

EXPERIMENTO SOBRE DETETORES OUT-OF-CORE NO REATOR IPEN/MB-01

Alfredo Y. Abe*, Leda Cristina C. B. Fanaro[†], Rinaldo Fuga*, Rogério Jerez[†],
Paulo R. Pinto Coelho[†], Arlindo Gilson Mendonça*, Adimir dos Santos[†],
João M. L. Moreira*, Elcio Angioletto*, Graciete S. de A. e Silva[†], Ricardo Diniz[†]

*Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, CTMSP
Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária
05508-900, São Paulo, SP, Brasil

[†]Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP
Travessa R 400, Cidade Universitária
05598-900, São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Visando estudar a resposta de detetores “out-of-core” foram colocadas 16 placas de aço de 0,5 mm de espessura próximas à interface núcleo-refletor do reator IPEN/MB-01. Detetores foram posicionados além destas placas de aço dentro e fora do tanque de moderador e foram feitas aquisições de seus sinais. Sete posições de detetores foram medidas além das placas de aço sendo uma delas fora do tanque de moderador, de forma a simular um detetor “out-of-core” de PWR.

Cálculos para comparação com resultados experimentais foram feitos com o programa TORT de transporte de nêutrons utilizando o método das ordenadas discretas. Na modelagem tridimensional em geometria cartesiana, utilizou-se 16 grupos de energia, discretização angular S_{16} e seções de choque com anisotropia P_3 .

Os resultados obtidos mostraram que a concordância entre as taxas de reação medidas e calculadas para a posição 1 é muito boa. A maior discrepância ocorreu para o caso de 16 placas de aço com um desvio de 2,2 %. Para a posição 7, fora do tanque de moderador, o fluxo de nêutrons é tão baixo que não foi possível ativar folhas de ouro para medidas de taxa de reação.

Palavras Chave: detetor “out-of-core”, transporte de nêutrons, TORT, experimento.

I. INTRODUÇÃO

A instrumentação nuclear da Instalação Nuclear a Água Pressurizada, INAP, que está em construção no Centro Experimental de Aramar, foi definida por meio de cálculos de transporte de nêutrons em geometria bi-dimensional. Dadas às características específicas de seu núcleo de reator compacto e a complexidade geométrica e de materiais existente entre o núcleo e os detetores “out-of-core”, resolveu-se fazer a verificação do projeto por meio de um experimento no reator IPEN/MB-01. Os canais da instrumentação “out-of-core” da INAP encontram-se localizados fora do vaso do reator após o isolante térmico a uma distância de aproximadamente 1 m do núcleo. Entre o núcleo e o detetor há várias estruturas de aço com funções específicas como um baffle para garantir o arranjo geométrico do núcleo, duas chapas de aço intercaladas por lâminas de água e, finalmente, o dispositivo de suporte do detetor que compõe o canal. A resposta do detetor out-of-core depende de sua sensibilidade, do transporte de nêutrons através da região descrita acima e da forma da

fonte de nêutrons que é o núcleo do reator. Recentemente, este tipo de problema tem sido estudado para se determinar a fluência de nêutrons em vasos de pressão e doses acumuladas em capsulas de “surveillances” [1,2] objetivando estender a vida útil de vasos de pressão de reatores de potência.

Nos cálculos de transporte de nêutrons realizados para a especificação dos detetores “out-of-core” da INAP utilizou-se uma modelagem bi-dimensional da região e solução da equação de transporte de nêutrons por ordenadas discretas. A influência da altura do reator não pôde ser avaliada com precisão ficando o refinamento para um estudo experimental. Assim, os principais objetivos deste trabalho são estabelecer a metodologia de cálculo de fluxo de nêutrons na posição dos detetores “out-of-core” e determinar experimentalmente a precisão desta metodologia.

