

# Estudo de blindagem radiológica visando a implantação de um obturador do feixe de nêutrons no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear – IEN/CNEN

Larissa R P Xavier\*, Domingos O Cardoso, Francisco J O Ferreira

Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

\*larissa.xavier@cnen.gov.br

**RESUMO:** O presente trabalho sugere o estabelecimento de um obturador para o feixe de nêutrons emergente do canal de irradiação J-9 do reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). A implantação deste tipo de mecanismo permitirá o acesso externo a este canal de irradiação sem que o reator necessite ser desligado, minimizando as doses ocupacionais. As medidas experimentais foram realizadas num sistema de detecção de nêutrons baseado no detector BF3, o qual está acoplado a um espectrômetro. Inicialmente o feixe de nêutrons emergente foi alinhado ao espectrômetro a fim de obter a sua maior intensidade. Em seguida, diferentes materiais foram usados como blindagens, visando à observação dos seus efeitos atenuadores a este feixe. Diante dos resultados obtidos e levando em consideração o custo, manuseio e disponibilidade, recomenda-se a utilização dos materiais hidrogenados como parafina, água ou concreto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Radioproteção. Blindagem radiológica. Reator Argonauta. Fluxo de nêutrons. Blindagem de nêutrons.

**ABSTRACT:** The present work suggests the establishment of a neutron beam shutter from the J-9 irradiation channel of the Argonauta reactor of the Institute of Nuclear Engineering (IEN). The implantation of this type of mechanism will allow the external access to this irradiation channel, and it will not be necessary to turn off the reactor. Thus, occupational doses will be minimized. The experimental measurements were performed on a neutron detection system based on the BF3 detector, which is coupled to a spectrometer. Initially the emerging neutron beam was aligned to the spectrometer in order to obtain its highest intensity. Then, different materials were used as shielding so the attenuating effects to this beam could be observed. Considering the results obtained, the cost, handling and availability, it is recommended to use the hydrogenated materials as paraffin, water or concrete.

**KEYWORDS:** Radioprotection. Radiological shielding. Argonauta reactor. Neutron beam. Neutron beam shutter.

## 1. INTRODUÇÃO

A Proteção Radiológica é o conjunto de medidas que visa a proteger o homem, seus descendentes e o meio ambiente de possíveis efeitos danosos das radiações ionizantes [1].

O princípio básico da proteção radiológica conhecido como ALARA (As Low As Reasonably Achievable) estabelece que todas as exposições devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequíveis. Isto porque estudos radiobiológicos em baixas doses mostraram que não existe um limiar real de dose para os efeitos estocásticos. Assim, a exposição de qualquer tecido envolve um risco carcinogênico, dependendo da radiosensibilidade desse tecido. Portanto, a aplicação deste princípio requer a otimização da proteção radiológica em todas as situações que possam ser controladas por medidas de proteção, particularmente na seleção, planejamento de equipamentos, operações e sistemas de proteção [2].

O reator em questão neste trabalho atende regularmente uma média de 50 alunos/ano de cursos de instituições de ensino do Rio de Janeiro, através da disponibilização de sua infraestrutura para aulas experimentais e trabalhos de conclusão de curso [3].

Visando à adoção de medidas de radioproteção mais eficazes, a instalação de um obturador do feixe no canal de irradiação J-9 será um fator importante para a segurança radiológica dos usuários, minimizando a exposição crônica dos indivíduos ocupacionalmente expostos e demais usuários do reator.

Este trabalho tem como objetivo analisar, através de medidas experimentais com vários materiais, configurações de blindagem radiológica capazes de atuarem como obturadores do feixe de nêutrons emergente do canal J-9 do reator do IEN/CNEN e, por conseguinte, otimizar os procedimentos de radioproteção aplicados aos IOEs e demais pesquisadores que o utilizam.

Após a implementação do obturador será possível aces-

sar os arranjos experimentais localizados na região externa a este canal sem que o reator seja desligado, dessa forma, permitindo o aprimoramento e a expansão das atividades de pesquisa junto ao reator, na medida em que tornará possível a realização de novas técnicas experimentais.

