011.
- [24] F. Faião-Flores, P. Coelho, R. Muniz, G. Souza, J. Arruda-Neto e D. Maria, "Antitumor Potencial Indication and Free Radicals Production in Melanoma Cells by Boron Neutron Capture Therapy," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 69, pp. 1748-1751, 2011.
- [25] G. S. Silva, P. R. P. Coelho e P. T. D. Siqueira, "Shielding design for a research facility in the

IEA-R1 reactor,” *New frontiers of nuclear technology: reactor physics, safety, and high-performance computing*, 2002.

- [26] X-5 Monte Carlo Team, “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, V.5,” Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2005.
- [27] N. Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, U.S.A.: Taylor & Francis, 1995.
- [28] E. Segre, *Dos Raios X aos Quarks*, Distrito Federal: Universidade de Brasília, 1980.
- [29] F. J. Mestnik, “A Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons no Núcleo do Reator IEA-R1, obtida por meio de avaliação de folhas,” São Paulo, 1978.
- [30] B. G. Nunes, “Determinação Experimental de razões espectrais do espectro de energia dos nêutrons no combustível do reator nuclear IPEN/MB-01,” São Paulo, 2012.
- [31] U. d. Bitelli, “Medida e Cálculo da Distribuição Espacial e Energética de Nêutrons no Núcleo do Reator IEA-R1,” São Paulo, 1988.
- [32] L. E. C. Mura, “Caracterização dos Campos Neutrônicos Obtidos Por Meio de Armadilhas de Nêutrons no Interior do Núcleo do Reator IPEN/MB-01,” São Paulo, 2011.
- [33] International Commission on Radiation Units and Measurements, “Neutron Dosimetry for Biology and Medicine,” ICRU Report 26, 1984.
- [34] F. H. Attix, *Introduction to Radiological and Radiation Dosimetry*, John Wiley & Sons, 2004.
- [35] J. R. LAMARSH, *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, 1978.
- [36] C. Zamboni, *Fundamentos da Física de Nêutrons*, São Paulo/SP: Livraria da Física, 2007.
- [37] Korea Atomic Energy Research Institute, “Nuclear Data Center,” 2000. [Online]. Available: <http://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/endfform.pl>. [Acesso em 22 Julho 2012].
- [38] “atom.kaeri.re.kr,” [Online]. Available: <http://atom.kaeri.re.kr>. [Acesso em 07 Junho 2012].
- [39] “MAESTRO MCA Emulation Software,” [Online]. Available: <http://www.ortec-online.com/Solutions/applications-software.aspx>. [Acesso em 02 Dezembro 2013].

Anexo A – Propagação das Incertezas relacionadas às medidas experimentais

Para as atividades de saturação dos detectores de ativação utilizados nos experimentos, as incertezas podem ser calculadas usando a propagação de erros da equação abaixo:

$$\frac{\sigma A^{\infty}}{A^{\infty}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(C - BG)}{(C - BG)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(e^{\lambda t_s})}{e^{\lambda t_s}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(1 - e^{-\lambda t_s})}{(1 - e^{-\lambda t_s})}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(1 - e^{-\lambda t_d})}{(1 - e^{-\lambda t_d})}\right)^2}$$

Equação 16

Pode-se expandir o termo $(1 - e^{-\lambda t})$ da Eq. 21 em série de Taylor, reescrevendo a equação como abaixo:

$$A^{\infty} = \frac{e^{\lambda t_s}(C - BG)}{t_s I \varepsilon (1 - e^{-\lambda t_s})}$$

Equação 17

Como erros percentuais relativos aos tempos estimados pelo cronômetro são estimados pela metade da menor divisão, os mesmos são desprezados, dessa forma a Eq. 23 é reescrita como:

$$\frac{\sigma A^{\infty}}{A^{\infty}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma(C - BG)}{(C - BG)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma I}{I}\right)^2}$$

Equação 18

As incertezas das atividades de saturação por núcleo alvo são calculadas da mesma forma como foi calculada para as atividades de saturação dos detectores de ativação. A diferença entre as duas equações são os termos que compõem cada uma, no caso das incertezas das atividades de saturação por núcleo alvo, termos um termo adicionado que corresponde às massas de cada folha de ativação e a equação é dada por:

$$\sigma\left(\frac{A^{\infty}}{N_0}\right) = \left(\frac{A^{\infty}}{N_0}\right) \sqrt{\left(\frac{\sigma A^{\infty}}{A^{\infty}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma m}{m}\right)^2}$$

Equação 19

Anexo B – Arquivo de Entrada do MCNP para Simulações das Irradiações na Instalação de Pesquisas em BNCT junto ao Reator IEA- R1

BNCT - Instalacao

```

c
c   CHUMBO E POLIETILENO
c   8cm de polietileno atras
c   2.5cm de polietileno frentre
c   W W G
c   S E T E M B R O  2014
c
c
c
c Geometria: Instalacao inteira da face do nucleo aa boca do BH
c
c
c
c   1   2   3   4   5   6   7   8
c 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
c *****
c Mapeamento de Fluxo
c
c
c   Fonte de Neutrons com 22 grupos de energia
c   (precisa ser feito ainda o de fotons com 18 grupos de energia)
c   a partir de calculos da Graciete utilizando o DOT
c
c   Fonte de 54 aneis coplanares com densidade linear de intensidade
c   proporcional ao raio (coordenada X) e a intensidade neste ponto (valor do DOT)
c
c   Numeracao das superficies e especificadores (cotas, raios) em concordancia
c   com os utilizados no arquivo DOT
c
c *****
c
c   Otimizacoes possiveis: criar regioes com diferentes importancias
c       refazer fonte com R dependente de E (deve ficar mais limpo)
c       aumentar o numero de particulas simuladas com cartao DBCN
c
c
c 1 4 -2.6989  39 -40    -334 imp:n,p=1 $ Al do Nucleo
c
c BH
c 2 4 -2.6989  42 -43    -316 imp:n,p=1 $ tampa
c 3 4 -2.6989  43 -63   315 -316 imp:n,p=1 $ tubo
c 4 4 -2.6989  63 -129  314 -317 imp:n,p=1 $ seccao do tubo externa
c
c 5 4 -2.6989 129 314 (-130:330) (-140:331:146)
c       -155 (-331:-147) -332 (139:-331) imp:n,p=1 $ parte externa
c
c 8 4 -2.6989 139 -147      331 -332 imp:n,p=1 $
c
c Liner
c 11 4 -2.6989 44 -45    -310 imp:n,p=1 $ tampa
c 12 4 -2.6989 45 -65   308 -310 imp:n,p=1 $ tubo
c 13 4 -2.6989 65 -66   308 -313 imp:n,p=1 $ tubo

