



## RECUPERAÇÃO DOS TERMOPARES DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL INSTRUMENTADO DO REATOR NUCLEAR TRIGA IPR-R1

AMIR ZACARIAS MESQUITA, ANTÔNIO JUSCELINO PINTO, MARCO ANTÔNIO CÂNDIDO

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear  
Comissão Nacional de Energia Nuclear, CDTN/CNEN  
Caixa Postal 941, Campus da UFMG, Pampulha, CEP: 30 123 970, Belo Horizonte, MG, Brasil

*(Recibido 1 de marzo de 2010, para publicación 22 de marzo de 2010)*

**Resumo** – O elemento combustível instrumentado (CI) é em todos os aspectos igual aos elementos combustíveis normais dos reatores de pesquisa TRIGA, exceto pela presença em seu centro de três termopares do tipo K (cromel-alumel). Em 2004 o CI foi colocado na posição de maior fluxo de nêutrons do núcleo do reator TRIGA IPR-R1, permanecendo neste local até junho de 2007. Durante este tempo seus termopares monitoraram a temperatura e a potência do núcleo em todas as operações, possibilitando também a realização de experimentos de transferência de calor no reator. Após cerca de três anos de monitoração, os três termopares falharam em suas leituras devido à ruptura dos termoelementos na conexão com os fios de extensão. Este trabalho descreve a metodologia utilizada na recuperação dos termopares do elemento combustível instrumentado, realizados em outubro de 2008 no CDTN. Obteve-se êxito parcial na recuperação da continuidade dos termoelementos. São sugeridos procedimentos a serem adotados para nova tentativa de recuperação e retorno deste elemento ao núcleo, dando maior segurança operacional ao reator. É realçada a importância da existência de pelo menos dois elementos combustíveis instrumentados no núcleo, conforme especificação atual de instrumentação da General Atomic Electronic Systems Inc. e a exemplo dos outros reatores TRIGA em operação atualmente. A monitoração da temperatura do núcleo nas operações é recomendação da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), sendo esta variável o principal limite operacional de um reator nuclear. A temperatura do combustível foi adotada no Relatório de Análise de Segurança do reator TRIGA IPR-R1 como limite operacional de segurança, não devendo seu valor ultrapassar 550°C.

**Palavras-chave** – Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA, termopar, combustível instrumentado, temperatur.

### 1. INTRODUÇÃO

O reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1 do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), localizado em Belo Horizonte (Brasil), teve sua primeira criticalidade em 1960 operando a uma potência máxima de 30 kW, com um núcleo constituído de 58 elementos combustíveis revestidos em alumínio. Desde meados da década de 60 a General Atomic, fornecedor dos reatores TRIGA, não fabrica mais combustíveis com este tipo de revestimento. Em 1971 o CDTN adquiriu nove elementos combustíveis (revestimento em aço inoxidável), sendo um deles instrumentado com três termopares do tipo K, com as juntas quentes fixados em seu eixo central. No ano de 2002, foram inseridos quatro destes elementos combustíveis no núcleo para aumento da reatividade, visando à elevação da potência do reator para 250 kW. Em 2004 inseriu-se o elemento combustível instrumentado (CI, número de série 6821TC), mostrado na Fig. 1, na posição mais quente do núcleo prevista pelo cálculo neutrônico. O CI permaneceu nesta posição até 2007, possibilitando a realização de pesquisas de transferência de calor em várias potências de operação, inclusive na nova potência de 250 kW [1]. Durante este tempo também monitorou a temperatura e a potência do núcleo em todas as operações. Os valores de temperaturas e de outros parâmetros operacionais encontram-se arquivados no banco de dados do sistema de aquisição de dados, desenvolvido para subsidiar os experimentos [2].

