

Avaliação experimental da eficiência do boro no controle da reatividade dos reatores nucleares refrigerados a água

Experimental evaluation of the efficiency of boron in controlling the reactivity of water-cooled nuclear reactors

Evaluación experimental de la eficiencia del boro en el control de la reactividad de reactores nucleares refrigerados por agua

Recebido: 05/01/2022 | Revisado: 10/01/2022 | Aceito: 17/01/2022 | Publicado: 18/01/2022

Amir Zacarias Mesquita

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3411-5984>
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Brasil
E-mail: amir@cdtn.br

Alexandre Melo de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8298-3543>
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo, Brasil
E-mail: alexanoliveira@gmail.com

Lindomar Matias Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-4395>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: lindomar@unifei.edu.br

Isabela Carolina Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1503-8928>
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Brasil
E-mail: isacarolreis@yahoo.com.br

Resumo

Reatores nucleares são dispositivos em que reações de fissão em cadeia são obtidas de modo controlado. A grandeza que representa este controle é a reatividade. Através da inserção ou remoção de barras absorvedoras de nêutrons controla-se o fluxo de nêutrons, determinando deste modo os níveis de potência. Já para o controle de longo prazo, substâncias químicas com alta seção de choque de absorção, são dissolvidas na água de refrigeração dos reatores à água pressurizada (PWR). O ácido bórico é utilizado para este propósito, devido ao isótopo B-10. O propósito deste trabalho foi mostrar a efetividade do boro no controle da reatividade dos reatores nucleares refrigerados a água leve. Foram inseridas amostras, com concentrações diferentes de ácido bórico no núcleo do reator nuclear de pesquisa Triga IPR-R1, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN. As variações de reatividades foram avaliadas utilizando o Método Estático da Reatividade Nula. Medidas do pH e da condutividade elétrica foram realizadas nas soluções para caracterizá-las. Os resultados encontrados possibilitaram simular o consumo de B-10 durante a operação do reator e seu efeito na reatividade com o aumento da concentração de ácido bórico. Os valores de pH tiveram um aumento muito pequeno após a irradiação. Já as condutividades das amostras tiveram alterações pouco significativas. Como resultado desta pesquisa, foi levantada uma correlação entre várias concentrações de ácido bórico e a reatividade do reator.

Palavras-chave: Reator nuclear; Triga; Boro; Controle químico; Reatividade; Nêutrons.

Abstract

Nuclear reactors are devices in which chain fission reactions are obtained in a controlled manner. The unit that this control represents is the reactivity. By inserting or removing neutron absorber bars the neutron flux is controlled, thereby determining the power levels. Already for long-term control, chemicals with a high absorption cross section are dissolved in the cooling water of the pressurized water reactor (PWR). Boric acid is used for this purpose, due to the B-10 isotope. The purpose of this work was to presents the effectiveness of boron in controlling the reactivity of nuclear reactors cooled to light water. Samples with different concentrations of boric acid were inserted into the IPR-R1 Triga nuclear reactor core from the Development Center of Nuclear Technology (CDTN). Variations of reactivities were evaluated using the Static Reactivity Null Method. The pH and electrical conductivity measurements were performed on the solutions to characterize them. The results obtained made it possible to simulate B-10 consumption during reactor operation and its effect on reactivity with increasing boric acid concentration. The pH values had a very small increase after irradiation. However, the conductivity of the samples had minor changes. As a result of this research, a correlation between various concentrations of boric acid and reactivity of the reactor was raised.

Keywords: Nuclear reactor; Triga; Boron; Chemical control; Reactivity; Neutrons.

Resumen

Los reactores nucleares son dispositivos en los que se obtienen reacciones en cadena de fisión de forma controlada. La magnitud de este control es la reactividad. Mediante la inserción o remoción de barras absorbentes de neutrones, se controla el flujo de neutrones, determinando así los niveles de potencia. Para un control a largo plazo, las sustancias químicas con una sección transversal de alta absorción se disuelven en el agua de enfriamiento de los reactores de agua a presión (PWR). El ácido bórico se utiliza para este propósito, debido al isótopo B-10. El propósito de este trabajo fue mostrar la eficacia del boro en el control de la reactividad de los reactores nucleares ligeros refrigerados por agua. Se insertaron muestras con diferentes concentraciones de ácido bórico en el núcleo del reactor de investigación nuclear Triga IPR-R1, del Centro para el Desarrollo de Tecnología Nuclear - CDTN. Las variaciones de reactividad se evaluaron utilizando el método estático de reactividad nula. Se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica en las soluciones para caracterizarlas. Los resultados encontrados permitieron simular el consumo de B-10 durante la operación del reactor y su efecto sobre la reactividad con el aumento de la concentración de ácido bórico. Los valores de pH tuvieron un aumento muy pequeño después de la irradiación. Las conductividades de las muestras tuvieron pocos cambios significativos. Como resultado de esta investigación, se generó una correlación entre varias concentraciones de ácido bórico y la reactividad del reactor.

Palabras clave: Reactor nuclear; Triga; Boro; Control químico; Reactividad; Neutrones.

1. Introdução

Para manter um reator nuclear crítico é necessário equilibrar a taxa em que os nêutrons são produzidos dentro do núcleo, com a taxa em que eles são perdidos devido a fugas e absorções. Através da inserção ou remoção de barras absorvedoras de nêutrons controla-se a população de nêutrons no núcleo, determinando deste modo os níveis de potência desejados. Já para o controle de longo prazo, substâncias químicas com alta seção de choque de absorção, como o ácido bórico, são dissolvidas na água de refrigeração dos reatores PWR (*Pressurized Water Reactor*).