```

14 4 -2.6989 66 -130 312 -313 imp:n,p=1 \$ tubo
 15 4 -2.6989 130 -132 312 -322 imp:n,p=1 \$ rebarba
 c
 c
 c Agua da Piscina
 20 3 -1.0 39 (334:40) (-42:316) (317:-63) -72 -401 imp:n,p=1
 21 3 -1.0 39 -72 401 -402 imp:n,p=0.3
 22 3 -1.0 39 -72 402 -403 imp:n,p=0.06
 23 3 -1.0 39 -72 403 -355 imp:n,p=0.01
 c
 c Agua do BH
 25 3 -1.0 43 (-44:310) (-65:313) -130 (-314:-63) -315 imp:n,p=1
 c
 c
 c Ar do Liner
 30 5 -1.2250E-3 45 -132 -312 (66:-308) (-75:311) imp:n,p=1
 c
 c
 c Chapa de Aco
 40 6 -7.93 72 -73 317 -401 imp:n,p=1
 41 6 -7.93 72 -73 401 -402 imp:n,p=1
 42 6 -7.93 72 -73 402 -403 imp:n,p=1
 43 6 -7.93 72 -73 403 -355 imp:n,p=1
 c
 c
 c Concreto Barita
 50 8 -3.5 73 -129 317 -401 imp:n,p=1
 51 8 -3.5 73 -129 401 -402 imp:n,p=0.3
 52 8 -3.5 73 -129 402 -403 imp:n,p=0.06
 53 8 -3.5 73 -129 403 -355 imp:n,p=0.01
 c
 55 8 -3.5 129 331 (-139:332:147) -156 -355 imp:n,p=0.3
 c
 c
 c Cartola
 60 4 -2.6989 75 -76 -311 imp:n,p=1 \$ tampa
 61 4 -2.6989 76 -132 309 -311 imp:n,p=1 \$ tubo
 62 4 -2.6989 132 -133 309 -322 imp:n,p=1 \$ rebarba
 c
 c
 c Ar da Cartola
 65 5 -1.2250E-3 76 (-78:307) -133 -309 imp:n,p=1
 c
 c Tubo Movei
 70 4 -2.6989 78 -79 -307 imp:n,p=1 \$ tampa
 71 4 -2.6989 79 -133 306 -307 (-81:-1:96)
 (-103:-1:113) (-115:-1:130) imp:n,p=1 \$ tubo
 72 4 -2.6989 98 -100 305 -306 imp:n,p=1 \$ engate do tubo interno
 73 4 -2.6989 133 -134 -307 imp:n,p=1 \$ tampa externa
 c
 c
 c Filtros
 80 10 -1.135E+1 91 -98 -306 imp:n,p=1 \$ filtros internos - C H U M B O
 81 5 -1.2250E-3 100 -102 -306 #8881 imp:n,p=1 \$ filtros externos (lugar do POLY)
 8881 14 -0.93 100 -10001 -306 imp:n,p=1 \$ filtro anterior de poly (2.5cm)
 c
 c
 c Blindagem
 85 10 3.348E-2 11003 -132 -306 #8885 imp:n,p=1 \$ Blindagem de Fora
 8885 14 -0.93 113 -11003 -306 imp:n,p=1 \$ filtro de tras de poly (8cm)

c

c

c Ar no Tubo

90 5 -1.2250E-3 79 -91 -306 imp:n,p=1 \$secao mais interna

91 5 -1.2250E-3 98 -100 -305 imp:n,p=1 \$secao intermediaria

c

c 92 5 -1.2250E-3 102 -113 -306 #1150 #1160 #8881 imp:n,p=1 \$porta amostra

921 5 -1.2250E-3 102 -1021 -306 #1160 imp:n,p=1

922 5 -1.2250E-3 1021 -1022 -306 imp:n,p=1

923 5 -1.2250E-3 1022 -1023 -306 imp:n,p=1

924 5 -1.2250E-3 1023 -1024 -306 imp:n,p=1

925 5 -1.2250E-3 1024 -1025 -306 imp:n,p=1

926 5 -1.2250E-3 1025 -1026 -306 imp:n,p=1

927 5 -1.2250E-3 1026 -1027 -306 imp:n,p=1

928 5 -1.2250E-3 1027 -113 -306 #1150 imp:n,p=1

c

c

93 5 -1.2250E-3 132 -133 -306 imp:n,p=1 \$secao mais externa

c

94 5 -1.2250E-3 1 306 -307
((81 -96):(103 -113):(115 -130)) #8881 #8885 imp:n,p=1 \$cavidades para insercao de discos

c

c

c parte Externa

99 5 -1.2250E-3 130 (322:133) (307:134) -156 -331
(155:-330:-146) (140:-330) imp:n,p=1 \$Boca do BH