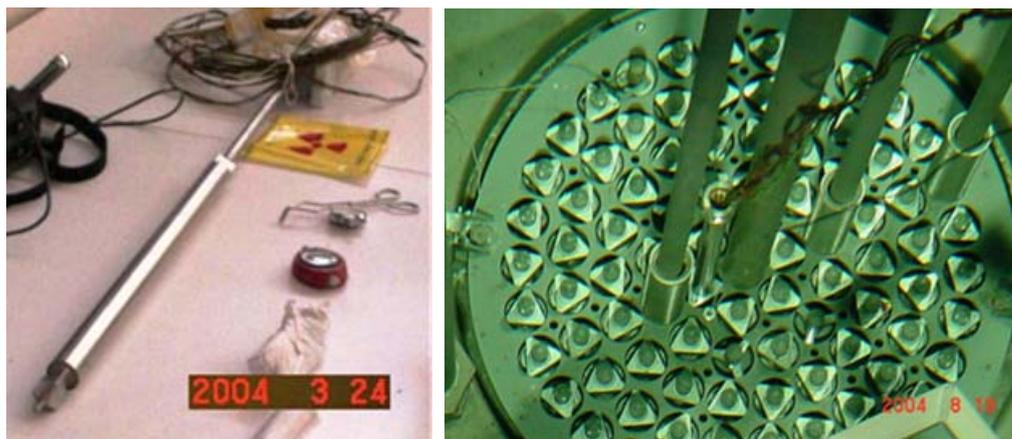


Fig. 1. Elemento combustível instrumentado antes a após ser inserido no núcleo do reator TRIGA IPR-1.



Fig. 2. Poços de estocagem de elementos combustíveis irradiados.

Após quase três anos de acompanhamento da temperatura do núcleo, notou-se que um dos três termopares não enviava mais o valor correto das medidas. Posteriormente, os outros dois termopares também falharam em suas medidas. Observou-se que ocorreu o rompimento dos termopares no conector situado entre os termoelementos e seus fios de extensão. Em agosto de 2007, o elemento combustível instrumentado foi retirado do núcleo e colocado em uma prateleira (rack) posicionado na parede do tanque do reator (imerso na água desmineralizada do poço). Um ano depois o elemento combustível instrumentado foi retirado do poço do TRIGA e colocado no poço de alojamento de combustíveis irradiados (Fig. 2), situados ao lado do poço do reator, preenchido com água potável. O elemento instrumentado ficou imerso em água, inclusive no local onde ocorreu a ruptura dos termopares. Posteriormente o CI foi erguido no poço de modo que se tivesse acesso ao local da ruptura e foram iniciados os trabalhos para a recuperação da continuidade de seus termopares.

A retirada da blindagem e a restauração da continuidade elétrica dos termoelementos (cromel e alumel) foram realizadas com êxito, mas as medidas de temperatura de dois dos três termopares estão, no momento, comprometidas. Ocorreu infiltração de água no isolamento de óxido de magnésio, que separa os termoelementos entre si, e entre estes e a blindagem de aço inoxidável. O CI e os locais de rompimento dos termopares ficaram imersos na piscina do reator por um longo período (a uma pressão de cerca de 4m de coluna d'água), e, posteriormente, ficaram imersos em água potável do poço de alojamento.

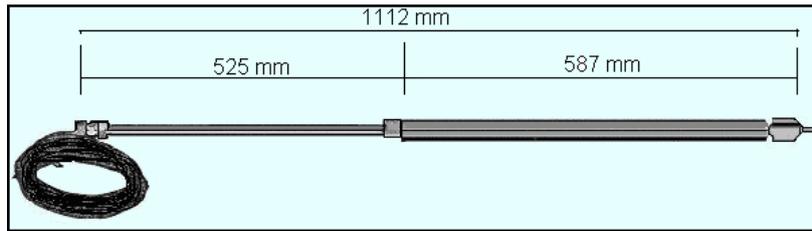


Fig. 3. Elemento combustível instrumentado (número de série 6821TC).