O absorvedor de nêutrons mais comum em reatores PWR é o boro, adicionado na forma de ácido bórico (H_3BO_3). O boro natural contém 9,8% de B-10, com o restante na forma de B-11. O B-10 tem uma seção de choque de absorção de nêutrons térmicos de aproximadamente 3840 barns, o que aumenta a probabilidade de captura neutrônica de nêutrons moderados. O isótopo B-11 é quase ineficaz como absorvedor de nêutrons (IAEA, 1996).

A concentração de ácido bórico depende das características do núcleo e da projeção de queima do combustível. Nos reatores PWR o teor de boro começa dentro da faixa de 1000-2000 ppm e diminui, gradativamente, devido à absorção de nêutrons. No final do período de queima do combustível, de quaisquer dos ciclos de queima, a concentração de boro alcança poucos ppm ou está próxima de zero. No desligamento para abastecimento do reator, o ácido bórico também é injetado em altas concentrações a fim de absorver todos os nêutrons térmicos extinguindo a reação de fissão. Já nas trocas de elementos combustíveis, o ácido bórico é utilizado em grandes concentrações, para garantir a subcriticalidade do núcleo (Nordmann, 2004).

Como o núcleo dos reatores está imerso em água, parte dos nêutrons provenientes da reação de fissão são termalizados pela colisão elástica com os átomos de hidrogênio da água, num processo de moderação. Os nêutrons térmicos são capturados pelo isótopo 10 do boro, contido no refrigerante como ácido bórico, conforme Eq. 1 (Pastina *et al.*, 1999).



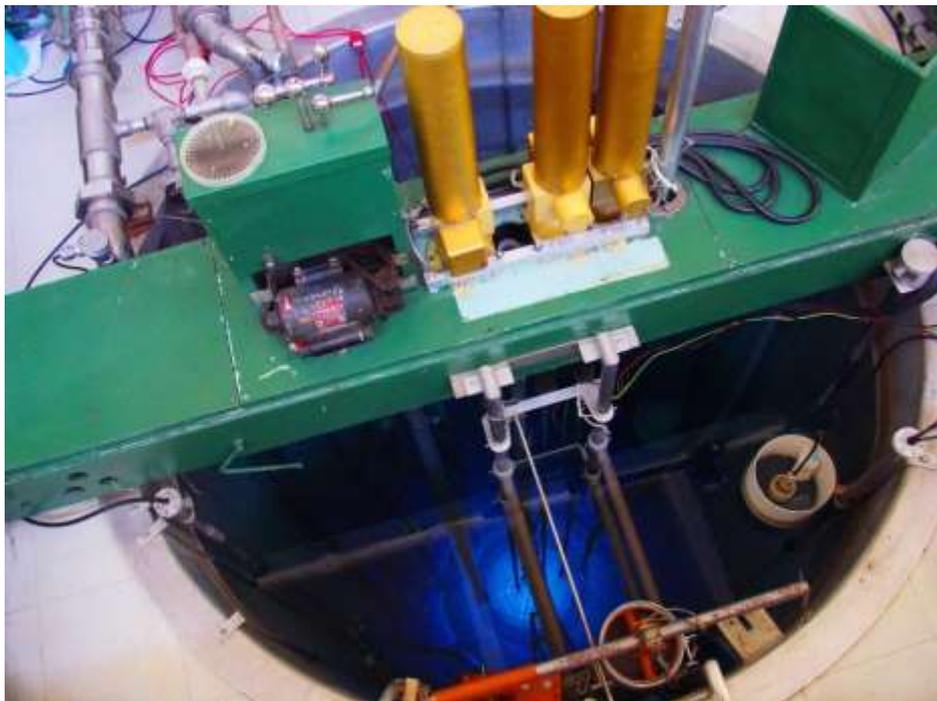
O uso do ácido bórico para controle da reatividade possui benefícios: redução da dependência das barras de controle, economia do combustível e melhor distribuição da potência no núcleo e os produtos da reação, hélio (He) e lítio (Li), são isótopos estáveis (Giada, 2005) (Byrne, 1994).

Existem duas principais razões para realizar um controle químico da reatividade no reator. A primeira é a redução do número de barras de controle, o que fornece uma economia considerável nos custos operacionais do reator, já que as barras de controle juntamente com seus respectivos mecanismos de controle são onerosas. Além disso, a inserção das barras de controle no vaso do reator é reduzida, o que melhora sua resistência, reduz a probabilidade de corrosão e aumenta o tempo de vida útil

do vaso do reator. A segunda razão é que o uso do controle químico não produz distúrbios de potência no núcleo do reator (Lamarsh e Baratta, 2018).

O propósito deste trabalho foi mostrar a efetividade do boro como absorvedor de nêutrons no controle da reatividade de reatores nucleares refrigerados a água leve (Reis, 2017). Para tal, foram conduzidos experimentos de medida da variação da reatividade do reator de pesquisas Triga IPR-R1, mostrado na Fig. 1. Amostras com concentrações diferentes de ácido bórico, condicionadas em recipientes estanques, foram inseridas no núcleo do reator (Reis *et al.*, 2016a). O IPR-R1 é um reator de pesquisa refrigerado a água leve desmineralizada, cujo núcleo é composto de 63 elementos combustíveis. A parte ativa nos combustíveis é composta por uma dispersão homogênea de urânio enriquecido a 20% do isótopo U-235 (Mesquita, 2021).