O experimento “out-of-core” consiste basicamente na colocação de placas de aço carbono junto a face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01, e aquisição das contagens

de detectores BF_3 e ^{10}B , posicionados após as placas. O detector BF_3 , interno ao tanque do reator, foi posicionado em até seis posições e o detector ^{10}B foi posicionado externo ao tanque do reator simulando um detector “out-of-core” em condições reais. As medidas internas ao tanque visaram o fornecimento de informações mais próximas ao núcleo para a avaliação dos métodos de cálculo.

As atividades relacionadas com o experimento duraram cerca de 20 dias úteis, de 14 setembro a 15 outubro de 1999 [3], desde a colocação das placas de aço na região do refletor até a remoção de todas elas. Durante estas atividades foram efetuadas aquisições de dados dos detectores “out-of-core” com o núcleo contendo entre nenhuma e 16 placas de aço posicionadas junto a sua face oeste.

Outras medidas foram realizadas durante os experimentos como medida de reatividade das chapas e de distribuição de taxa de reação de nêutrons na região do refletor, entretanto, não são apresentadas neste trabalho.

II. O EXPERIMENTO “OUT-OF-CORE”

A Figura 1 mostra esquematicamente as condições do experimento no reator IPEN/MB-01. As medidas foram

realizadas com o núcleo na configuração retangular (28x26 varetas), na face oeste do núcleo foram inseridas 16 chapas de aço na interface núcleo-refletor (parte hachurada à direita do núcleo na Fig. 1), o detector de BF_3 foi posicionado para as medidas nas posições numeradas de 1 a 6 e o detector de ^{10}B na posição 7, fora do tanque de moderador no ar.

O círculo indica a parede de aço inoxidável do tanque de moderador com diâmetro semelhante ao do vaso do reator da INAP. Os círculos numerados de 1 a 10 indicam a posição dos canais de instrumentação nuclear do reator IPEN/MB-01 e os dois círculos com indicação de ruído mostram a posição dos detectores utilizados para monitoração da potência do reator pela técnica de ruído.

O experimento “out-of-core” [3,4] consistiu na inserção de chapas de aço-carbono (ABNT-1020) na face oeste do núcleo do reator. As chapas de aço utilizadas possuem uma seção transversal de 50,8 x 71,6 cm e uma espessura de 0,5 cm. Estas chapas justapostas na face oeste e a cada inserção de duas placas são coletadas informações em detectores posicionados após estas chapas a fim de se acompanhar a variação do fluxo de nêutrons.