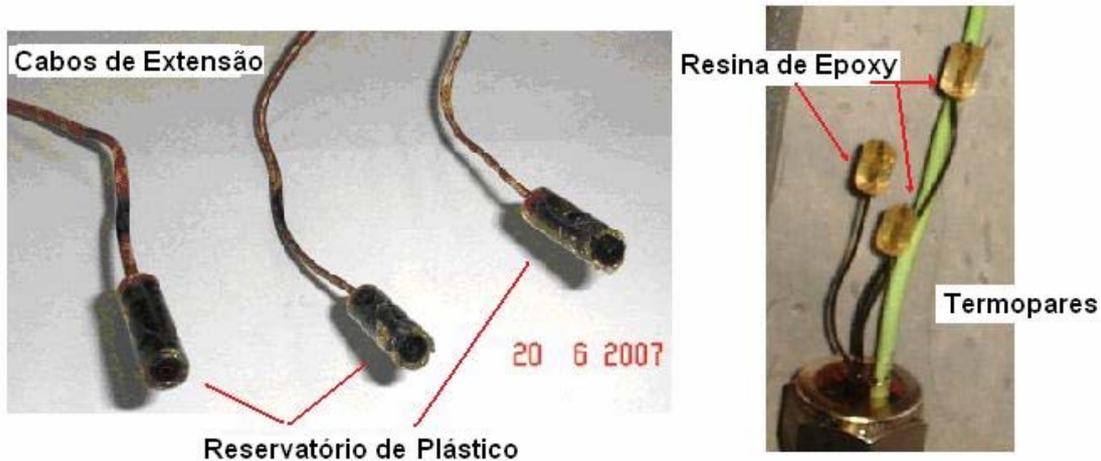


Fig. 4. Cabos de extensão e os termopares após a ruptura.

A recuperação do CI é fundamental na realização dos projetos de pesquisa do programa plurianual do CDTN/CNEN. Os trabalhos são apoiados pelos seguintes órgãos de fomento brasileiros: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [3] e [4].

## 2. DESCRIÇÃO DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL INSTRUMENTADO E DO LOCAL DE ROMPIMENTO DOS TERMOPARES

Os elementos combustíveis normais dos reatores TRIGA são barras cilíndricas revestidas com aço inoxidável (AISI-304), tendo um comprimento total de 721 mm e 38,1 mm de diâmetro. No centro fica a liga combustível com 381 mm de comprimento. Nas duas extremidades do combustível existem dois cilindros de grafita de 88,1 mm de comprimento que atuam como refletores axiais de nêutrons. No centro do combustível existe um furo de 6,35 mm de diâmetro preenchido com um tarugo de zircônio. O combustível é uma mistura homogênea de urânio (U, combustível) e hidreto de zircônio (ZrH, moderador de nêutrons). A liga contém 8,5% em peso de urânio, 89,9% de zircônio e 1,6% de hidrogênio. O enriquecimento em  $^{235}\text{U}$  é de 20%. O elemento combustível instrumentado possui as mesmas características dos elementos normais, mas possui três termopares do tipo K com as juntas quentes localizadas no pino central de zircônio. A geometria e dimensões do CI são mostradas na Fig. 3.

O diâmetro dos termoelementos é de 0,14 mm e o isolamento é feito com MgO, sendo a blindagem de aço inoxidável com diâmetro de 1,0 mm [5]. Os termopares saem do interior do pino de zircônio, localizado no centro da parte ativa do elemento combustível, passam pelo refletor de grafite, atravessam o espaçador e o tubo guia e saem do CI por um prensa-cabo de aço inoxidável.

