



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

SISTEMA PARA INSPEÇÃO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE REATORES NUCLEARES DE PESQUISA PELO MÉTODO DE “SIPPING”

Rogério Rivail Rodrigues, Amir Zacarias Mesquita

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear
(CDTN/CNEN)

Campus da UFMG – Pampulha. Belo Horizonte - Brasil

rrr@cdtn.br, amir@cdtn.br

RESUMO

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) é uma instituição de pesquisa do Governo Federal do Brasil. Sua missão é a pesquisa nuclear para fins pacíficos. Em suas instalações existe um reator nuclear de pesquisa tipo TRIGA Mark I, fabricado pela General Atomics Co., em funcionamento desde novembro de 1960. Seu núcleo é formado por 63 elementos de combustível (EC), sendo que 59 revestidos em alumínio e 4 revestidos em aço inox.

Devido a exigências legais de segurança impostas pelo órgão regulador brasileiro, tornou-se necessário examinar os EC, que formam o núcleo do reator, para verificar a sua integridade estrutural no que se refere à possibilidade de ocorrência de fugas de produtos de fissão em função de defeitos no revestimento. Com esse objetivo está sendo desenvolvido e implantado uma metodologia específica, para verificação dos EC pelo emprego da técnica conhecida como teste de “sipping”. Para isso foi projetado e está em fase final de fabricação um dispositivo para realização deste teste nos elementos combustíveis do reator TRIGA do CDTN.

Este trabalho descreve o estágio atual da pesquisa, onde foi construído um recipiente onde será testado um elemento combustível ainda não irradiado (não queimado), com a finalidade de mostrar a viabilidade do sistema proposto. A próxima etapa será a inspeção de todos os elementos combustíveis existentes no núcleo. Neste caso deverão tomados os cuidados relativos a radiação ionizante emitida pelos combustíveis. O resultado esperado é a confirmação que os EC encontram-se em excelente estado de conservação, atendendo aos novos protocolos de segurança, garantindo a continuidade do uso do reator com segurança.

Palavras Chaves: Reator nuclear de pesquisa, TRIGA, integridade estrutural, elementos combustíveis, “sipping”.



1. INTRODUÇÃO

No reator TRIGA IPR-R1 os 59 elementos revestidos em alumínio tipo AL1100F têm paredes com 0,76 mm de espessura [1]. Os 4 elementos revestidos em aço inoxidável AISI-304 [2] têm paredes de 0,50 mm de espessura [3]. Essas paredes são projetadas para ter a menor espessura possível de modo a melhorar a condução de calor e o fluxo de nêutrons, mas, por outro lado, tornam delicada a manipulação dos elementos combustíveis. Os EC's são manuseados por uma ferramenta própria, operada manualmente e que acarreta o risco de ocasionar fricção dos revestimentos dos EC's, nas estruturas metálicas do núcleo. A manipulação pode levar a danos no encapsulamento como arranhões, furos, ou até mesmo rasgos, se houver alguma falha no manuseio levando em conta a delicada espessura do revestimento de alumínio [4]. O revestimento dos quatro EC's em aço é mais resistente mecanicamente do que o revestimento em alumínio, devido às diferentes propriedades mecânicas desses materiais.[5]. A Figura 1 apresenta um elemento combustível do reator TRIGA Mark I. Após aproximadamente 46 anos de operação, observou-se por inspeção visual, manchas e pites de corrosão em alguns EC[4].

De acordo com a General Atomics, fabricante do combustível, [6], mesmo com a retirada total do encapsulamento de alumínio ou aço inox dos EC's a liga empregada como combustível tem a capacidade de retenção de 99% dos produtos de fissão produzidos durante a queima do combustível [6].



Figura 1- Elemento Combustível revestido em alumínio do reator TRIGA IPR-R1 [1].

2. OBJETIVO

O objetivo principal deste projeto é desenvolver uma metodologia para verificação de possíveis vazamentos em EC de reatores nucleares de pesquisa. Será desenvolvido o teste denominado: teste de sipping para inspeção dos 63 elementos combustíveis (EC) que compõem o núcleo do reator TRIGA IPR-R1. A técnica de sipping consiste em colocar elementos combustíveis em um banho de água e, após um tempo de 8 a 12h de imersão, coletar e analisar uma amostra representativa do banho com foco na presença ou não de produtos de fissão como indicativos de falha no revestimento do EC. Uma correlação entre os componentes encontrados na água de refrigeração do poço e a integridade dos combustíveis será elaborada. Como objetivo secundário,



será realizada a inspeção em todos os elementos de combustível do reator TRIGA IPR-R1, verificando se existem EC no núcleo do TRIGA IPR-R1 que apresentam não conformidade de contenção de produtos de fissão.