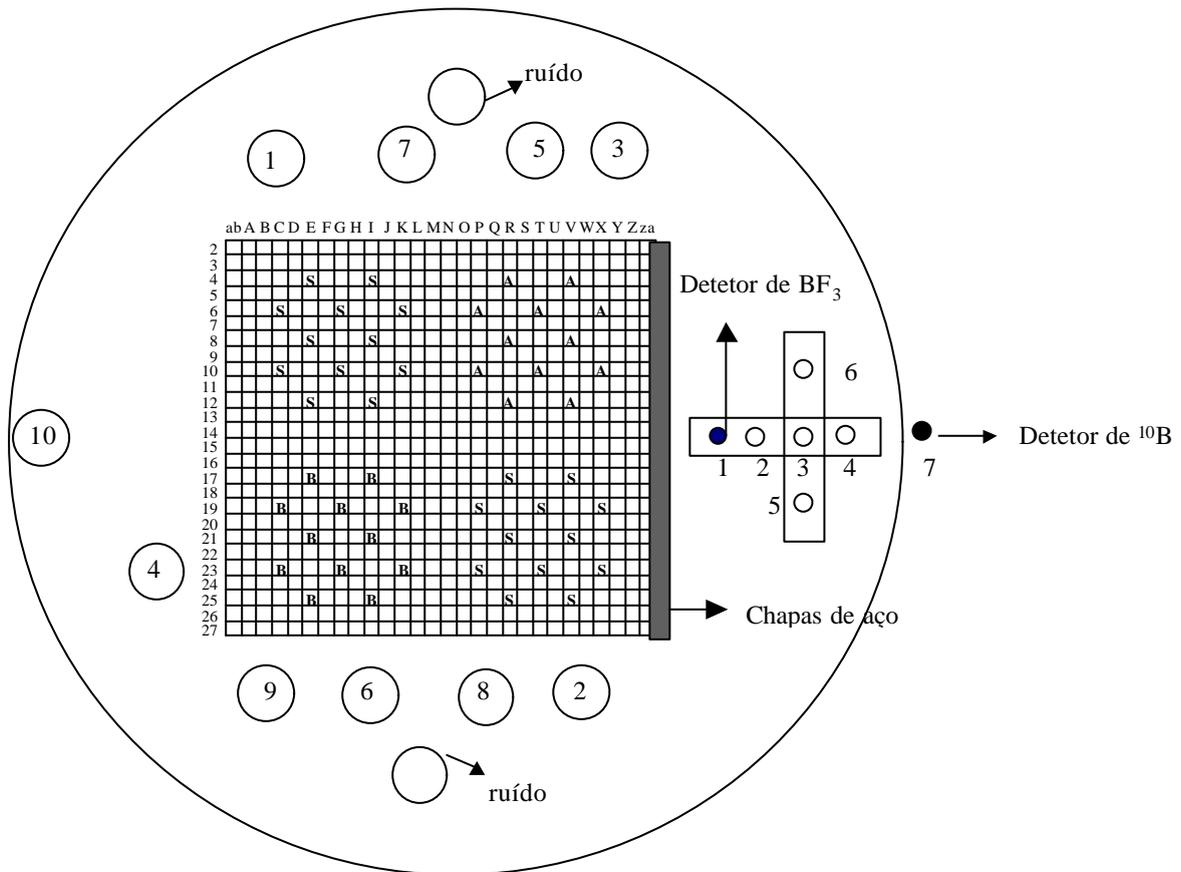


FIGURA 1 - Diagrama esquemático do núcleo do Reator IPEN/MB-01 indicando as posições das placas de aço carbono e dos detectores utilizado no experimento.

O detector BF₃ foi colocado em um tubo de alumínio (tubulão) com sua base posicionada em uma altura que corresponde ao centro do núcleo. O detector de ¹⁰B foi fixado na parede externa do tanque de moderador na altura correspondente também ao centro do núcleo. As condições de operação de ambos os detectores encontram-se na Ref. 1; os equipamentos utilizados na cadeia de instrumentos dos detectores foram uma fonte de alta tensão Ortec 556 ou Ortec Acemate, pré-amplificador Ortec PC142IH, amplificador Ortec 450 ou 460, monocanal Ortec 551 ou Micronal 4010, contador duplo Ortec 778 ou 772 e contador de tempo Ortec 774 ou 773.

Determinou-se uma faixa de potência adequada para o experimento de forma que a resposta do detector não saturasse para a situação de alto fluxo (nenhuma placa) e que o detector não deixasse de responder para o caso de baixo fluxo (16 placas). Os resultados obtidos nesta etapa indicaram que o experimento fosse realizado com o reator operando nas potências de 3 W e 7 W. Foram feitas medidas para verificar a interferência da presença do detector de BF₃ nos sinais do detector de ¹⁰B. Os resultados mostraram que a resposta do último é independente da posição do primeiro. A seguir foram realizadas as medidas de sinal dos detectores para as condições de 16, 12, 8, 6, 5, 4, 3, 2, 1, e 0 chapas de aço na interface núcleo-refletor. Os resultados foram analisados com o programa ORIGIN 5.0, através de gráficos e ajustes que descrevem os valores experimentais.

A Tabela 1 apresenta as respostas dos detectores BF₃ na posição 1 e ¹⁰B na posição 7 (fora do tanque de moderador) em função do número de chapas colocadas na face oeste do reator. As medidas apresentadas foram realizadas para a potência de 7 W, barra de controle BC 2 fixa na posição de 59 % retirada e barra de controle BC 1 variando entre 58,1 e 66,8 %, retirada para manter a criticalidade do reator.