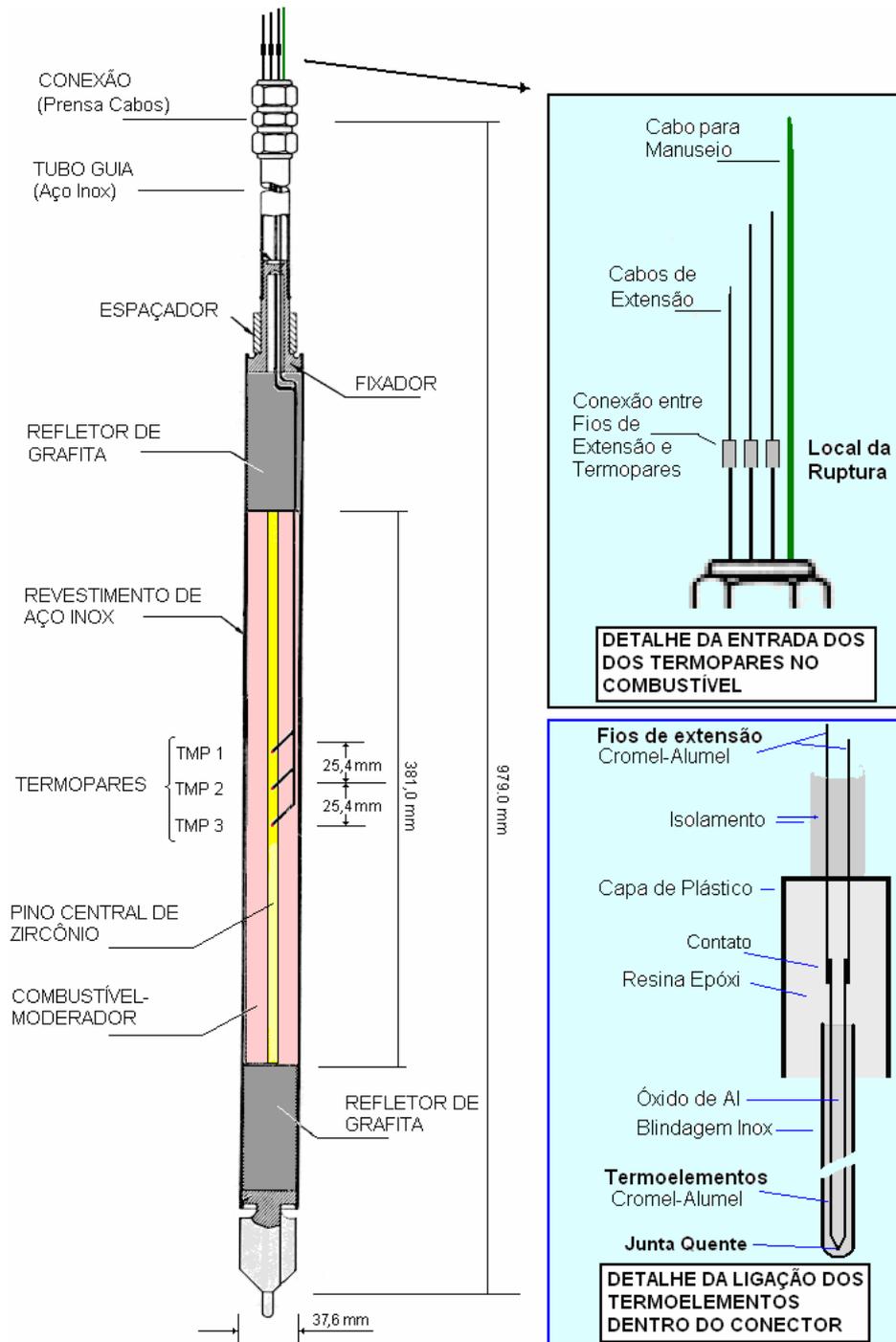


Fig. 5. Elemento combustível instrumentado e detalhe do conector do termopar.

A aproximadamente 10 cm deste ponto existe a conexão dos termoelementos (chromel-alumel) do termopar com seus fios de extensão, também de chromel-alumel. Foi neste conector que ocorreu a descontinuidade da ligação, conforme mostrado na fotografia da Fig. 4. Analisando o local de contato, pôde-se concluir que os dois termoelementos estavam em contato com os dois fios de extensão sem solda e protegidos por resina epóxi, alojada dentro de um reservatório de material plástico [6]. Possivelmente, devido à radiação ocorreu a degradação da resina e desfez-se o contato elétrico e mecânico entre os termoelementos e seus fios de extensão. A Fig. 5 mostra um diagrama do CI e detalhes do local onde ocorreu a ruptura.