Figura 1 – Poço do Triga IPR-R1 mostrando seu núcleo com o reator em operação.

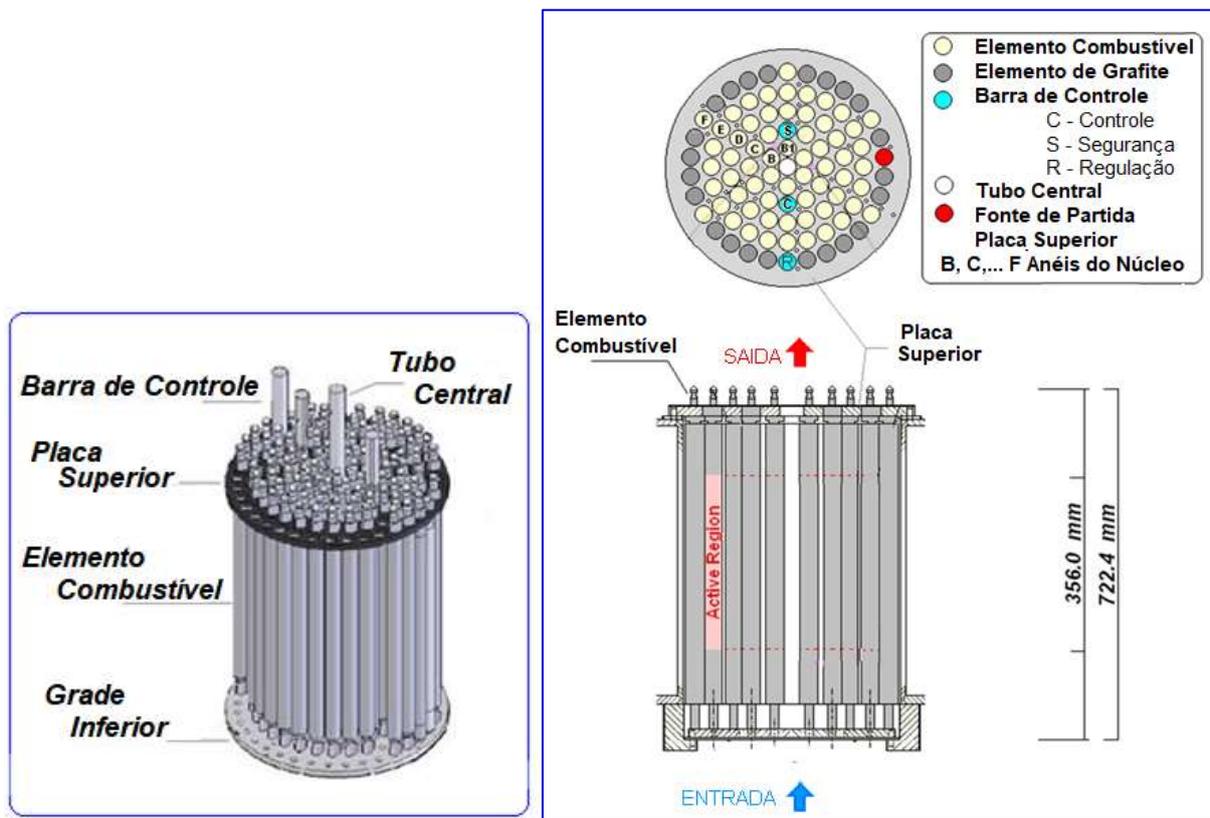


Fonte: Mesquita *et al.* (2021).

2. Metodologia

Os experimentos no reator foram conduzidos, após um período de uma semana sem operação do reator Triga IPR-R1 (reator frio) e operou-se a baixa potência (1 W) durante 10 minutos, para não haver efeito da temperatura na reatividade. Preparam-se amostras com concentrações diferentes de soluções de ácido bórico (Reis *et al.* (2016b). Mediu-se o pH e condutividade elétrica das soluções, antes da irradiação. Em seguida, realizaram-se os experimentos de variação da reatividade do reator. Após os experimentos, caracterizou-se novamente as amostras (Reis *et al.* 2016c). As amostras foram inseridas do tubo central do núcleo (fluxo máximo de nêutrons) (Fig. 2), com o reator operando a 1 W. A Barra de Controle foi mantida em uma posição fixa e a Barra de Segurança foi totalmente retirada. Assim, toda a compensação de reatividade se deu retornando à criticalidade, exclusivamente, pelo reposicionamento da Barra de Regulação.

Figura 2- Diagrama do núcleo do reator Triga IPR-R1.



Fonte: Mesquita *et al.* (2021).

2.1 Caracterização das amostras

Cada amostra continha diferentes concentrações de ácido bórico apresentando na Tabela 1. A faixa de valores das concentrações usuais utilizadas nos reatores PWR, vão de cerca de 1000 ppm a 2000 ppm. Nos experimentos, aqui realizados, as concentrações foram maiores devido ao pequeno volume do porta-amostras e do tubo central do reator, onde estas foram inseridas. Além disto nos experimentos as amostras são pontuais, ao contrário dos reatores PWR onde a solução de boro é diluída de modo homogêneo no núcleo. As variações de reatividade foram medidas usando a técnicas da reatividade nula.

Tabela 1 - Concentração das soluções de H_3BO_3 .