c

c

c 991 5 -1.2250E-3 -209 imp:n,p=1

c

c AR dado pelos materiais 11 e 5 com densidades ligeiramente diferentes

c FOLHAS

1150 11 -0.0012 -1000 3000 -2000 imp:n,p=1

1160 11 -0.0012 -1000 5000 -4000 imp:n,p=1

c

c Universo Externo

100 0 -39:355:156 imp:n,p=0

c Superficies

c

1 px 0.0

c

39 pz 53.385 \$ Aluminio do Nucleo

40 pz 53.735

42 pz 56.275 \$ BH

43 pz 56.910

44 pz 57.410 \$ Liner

45 pz 58.045

63 pz 157.20 \$ Alargamento da espessura do tubo BH

65 pz 159.31 \$ Alargamento do Liner

66 pz 159.94

72 pz 167.305 \$ Chapa de Aco que reveste a Piscina

73 pz 167.647

75 pz 169.79 \$ Extremidade Anterior da Cartola

76 pz 170.79

78 pz 172.79 \$ Extremidade Anterior do Tubo Porta-Amostra

79 pz 173.455

c

81 pz 176.29 \$ para inclusao dos filtros

91 pz 203.69 \$ Filtros

96 pz 214.99 \$ para inclusao dos filtros
 98 pz 220.69
 100 pz 224.69
 10001 pz 227.69 \$ usei no filtro poly da frente
 102 pz 229.69
 c
 1021 pz 233.69
 1022 pz 237.69
 1023 pz 241.69
 1024 pz 245.69
 1025 pz 249.69
 1026 pz 253.69
 1027 pz 257.69
 c
 c
 103 pz 232.69
 113 pz 262.69
 11003 pz 270.69 \$ usei no filtro poly de tras
 115 pz 267.69
 c FOLHAS
 1000 cz 0.5
 2000 pz 260.69
 3000 pz 260.59
 4000 pz 231.79
 5000 pz 231.69
 c
 129 pz 316.52
 130 pz 317.79
 132 pz 320.79
 133 pz 322.69
 134 pz 324.69
 c
 139 pz 336.20
 140 pz 337.47
 146 pz 353.34
 147 pz 354.61
 155 pz 363.50
 156 pz 365.405
 c
 c
 c
 201 sz 90 1
 202 sz 130 1
 203 sz 165 1
 204 sz 180 1
 205 sz 190 1
 206 sz 240 1
 207 sz 250 1
 208 sz 260 1
 209 sz 350 1
 c
 305 cz 5.735 \$ Anel de engate: Diam. Interno
 306 cz 6.40 \$ Diam. da Cavidade Porta Amostra
 307 cz 7.065 \$ Diam. Exteno do tubo Porta Amostra
 308 cz 7.62 \$ Liner: Diam. Int. sec. Anterior
 309 cz 7.7 \$ Cartola: Diam. Interno
 310 cz 7.9375 \$ Liner: Diam. Ext. sec. Anterior
 311 cz 8.4 \$ Cartola: Diam. Externo
 312 cz 9.525 \$ Liner: Diam. Int. sec. Posterior
 313 cz 9.8425 \$ Liner: Diam. Ext. sec. "

```

c BH
314 cz 10.16 $ Diam. Int. sec. Posterior
315 cz 10.24 $ " " sec. Anterior
316 cz 10.954 $ Diam. Ext. sec. Anterior
317 cz 11.43 $ " " sec. Posterior
c
322 cz 14.5 $ Rebarba da Cartola e do Liner
c
c Boca do BH
330 cz 20.95
331 cz 22.22
332 cz 23.49
c
334 cz 24.875 $ Diam. do Nucleo
355 cz 125.0 $ Diam. do Universo
c
401 cz 30
402 cz 60
403 cz 90
c

mode n p
c -----
c Fonte de Neutrons
c -----
c Fonte Plana Circular e direcional (somente para frente)
c
c
c Espectro de Energia e distribuicao Espacial Dados pelo DOT
c
c 22 grupos de Energia e grade radial com 54 pontos
c Posicao Axial : YZT = 39 => Dz = 53,385 - 53,735 => 53,56
c
c Arquivos: FonteBNCTmar 06.sxc
c (03 Marco de 2006)
c
c
c -----
c
c
c sdef pos=0 0 53.56 rad=d1 axs=0 0 1 VEC= 0 0 1 dir=d2 erg=frac d3 par=1
c
c -----
c Dependencia Radial de cada grupo
c -----
c
sil L 0.72 2.15 3.58 5.02 6.07 6.73
7.34 7.66 7.82 8.17 8.96 9.68
10 10.2 10.6 11.19 11.47 11.75
12.5 13.5 14.25 15 16 17
18 18.81 19.42 20.03 20.64 21.59
22.86 24.13 24.82 25.61 27.08 28.3
29.29 30.27 31.26 33 35.5 38
40.5 45.55 53.15 60.75 68.35 75.95
83.52 91.06 98.6 106.15 113.69 121.23
c
sp1 D 1.5028E+13 4.4875E+13 7.4286E+13 1.0305E+14 1.2382E+14 1.3648E+14
1.4778E+14 1.5394E+14 1.5663E+14 1.6240E+14 1.7568E+14 1.8829E+14
1.9357E+14 1.9685E+14 2.0205E+14 2.1175E+14 2.1572E+14 2.1901E+14
2.2830E+14 2.4035E+14 2.4866E+14 2.5481E+14 2.6248E+14 2.6854E+14