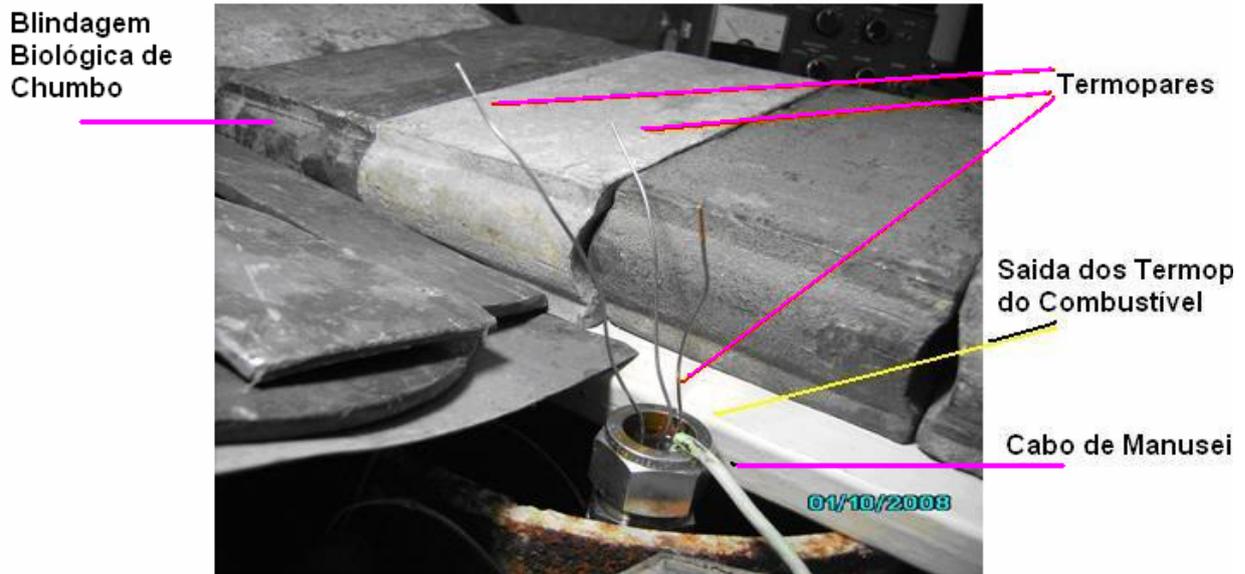


Fig. 6. Local de realização dos trabalhos de recuperação da ruptura dos termopares.

### 3. DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS DE RECUPERAÇÃO

Com o elemento instrumentado posicionado no poço de armazenamento de combustíveis irradiados, este foi erguido, com o auxílio do cabo de aço de manipulação, de modo que apenas a parte terminal dos termopares ficasse fora d água. Foram colocadas algumas peças de chumbo para melhoria da blindagem radiológica, conforme pode-se ver na fotografia da Fig. 6, mas em alguns locais a única blindagem era a água do poço.

Para subsidiar os trabalhos de recuperação realizaram-se cálculos, utilizando os códigos MCNP (Monte Carlo), ORIGEN e MONTEBURNS, para a caracterização dos parâmetros nucleares e térmicos do combustível após sua retirada do núcleo [7]. Nos cálculos considerou-se que o CI esteve na posição mais quente do núcleo, com queima de 0,2 g de  $^{235}\text{U}$ , de um total inicial de 38,0 g (cerca de 0,5%), o que corresponde a uma energia dissipada de 100,2 MWh. Os cálculos mostraram que após 1 ano da retirada do CI do núcleo a atividade do combustível é pouco maior que 1 Ci e o calor de decaimento é menos que 1mW, parâmetros como radiotoxicidade por ingestão e inalação estão dentro da faixa esperada. A atividade é devido principalmente a contribuição dos produtos de fissão  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{147}\text{Pm}$ .

O nível de radiação foi medido com um contador Geiger. Nos pontos onde não havia blindagem de chumbo o nível de radiação era de 22 mR/h, nos locais protegidos pelo chumbo o nível de radiação era pouco acima da radiação de fundo normal da sala do reator. Os níveis de radiação medidos estavam pouco acima dos encontrados pelos cálculos.

#### 3.1. Remoção da blindagem de aço inoxidável dos termopares

Para a remoção da blindagem dos termopares foi utilizado o processo de remoção por corrente elétrica [8]. Capacitores eletrolíticos foram carregados e sua carga foi utilizada para queimar a blindagem. Para encontrar o valor correto de corrente elétrica foram realizados vários testes preliminares com termopares de bitola igual aos dos termopares do CI (1,0 mm). Confeccionou-se dois eletrodos de cobre com um rasgo de 1 mm de modo a acomodar o termopar antes da passagem da corrente elétrica. O pulso de corrente elétrica foi ajustado para queimar (transforma-se em cinzas) apenas o aço inoxidável do revestimento, deixando exposto o isolamento de óxido de magnésio. Após a remoção da blindagem, retirou-se o óxido de magnésio facilmente com auxílio de uma pinça. Deste modo os dois termoelementos ficaram acessíveis, podendo ser identificados. A Fig. 7 mostra a montagem utilizada para a remoção da blindagem dos termopares.



Fig. 7. Montagem utilizada para remoção da blindagem dos termopares por corrente elétrica.