Identificação das Amostras	Concentração (ppm)
Amostra 1	0
Amostra 2	10.000
Amostra 3	20.000
Amostra 4	30.000
Amostra 5	40.000

Fonte: Autores.

1.2 Equação de *Inhour* – reatividade

Uma das maneiras de expressar a reatividade é em termos do inverso da hora, conhecida pela unidade *inhour*, definida como a reatividade que corresponde a um Período estável de uma hora (3600 s). O Período do reator (T) é definido como o tempo necessário para que a potência do reator aumente (ou diminua) de um fator e , de aproximadamente 2,718. A função que relaciona o período estável (T) com o acréscimo do fator de multiplicação (δk) (com $k \approx 1$), é conhecida como “equação de *inhour*” e é dada pela Eq. 2 (IAEA, 2017):

$$\rho = \frac{\delta k}{1 + \delta k} \Rightarrow \rho = \frac{\ell}{T(1 + \delta k)} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \quad (2)$$

O termo $\rho = \frac{\delta k}{1 + \delta k} = \frac{k - 1}{k}$ é denominado reatividade.

A reatividade descreve o comportamento do reator quando k desvia de 1, sendo o parâmetro mais importante na operação do reator nuclear. Note-se que os níveis de potência, a densidade dos nêutrons, etc., estão constantemente mudando quando k não é igual a 1,0. A diferença entre um dado valor de k e 1,0 é denominado como o “excesso” do fator de multiplicação δk , e tanto pode ser positivo ou negativo, dependendo se k for menor ou maior que 1,0. Quando a reatividade é positiva, o reator é supercrítico; zero, ele está crítico; e negativo, o reator está subcrítico.

A reatividade pode ser controlada de várias formas: por adição ou remoção de combustível; alterando a fração de nêutrons que fogem do sistema, ou por alteração da quantidade do material absorvedor, que compete com o combustível na captura de nêutrons. A reatividade ρ está relacionada com o acréscimo δk conforme Eq. 3.

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \quad (3)$$

As alterações de reatividade envolvidas nas operações normais do reator são pequenas e envolvem valores de k muito próximos de 1, por exemplo $k = 1,003$ dá um $\delta k = 0,003$. A reatividade é uma quantidade definida matematicamente que não pode ser medida diretamente, na prática. Uma vez que k é um número adimensional, a quantidade ρ é um número puro. No entanto, várias unidades são utilizadas para expressar a reatividade em termos de um valor fixo: número puro ou por cento ($\times 100$ número puro), ou também o “mk” ($1\text{mk} = 0,001$). A unidade para a reatividade de uso comum nos reatores de potência é o pcm (“por cem mil”), que é igual a um valor de ρ de 10^{-5} ($= 1$ pcm). Em reatores de pesquisa, como os reatores Triga, a reatividade é dada em uma unidade denominada dólar, dividida em centavos (¢) (*cents*). A reatividade em dólar (β_s) é igual a β_{eff} . Sendo β_{eff} a fração efetiva de nêutrons atrasados na fissão térmica do ^{235}U (Mesquita, 2021).

Em reatores PWR, diversos são os parâmetros que influenciam a reatividade do núcleo. Entre eles, destaca-se a concentração de ácido bórico, objeto de estudo deste trabalho. Outros parâmetros que influenciam na reatividade neutrônica são: temperatura média do moderador, temperatura do combustível, concentração de produtos de fissão (principalmente, xenônio e samário) e a posição das barras de controle e regulação (Gomes, 2008).

Para um dado reator, as quantidades β_i , λ_i , e k são conhecidas (frequentemente $k \approx 1$ e é deixado de fora da equação), de modo que o período pode ser determinado quando a reatividade é conhecida e vice-versa.

Quando o período é longo (isto é, quando a reatividade é muito pequena), a unidade pode ser negligenciada em comparação a $\lambda_i T$ e $\ell/(1 + \delta k)$ é pequeno comparado ao termo de soma. Nesses casos, a Equação 2 se reduz a Equação 4 (Lamarsh e Baratta, 2018).

$$\rho = \frac{1}{T} \sum_i \frac{\beta_i}{\lambda_i} \quad (4)$$

Estimar os valores de reatividade pela Equação 4 é válido, ressaltando apenas que essa equação foi obtida assumindo $T \gg 1/\lambda_i = 1/0,0124 \approx 80$ segundos para um reator com combustível de U-235. Assim, tomando um período que seja o dobro, isto é, $T=160$ s, a Eq. 4 quando usada para valores de período menor que este valor, fica superestimada a reatividade (Lamarsh e Baratta, 2018).

1.3 Método estático da reatividade nula

O método estático da reatividade nula, para o cálculo da reatividade, consiste em se estabelecer um estado crítico inicial e comparar a um estado crítico final, obtido após uma alteração no núcleo. A mudança nas posições das barras de controle entre os dois estados crítico obtidos permite que se obtenha a reatividade inserida. A variação na reatividade é determinada a partir da curva de calibração das barras de controle e sua movimentação. Considerando que a barra de Regulação é projetada para compensar pequenas variações de reatividade, optou-se por manter fixa a posição da barra de Controle, de modo que toda compensação de reatividade se desse exclusivamente pelo reposicionamento da Barra de Regulação. Assim a curva de calibração desta barra foi utilizada para determinar as variações de reatividade (Souza, 2016).