3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Para a implementação do teste de sipping foi projetado, desenhado e fabricado com recursos próprios no CDTN um dispositivo específico para verificar a existência, ou não, de vazamentos de produtos de fissão em meio aquoso, a frio e sem mudança de pressão, adaptado para as condições do reator nuclear TRIGA IPR-R1. O dispositivo consta de um tanque e uma cesta de manuseio de EC. Este conjunto foi confeccionado todo em alumínio comercial na oficina mecânica central do CDTN, e seus componentes foram soldados no laboratório de soldagem do Serviço de Integridade Estrutural, com solda especial tipo TIG, com elemento de solda para alumínio, Figura 2.



Figura 2. Dispositivo de *sipping* em imagem simplificada

Toda a operação de carregamento espera e descarregamento do dispositivo do *sipping* será feita com o Reator Nuclear TRIGA IPR-R1 desligado. As operações de carregamento e descarregamento do dispositivo serão conduzidas pelos operadores do reator, que deverão colocar os EC's de volta em suas respectivas posições, sem alterar a configuração do núcleo do reator.

A cesta, que pode conter até 3 EC's, apresenta uma estrutura base em seu fundo que tem a finalidade de facilitar a colocação da cesta carregada no tanque, Figura 3.

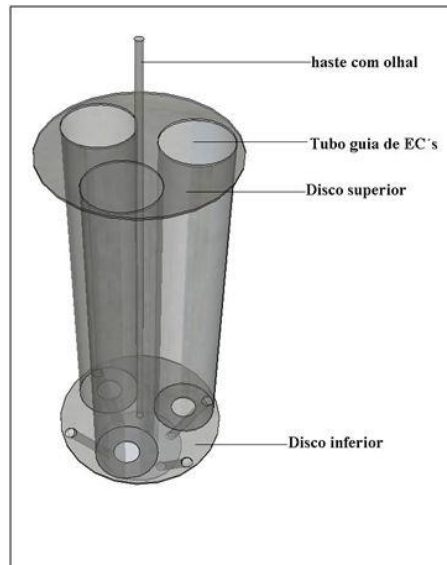


Figura 3. Representação da cesta de carregamento de EC's do reator TRIGA IPR-R1

Depois de carregada com os EC's escolhidos, a cesta é colocada no tanque de sipping. Essa operação será executada manualmente pelos operadores do reator.. O carregamento da cesta de sipping se dá com a cesta posicionada próximo do topo do núcleo do reator. Nesta posição o operador, com uso da ferramenta de transporte de EC's, saca o EC do núcleo e o coloca na posição vaga da cesta dentro de um dos tubos guias da cesta e o deixa lá através do desengate remoto da ferramenta. Toda essa operação necessita de manipulação dos cordames utilizados para sustentação da cesta e do tanque além da manipulação da ferramenta de transporte de EC's. A operação pode ser conduzida por um único operador, porém a participação de mais operadores é recomendada. A Figura 4 apresenta um esquema da posição de carregamento e descarregamento da cesta.

Toda a manipulação de carregamento e descarregamento da cesta de EC's é conduzida com o tanque do dispositivo de sipping submerso a meia altura do tanque do TRIGA,. O tanque do sipping será preso por cordames de nylon de capacidade suficiente para suportar o peso da estrutura carregada, fora da água, embora o dispositivo carregado com EC's não passe de 10, ou 20 cm acima da linha d'água do poço do reator. Os cordames serão presos ao gancho da ponte rolante existente no laboratório do reator e haverá cordames de segurança, atados na estrutura de proteção do poço para o caso de haver ruptura, ou caso os cordames principais de sustentação sejam soltos acidentalmente do gancho da ponte rolante. O mesmo se dará com a cesta de carregamento de EC'S do dispositivo de sipping que será manipulada através de um cordame de nylon, atado no olhal existente no topo de sua haste. Também um cordame de segurança será



atado à cesta para evitar que esta se precipite para o fundo do poço caso ocorra ruptura, ou o caso o cabo principal se solte acidentalmente.