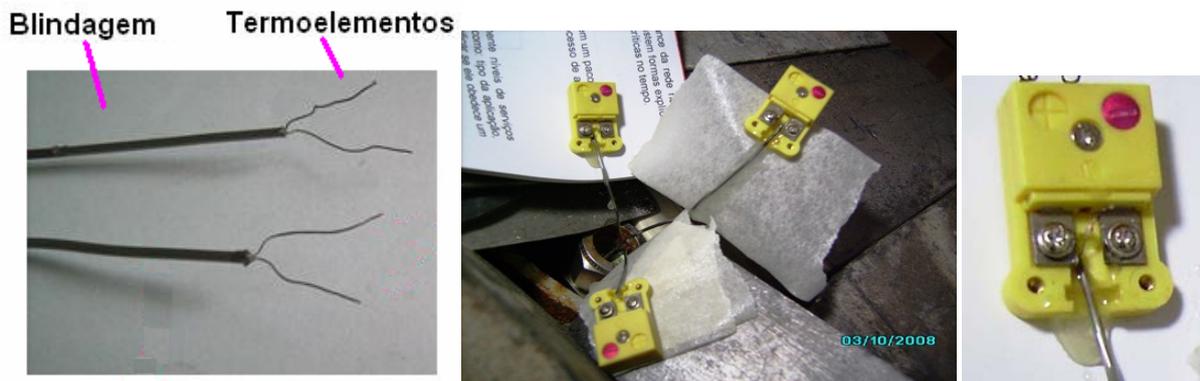


Fig. 8. Dois termopares após a remoção da blindagem e do isolamento, e termopares fixados aos conectores.

### 3.2. Identificação dos Termoelementos

Os termopares tipo K são compostos de uma liga de cromel e uma liga de alumel. O cromel é eletricamente positivo e é não-magnético, já o alumel é eletricamente negativo e é magnético. A identificação foi realizada aproximando-se um pequeno pedaço de imã nos dois fios, aquele que o atraísse seria o magnético e de polaridade negativa sendo, portanto, o termoelemento alumel. Os fios foram mantidos isolados entre si e entre eles e o revestimento. A Fig. 8 mostra, na foto do lado esquerdo, dois dos termopares após a retirada da blindagem metálica e do isolamento.

### 3.3. Conexão dos Termoelementos

Após a identificação dos termoelementos, estes foram fixados aos parafusos da metade fêmea de conectores polarizados (confeccionados com ligas cromel e alumel). Colocou-se cola a base de epóxi (Araldite™ de secagem normal) para ajudar a fixar os termopares ao conector. As outras metades dos conectores (macho) foram conectadas a novos cabos de extensão tipo K. A Fig. 8 mostra, na fotografia central, os três termopares já fixados à metade fêmea dos conectores, em destaque é mostrada à direita a conexão de um dos termopares.

Tabela 1. Parâmetros dos termopares após a recuperação.

Posição do Termopar no CI	Resistência elétrica dos termoelementos (continuidade) [ $\Omega$ ]	Isolamento entre termoelementos e blindagem [ $\Omega$ ]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Superior	85,0	22	23,4
Médio	87,4	20	23,6
Inferior	86,1	30	24,2

### 3.4. Controle de qualidade

Com os termoelementos fixados aos parafusos dos conectores foram realizados, com auxílio de um multímetro digital e de um indicador/controlador digital de sinal, a verificação da continuidade dos termoelementos, o isolamento com relação à blindagem e a medida da temperatura. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

Apesar de o isolamento estar muito abaixo do encontrado em termopares novos, que é da ordem de alguns  $\text{M}\Omega$ , os valores das continuidades para esta bitola estão corretos e o valores medidos da temperatura da água é da mesma ordem de grandeza de um termopar que foi inserido no poço. Portanto, concluiu-se que o elemento combustível instrumentado poderia retornar ao reator e continuar monitorando a temperatura do núcleo. Foi feita a conexão da metade fêmea do conector (ligada aos termoelementos), à metade macho do conector (ligado aos cabos de extensão). Para proteger os conectores foram colocadas camadas de borracha silicone em torno destes mantendo-os mecanicamente presos e protegidos. Os cabos de extensão dos termopares foram fixados por meio de braçadeiras ao cabo de aço de manipulação. Após esta etapa o elemento combustível instrumentado foi descido até o fundo do poço de armazenamento, ficando coberto por 3 m de água. Os cabos de extensão dos termopares foram conectados ao sistema de aquisição de dados do reator TRIGA IPR-R1 [9]. Verificou-se que dois dos termopares já não mais indicavam corretamente a temperatura. Os termopares foram conectados a indicadores digitais de temperatura e observou-se que dois deles mostravam valores próximos ( $22^{\circ}\text{C}$ ) e o outro indicavam um valor bem acima ( $600^{\circ}\text{C}$ ). As indicações foram monitoradas durante três dias, no final apenas um dos termopares indicava valores coerentes. Observou-se uma inconstância nas medidas, dependendo do medidor que era utilizado. Concluiu-se que o erro foi devido ao baixo isolamento do óxido de magnésio por causa da umidade.