Os dados relativos à calibração da barra de Regulação são apresentados na Tabela 2 e a Figura 3 apresenta a curva de calibração integral desta barra. Foi feito um ajuste através de um polinômio de terceiro grau, cuja fórmula é expressa na mesma figura. A metodologia para calibração das barras está descrita em Souza e Mesquita (2008).

Tabela 2 - Dados da calibração da Barra de Regulação.

Regulação (posição)	Δx	Controle (posição)	$T(s)$	$\Delta\rho^*(\epsilon)$	$\rho(\epsilon)$
IN-149	-	524		Crítico	
300	151	524	145,8	6,1	6,1
300		513		Crítico	
380	80	513	160,6	5,7	11,8
380		504		Crítico	
460	80	504	127,8	6,8	18,6
460		491		Crítico	
524	64	491	162,4	5,6	24,2
524		481		Crítico	
589	65	481	193,0	4,8	29,0
589		471		Crítico	
668	79	471	160,2	5,7	34,7
668		460		Crítico	
758	90	460	211,1	4,5	39,2
758		452		Crítico	
903	145	452	278,5	3,5	42,7
903		452		Crítico	

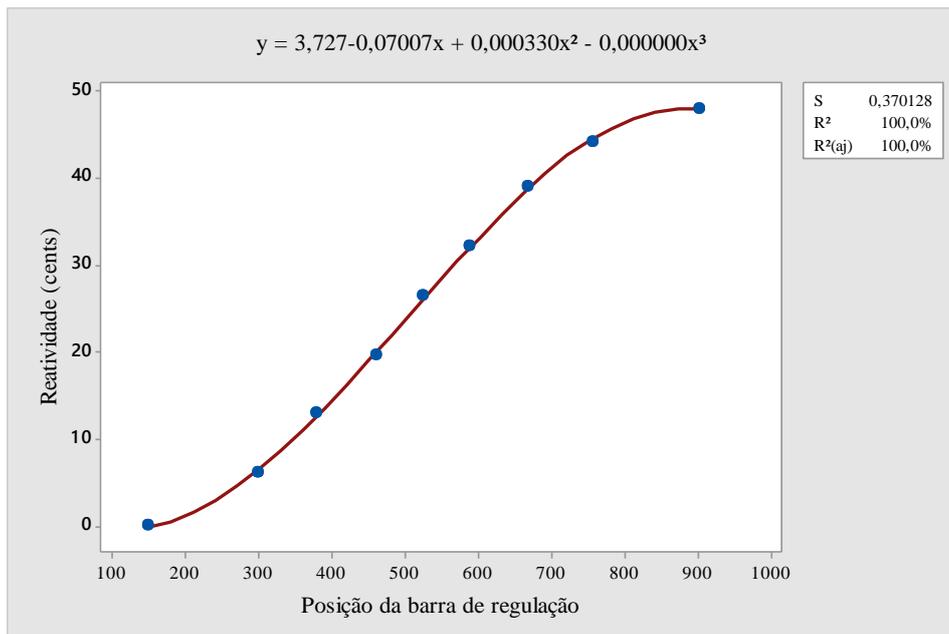
*Valores calculados a partir das Equações 2.4 e 2.6 e com um β_{eff} 0,774%.
 Fonte: Adaptado de Souza (2016).

Na curva de calibração da barra, cada posição da barra corresponde a um determinado valor de reatividade. Logo a diferença entre as posições de barras obtidas para os estados críticos, fornece o valor da variação de reatividade correspondente àquela mudança de estado, ou seja, fornece o valor da reatividade inserida pela amostra no núcleo.

A reatividade devido ao boro é determinada pela diferença das reatividades com as amostras contendo H_3BO_3 ρ_f (estado crítico final), e a reatividade com as amostras sem adição de H_3BO_3 ρ_0 , (estado crítico inicial), conforme Eq. 5.

$$\rho_B = \rho_f - \rho_0 \quad (5)$$

Figura 3 - Curva de calibração integral da Barra de Regulação.



Fonte: Reis (2016).

1.4 Análise dos experimentos

Os resultados do experimento foram representados em gráficos. Os gráficos incluem a linha de regressão, que representa a equação de regressão, o erro padrão da regressão, os coeficientes de determinação e os intervalos de confiança e predição de 95%. O erro padrão da regressão, simbolizado por “S”, representa os valores da distância padrão dos dados até a linha de regressão. Quanto menor o valor de “S”, melhor o modelo prediz a resposta. O coeficiente de determinação, simbolizado por “R²” indica quantos por cento a variação encontrada pela regressão representa na variação total, indicando, portanto, a qualidade da regressão. O “R² (aj)” simboliza o coeficiente de determinação ajustado. O termo ajustado significa ajustado para os graus de liberdade associados às somas dos quadrados. O valor de “R²” sozinho dá uma falsa impressão que o modelo está bom. Por isso é importante avaliar também os valores de “R² (aj)”. Quanto mais próximos de 100% forem esses coeficientes de determinação, maior será a validade da regressão. O intervalo de confiança “IC” fornece um intervalo de valores prováveis para a resposta média, possibilitando então avaliar a estimativa do valor ajustado para os valores observados das variáveis. Já o intervalo de predição “IP” é um intervalo que provavelmente contém uma única resposta futura para um valor de variável preditora, ou seja, com faixa de predição de 95%, pode-se ter 95% de confiança de que as novas observações irão cair dentro do intervalo indicado pelas linhas tracejada na cor roxa.