TABELA 1 – Contagens dos detectores BF₃ na posição 1 e ¹⁰B na posição 7 em função do número de chapas colocadas na face oeste.

Número de Placas	Contagem do BF ₃ (x10 ³)	Contagem do ¹⁰ B (x10 ³)
0	1945,3 ± 1,4	
1	1773,1 ± 1,3	686,8 ± 2,6
2	1697,1 ± 1,3	645,6 ± 2,5
3	1656,6 ± 1,3	625,7 ± 2,5
4	1633,3 ± 1,3	600,9 ± 2,4
5	1615,7 ± 1,3	590,9 ± 2,4
6	1596,6 ± 1,3	575,4 ± 2,4
8	1579,1 ± 1,3	540,9 ± 2,3
12	1543,2 ± 1,2	494,8 ± 2,2
16	1525,9 ± 1,2	447,0 ± 2,1

Notou-se durante as medidas que a posição das barras de controle altera a distribuição de fonte de nêutrons no reator o suficiente para ser notada pelos dois detectores. Outros dois conjuntos de medidas com posições de barras de controle ligeiramente diferente e potência de 3 e 7 W também foram realizados e mostraram comportamentos semelhantes.

Para facilitar comparações entre resultados experimentais e de cálculo foram feitas medidas de taxa de reação de folhas de Au irradiadas nas mesmas posições e potências de operação que os detectores. Estas medidas, denominadas intercalibração detector-folhas de Au, visam construir uma correlação experimental entre o sinal do detector e a atividade específica obtida com as folhas de Au. As taxas de reação nas folhas de ativação podem ser calculadas com mais facilidade que a resposta dos detectores.

As folhas de Au foram posicionadas em uma régua de lucite que permite a variação da altura e colocadas em um tubulão de alumínio contendo água. Depois de irradiadas nas mesmas condições operacionais que os detectores, as folhas foram contadas em um detector tipo poço de NaI e as contagens foram processadas e convertidas em atividade específica. Para garantir a qualidade das medidas um segundo detector localizado nas posições laterais, 5 e 6, foi utilizado durante as medidas. A Tabela 2 apresenta os resultados de taxa de reação no Au, referentes à posição do detector 1, em função do número de chapas colocadas na face oeste do reator para a potência de operação de 7 W.

TABELA 2 – Taxa de reação nas folhas de Au na posição de detector 1 em função do número de chapas de aço na face oeste.

Número de chapas	Taxa de reação no ¹⁹⁷ Au (reações/g) (x10 ²)
0	215,3 ± 7,6
1	195,4 ± 6,8
2	186,7 ± 6,5
3	182,0 ± 6,3
4	179,3 ± 6,2
5	177,3 ± 6,1
6	175,1 ± 6,0
8	173,1 ± 5,9
12	168,9 ± 5,8
16	166,9 ± 5,7

Foram feitas medidas com o detector BF₃ nas posições 2 a 6, entretanto os resultados ainda não foram analisados. Folhas de Au foram colocadas e irradiadas nas

posições 2 a 7, entretanto os dados também não foram analisados. Na posição 7, fora do tanque de moderador, as de Au foram irradiadas por mais de 4 horas com o reator operando em sua potência máxima, isto é, 100 W, sem que se obtivesse uma atividade que fosse medida com qualidade. Assim, nesta posição não foi possível obter resultados de taxas de reação no Au.

III. MODELAGEM DO EXPERIMENTO COM O PROGRAMA TORT

O reator IPEN/MB-01 é constituído por 728 varetas em um arranjo retangular de 28 x 26 posições, 48 destas varetas são absorvedoras de nêutrons e usadas para controle e segurança e as demais 680 são varetas de combustível típicas de PWR. O enriquecimento das pastilhas de UO_2 é de 4,3 %, o revestimento das varetas é de aço inoxidável e o núcleo do reator é refletido e moderado por água leve.