## 4. CONCLUSÃO

Uma das etapas a ser seguida na recuperação de termopares é a secagem do isolamento ( $\text{MgO}$ ) antes da conexão dos termoelementos aos conectores [8]. Devido à dificuldade de se trabalhar muito próximo da parte ativa do elemento combustível, tentou-se executar os trabalhos de recuperação sem realizar esta etapa. No momento apenas um dos termopares responde corretamente. É incerto o comportamento deste termopar se for utilizado para monitoramento de temperaturas da ordem de  $190^{\circ}\text{C}$ , que o valor encontrado nas operações do reator em 100 kW (ou  $300^{\circ}\text{C}$  operando em 250 kW). Existe também a possibilidade de estar ocorrendo um contato elétrico não adequado, no local da conexão, já que os trabalhos de recuperação foram realizados o mais rápido possível devido ao nível de radiação. É recomendado que se mantenha o CI fora do poço de armazenamento, em local seco, com blindagem radiológica apropriada. A realização de novos trabalhos para a recuperação dos termopares deve ser realizada, tendo-se o cuidado de se fazer a secagem do isolamento de óxido de magnésio e impedir a entrada de umidade no isolamento, com o fechamento do local com resina epóxi. O decaimento dos produtos de fissão fornecerá calor para a secagem do óxido de magnésio. Fontes de calor como resistores elétricos também poderão ser utilizados para a secagem do isolamento.

Ressalta-se aqui a importância da existência de pelo menos dois elementos combustíveis instrumentados no núcleo do reator, conforme especificação atual de instrumentação da General Atomic Electronic Systems Inc [10] e a exemplo dos vários outros reatores TRIGA. A monitoração da temperatura do núcleo nas operações é recomendação da Agência Internacional de Energia Atômica, sendo esta variável o principal limite operacional de um reator nuclear [11]. A temperatura do combustível foi adotada no Relatório de Análise de Segurança do reator TRIGA IPR-R1 como limite operacional de segurança, não devendo seu valor ultrapassar 550°C [12]. O reator IPR-R1 operando na potência de 250 kW a temperatura do centro do combustível, na posição mais quente do núcleo atingiu 310°C em algumas operações [1]. Mesmo que se consiga recuperar o CI e retorná-lo ao reator como instrumento de monitoração da temperatura máxima do núcleo, é recomendado a aquisição de um novo elemento, conforme a filosofia de redundância na instrumentação adotada em reatores nucleares. O preço atual deste elemento é de aproximadamente 80,000 €, conforme cotação recente do fabricante TRIGA International [13]. O elemento combustível instrumentado além de dar proteção ao reator é a principal ferramenta utilizada nas pesquisas experimentais dos parâmetros neutrônicos e termohidráulicos realizadas no IPR-1.

### AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil) pelo apoio financeiro.

### REFERENCIAS

- [1] Mesquita, A.Z., “Investigação Experimental da Distribuição de Temperaturas no Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1”, Ph.D Thesis, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brazil (2005)
- [2] Mesquita, A.Z., Souza, R.M.G.P., “The operational parameter electronic database of the IPR-R1 TRIGA research reactor”, *Proceedings of the 4th World TRIGA Users Conference*, Lyon, France (2008)
- [3] Mesquita, A.Z., “Atualização e Recuperação da Instrumentação do Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1”, Edital 03/08. Programa Pesquisador Mineiro II. Projeto de Pesquisa, Processo FAPEMIG 031-08 (2008)
- [4] Mesquita, A.Z., “Experimentos Neutrônicos e Termohidráulicos no TRIGA IPR-R1”, Relatório de Pesquisa, 1º. Seminário de Projetos do CDTN/CNEN (2009)
- [5] Gulf General Atomic, *Instrumented Fuel Elements Specifications*, San Diego, California (1971)
- [6] Gulf General Atomic, “15” SST Fuel Element Assembly Instrumented Core”, San Diego, CA. *Drawing Number TOS210J220* (1972)
- [7] Dalle, H.M., “Simulação da Queima e Determinação de Taxas de Dose para o Elemento Combustível Instrumentado do Reator TRIGA IPR-R1”, Belo Horizonte, *Nota Técnica CNEN/CDTN, NI-EC3-01/09*, (2009)
- [8] Mesquita, A.Z., Ladeira, L.C.D., “Dispositivo para Desencapar Termopares de Isolamento Mineral pela Remoção de sua Blindagem por Corrente Elétrica”, Patente de Invenção. No. 8503430. Depositado em 08.07 (1985)
- [9] Mesquita, A.Z., Rezende, H.C., “Data Acquisition System for TRIGA Mark I Nuclear Research Reactor of CDTN”, *Proceedings of the America Nuclear Energy Symposium (ANES 2004)*, Miami Beach, Flórida, USA. America Nuclear Energy (2004)
- [10] General Atomic Electronic Systems Inc., “Reactor Instrumentation & Control System Console for 100 kW IPR-R1 TRIGA Reactor CDTN TRIGA® Reactor Facility at Belo Horizonte, Brazil, GA-ESI, July (2008)
- [11] IAEA - International Atomic Energy Agency, “Operational Limits and Conditions of Research Reactors”, *Safety Series No. 35-G6*, Vienna (1995)