```

```

2.7318E+14 2.7613E+14 2.7705E+14 2.7719E+14 2.7618E+14 2.7344E+14
2.6813E+14 2.5799E+14 2.5247E+14 2.1172E+14 1.5500E+14 1.2267E+14
1.0132E+14 8.4551E+13 7.0367E+13 5.2898E+13 3.4551E+13 2.3060E+13
1.5299E+13 8.1731E+12 3.0777E+12 1.4132E+12 5.8392E+11 3.0191E+11
1.3503E+11 7.1563E+10 3.2335E+10 1.6790E+10 7.4453E+9 3.8943E+9
c
c -----
c Emissao isotopica no semi-espaco positivo
c -----
c
sb2 -31 5
c
c -----
c Espectro de Energia
c -----
c          ATENCAO!!! p/ a inversao nos grupos de energia !!
c          grupo 1 e o mais energetico
c          grupo 22 e o de menor energia
c
c
ds3 S  101  102  103  104  105  106
      107  108  109  110  111  112
      113  114  115  116  117  118
      119  120  121  122  123  124
      125  126  127  128  129  130
      131  132  133  134  135  136
      137  138  139  140  141  142
      143  144  145  146  147  148
      149  150  151  152  153  154
c
c
C
si101 H 0 6.82e-7  1.1254e-6  3.0590e-6  1.0677e-5  2.2603e-5  1.0130e-4
      5.8295e-4  3.3546e-3  1.1109e-1  6.3928e-1  1.1080  1.8268
      2.3457  2.4660  3.0119  4.0657  4.9659  6.3763
      8.1873  10.0  12.214  17.333
c
sp101 D 0 1.4615E+13 1.8077E+11 3.6478E+11 4.6190E+11 2.7939E+11 5.6023E+11
      6.5119E+11 6.4467E+11 1.3210E+12 8.2835E+11 3.3178E+11 3.5216E+11
      1.3646E+11 2.2382E+10 5.6245E+10 6.3417E+10 4.3262E+10 3.2569E+10
      1.3744E+10 3.1230E+9 8.3482E+8 1.7809E+8
c
si102 H 0 6.82e-7  1.1254e-6  3.0590e-6  1.0677e-5  2.2603e-5  1.0130e-4
      5.8295e-4  3.3546e-3  1.1109e-1  6.3928e-1  1.1080  1.8268
      2.3457  2.4660  3.0119  4.0657  4.9659  6.3763
      8.1873  10.0  12.214  17.333
c
sp102 D 0 1.4604E+13 1.7931E+11 3.6171E+11 4.5774E+11 2.7671E+11 5.5446E+11
      6.4360E+11 6.3582E+11 1.2996E+12 8.1506E+11 3.2672E+11 3.4606E+11
      1.3368E+11 2.1947E+10 5.5268E+10 6.2355E+10 4.2572E+10 3.2051E+10
      1.3524E+10 3.0667E+9 8.1952E+8 1.7467E+8
c
si103 H 0 6.82e-7  1.1254e-6  3.0590e-6  1.0677e-5  2.2603e-5  1.0130e-4
      5.8295e-4  3.3546e-3  1.1109e-1  6.3928e-1  1.1080  1.8268
      2.3457  2.4660  3.0119  4.0657  4.9659  6.3763
      8.1873  10.0  12.214  17.333
c
sp103 D 0 1.4554E+13 1.7716E+11 3.5730E+11 4.5198E+11 2.7312E+11 5.4709E+11
      6.3471E+11 6.2652E+11 1.2782E+12 8.0271E+11 3.2172E+11 3.4056E+11
      1.3146E+11 2.1581E+10 5.4403E+10 6.1443E+10 4.1975E+10 3.1612E+10

```


1.3341E+10 3.0224E+9 8.0759E+8 1.7205E+8

c

si104 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp104 D 0 1.4467E+13 1.7439E+11 3.5164E+11 4.4467E+11 2.6862E+11 5.3794E+11
6.2385E+11 6.1551E+11 1.2558E+12 7.8978E+11 3.1687E+11 3.3542E+11
1.2943E+11 2.1245E+10 5.3592E+10 6.0531E+10 4.1360E+10 3.1149E+10
1.3147E+10 2.9779E+9 7.9573E+8 1.6954E+8

c

si105 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp105 D 0 1.4391E+13 1.7249E+11 3.4782E+11 4.3987E+11 2.6574E+11 5.3231E+11
6.1773E+11 6.1023E+11 1.2476E+12 7.8418E+11 3.1435E+11 3.3283E+11
1.2849E+11 2.1080E+10 5.3184E+10 6.0029E+10 4.0945E+10 3.0802E+10
1.2993E+10 2.9450E+9 7.8692E+8 1.6773E+8

c

si106 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp106 D 0 1.4320E+13 1.7060E+11 3.4395E+11 4.3490E+11 2.6271E+11 5.2619E+11
6.1058E+11 6.0332E+11 1.2344E+12 7.7595E+11 3.1116E+11 3.2955E+11
1.2728E+11 2.0871E+10 5.2645E+10 5.9413E+10 4.0525E+10 3.0480E+10
1.2858E+10 2.9150E+9 7.7900E+8 1.6610E+8

c

si107 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp107 D 0 1.4232E+13 1.6869E+11 3.4011E+11 4.3006E+11 2.5981E+11 5.2048E+11
6.0419E+11 5.9740E+11 1.2235E+12 7.6963E+11 3.0846E+11 3.2693E+11
1.2643E+11 2.0714E+10 5.2223E+10 5.8950E+10 4.0191E+10 3.0215E+10
1.2746E+10 2.8917E+9 7.7293E+8 1.6491E+8

c

si108 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp108 D 0 1.4186E+13 1.6833E+11 3.3948E+11 4.2947E+11 2.5961E+11 5.2047E+11
6.0503E+11 5.9949E+11 1.2296E+12 7.7255E+11 3.0931E+11 3.2872E+11
1.2762E+11 2.0905E+10 5.2626E+10 5.9449E+10 4.0466E+10 3.0405E+10
1.2823E+10 2.9171E+9 7.8002E+8 1.6661E+8

c

si109 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp109 D 0 1.4166E+13 1.6733E+11 3.3742E+11 4.2678E+11 2.5793E+11 5.1701E+11
6.0078E+11 5.9494E+11 1.2198E+12 7.6652E+11 3.0699E+11 3.2606E+11
1.2649E+11 2.0714E+10 5.2161E+10 5.8912E+10 4.0122E+10 3.0155E+10

1.2718E+10 2.8917E+9 7.7315E+8 1.6513E+8

c

sil10 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp110 D 0 1.4111E+13 1.6525E+11 3.3311E+11 4.2109E+11 2.5432E+11 5.0942E+11
5.9125E+11 5.8455E+11 1.1965E+12 7.5334E+11 3.0195E+11 3.2009E+11
1.2384E+11 2.0270E+10 5.1119E+10 5.7759E+10 3.9388E+10 2.9607E+10
1.2490E+10 2.8353E+9 7.5804E+8 1.6185E+8

c

sil11 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp111 D 0 1.3995E+13 1.6134E+11 3.2506E+11 4.1056E+11 2.4773E+11 4.9578E+11
5.7458E+11 5.6705E+11 1.1590E+12 7.3129E+11 2.9397E+11 3.1142E+11
1.2027E+11 1.9698E+10 4.9744E+10 5.6246E+10 3.8430E+10 2.8917E+10
1.2206E+10 2.7665E+9 7.3962E+8 1.5786E+8