As incertezas associadas às variáveis concentração das soluções de H₃BO₃, pH, condutividade e reatividade foram avaliadas de acordo com o procedimento da norma ISO (2008) - *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*.

3. Resultados

3.1 Variação da condutividade elétrica e do pH das amostras

Na Tabela 3 é apresentado dos resultados para os valores de concentração e os valores de pH antes e após a irradiação.

Tabela 3 - Resultados da medida do pH das soluções de H₃BO₃.

Concentração de ácido bórico (ppm)	Antes da irradiação		Depois da irradiação	
	pH	U	pH	U
0	5,958	0,017	6,04	0,35
10.000 ± 177	4,928	0,035	5,088	0,027
20.000 ± 236	4,558	0,017	4,644	0,027
30.000 ± 358	4,236	0,014	4,320	0,014
40.000 ± 482	3,9420	0,0089	3,984	0,017

Fonte: Autores.

As concentrações das soluções de H₃BO₃ estão representadas com suas respectivas incertezas de medidas, nas quais as incertezas expandidas estimadas para as concentrações de ácido bórico foram menores que 2%, logo, não foram consideradas no cálculo de incertezas dos demais parâmetros (pH, condutividade e reatividade). Nesta tabela e nas seguintes a serem mostradas, “U” indicada a incerteza expandida, com probabilidade de abrangência correspondente a 95%.

O pH das amostras teve um aumento muito pequeno após o experimento. Este pequeno aumento pode estar associado ao aumento da concentração de oxigênio formado pela radiólise da água. Ou então, pela interação da água com o ambiente, o que pode impactar na sua composição.

A condutividade elétrica é um indicador da concentração total das impurezas iônicas. Em reatores nucleares, o aumento de impurezas iônicas influencia adversamente na corrosão dos materiais, no aumento do campo de radiação e no desempenho do combustível. Por isso, o nível de condutividade elétrica na água de reatores nucleares deve ser mantido o mais baixo possível. Um aumento da condutividade elétrica pode, também, ser devido à presença de produtos de fissão no refrigerante primário, o que indica falha nos revestimentos dos elementos combustíveis. Os valores da condutividade avaliada antes e após a radiação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados medidos da condutividade elétrica das soluções de H₃BO₃.

Concentração de ácido bórico (ppm)	Antes da irradiação		Depois da irradiação	
	\bar{x} (μ S/cm)	U (μ S/cm)	\bar{x} (μ S/cm)	U (μ S/cm)
0	0,55	0,11	1,420	0,012
10.000	5,730	0,092	5,610	0,019
20.000	12,61	0,36	12,61	0,83
30.000	23,81	0,70	22,39	0,34
40.000	40,44	0,77	39,47	1,48

Fonte: Autores.

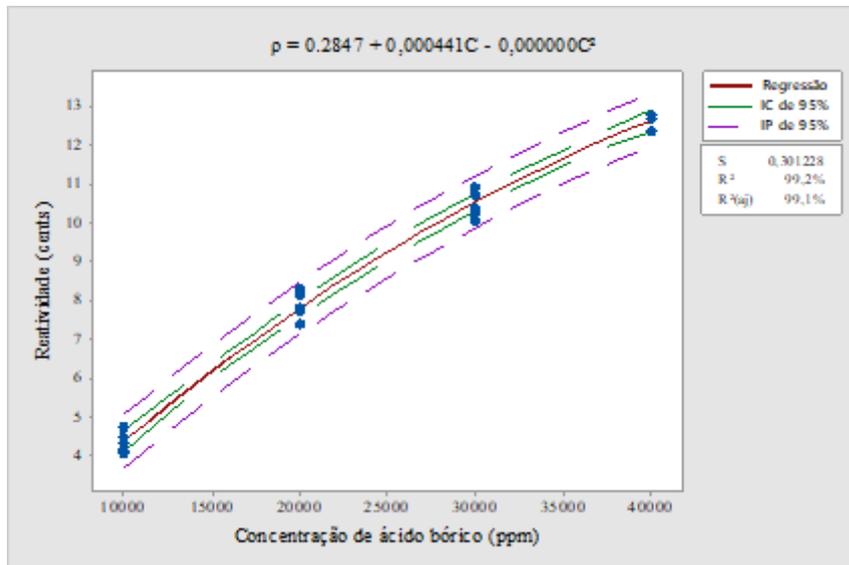
Pode-se dizer que, a partir dos resultados encontrados, houve pouca variação na condutividade das amostras após a irradiação, exceto para a água pura. Como a condutividade da água deionizada é muito baixa, sua interação com o meio (ar) incorpora componentes gasosos em sua composição, tendo como consequência o aumento da condutividade.

Na literatura é relatado que com um valor de pH entre 4,5 e 7 e uma condutividade abaixo de 1 μ S/cm, a corrosão da maioria dos metais é mínima. Porém, esses valores de pH e condutividade não podem ser levados em consideração no presente trabalho, dado que a concentração de ácido bórico utilizada nos experimentos (0–40.000 ppm) foi muito maior do que aquela aplicada em reatores do tipo PWR (0–2.500 ppm). Além disso, outros produtos químicos (tais como hidróxido de lítio, hidrogênio e zinco, etc.) que são acrescentados para controlar o pH e a condutividade elétrica, não foram adicionados nas amostras. Por conseguinte, com o aumento da concentração de ácido bórico, evidentemente, ocorrerá o aumento da condutividade.