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

Algumas publicações serviram de referência ao desenvolvimento deste trabalho e serão descritas de forma sucinta:

Em 1989, BAHETE, VANGANI e KUMAR [4] desenvolveram técnicas de otimização de parâmetros como: espessura de moderador, razão L/D, blindagem e outros, para sistemas neutrongráficos utilizando fontes isotópicas. Para diminuir o tempo de exposição ao feixe de nêutrons, devido à baixa intensidade das fontes, sugeriram a utilização de filmes pré-expostos.

Em 1990, VOI [5] a fim de determinar a estrutura e a dinâmica molecular de amostras de baquelites calcinadas, estudou e determinou as seções de choque por medidas de transmissão e de espalhamento de nêutrons. As medidas de transmissão, com uma aproximação para compostos moleculares forneceram valores de seções de choque totais que difeririam menos que 5% das existentes na literatura. Posteriormente, prováveis fórmulas moleculares para a baquelite foram estimadas através de correlações das medidas de seções de choque com informações fornecidas por espectroscopia de infravermelho, análise elementar e outras técnicas. Com os espectros de frequências obtidos e os resultados fornecidos por todas as técnicas utilizadas, foi possível estabelecer um modelo estrutural similar ao de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos para a baquelite calcinada.

MACGILLIVRAY e NRAY SERVICES INC (1996) [6] divulgaram princípios e práticas aplicadas em projetos de colimadores utilizados em radiografia de nêutrons. Apesar

de todo o conhecimento que já se possui sobre essa técnica, algumas instalações têm sido projetadas fora das devidas recomendações de grupos experientes no assunto. Deram ênfase à escolha do material, alertando que este deve ser um bom espalhador de nêutrons e que o feixe colimado não deve ser contaminado com raios gama de alta energia.

Em 1999, SILVA [7] demonstrou a potencialidade da neutrongrafia, aliada à tomografia computadorizada por transmissão, para a detecção de narcóticos e explosivos ocultos por diversos materiais. Foram reconstruídas imagens tomográficas, a partir de ensaios experimentais de neutrongrafias realizadas no arranjo instalado no reator Argonauta do IEN/CNEN, e também a partir de simulações realizadas com o código MCNP-4B. Na reconstrução das imagens tomográficas utilizou-se o algoritmo (ARIEM) baseado no princípio de entropia máxima, reconstruindo satisfatoriamente imagens com apenas 6 projeções e 103 abscissas. A conclusão foi de que as reconstruções tomográficas com nêutrons térmicos, de uma forma geral, puderam caracterizar bem a presença de certa quantidade de droga e explosivo, quando submetidos a ocultação por alumínio, chumbo e tecido de algodão.

MENEZES (2000) [8] utilizou o canal de irradiação 08 do reator nuclear de pesquisa IEA-R1 do IPEN/CNEN-SP e também um obturador de feixe para permitir o acesso dos pesquisadores às posições de irradiação. Este obturador foi constituído de duas partes: um cilindro de alumínio, instalado na parte interna do colimador de nêutrons, e um dispositivo externo, junto à parede do reator, na saída do mesmo colimador, que se movimentava perpendicularmente ao feixe de nêutrons. O cilindro de alumínio possuía um sistema de tubos por onde se podia enchê-lo de água para interromper o feixe de nêutrons e, também, esvaziá-lo quando se queria fazer uma radiografia. O dispositivo externo foi composto de camadas de gadolínio, cádmio, parafina borada e chumbo. Estes dois dispositivos foram capazes de reduzirem a dose de radiação neutrônica e gama a níveis seguros na parte interna da blindagem, nas posições de irradiação.

ANDRADE (2002) [9] utilizou o canal de irradiação 08 do reator nuclear de pesquisa IEA-R1 do IPEN/CNEN-SP, e visando a aumentar a segurança do arranjo experimental em termos de proteção radiológica instalou um obturador contra radiação neutrônica (“beam-stopper”). Esse constava de um cone de alumínio que se ajustava ao colimador e que, em sua extremidade de saída do feixe, possuía dois tubos soldados através dos quais água deionizada podia ser inserida ou retirada de seu interior mediante um sistema de bomba d’água e ar comprimido. Além disso, outro dispositivo “carrinho” confeccionado em chumbo com espessura de 15 cm foi utilizado para blindar radiação gama.