c

sil12 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp112 D 0 1.3887E+13 1.5921E+11 3.2082E+11 4.0535E+11 2.4470E+11 4.9000E+11
5.6859E+11 5.6228E+11 1.1518E+12 7.2622E+11 2.9133E+11 3.0914E+11
1.1972E+11 1.9593E+10 4.9445E+10 5.5918E+10 3.8152E+10 2.8688E+10
1.2106E+10 2.7489E+9 7.3506E+8 1.5702E+8

c

sil13 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp113 D 0 1.3846E+13 1.5771E+11 3.1779E+11 4.0149E+11 2.4237E+11 4.8536E+11
5.6333E+11 5.5738E+11 1.1423E+12 7.2028E+11 2.8899E+11 3.0695E+11
1.1905E+11 1.9486E+10 4.9149E+10 5.5595E+10 3.7930E+10 2.8522E+10
1.2039E+10 2.7362E+9 7.3184E+8 1.5640E+8

c

sil14 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp114 D 0 1.3817E+13 1.5679E+11 3.1592E+11 3.9912E+11 2.4092E+11 4.8249E+11
5.6011E+11 5.5447E+11 1.1366E+12 7.1681E+11 2.8784E+11 3.0608E+11
1.1885E+11 1.9457E+10 4.9064E+10 5.5542E+10 3.7863E+10 2.8453E+10
1.2011E+10 2.7329E+9 7.3116E+8 1.5635E+8

c

sil15 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp115 D 0 1.3710E+13 1.5396E+11 3.1011E+11 3.9152E+11 2.3616E+11 4.7257E+11
5.4775E+11 5.4106E+11 1.1077E+12 6.9921E+11 2.8143E+11 2.9857E+11
1.1550E+11 1.8913E+10 4.7778E+10 5.4071E+10 3.6937E+10 2.7785E+10

1.1734E+10 2.6619E+9 7.1189E+8 1.5208E+8

c

sil16 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp116 D 0 1.3649E+13 1.5150E+11 3.0512E+11 3.8516E+11 2.3231E+11 4.6487E+11
5.3889E+11 5.3267E+11 1.0903E+12 6.8736E+11 2.7671E+11 2.9388E+11
1.1385E+11 1.8648E+10 4.7112E+10 5.3354E+10 3.6454E+10 2.7428E+10
1.1586E+10 2.6301E+9 7.0350E+8 1.5034E+8

c

sil17 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp117 D 0 1.3570E+13 1.5020E+11 3.0255E+11 3.8204E+11 2.3052E+11 4.6153E+11
5.3554E+11 5.3019E+11 1.0869E+12 6.8497E+11 2.7557E+11 2.9325E+11
1.1398E+11 1.8676E+10 4.7133E+10 5.3418E+10 3.6463E+10 2.7426E+10
1.1584E+10 2.6347E+9 7.0496E+8 1.5078E+8

c

sil18 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp118 D 0 1.3500E+13 1.4782E+11 2.9764E+11 3.7559E+11 2.2646E+11 4.5305E+11
5.2502E+11 5.1889E+11 1.0617E+12 6.6991E+11 2.7016E+11 2.8710E+11
1.1135E+11 1.8249E+10 4.6121E+10 5.2280E+10 3.5740E+10 2.6901E+10
1.1368E+10 2.5810E+9 6.9052E+8 1.4762E+8

c

sil19 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp119 D 0 1.3330E+13 1.4259E+11 2.8696E+11 3.6177E+11 2.1790E+11 4.3555E+11
5.0403E+11 4.9727E+11 1.0152E+12 6.4217E+11 2.5989E+11 2.7610E+11
1.0699E+11 1.7551E+10 4.4434E+10 5.0442E+10 3.4558E+10 2.6046E+10
1.1016E+10 2.4979E+9 6.6834E+8 1.4284E+8

c

sil120 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp120 D 0 1.3088E+13 1.3638E+11 2.7437E+11 3.4569E+11 2.0810E+11 4.1580E+11
4.8095E+11 4.7439E+11 9.6865E+11 6.1399E+11 2.4913E+11 2.6497E+11
1.0281E+11 1.6887E+10 4.2789E+10 4.8653E+10 3.3377E+10 2.5185E+10
1.0661E+10 2.4174E+9 6.4698E+8 1.3830E+8

c

sil121 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp121 D 0 1.2881E+13 1.3182E+11 2.6517E+11 3.3408E+11 2.0110E+11 4.0188E+11
4.6503E+11 4.5910E+11 9.3873E+11 5.9555E+11 2.4193E+11 2.5779E+11
1.0030E+11 1.6488E+10 4.1767E+10 4.7556E+10 3.2628E+10 2.4636E+10

1.0433E+10 2.3691E+9 6.3428E+8 1.3569E+8

c

si122 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp122 D 0 1.2637E+13 1.2587E+11 2.5309E+11 3.1859E+11 1.9159E+11 3.8257E+11
4.4213E+11 4.3590E+11 8.9026E+11 5.6653E+11 2.3114E+11 2.4665E+11
9.6145E+10 1.5823E+10 4.0089E+10 4.5736E+10 3.1463E+10 2.3803E+10
1.0092E+10 2.2906E+9 6.1345E+8 1.3126E+8

c

si123 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp123 D 0 1.2309E+13 1.1860E+11 2.3836E+11 2.9981E+11 1.8013E+11 3.5948E+11
4.1506E+11 4.0895E+11 8.3528E+11 5.3375E+11 2.1876E+11 2.3404E+11
9.1521E+10 1.5077E+10 3.8205E+10 4.3703E+10 3.0129E+10 2.2835E+10
9.6920E+9 2.2008E+9 5.8970E+8 1.2627E+8

c

si124 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp124 D 0 1.1963E+13 1.1110E+11 2.2317E+11 2.8045E+11 1.6833E+11 3.3569E+11
3.8715E+11 3.8109E+11 7.7837E+11 4.9966E+11 2.0593E+11 2.2104E+11
8.6808E+10 1.4317E+10 3.6279E+10 4.1629E+10 2.8767E+10 2.1846E+10
9.2840E+9 2.1098E+9 5.6580E+8 1.2127E+8