3.2 Mudança da reatividade devido às amostras

As reatividades devidas ao boro são apresentadas na Figura 4. As reatividades foram obtidas pela diferença entre as reatividades das amostras contendo H_3BO_3 e as amostras contendo água pura.

Figura 4 - Reatividade ρ_B devida ao boro pelo Método da Reatividade Nula.



Fonte: Autores.

Tabela 5 - Posições crítica das barras de controle para os vários estados do reator.

Concentração H_3BO_3 (ppm)	Nº de repetições das medidas	Potência do reator (watts)	Posição crítica das barras			Reatividade (¢)
			REG	CONT	SEG	
0	1	1	303	550	UP	6,44
10.000	1	1	347	550	UP	9,78
20.000	1	1	393	550	UP	13,73
30.000	1	1	418	550	UP	16,02
40.000	1	1	453	550	UP	19,35
0	2	1	300	550	UP	6,23
10.000	2	1	339	550	UP	9,13
20.000	2	1	384	550	UP	12,92
30.000	2	1	422	550	UP	16,40
40.000	2	1	449	550	UP	18,96
0	3	1	294	550	UP	5,83
10.000	3	1	340	550	UP	9,21
20.000	3	1	388	550	UP	13,28
30.000	3	1	426	550	UP	16,77
40.000	3	1	450	550	UP	19,06
0	4	1	282	550	UP	5,05
10.000	4	1	344	550	UP	9,53
20.000	4	1	389	550	UP	13,37
30.000	4	1	420	550	UP	16,21
40.000	4	1	445	550	UP	18,58
0	5	1	280	550	UP	4,92
20.000	5	1	383	550	UP	12,84
30.000	5	1	422	550	UP	16,96
40.000	5	1	450	550	UP	19,06

Fonte: Autores.

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios das reatividades em valor absoluto e as suas respectivas incertezas expandidas calculadas para as várias concentrações das soluções de ácido bórico pelo da Reatividade Nula.

Tabela 6 - Resultados da mudança de reatividade devido ao boro ρ_B .

Concentração de ácido bórico (ppm)	Reatividade Nula	
	$\bar{\rho}$ (¢)	U (¢)
10.000	3,71	1,16
20.000	7,53	1,41
30.000	10,78	1,61
40.000	13,31	1,78

Fonte: Autores.

Apesar do pequeno volume (6,5 mL solução de H_3BO_3) inserido, a influência na reatividade do reator IPR-R1 foi observada e significativa em concentrações mais altas. Isso mostra o quanto este reator é sensível a pequenos distúrbios em seu núcleo e o quão efetivo é o isótopo B-10 como absorvedor de nêutrons.

4. Conclusão

Como as amostras foram preparadas apenas com soluções de ácido, sem adição de nenhum outro agente alcalino, o pH das amostras reduziu com o aumento da concentração de ácido, enquanto a condutividade elétrica aumentou. Após a irradiação, o pH das amostras sofreu um pequeno aumento, já a condutividade teve mudanças pouco significativas. A avaliação desses parâmetros é importante na caracterização da qualidade da água e no controle de impurezas de reatores refrigerados à água leve (Rodrigues *et al.*, 2018) (IAEA, 2010, 2011).

As perturbações no núcleo do reator que levaram às mudanças na reatividade ocorreram devido à introdução do isótopo 10 do boro, contido nas amostras como ácido bórico, o que aumentou a absorção local de nêutrons. Foi possível observar que até a concentração máxima de boro, a reatividade teve um comportamento linear com o aumento da concentração. O experimento reproduziu o comportamento esperado da reatividade em função da concentração de H_3BO_3 — aumento da concentração de boro e consequente aumento do valor absoluto da reatividade devido à absorção de nêutrons.

O pequeno volume das soluções foi importante para demonstrar o quão sensível o reator Triga é às pequenas perturbações. Por outro lado, um volume de amostra maior que se estendesse ao longo do tubo central cobrindo toda a área ativa do núcleo, possibilitaria utilizar concentrações menores mais próximas daquelas usadas em reatores de potência, acarretando em melhores resultados nos parâmetros analisados no presente trabalho.

Os resultados obtidos, neste trabalho, possibilitam a realização de outros estudos. Entre as novas investigações que podem ser realizadas, pode-se citar a influência de outros produtos químicos que podem ser adicionados à água de refrigeração para melhorar os coeficientes de transferência de calor (Oliveira *et al.*, 2021). Outra pesquisa que se pode realizar, é a adição na água de refrigeração de substâncias para podem ajudar na redução de problemas relacionados à corrosão e controle do campo de radiação (Scott e Combrade, 2006) (IAEA, 2013) (Fylonych e Zaporozhan, 2021). Este trabalho está contribuindo com resultados relevantes para a tecnologia de reatores nucleares. Foi também um experimento inédito com utilização de amostras de ácido bórico em um reator nuclear de pesquisa.

Agradecimentos

Esse projeto é apoiado pelas seguintes instituições: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen), Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFCT), Universidade

Federal de Itajubá (UNIFEI), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- Byrne, J. (1994). *Neutrons, Nuclei and Matter: An Exploration of the Physics of Slow Neutrons*. New York: Ed. Dover.
- Giada, M. R. (2005). *Determinação da reatividade do veneno queimável de $Al_2O_3-B_4C$ em função da sua concentração no reator IPEN/MB-01*. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear - Reatores) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- Gomes, K. (2008). *Controle preditivo neural aplicado ao processo de criticalidade da usina nuclear de Angra II*. 193 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (1996). *Processing of nuclear power plant waste streams containing boric acid*. Vienna: IAEA Nuclear Energy Series, (IAEA-TECDOC-911).
- IAEA – International Atomic Energy Agency. (2013). *Water Chemistry and Clad Corrosion/Deposition Including Fuel Failures*. IAEA-TECDOC-CD-1692. Proceedings of a Technical Meeting held in Kiev, Ukraine.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (2011). *Good Practices for Water Quality Management in Research Reactors and Spent Fuel Storage Facilities*. NP-T-5.2. Vienna.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (2010). *Recommended Practices for Water Quality Management in Research Reactors & Spent Fuel Storage Facilities*. IAEA Nuclear Energy Series.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. (2017). *Physics and Kinetics of TRIGA Reactors*. [https://ansn.iaea.org/Common/documents/Training/TRIGA%20Reactors%20\(Safety%20and%20Technology\)/chapter2/physics221.htm](https://ansn.iaea.org/Common/documents/Training/TRIGA%20Reactors%20(Safety%20and%20Technology)/chapter2/physics221.htm).
- ISO - International Organization of Standardization. (2008). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Geneva.
- Lamarsh, J. R.; Baratta, A. J. (2018). *Introduction to Nuclear Engineering*. 4th Edition. Pearson. Hoboken, New Jersey.
- Mesquita, A.Z. (2021). *Reatores Nucleares - Introdução à Energia do Núcleo*. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do Centro e Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. 147p. Belo Horizonte.
- Mesquita, A.Z.; Palma, D.A.P.; Rezende, H.C.; Oliveira, A.M.; Morghi, Y.; Ribeiro, P.A.M.; Alcântara e Alves; Peconick, D.G.O. (2021a). Power Measurement Methodologies for Pool Nuclear Research Reactors. *Latin American Journal of Development*, v. 3, p. 882-892, 2021. DOI: 10.46814/lajdv3n2-032.
- Mesquita, A.Z.; Rezende, H.C.; Rodrigues, R.R.; Almeida, V.F.; Palma, D.A.P. (2021b). Experimental evaluation of natural convection in the IPR-R1 Triga research reactor at 264 kW and 105 kW. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 9, p. 1-15. DOI: 10.15392/bjrs.v9i2B.1256.
- Nordmann, F. (2004). Aspects on chemistry in French nuclear power plants. *14th International Conference on the Properties of Water and Steam in Kyoto*, p. 521–530.
- Oliveira, A.M.; Mesquita, A.Z.; Reis, I.C. (2021). Proposta de Investigação Experimental do Desempenho Termo-Hidráulico de Nanofluidos na Refrigeração de Reatores Nucleares à Água Leve. In: Antonella Carvalho de Oliveira. (Org.). *Projeto, Análise e Otimização na Área das Engenharias*. 1ed. Ponta Grossa (PR): Atena Editora. v. 1, p. 124-130.
- Pastina, B.; Isabay, J.; Hickel, B. (1999). The influence of water chemistry on the radiolysis of the primary coolant water in pressurized water reactors. *Journal of Nuclear Materials*, v. 264, n. July 1998, p. 309–318. DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00494-2.
- Reis, I. C. (2017). *Avaliação Teórico-Experimental da Influência do Boro na Reatividade do Reator Triga IPR-R1*. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais). Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte.
- Reis, I. C.; Monteiro, R.P.G.; Mesquita, A.Z. (2016c). Rotina de determinação do pH e da condutividade de amostras de água borada antes e após irradiação no tubo central do reator TRIGA IPR-R1. Doc. Nº: R001.20.RE.002. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/Cnen). Belo Horizonte.
- Reis, I. C.; Souza, R.M.G.P.; Mesquita, A.Z.; Monteiro, R.P.G. (2016a). *Procedimento Experimental para Determinação do Efeito do Boro na Reatividade do Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1*. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. NI-SETRE 05/2016. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/Cnen). Belo Horizonte.
- Reis, I.C.; Monteiro, R.P.G.; Mesquita, A.Z. (2016b). Rotina do preparo de soluções de ácido bórico para irradiação no reator TRIGA IPR-R1. (Doc. Nº: R001.20.RE.001. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/Cnen). Belo Horizonte.
- Rodrigues, R.R.; Mesquita, A.Z.; Palma, D.A.P. (2018). Designing a system to detect leaking in fuel elements in Brazilian Triga research reactor. *International Journal of Nuclear Energy, Science and Technology* (Print), v. 12, p. 239. DOI: 10.1504/IJNEST.2018.095691.
- Scott, P. M.; Combrade, P. (2006). Corrosion in Pressurized Water Reactor. *ASM Handbook – Corrosion Environment and Industries*. Volume 13C, p 36A. D. Cramer and B. S. Covino, Jr. Eds, ASM, Metals Park, OH.
- Souza, R. M. G. P.; Mesquita, A. Z. (2008). *Procedimentos de Testes Neutrônicos e Termohidráulicos no Reator TRIGA IPR-R1 à 100 kW – Núcleo com 63 E.C*. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Nota Interna (NI-TR-03/08).
- Fylonych, Y.; Zaporozhan, V.; Balashevskiy, O.; Merkotan, K. (2021). Analysis of the Influence of Nuclear Fuel Burnup on the ^{16}N Formation Rate in the Primary Coolant Circuit of WWER-1000 Reactor. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. Vol. 22 No. 1. DOI: 10.15407/jnpae2021.01.048.