Em 2003, FERREIRA [10] realizou um trabalho visando à implantação de um sistema eletrônico para a aquisição de imagens neutrongráficas no reator Argonauta do IEN/CNEN. Foram feitas análises e comparações entre ensaios neutrongráficos realizados no referido reator e no reator IEA-R1 do IPEN/CNEN-SP (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), que dispõe de um sistema em tempo real, e também estudos de diversos sistemas utilizados em outros laboratórios. Concluiu que o arranjo neutrongráfico do IEN estava qualificado em termos de resolução, sensibilidade e intensidade de fluxo de nêutrons para realizar ensaios neutrongráficos em tempo real, utilizando-se um sistema eletrônico de imageamento.

Em 2010, CUNHA [11], realizou simulações computacionais de um reator nuclear de pesquisa utilizando o código de transportes de partículas. O Monte Carlo N-Particle (MCNPX) modelou o reator Argonauta, localizado no IEN/CNEN. Tal montagem apresentou fidelidade geométrica, incluindo a descrição pormenorizada dos materiais, blindagem e canais de irradiação. Além disso, programas adicionais foram utilizados para verificar a geometria, como o VisEd e Moritz. Durante o trabalho, quatro diferentes simulações foram feitas. A primeira simulação consistiu em estimar a reatividade máxima. Na segunda, as barras de controle foram dispostas num arranjo específico para deixar o reator crítico. A terceira consistiu na colocação de detectores em lugares pré-determinados, onde o reator é monitorado. Na quarta, os detectores foram posicionados ao longo do eixo de maior dimensão do combustível, abrangendo os meios multiplicativo e não-multiplicativo. Com base nestas simulações, o perfil de fluxo de nêutrons térmicos foi plotado. Todos os resultados foram comparados com dados experimentais e obteve-se boa concordância entre eles. Com isto, pode-se considerar que o modelo foi validado.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia empregada nesse estudo baseou-se na medida experimental da atenuação da intensidade do feixe de nêutrons emergentes do canal J-9, quando blindados por diferentes tipos de materiais. Para isso utilizou-se um sistema de medidas nucleares baseado no detector BF<sub>3</sub>, o qual encontra-se acoplado ao espectrômetro de cristal, conforme ilustrado na Figura 1.

Além disso, utilizou-se o arranjo experimental situado em frente ao canal J-9, o qual é composto de: um pré-amplificador, um *multichannel analyzer*, que engloba a fonte de alta tensão, amplificador, buffer multicanal, eletrônica associada e o software WinSpec. Na Tabela 1 a seguir está apresentada a especificação da instrumentação utilizada e, na Tabela 2, os parâmetros operacionais do sistema de medidas, os quais já foram historicamente usados [5].

**Tab 1:** Especificação da instrumentação utilizada.

Equipamento	Especificação
Detector BF <sub>3</sub>	Wood Counter Laboratory – Modelo 12543
Pré-amplificador	Oxford TC 175
Analizador multicanal	GBS Elektronik GmbH Rossendorf – MCA 166
WinSpec	Versão 2.04.0000

**Tab 2:** Parâmetros operacionais do sistema de medidas.

Equipamento	Parâmetros operacionais	Valor
Fonte de alimentação	Alta voltagem (HV)	2000 V
Amplificador	Ganho grosseiro	1000
	Ganho fino	1,0
Buffer multicanal	Número de canais	1024
WinSpec	ROIs	18-44; 100-828