c

si125 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp125 D 0 1.1608E+13 1.0357E+11 2.0790E+11 2.6099E+11 1.5646E+11 3.1174E+11
3.5904E+11 3.5300E+11 7.2108E+11 4.6511E+11 1.9279E+11 2.0770E+11
8.1956E+10 1.3541E+10 3.4317E+10 3.9520E+10 2.7374E+10 2.0828E+10
8.8652E+9 2.0165E+9 5.4141E+8 1.1617E+8

c

si126 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

c

sp126 D 0 1.1319E+13 9.7650E+10 1.9593E+11 2.4575E+11 1.4719E+11 2.9309E+11
3.3725E+11 3.3138E+11 6.7742E+11 4.3884E+11 1.8273E+11 1.9745E+11
7.8275E+10 1.2956E+10 3.2824E+10 3.7930E+10 2.6296E+10 2.0032E+10
8.5378E+9 1.9449E+9 5.2287E+8 1.1236E+8

c

si127 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
8.1873 10.0 12.214 17.333

sp127 D 0 1.1079E+13 9.2707E+10 1.8591E+11 2.3298E+11 1.3939E+11 2.7734E+11
3.1873E+11 3.1282E+11 6.3912E+11 4.1554E+11 1.7388E+11 1.8850E+11
7.5099E+10 1.2454E+10 3.1519E+10 3.6552E+10 2.5382E+10 1.9370E+10
8.2649E+9 1.8852E+9 5.0734E+8 1.0915E+8

c
 si128 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp128 D 0 1.0834E+13 8.7619E+10 1.7559E+11 2.1977E+11 1.3131E+11 2.6096E+11
 2.9935E+11 2.9325E+11 5.9839E+11 3.9110E+11 1.6471E+11 1.7926E+11
 7.1824E+10 1.1945E+10 3.0200E+10 3.5141E+10 2.4442E+10 1.8697E+10
 7.9864E+9 1.8240E+9 4.9125E+8 1.0578E+8

c
 si129 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp129 D 0 1.0569E+13 8.2269E+10 1.6473E+11 2.0589E+11 1.2282E+11 2.4375E+11
 2.7895E+11 2.7256E+11 5.5500E+11 3.6494E+11 1.5488E+11 1.6945E+11
 6.8406E+10 1.1422E+10 2.8841E+10 3.3666E+10 2.3472E+10 1.8025E+10
 7.7099E+9 1.7642E+9 4.7545E+8 1.0248E+8

c
 si130 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp130 D 0 1.0165E+13 7.4113E+10 1.4816E+11 1.8466E+11 1.0982E+11 2.1729E+11
 2.4744E+11 2.4029E+11 4.8616E+11 3.2312E+11 1.3917E+11 1.5355E+11
 6.2698E+10 1.0554E+10 2.6630E+10 3.1252E+10 2.1898E+10 1.6934E+10
 7.2626E+9 1.6644E+9 4.4886E+8 9.6810E+7

c
 si131 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp131 D 0 9.6006E+12 6.3969E+10 1.2758E+11 1.5840E+11 9.3826E+10 1.8488E+11
 2.0908E+11 2.0126E+11 4.0347E+11 2.7271E+11 1.1981E+11 1.3402E+11
 5.5809E+10 9.5438E+9 2.4072E+10 2.8382E+10 1.9979E+10 1.5627E+10
 6.7266E+9 1.5491E+9 4.1837E+8 9.0409E+7

c
 si132 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp132 D 0 8.9321E+12 5.4208E+10 1.0778E+11 1.3316E+11 7.8530E+10 1.5387E+11
 1.7246E+11 1.6392E+11 3.2166E+11 2.2086E+11 9.9153E+10 1.1284E+11
 4.8256E+10 8.4631E+9 2.1385E+10 2.5289E+10 1.7855E+10 1.4208E+10
 6.1442E+9 1.4281E+9 3.8644E+8 8.3902E+7

c
 si133 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp133 D 0 8.5733E+12 5.0035E+10 9.9326E+10 1.2242E+11 7.2100E+10 1.4090E+11
 1.5732E+11 1.4872E+11 2.8625E+11 1.9674E+11 8.8884E+10 1.0258E+11
 4.4636E+10 7.9210E+9 2.0028E+10 2.3739E+10 1.6764E+10 1.3458E+10
 5.8416E+9 1.3717E+9 3.7227E+8 8.1388E+7

c
 si134 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp134 D 0 7.0721E+12 3.9128E+10 7.7114E+10 9.3983E+10 5.4897E+10 1.0576E+11
 1.1571E+11 1.0651E+11 2.0023E+11 1.4736E+11 6.8016E+10 7.6742E+10
 3.3811E+10 6.4403E+9 1.7114E+10 2.0162E+10 1.4057E+10 1.1355E+10
 5.0003E+9 1.2184E+9 3.3714E+8 7.5964E+7

c
 si135 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp135 D 0 4.9504E+12 2.5135E+10 4.9043E+10 5.8821E+10 3.3886E+10 6.4264E+10
 6.8859E+10 6.2400E+10 1.1926E+11 1.0002E+11 4.8674E+10 5.5003E+10
 2.5253E+10 5.2121E+9 1.4382E+10 1.6813E+10 1.1603E+10 9.4658E+9
 4.2285E+9 1.0689E+9 3.0083E+8 6.9583E+7

c
 si136 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp136 D 0 3.7669E+12 1.7477E+10 3.3954E+10 4.0462E+10 2.3166E+10 4.3836E+10
 4.6989E+10 4.3013E+10 8.4297E+10 7.5541E+10 3.8230E+10 4.3585E+10
 2.0807E+10 4.5345E+9 1.2748E+10 1.4808E+10 1.0189E+10 8.3966E+9
 3.7944E+9 9.8447E+8 2.7995E+8 6.5858E+7

c
 si137 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp137 D 0 3.0115E+12 1.3102E+10 2.5419E+10 3.0256E+10 1.7334E+10 3.2858E+10
 3.5423E+10 3.2726E+10 6.4919E+10 6.0577E+10 3.1426E+10 3.5929E+10
 1.7649E+10 4.0255E+9 1.1496E+10 1.3272E+10 9.1046E+9 7.5690E+9
 3.4521E+9 9.1375E+8 2.6194E+8 6.2411E+7