- [12] CDTN/CNEN, “Relatório de Análise de Segurança do Reator TRIGA IPR-R1”, RASIN/TRIGA-IPR-R1/CDTN, Belo Horizonte (2007)
- [13] TRIGA International, “Supply of TRIGA® Fuel Rods”, TIFP 001-08. Rev. 1 (Oct 08), 31 CERCA, Lyon, France, October (2008)

## THERMOCOUPLES RECOVERY OF THE INSTRUMENTED FUEL ROD OF THE IPR-R1 TRIGA NUCLEAR REACTOR

**Abstract** – The instrumented fuel element (IF) is in all respects equal to the normal fuel elements of TRIGA research reactors, except for the presence at its centerline of three type K thermocouples (chromel-alumel). In 2004 the instrumented fuel element (IF) was inserted into the core hottest position, predicted by neutronic calculations. The IF stayed in this position up to 2007, allowing heat transfer investigations in several operating powers, including the maximum power of 250 kW. During this time it also monitored the core temperature in all operations. The fuel temperature and other operational parameters were stored in a computer hard disk, with an accessible historical database, in order to make the chronological information on reactor performance and its behavior available to users. After almost 3 years of monitoring the core temperature, it was noticed that the three thermocouples failed in its measures. It was observed the rupture of the thermocouples in the connector placed between the thermoelements wire and its extension cables. This paper describes the methodology used in the recovery of the instrumented fuel element thermocouples, carried out in October of 2008 at CDTN. It was obtained partial success in the restoration of the thermoelements continuity. There are suggested procedures for new recovery and the returning of the IF to the core, improving the operational safety to the reactor. According to the specification of General Atomics Electronic Systems Inc instrumentation, and like several TRIGA reactors in operation today, it is recommended the existence of at least two instrumented fuel elements in the core. The core temperature monitoring in all the operations, is a recommendation of the International Atomic Energy Agency (IAEA), and this parameter is the main operational limit of a nuclear reactor. The core temperature monitoring was adopted in the IPR-R1 TRIGA Safety Analysis Report as safety operational limit and can not exceed 550°C.

**Keywords** – TRIGA, research nuclear reactor, Thermocouples, Instrumented fuel element, Temperature.

## NOMENCLATURA

<i>CI</i>	Elemento combustível nuclear instrumentado
<i>TRIGA</i>	<i>Training, Research, Isotopes, General Atomics</i>
<i>IPR-R1</i>	Instituto de Pesquisas Radioativas – Reator nº 1
$^{235}\text{U}$	isótopo urânio-235, combustível nuclear
$^{137}\text{Cs}$	isótopo céσιο-137, produto de fissão do urânio
$^{147}\text{Pm}$	isótopo promécio-147, produto de fissão do urânio
<i>ZrH</i>	hidreto de zircônio, moderador de nêutrons
<i>MgO</i>	óxido de magnésio, isolante elétrico
<i>A</i>	atividade radioativa (Ci)
<i>D</i>	dose de radiação ionizante (mR/h)
<i>R</i>	resistência elétrica ( $\Omega$ )
<i>T</i>	temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ou K)
<i>P</i>	potência, taxa de transferência de calor (kW)