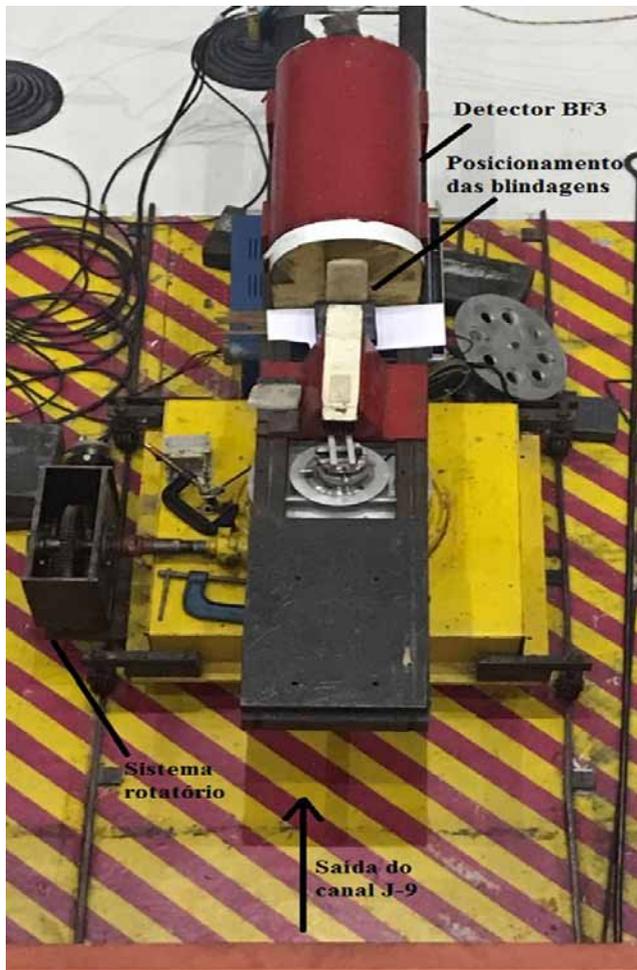


Fig. 1 – Sistema experimental montado.

Para realizar as medidas, o canal J-9 foi preparado utilizando-se os colimadores de grafita internos, paralelo e divergente, e na saída do canal, foi instalada a gaveta com colimador de barras paralelas, com o objetivo de intensificar a componente térmica e diminuir a divergência e o espalhamento de nêutrons [7].

Na entrada do espectrômetro também foram instalados colimadores e blindagens adicionais de cádmio e parafina borada também com o objetivo de evitar a detecção de nêutrons espalhados e, assim, assegurar a contribuição apenas de nêutrons oriundos do J-9.

O trabalho experimental dividiu-se em duas etapas. A primeira dedicada ao alinhamento do feixe de nêutrons do canal J-9 com o detector BF<sub>3</sub>, de modo a se obter a melhor posição para o espectrômetro que seria o ponto em que o feixe direto fosse mais intenso e, conseqüentemente, obter-se uma melhor estatística de contagem com menor interferência. A segunda etapa foi referente à comparação das medidas do feixe direto com as medidas da transmissão do feixe interceptado pelas diferentes blindagens.

Na primeira etapa, de obtenção de posicionamento adequado, o espectrômetro é montado num sistema de trilhos que possibilita a rotação deste equipamento em até 360 graus, com variações mínimas de 0,1 grau.

Foram realizadas medições entre as posições de  $\theta$  de -6 a 6 graus, passando pelo zero, com intervalo de 1 grau. Na Figura 2 é possível observar como foi feita a rotação do espectrômetro. Para cada ângulo  $\theta$  foi calculada uma média simples para um total de três medidas, cada uma de 30 segundos.



Fig. 2 – Alinhamento do espectrômetro com o fluxo do canal J-9.

Para a segunda parte experimental foram selecionados alguns materiais. Uma parte deles citados na literatura especializada, tais como baquelite [5], parafina borada e chumbo [8], alumínio e água [9], usualmente utilizados como blindagens para nêutrons e outros em função da alta seção de choque, como cádmio, gadolínio e elementos hidrogenados, com o intuito de verificar as suas capacidades de blindar o feixe de nêutrons e, assim, sugerir o material mais apropriado para ser empregado como obturador do feixe de nêutrons emergente do canal J-9.

Os materiais disponíveis que foram utilizados e suas características podem ser observados na Tabela 3 a seguir [5]:

Tab 3: Características dos materiais que serviram como blindagem para o fluxo de nêutrons do canal j-9.

Material	Espessura (cm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Parafina	1,80	0,90
Parafina borada	1,25	0,88
Cádmio	0,05	8,65
Gadolínio	0,005	7,90
Concreto (alta densidade)	2,23	3,60
Água	2,35	1,00
Aço inoxidável	0,85	8,00
Grafite	1,50	2,16
Ferro	0,85	7,87
Porta amostra de Baquelite	0,20	1,38
Chumbo	1,07	11,34
Alumínio	1,33	2,7

A medida da intensidade do feixe de nêutrons emergentes do canal J-9, feixe direto, foi realizada sem nenhum material entre a saída do canal e o detector. Em seguida, posicionou-se um a um os materiais descritos anteriormente, de forma a

blindar o fluxo oriundo do canal J-9, conforme Figura 3. Para cada condição descrita acima foram realizadas 3 medidas de 300 segundos cada.



Fig. 3 – Estrutura montada para o experimento, utilizando a parafina borada como blindagem.