Na Figura 1 é apresentada uma vista superior do reator onde as posições com denominação “S” são de varetas de segurança, as com denominação “A” e “B” são de varetas de controle e as demais posições são de combustível.

O espaçamento entre varetas, centro a centro, é de 1,5 cm. As várias regiões axiais que compõem o núcleo com suas respectivas dimensões são refletor inferior (15 cm de água), placa matriz (2,2 cm de aço-inox), alumina inferior (9 cm de água e alumínio), núcleo ativo (54,6 cm de combustível), alumina superior (5,4 cm de água e alumínio) e tubo espaçador (38,6 cm de água e tubos).

Baseando-se nestas informações foi realizada uma modelagem tridimensional [4] do reator IPEN/MB-01 com o programa TORT [5], em uma estrutura de 16 grupos de energia com 5 grupos de “upscattering”, discretização angular S_{16} e seções de choque com anisotropia P_3 . Esta modelagem consiste em uma geometria retangular X-Y-Z, com uma discretização espacial total de 103 “meshes” na direção X, 50 “meshes” na direção Y e 81 “meshes” na direção Z.

O núcleo ativo do reator foi modelado pino a pino (28 x 26 varetas) com uma distância entre centros das varetas de 1,5 cm, ou seja com uma discretização de 28 “meshes” na direção X e 26 “meshes” na direção Y. A altura ativa do núcleo do reator (54,6 cm) foi discretizada em 55 “meshes” correspondentes a direção Z.

O refletor radial do núcleo do reator foi representado por 30 cm de água a menos da face oeste onde está montado o arranjo experimental. A discretização espacial desta água lateral (normalmente chamado refletor radial) foi efetuada em 12 “meshes” tanto na direção X (face leste) como em Y (faces norte e sul). Na direção X, face oeste, (região do arranjo experimental) foi efetuada uma discretização de 63 “meshes”, representando com detalhe a água e as placas de aço. Os detalhes da discretização espacial da modelagem encontra-se na Ref. 2.

Para refletir as condições dos experimentos, modelou-se o núcleo do reator IPEN/MB-01 com as respectivas configurações críticas obtidas experimentalmente, isto é, bancos de controle BC 1 e BC 2 simétricos e BC 1 e BC 2 assimétricos. As placas de aço carbono também foram modeladas junto a face oeste do núcleo, sendo que a primeira placa dos conjuntos de 4, 8 e 16 placas ficou posicionada a cerca de 5 mm da última fileira de varetas combustíveis.

Os casos com 4 e 8 placas de aço carbono, foram executados com o programa TORT com as duas configurações críticas experimentais. Os casos sem placas de aço e com 16 placas foram executados com o programa TORT com uma única configuração crítica para os bancos de controle: sem placas com bancos simétricos e com 16 placas com bancos assimétricos.

A Figura 2 apresenta as distribuições de taxa de reação nêutron-folhas de Au, calculadas com o programa TORT, para as situações com 4, 8 e 16 placas para a face oeste e bancos de controle em posições assimétricas. Dois efeitos físicos interessantes podem ser observados. Há o deslocamento do pico de nêutrons térmicos do refletor para logo após os conjuntos de placas. Há, também, o aumento da taxa de reação na região dentro do núcleo do reator a medida que se coloca mais placas de aço no refletor. Assim, as placas de aço na periferia do reator absorvem nêutrons mas, principalmente, refletem nêutrons para dentro do núcleo.