c
 si138 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp138 D 0 2.4274E+12 1.0065E+10 1.9557E+10 2.3351E+10 1.3422E+10 2.5585E+10
 2.7868E+10 2.6144E+10 5.2983E+10 4.9961E+10 2.6274E+10 3.0093E+10
 1.5135E+10 3.5852E+9 1.0367E+10 1.1908E+10 8.1488E+9 6.8271E+9
 3.1351E+9 8.4278E+8 2.4326E+8 5.8601E+7

c
 si139 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp139 D 0 1.9517E+12 7.8386E+9 1.5254E+10 1.8274E+10 1.0560E+10 2.0208E+10
 2.2158E+10 2.0895E+10 4.2328E+10 4.1007E+10 2.1973E+10 2.5335E+10
 1.3047E+10 3.1975E+9 9.3436E+9 1.0674E+10 7.2995E+9 6.1653E+9
 2.8484E+9 7.7552E+8 2.2526E+8 5.4801E+7

c
 si140 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp140 D 0 1.3823E+12 5.4290E+9 1.0614E+10 1.2807E+10 7.4491E+9 1.4356E+10
 1.5913E+10 1.5194E+10 3.1237E+10 3.0318E+10 1.6347E+10 1.8707E+10
 9.8056E+9 2.5234E+9 7.5226E+9 8.5369E+9 5.7922E+9 4.9442E+9
 2.2981E+9 6.3556E+8 1.8644E+8 4.6001E+7

c
 si141 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp141 D 0 8.2436E+11 3.3108E+9 6.5088E+9 7.9244E+9 4.6547E+9 9.0392E+9
 1.0134E+10 9.7808E+9 2.0309E+10 2.0384E+10 1.1312E+10 1.3132E+10
 7.1436E+9 1.9287E+9 5.8145E+9 6.5551E+9 4.4945E+9 3.9129E+9
 1.8470E+9 5.2109E+8 1.5438E+8 3.8622E+7

c
 si142 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp142 D 0 5.0344E+11 2.1303E+9 4.2056E+9 5.1534E+9 3.0429E+9 5.9439E+9
 6.7273E+9 6.5729E+9 1.3882E+10 1.4018E+10 7.8801E+9 9.2363E+9
 5.1835E+9 1.4544E+9 4.4218E+9 4.9662E+9 3.4583E+9 3.0744E+9
 1.4770E+9 4.2501E+8 1.2723E+8 3.2331E+7

c
 si143 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp143 D 0 3.0676E+11 1.3905E+9 2.7497E+9 3.3778E+9 2.0019E+9 3.9162E+9
 4.4412E+9 4.3382E+9 9.1244E+9 9.4314E+9 5.3862E+9 6.4174E+9
 3.7169E+9 1.0763E+9 3.2866E+9 3.6856E+9 2.6263E+9 2.3861E+9
 1.1683E+9 3.4249E+8 1.0368E+8 2.6774E+7

c
 si144 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp144 D 0 1.4502E+11 6.8238E+8 1.3504E+9 1.6603E+9 9.8355E+8 1.9248E+9
 2.1827E+9 2.1322E+9 4.4863E+9 4.5147E+9 2.5221E+9 2.9586E+9
 1.7211E+9 5.1083E+8 1.5842E+9 1.7955E+9 1.3074E+9 1.2219E+9
 6.1398E+8 1.8542E+8 5.7466E+7 1.5400E+7

c
 si145 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp145 D 0 4.4300E+10 2.3752E+8 4.7160E+8 5.8298E+8 3.4753E+8 6.8397E+8
 7.8329E+8 7.7472E+8 1.6606E+9 1.7512E+9 1.0113E+9 1.2091E+9
 7.2731E+8 2.2255E+8 6.9529E+8 7.9512E+8 6.0935E+8 5.9395E+8
 3.1101E+8 9.7471E+7 3.1074E+7 8.6683E+6

c
 si146 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp146 D 0 1.7478E+10 9.9252E+7 1.9740E+8 2.4466E+8 1.4614E+8 2.8811E+8
 3.3058E+8 3.2735E+8 6.9923E+8 7.2364E+8 4.1158E+8 4.9277E+8
 3.0193E+8 9.4313E+7 2.9734E+8 3.4474E+8 2.7761E+8 2.8241E+8
 1.5453E+8 5.0313E+7 1.6503E+7 4.7949E+6

c
 si147 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp147 D 0 6.1774E+9 3.7853E+7 7.5341E+7 9.3493E+7 5.5941E+7 1.1044E+8
 1.2707E+8 1.2620E+8 2.7199E+8 2.8823E+8 1.6804E+8 2.0244E+8
 1.2541E+8 3.9542E+7 1.2614E+8 1.4900E+8 1.2490E+8 1.3193E+8
 7.5215E+7 2.5398E+7 8.5783E+6 2.6011E+6

c
 si148 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp148 D 0 2.9560E+9 1.6475E+7 3.2784E+7 4.0659E+7 2.4303E+7 4.7943E+7
 5.5063E+7 5.4637E+7 1.1716E+8 1.2268E+8 6.9651E+7 8.3317E+7
 5.1725E+7 1.6351E+7 5.2854E+7 6.3760E+7 5.5231E+7 6.0385E+7
 3.5804E+7 1.2534E+7 4.3672E+6 1.3859E+6

c
 si149 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp149 D 0 1.1957E+9 6.5107E+6 1.2960E+7 1.6086E+7 9.6251E+6 1.9004E+7
 2.1864E+7 2.1678E+7 4.6510E+7 4.9011E+7 2.8515E+7 3.4342E+7
 2.1364E+7 6.7374E+6 2.2099E+7 2.7258E+7 2.4223E+7 2.7349E+7
 1.6868E+7 6.1280E+6 2.2054E+6 7.3361E+5

c
 si150 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp150 D 0 6.0253E+8 2.8620E+6 5.6936E+6 7.0575E+6 4.2167E+6 8.3140E+6
 9.5422E+6 9.4708E+6 2.0354E+7 2.1432E+7 1.2101E+7 1.4361E+7
 8.8902E+6 2.7824E+6 9.2739E+6 1.1699E+7 1.0587E+7 1.2312E+7
 7.9054E+6 2.9828E+6 1.1093E+6 3.8656E+5

c
 si151 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp151 D 0 2.5104E+8 1.1538E+6 2.2965E+6 2.8508E+6 1.7056E+6 3.3674E+6
 3.8727E+6 3.8374E+6 8.2213E+6 8.7028E+6 5.0264E+6 6.0104E+6
 3.7155E+6 1.1534E+6 3.9057E+6 5.0272E+6 4.6142E+6 5.5213E+6
 3.6969E+6 1.4503E+6 5.5729E+5 2.0329E+5

c
 sil52 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp152 D 0 1.2440E+8 5.1119E+5 1.0168E+6 1.2597E+6 7.5264E+5 1.4839E+6
 1.7037E+6 1.6921E+6 3.6452E+6 3.8521E+6 2.1546E+6 2.5426E+6
 1.5651E+6 4.8110E+5 1.6543E+6 2.1688E+6 2.0086E+6 2.4679E+6
 1.7249E+6 7.0436E+5 2.7960E+5 1.0666E+5

c
 sil53 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp153 D 0 5.1172E+7 2.0787E+5 4.1391E+5 5.1440E+5 3.0775E+5 6.0763E+5
 6.9916E+5 6.9327E+5 1.4842E+6 1.5804E+6 9.0865E+5 1.0801E+6
 6.6339E+5 2.0195E+5 7.0428E+5 9.3799E+5 8.7351E+5 1.0994E+6
 8.0161E+5 3.4080E+5 1.3973E+5 5.5711E+4

c
 sil54 H 0 6.82e-7 1.1254e-6 3.0590e-6 1.0677e-5 2.2603e-5 1.0130e-4
 5.8295e-4 3.3546e-3 1.1109e-1 6.3928e-1 1.1080 1.8268
 2.3457 2.4660 3.0119 4.0657 4.9659 6.3763
 8.1873 10.0 12.214 17.333

c
 sp154 D 0 2.5743E+7 9.4831E+4 1.8846E+5 2.3295E+5 1.3913E+5 2.7424E+5
 3.1463E+5 3.1210E+5 6.7339E+5 7.0894E+5 3.9464E+5 4.6439E+5
 2.8413E+5 8.5622E+4 3.0261E+5 4.0831E+5 3.8066E+5 4.8881E+5
 3.7062E+5 1.6386E+5 6.9334E+4 2.8868E+4

c
 c
 c Agua
 m3 1001.66c 2 8016.66c 1
 mt3 lwtr.01t

c
 c
 c Aluminio
 m4 13027.66c 1

c
 c Ar (com as secoes de choque disponiveis - BENCHMARK)
 m5 7014.66c 3.3803E-5 8016.66c 8.9860E-6

c
 c
 c aco piscina do Reator IEA-R1m (Rel.410440046)
 m6 6000.66c 3.2000E-4 12000.66c 1.7080E-3 26054.66c 3.3059E-3
 26056.66c 5.2268E-2 26057.66c 1.2540E-3 26058.66c 1.7100E-4
 28058.66c 5.8602E-3 28060.66c 2.2404E-3 28061.66c 9.6997E-5
 28062.66c 3.0816E-4 28064.66c 7.8113E-5 24050.66c 8.0279E-4
 24052.66c 1.5463E-2 24053.66c 1.7532E-3 24054.66c 4.3554E-4
 25055.66c 1.7470E-3

c
 c
 c Concreto Barita (Explicitar as composicao isotopica do Ba)
 m8 8016.66c 4.726E-2 1001.66c 1.827E-2 13027.66c 4.900E-4
 11023.66c 1.037E-4 12000.66c 1.962E-4 14000.60c 1.358E-3
 26054.66c 2.3183E-5 26056.66c 3.6652E-4 26057.66c 8.7934E-6
 26058.66c 1.1991E-6 25055.66c 3.9450E-6 16000.66c 6.510E-3
 56138.66c 6.4095E-3

c

```

c
c blindagem de chumbo
m10 82206.66c 0.241 82207.66c 0.221 82208.66c 0.524
c
m11 6000.66c 0.00015 7014.66c 0.784431 8016.66c 0.210748 18000. 0.004671 $ ar
c
c disco de polietileno (densidade -0.93)
m14 1001.62c 0.666590 1002.24c 0.000077 6000.24c 0.333333
c
c tallies
c
c
fmesh4:n geom=cyl origin=0 0 53.385
      axs=0 0 1 vec= 1 0 0 out=ij
      imesh= 5.735 6.4 7.065 7.62 7.7 7.9375 8.4 9.525 9.8425 10.16
            10.24 10.954 11.43 14.5 20.95 22.22 23.49 24.875 30 50
      iints= 12 3 3 2 2 2 3 2 3
            2 2 3 7 13 4 3 3 10 20
      jmesh=312 jints=624
      kmesh=0.5 1 kints=1 1
      Emesh= 6.25e-7 0.1 20
      Eints= 1 1 1
c
c -----
c
c
wwg:n 14 1 1 j j j j 0
c
c -----
c
f14:n 921 922 923 924 925 926 927 928
e14 6.25e-7 0.01 1 10
fq14 F E
fc14 FLUXO de neutrons ao longo dos segmentos (4cm) da cavidade de irradiacao
c
f16:n 921 922 923 924 925 926 927 928
e16 6.25e-7 0.01 1 10
fq16 F E
fc16 Perfil de DOSE devido aos NEUTRONS ao longo dos segmentos
      (4cm) da cavidade de irradiacao
c
f26:p 921 922 923 924 925 926 927 928
e26 0.01 0.1 1 10
fq26 F E
fc26 Perfil de DOSE devido aos FOTONS ao longo dos segmentos
      (4cm) da cavidade de irradiacao
c
ctme 8000
c
prdmp j -120 1 j j
print 30 110

```