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Seguindo a metodologia, iniciou-se pelo alinhamento do feixe emergente do canal J-9 com o espectrômetro, onde se encontra o detector BF<sub>3</sub>. Para realização desta etapa, o reator operou a 34 W, sendo realizadas medições entre as posições -6 a 6 graus, passando pelo zero, com intervalos de 1 grau. Como é possível observar nos resultados apresentados na Figura 4, o alinhamento representado pelo maior fluxo de nêutrons ocorreu na posição de (-1) grau. Nesta condição foi verificada, através do espectro obtido, a relação entre a área sob o pico atribuído a detecção de nêutrons emergentes com a da área sob o pico obtida com a detecção da radiação gama, sendo encontrada a razão de 28,4.

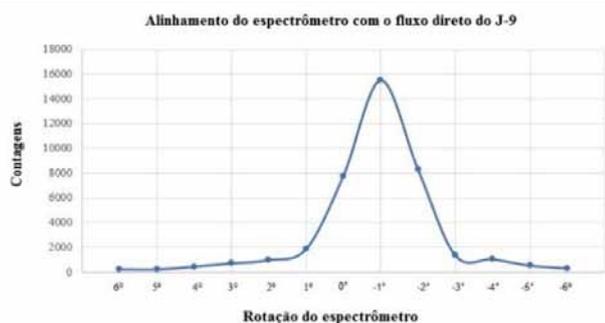


Fig. 4 – Contagem média de nêutrons por grau, no fluxo direto do canal J-9.

Com espectrômetro alinhado na posição (-1°), iniciou-se a segunda etapa de medidas. A potência do reator foi ajustada para 170 Watts, com a finalidade de aumentar a estatística de contagem nas condições em que o feixe emergente de nêutrons oriundo do J-9 fosse blindado pelos diferentes materiais utilizados.

Para esse novo nível de potência foi novamente verificada a relação de nêutrons emergentes com a de radiação gama, através do espectro obtido nesta etapa, como apresentado na Figura 5. Obtendo-se uma razão de 28,6, bastante próxima da relação citada anteriormente, confirmando assim que não ocorreu a saturação do detector.

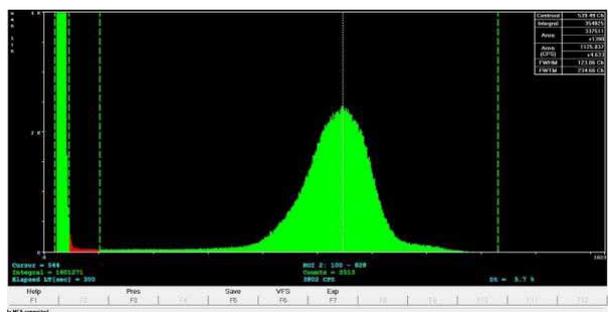


Fig. 5 – Espectro de altura de pulsos do BF<sub>3</sub> sob irradiação do canal J-9.

Repetiu-se o mesmo procedimento utilizado para o feixe direto para cada um dos materiais em estudo separadamente. Na Tabela 4 estão dispostos as contagens médias e o desvio padrão para as diversas blindagens:

Tab 4: Média de contagens e desvio padrão para os diferentes materiais.

Material	Média de contagens	Desvio padrão (%)
Parafina	6686	4
Parafina borada	18909	3
Cádmio	24992	3
Gadólíno	93186	5
Concreto	131429	7
Porta amostra com água	2496	7

Tab 4 – Continuação.

Porta amostra sem água	151313	2
Água	148818	2
Aço inoxidável	169914	2
Grafite	198425	3
Ferro	199702	8
Baquelite	211973	3
Chumbo	276259	8
Alumínio	282927	5

Em particular, para determinar a medida para a água realizou-se uma medida do porta amostra com água e uma medida do porta amostra vazio. Dessa forma a medida exclusiva para a água foi determinada pela diferença entre os dois valores.

A seguir, na Figura 6, estão dispostos os espectros dos feixes interceptados pela parafina e pelo alumínio, materiais os quais apresentaram menor e maior transmissão, respectivamente. Os espectros referentes a transmissão dos demais materiais, para uma melhor análise, podem ser encontrados em trabalho anterior [12].