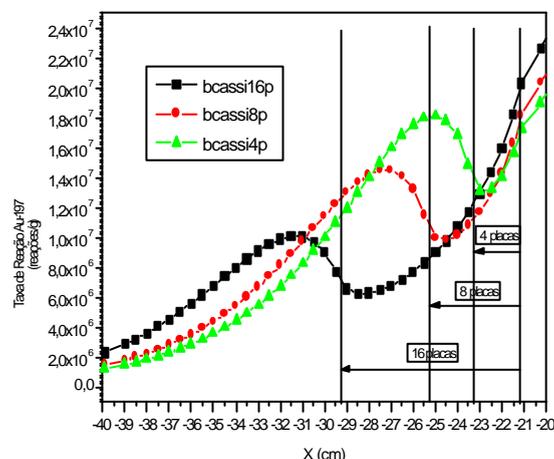


FIGURA 2 - Distribuição taxa de reação nêutron-Au para os casos com 4, 8 e 16 placas de aço carbono na região do refletor oeste

IV. COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CALCULADOS

As contagens do detector BF_3 foram convertidas em taxas de reação nêutron-Au, a partir dos resultados de intercalibração apresentados na Tabela 2, realizadas com detectores de ativação de ouro ^{197}Au , para o detector colocado na posição 1.

Na Tabela 3 são apresentadas as razões de taxas de reação calculadas com o programa TORT e as experimentais, para os casos da face oeste do núcleo sem placas com 4, 8 e 16 placas, para o reator operando a 7 W de potência e para a posição 1 do detetor BF₃. Nota-se que o maior desvio ocorre para o caso com 16 placas de aço e é de 2,2 %.

Na Tabela 3 são apresentadas as taxas de reação medidas e calculadas com o programa TORT. Na Figura 3 são mostradas as taxas de reação calculadas da Tabela 3 e todas taxas de reação medidas. Verifica-se uma boa concordância entre as taxas de reação experimentais sendo que o maior desvio é para o caso da face oeste com 16 placas, entretanto dentro da incerteza experimental.

TABELA 3 – Comparação entre as taxas de reação Au-nêutron calculadas com o TORT e experimentais. Medidas para o detetor de BF₃ na posição 1.

Número de placas	Medida x10 ² (reações/g)	Calculada x10 ² (reações/g)	C/E
0	215,3 ± 7,6	217,4	1,0100
4	179,3 ± 6,2	177,4	0,9894
8	173,1 ± 5,9	175,1	1,0116
16	166,9 ± 5,7	170,6	1,0222

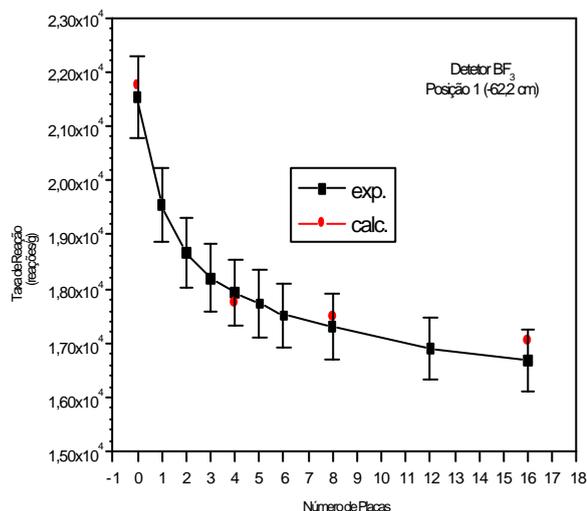


FIGURA 3 – Taxas de reação Au-nêutron experimentais e calculadas com o TORT em função do número de placas para a posição 1.

V. CONCLUSÕES

Foram realizadas várias medidas para se estudar a resposta de detetores “out-of-core” no reator IPEN/MB-01. Para simular as partes internas, típicas de um reator de água

pressurizada, foram colocadas até 16 placas de aço de 0,5 cm de espessura na face oeste do reator. As medidas de sinais de detetores BF₃ foram feitas em 6 posições no refletor localizado na face oeste do reator; fora do tanque de moderador, em condições semelhantes a um detetor “out-of-core”, foram feitas medidas com um detetor de ¹⁰B

Medidas de contagens dos detetores BF₃, na posição 1, e ¹⁰B, na posição 7 (fora do tanque de moderador), foram apresentadas em função do número de placas colocadas na face oeste. Medidas em outras posições ainda não foram analisadas e serão apresentadas em trabalhos futuros.

Os cálculos para a análise do experimento foram feitos com o programa TORT que resolve a equação de transporte de nêutrons pela método das ordenadas discretas. Na modelagem tri-dimensional em geometria cartesiana, utilizou-se 16 grupos de energia, discretização angular S₁₆ e seções de choque com anisotropia P₃.

Os resultados obtidos mostraram que a concordância entre as taxas de reação medidas e calculadas para a posição 1 é muito boa. A maior discrepância ocorreu para o caso de 16 placas de aço com um desvio de 2,2 %. Para a posição 7, fora do tanque de moderador, o fluxo de nêutrons é tão baixo que não foi possível ativar folhas de ouro para medidas de taxa de reação.

Os resultados de cálculo com o programa TORT mostram que as placas de aço deslocam o pico de nêutrons térmicos na região do refletor para além das placas de aço. As placas de aço também refletem nêutrons de volta ao núcleo aumentando o fluxo de nêutrons térmicos na parte do núcleo próxima à placa.

Em continuação a este trabalho, será feita a análise dos resultados medidos de contagens de detetores e folhas de ativação nas posições 2, 3, 4, 5, e 6; serão estudadas as alterações de reatividade e de distribuição de fluxo de nêutrons no núcleo do reator causados pela presença das placas de aço no refletor; será estudado o comportamento do fluxo térmico na região do refletor e será calculado com o programa TORT a resposta do detetor de ¹⁰B na posição 7, fora do tanque de moderador, que simula um detetor “out-of-core”.

REFERÊNCIAS

- REMEC, I. “Two benchmarks for qualification of pressure vessel fluence calculational methodology”, 1998 Radiation Protection and Shielding Division Topical Conference, p. I-295, The American Nuclear Society, Nashville, TN, USA, April 19-23, 1998.
- ABDERRAHIM, H. A. e MINSART, G. “Comparison of measured and computed gamma-ray doses in the structural materials of the VENUS-1 PWR mock-up”, 1998 Radiation Protection and Shielding Division Topical Conference, p. II-3, The American Nuclear Society, Nashville, TN, USA, April 19-23, 1998.

3. FANARO, L.C.C.B. e outros. **"Intercalibração de Detetores de BF₃ e 10B com Detetores de Ativação"**. Relatório Técnico PSE.RAF.CTMSP.013, RELT.001.R00, 24/ 09/ 99.
4. MENDONÇA, G., ABE, A. E SANTOS, A. **"Obtenção e análise dos fluxos de nêutrons térmicos e taxa de reação nos fios de ouro do experimento "out-of-core"**. Rel. no. R21-03-9100-RG-07-00. 18/11/99.
5. Rhoades, W. A.; Simpson, D. B.; **"The TORT Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code"**, ORNL/TM-13221, 1991.

ABSTRACT

In order to study the response of out-of-core detectors, 16 stainless steel plates, with 0.5 cm thickness, were placed at the core-reflector interface of the IPEN/MB-01 reactor. BF₃, ¹⁰B and Au foil detectors were localized beyond the stainless steel plates in 7 different positions, one of them outside the moderator tank of the reactor for simulating a true PWR out-of-core detector.

Calculations were performed for comparison with the experimental results with the TORT code, a three-dimensional transport theory discrete ordinate code. The experiment model utilized 16 energy groups, X-Y-Z geometry, S₁₆ discrete ordinates and P₃ cross-sections.

The obtained results showed a good agreement between measured and calculated reaction rates in Au foils. The larger discrepancy occurred for the case with 16 stainless steel plates with a 2,2 % deviation. For position 7, outside of the moderator tank, the neutron flux was so low that it could not activate the Au foils for the reaction rate measurements.