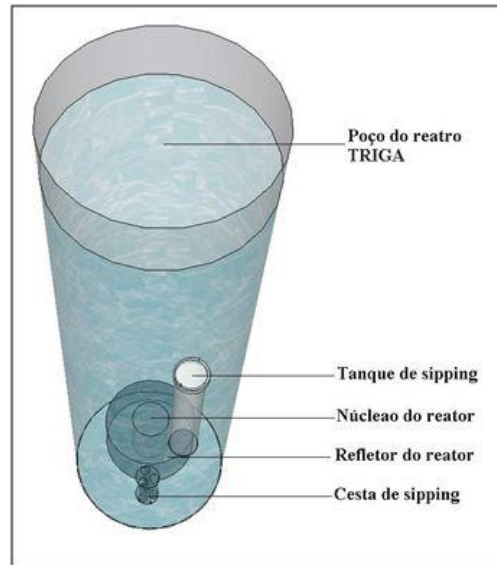


Figura 4. Representação do posicionamento da cesta para carregamento e descarregamento da cesta de *sipping*.

Uma vez carregada, a cesta será posicionada no fundo do tanque de sipping, Em seguida, o conjunto é então içado e sua posição é fixada um pouco acima da linha d'água do poço. Um furo "ladrão" existente próximo ao topo do tanque do sipping garantirá que todos os testes serão feitos com o mesmo nível de água no tanque. O tanque de sipping fica então cheio de água e, com a cesta posicionada na borda do poço do reator, permanece em repouso por um período de aproximadamente 12h para esperar que eventuais produtos de fissão possam vaziar para a água.

Antes e após a permanência do EC no tanque de sipping, amostras da água do tanque de sipping são coletadas e levadas para análise de vários parâmetros, desde contaminação por isótopos emissores de radiação gama, até pH, condutividade, metais e todas as demais análises que são feitas rotineiramente para avaliação da qualidade água do poço do reator [7]

No término do teste após a espera, o dispositivo deverá retornar à posição de meia altura no poço do reator. O operador então retirará a cesta do tanque, numa operação contrária ao carregamento. A cesta deverá ser reposicionada para que o operador possa então movimentar o EC de volta ao núcleo do TRIGA IPR-R1.

Esta sequencia de carga e descarga deverá ser executada para inspeção de todos os 63 EC presentes no núcleo do IPR-R1.



4. SITUAÇÃO ATUAL DO EQUIPAMENTO

O aparelho de teste de *sipping* já foi confeccionado pela oficina mecânica do CDTN, conforme desenho de fabricação feita no setor de projetos do CDTN seguindo nossas orientações técnicas, Figura 5, e Figura 6.



Figura 5. Aspecto real da cesta de carregamento de EC's



Figura 6. Cesta de carregamento do aparelho de *sipping* em tamanho normal, sobre bancada da oficina mecânica.

Após fabricação das peças na oficina mecânica do CDTN, as peças foram enviadas para soldagem e fixação na oficina de solda. Os dois conjuntos de peças, o tanque e a cesta de carregamento foram soldadas segundo especificações do desenho mecânico industrial enviado para oficina de solda Figura 7.

Foi utilizado para soldagem, um arame de solda especial para soldagem de ligas de alumínio. O alumínio não é um material de trabalho corriqueiro, e certa experiência é exigida dos técnicos



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

envolvidos em sua conformação para fabricação de coisas úteis. Um cuidado especial no desenho do dispositivo foi tomado para que o processo de soldagem tivesse efeito.

Para isso por várias vezes os técnicos envolvidos no processo de fabricação foram reunidos, técnico mecânico, técnico de soldagem, desenhista projetista técnico e este candidato a doutorado, com intuito de minimizar as auto-interferências técnicas de cada procedimento. Várias vezes o desenho técnico teve de ser modificado, como comumente acontece do desenvolvimento de modelos de utilidade industrial, por sugestão de cada participante até que uma forma final capaz de atender as peculiaridades de cada procedimento de fabricação fosse atendida.



Figura 7- Oficina de soldagem e tanque de sipping após soldagem

As peças soldadas e o conjunto formado pelo tanque e a cesta de sipping estão agora no salão do reator aguardando procedimentos de limpeza, ensaio de operação, protocolos de experimentos e respectiva execução dos testes.

Ainda falta montar o sistema auxiliar de sustentação do sistema de teste de sipping. Este será constituído pela ponte rolante e cordames de nylon que vão prender tanto o tanque de *sipping* quanto a cesta.

Outra parte que ainda falta montar é o sistema de bombeamento do aparelho que se constitui de um arranjo de mangueiras, válvulas, espigões, válvulas de retenção, bomba de água e recipientes de amostragem. Este sistema tem o objetivo de promover a movimentação de água do poço do reator para o sistema de sipping assim como seu retorno ao poço do reator e possibilitar a tomada de amostras de água do aparelho de sipping de forma automática.

5. PLANEJAMENTO DA EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento será realizado com os EC's do reator TRIGA e ocorrerá em 4 partes.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Parte 1 - o equipamento de teste de *sipping* já montado será limpo e testado fora do poço do reator através de ensaios de operação realizados pelos operadores do reator.

Parte 2- o equipamento será carregado e testes de *sipping* serão conduzidos fora do poço do reator utilizando EC de aço inox novos guardados no cofre do reator, atualmente são em número de 4 EC novos de aço inox guardados no cofre.

A água utilizada será a mesma do poço do reator que será usada nos testes dos outros EC que estão no núcleo. O cuidado de conduzir esse experimento fora da borda do poço é para que não ocorra a possibilidade que os EC de aço inox novos seja projetados por acidente no fundo do poço o que poderia causar um inconveniente nuclear.

Parte 3 – o equipamento de *sipping* será carregado com os elementos de aço inox em serviço no núcleo do reator. Atualmente são 4 EC, uma vez que o elemento instrumentado de aço inox esta fora de serviço devido a dano em seu cabeamento de termopares.

Parte 4 – o equipamento de *sipping* será carregado com os restantes EC de alumínio, até que todos, ou um número expressivo de testes capazes de oferecer subsídios à análise de eficiência e eficácia do método aqui proposto sejam conduzidos.

As amostras de água do tanque do *sipping* será colhidas e analisadas nos laboratórios do CDTN com relação a presença de Cs137.

O césio livre (Cs-137) estará na forma combinada e reagirá com a água e se apresentará em solução [1].

Os gases nobres em especial o Xe não devem ser observados, por que sua liberação da liga de U-HZr. Está condicionada a elevação da temperatura para próximo de 90 °C (potência 100kW, para TRIGA tipo Mark I). Como os testes se darão com a temperatura ambiente, não esperada a observação desta espécie na água de banho do *sipping* [8].

6. RADIOPROTEÇÃO.

Para a realização dos experimentos estão previstas a colocação dentro do dispositivo de 1 a 3 EC do reator por vez. Quando o dispositivo estiver posicionado na borda do poço haverá não menos que uma coluna de água de aproximadamente 1000 mm entre o topo dos elementos combustíveis e “ladrão hidráulico” da borda do dispositivo.

O ponto de referência do corpo do operador em pé acima do dispositivo (posição aproximada das gônadas) ficará posicionado a não menos que 1000 mm do nível do “ladrão hidráulico”. Desta forma, a proteção total de blindagem da cesta carregada, posicionada no topo do tanque do reator



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

será um metro (1000 mm) de água mais um metro de ar (1000 mm), do topo dos EC na cesta até o operador.

Medidas anteriores de taxas de dose associadas ao elemento combustível número 1230, posição B5 no núcleo [9], foram utilizadas para uma estimativa das taxas de dose associadas ao dispositivo de sipping carregado com 3 EC (carregamento máximo possível). A Tabela 1 abaixo apresenta a taxa de dose medida numa posição similar à situação prevista para o dispositivo de sipping. Na condição do experimento anterior, o EC estava posicionado no topo do poço de modo que havia uma coluna de água de 900 mm sobre ele.

Tabela 1 – Dose calculada para exposição de operador nas condições do experimento [9]

Altura da coluna de água + altura da coluna de ar sobre o EC (mm) *	Dose medida para 1 EC *	Dose extrapolada para 3 EC's
900+ 1000	135 μ Sv/h	405 μ Sv/h

A partir da Tabela 1 pode-se estimar uma taxa de dose para o operador de 405 μ Sv/h numa exposição simultânea a três EC. Deve-se atentar que na posição prevista para o teste do sipping a coluna de água é maior, 1000 mm, comparada à posição da medida anterior, 900 mm.

Considerando o limite de dose efetiva anual de 20 mSv para indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE), esses resultados indicam a necessidade de limitar a permanência de um IOE exposto ao dispositivo de sipping a no máximo, 49h/ano.

A operação de carga e descarga será executada no fundo do poço, onde a exposição do operador à dose será insignificante, visto que haverá aproximadamente 6 metros de coluna de água entre o dispositivo e o operador. O reator estará desligado.

7. CRITICALIDADE INDESEJADA

No experimento está previsto a retirada de grupos de três em três elementos de combustível, sua colocação em um cesta e depois a colocação destes três elementos dentro do tanque de sipping e sua manutenção próxima à borda do poço do reator por um período de 12 a 14 horas.

Nestas condições, o arranjo estará colocado a uma distancia maior que 5 m de distância da fonte de neutros do núcleo do reator, cuja distância linear a essa fonte está a mais de 5 m preenchido com água que forma uma excelente blindagem.

A condição de criticalidade não depende da presença da fonte de nêutrons. Essa fonte de nêutrons somente inicia a reação em cadeia que é multiplicada no meio crítico. No caso do núcleo de um reator a fonte serve para gerar o fluxo de nêutrons quando o reator está sub-crítico para estímulo



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

dos sensores de fluxo do reator. Isto é uma condição de segurança apropriada para tornar o reator controlável pelos operadores, uma vez q terão sinal dos detectores de fluxo.

A condição de criticalidade esta relacionada com a distribuição de materiais reativos no meio combustível, ou seja, de urânio fissionável, plutônio, ou outros materiais fissionáveis, criados e mantidos no meio.

A massa total de urânio em cada EC varia de 185 a 190g de U, para os EC de alumínio e aço inoxidável respectivamente. Essa massa urânio apresenta-se enriquecida a 20% no isótopo 235 do urânio.

Neste estudo chegou-se a conclusão que a massa segura para o reator TRIGA IPR-R1 é de 3127g. O estudo concluiu que o manuseio de três elementos de combustível é seguro com relação a não formação de massa crítica indesejada em quaisquer circunstancias [10].

8. REFERÊNCIAS

[1] Zangirolami, D. M.; Fluxo Neutrônico a 100 kW noa terminais de irradiação do reator TRIGA IPR-1, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

[2] Mesquita, A. Z.; Costa, A.C.L.; Souza, R.M.G.P.; Palma, D.A.P. Medidas Experimentais de Parâmetros Termohidráulicos no Núcleo de Reator Nuclear de Pesquisa. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, v. 16, p. 10-23; Disponível em: <http://www.uned.es/ribim/volumenes/Vol16N1Abril2012/V16N1A09%20Mesquita%20101-113.pdf> ; Série: 1; ISSN/ISBN: 11372729, 2012.

[3] CDTN/CNEN. Relatório de Análise de Segurança do Reator TRIGA IPR-R1. Belo Horizonte, RASIN/TRIGA-IPR-R1/CDTN, 2008.

[4] Alencar, D.A.; Silva Júnior, S.F.; Mesquita, A.Z.; Câmara, L.O.I.S.; Oliveira, P. F. *Using Visual Inspection NDT to Check Integrity of TRIGA Mark I Fuel Rods*. In: 3rd WORLD TRIGA USERS CONFERENCE, Belo Horizonte, 2006b.
Disponível em: http://www.cdtm.br/triga2006/internas.php?p=internas&cont_key=27 .

[5] ASME II, ASME Boiler & Pressure Vessel Code, part D 'Properties (Metric)', subpart 1 'Stress Tables', *Table 1A 'Maximum Allowable Stress Values S for Ferrous Materials' _ stainless steel 304*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

(UNS S30400), pp. 82-3 and Table 1B 'Maximum Allowable Stress Values S for Nonferrous Materials' _ Aluminium alloy 1100 (UNS A91100), pp. 150-1. 2004.

[6] General Atomics, TRIGA Research Reactors, <http://www.ga-esi.com/triga/about/index.php>, acessado em 27/novembro/2012.

[7] PUBLICAÇÃO CDTN – 973; Lúcia Maria L. de Alencar Auler, Eliana Aparecida Nonato, Milton Batista Franco, Geraldo Frederico Kastner, Andréa Vidal Ferreira; Programa de Controle Físico-Químico da Água de Refrigeração do Reator TRIGA IPR-R1; CDTN/CNEN, Belo Horizonte, MAIO/2012.

[8] A. Borio di Tigliole, M. Cagnazzo, F. Lana, A. Losi, G. Magrotti, S. Manera, F. Marchetti, P. Pappalardo, A. Salvini, G. Vinciguerra; Identification of a Leaking Triga Fuel Element at the Reactor Facility of Pavia; Laboratorio Energia Nucleare Applicata (L.E.N.A.) of University of Pavia – 27100 Pavia, Italy

[9] NI SERTA-002/13 de 30/04/2013, Oliveira, P.O, Maretti Júnior, F, Rocha, A.C.; Medidas de taxa de Dose em Elementos de Combustível Irrradiado do Reator TRIGA IPR-R1; CDTN/CNEN; Nota Interna, Belo Horizonte, MG, 2013.

[10] NI SETRE-01/14 de 29/01/2014, Edison Pereira de Andrade; Cálculo de Massa Segura Para o Combustível U-HnZr com U enriquecido a 20%^{w/o}; Nota Interna, Belo Horizonte, MG, 2013.

Wikipédia, Acesso no endereço eletrônico: em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Césio>> 27/03/2014.

Agradecimentos

Este projeto de pesquisa é apoiado pelos seguintes órgãos de fomento brasileiros: Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).