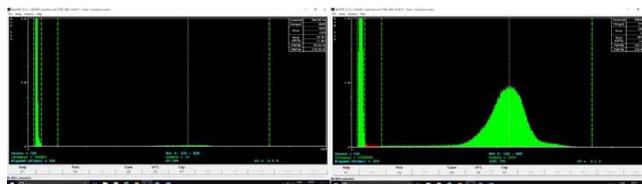


Fig. 6 – Fluxo transmitido pela: (a) Parafina; (b) Alumínio.

Observando as medidas experimentais representadas

pelos espectros foi possível calcular a transmissão do feixe quando blindados pelos materiais, utilizando a razão entre a contagem de nêutrons com a blindagem pela contagem de nêutrons do feixe direto. A seguir, na Tabela 5, estão apresentados esses resultados:

**Tab 5:** Transmissão dos diferentes materiais.

Material	Espessura (cm)	Transmissão
Parafina	1,80	0,019
Parafina borada	1,25	0,054
Cádmio	0,05	0,072
Gadólíneo	0,005	0,268
Concreto	2,23	0,378
Água	2,35	0,428
Aço inoxidável	0,85	0,488
Grafite	1,50	0,570
Ferro	0,85	0,574
Baquelite	0,20	0,609
Chumbo	1,07	0,794
Alumínio	1,33	0,813

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pelas medidas experimentais estão em acordo com a literatura, isto é, os materiais que apresentam menor transmissão de nêutrons são os hidrogenados, a parafina, a parafina borada, a água e o concreto, assim como, o cádmio e o gadolínio. E por isso são os mais indicados para serem utilizados no obturador do feixe emergente do canal J-9. Por outro lado, também pode se observar que os metais, tais como alumínio, chumbo, ferro e aço inoxidável apresentam uma grande transmissão. Além disso, para a escolha do melhor material a ser utilizado como obturador do feixe, deve-se levar em consideração o seu custo, o seu manuseio e a sua disponibilidade.

Diante dos resultados obtidos recomenda-se a utilização dos materiais hidrogenados, porém, devido às considerações relacionadas à construção do obturador é necessário um es-

tudo complementar para determinar uma configuração que melhor atenda a esse propósito.

Destaca-se o emprego da metodologia de medida da transmissão do feixe de nêutrons para obtenção dos resultados obtidos nesse estudo, ferramenta que é normalmente utilizada em estudos para medidas de seção de choque.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. P. Mazzili, R.F. Christovam, Y. Kodama, F. F. Suzuki, J. C. Dellamano, J. T. Marumo, M. P. Sanches, R. Vicente, S. A Bellintani, "Noções básicas de proteção radiológica", IPEN, São Paulo, 2002.
- [2] L. Tauhata, I.P.A. Salati, R. Di Prinzio, M.A.R.R. Di Prinzio, "Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos", IRD/CNEN, Rio de Janeiro (2014).
- [3] INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR, IEN, "Reator Argonauta", 2017. Disponível em <<http://www.ien.gov.br/index.php/principais-instalacoes/57-pagina-interna/159-argonauta>>.
- [4] G. L. BAHETI, V. S. VANGANI, R. KUMAR, "Optimization Techniques in Low Flux Neutron Radiography", Proceedings of the Third World Conference, Osaka, pp 571-576, 1989.
- [5] D. L. VOI, "Estudo da Estrutura e Dinâmica Moleculares da Baquelite através de medidas de seção de choque para neutrons", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.
- [6] G. M. MACGILLIVRAY, NRAY SERVICES INC, "Neutron Radiography Collimator Design".
- [7] A. X. SILVA, "Uso de um feixe de nêutrons térmicos para detecção de narcóticos e explosivos por tomografia para aplicação na Segurança Pública Nacional", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
- [8] M. O. MENEZES, "Radiografia com nêutrons em tempo-real", Tese de Doutorado, IPEN, São Paulo, 2000.
- [9] M. L. G. ANDRADE, "Caracterização de sistemas filme-conversor para radiografia com nêutrons", Dissertação de Mestrado, IPEN, São Paulo, 2002.
- [10] F. J. O. FERREIRA, "Estudo para implantação de um sistema eletrônico para aquisição de imagens neutrongráficas no Reator Argonauta do IEN/CNEN", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- [11] V. L. L. CUNHA, "Simulação do reator Argonauta/IEN utilizando o código MNCPIX", Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, 2010.
- [12] L. R. P. XAVIER, "Estudo de blindagem radiológica visando a implantação de um obturador do feixe de nêutrons no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear – IEN/CNEN", Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro,