

# Análise do Coeficiente Isotérmico de Reatividade de Vazios para Reator de Espectro Rápido

Fabiano P. C. Lima<sup>a,b</sup>, Sérgio de O. Vellozo<sup>b</sup>, João C. B. Fiel<sup>b</sup>, Marta J. Velozo<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República – GSI/PR

<sup>b</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME) –

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha,

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

fabiano.petrucci@presidencia.gov.br

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise do comportamento isotérmico do coeficiente de reatividade de vazios para um reator de espectro rápido em desenvolvimento no Instituto Militar de Engenharia (IME). A principal peculiaridade do projeto reside no uso de óxido misto [MOX - PuO<sub>2</sub> + U(urânio natural)O<sub>2</sub>] como núcleo do combustível. Para essa tarefa, o sistema Scale 6.1 foi utilizado para calcular a reatividade de várias distribuições de vazios geradas por bolhas no sódio, na temperatura de projeto de operação do reator, a 523K. Os resultados mostraram que o coeficiente de reatividade de vazios é bastante dependente do teor de vazios no núcleo, e principalmente, da localização desses vazios pelo núcleo, alcançando resultados positivos em alguns casos. Contudo, a ordem de grandeza das variações na reatividade do sistema foi baixa (10<sup>-4</sup> a 10<sup>-3</sup>), sendo tais efeitos compensados por outros efeitos de realimentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reator de espectro rápido, coeficiente de reatividade de vazios, óxido misto de urânio e plutônio.

**ABSTRACT:** This study aims to present an analysis of the isothermal void reactivity coefficient for a fast spectrum reactor in development at the Engineering Military Institute (IME). The main design peculiarity lies in using mixed oxide [MOX - PuO<sub>2</sub> + U(natural uranium)O<sub>2</sub>] as fuel core. For this task, SCALE system was used to calculate the reactivity for several voids distributions generated by bubbles in the sodium, at the design temperature of the reactor, 523K. The results showed that the void reactivity coefficient is very dependent on the content of voids in the core, and mainly, on the location of these voids throughout the core, reaching positive results in some cases. However, the order of magnitude of the changes in system reactivity was low (10<sup>-4</sup> to 10<sup>-3</sup>), such effects being compensated by other feedback effects.

**KEYWORDS:** fast breeder reactor, void reactivity coefficient, mixed oxide.

## 1. INTRODUÇÃO

A grande maioria das usinas nucleares existentes hoje no mundo usa combustível à base de urânio, já que o <sup>235</sup>U é o único nuclídeo fissil existente na natureza. No entanto, este existe apenas na proporção de 0,72% do urânio natural. O restante consiste principalmente de <sup>238</sup>U, que é um nuclídeo fértil e quase não fissionável nas atuais Usinas Nucleares de 2ª Geração.

Os recursos de urânio conhecidos e extraíveis a um custo viável estão atualmente estimados em menos de 6,5 milhões de toneladas. Considerando que atualmente as necessidades globais de urânio natural das centrais nucleares são de aproximadamente 70 mil toneladas por ano, haverá combustível nuclear disponível por apenas cerca de 100 anos, se considerada uma taxa de consumo constante pelas usinas [1]. Obviamente, essa quantidade de urânio não poderá garantir uma contribuição sustentável para a demanda mundial de energia.

Dessa forma, a fim de assegurar o futuro da energia nuclear, o desenvolvimento dos reatores rápidos regeneradores se torna necessário e constituem-se, indubitavelmente, na resposta definitiva que se pode dar ao problema energético através da fissão nuclear.

A principal importância não se deve tanto à capacidade de produzir energia a custo competitivo, mas no fato de permitir à fonte nuclear de se tornar praticamente inexaurível. Esses reatores produzem, durante seu funcionamento, um novo material fissil às custas da parte não-fissil (<sup>238</sup>U) do urânio natural, permitindo a ampliação do potencial energético das reservas uraníferas em cerca de 70 vezes, o que possibilitaria o uso da energia nuclear por um período praticamente indefinido [2].

Os reatores rápidos também possuem potencialidade para ser um sistema radiologicamente limpo, resultado do esquema de reprocessamento, que recupera os elementos transurânicos (e.g. plutônio) com alta eficiência e estes, por sua vez, retornam ao núcleo para serem “queimados”. No espectro rápido, esses elementos transurânicos são utilizados como combustíveis. Por consequência, o gerenciamento do rejeito de alta atividade seria facilitado, visto que a necessidade de armazenamento seria diminuída de milhões para algumas centenas de anos. Então, o risco de contaminação do meio ambiente por rejeito radioativo além do risco de proliferação de material para a fabricação de artefatos nucleares seria menor.

Contudo, para qualquer projeto nessa área, o controle efetivo da reatividade do sistema e da segurança do reator é um fator importante e crucial de projeto. Em um reator nuclear, as variações sofridas pela reatividade são decorrentes não apenas de condições impostas, tais como posição de barras de controle, arranjo de refletores ou inserção de fontes ou absorvedores de nêutrons, mas também devido a fatores inerentes de cada reator, os quais temporariamente causarão alterações na reatividade, muito embora o reator tenha sido posto em operação a uma potência fixa.

No caso de um reator de água fervente, por exemplo, a formação de bolhas de vapor no caroço afeta a reatividade causando uma redução na absorção de nêutrons pela água e aumentando a fuga de nêutrons do caroço. Testes efetuados em reatores desse tipo mostraram serem eles seguros e autorregulados, de modo que uma súbita excursão de potência induz à formação de bolhas no líquido moderador, reduzindo a termalização de nêutrons e aumentando a probabilidade de fuga. Em consequência, a taxa de fissão diminuirá, e, portanto também a potência.

No caso dos reatores Rápidos, o material mais utilizado como refrigerante é o metal na fase líquida, sendo muitas vezes escolhido o sódio (Na) para essa função. O ponto de ebulição do sódio, em pressão ambiente, é cerca de 800°C. Apesar da temperatura de ebulição estar bem acima da temperatura típica de operação desses reatores, em torno de 250°C, é possível, em caso de descontrole, que ocorra a formação de vazios, que podem influenciar tanto positivamente quanto negativamente no coeficiente de reatividade global.

Caso os vazios estejam localizados nas bordas do núcleo, esse efeito contribui para saída dos nêutrons do núcleo ativo, acarretando num coeficiente negativo. Porém, dependendo da localização desses vazios (e.g. na região central do núcleo), o coeficiente pode ser positivo. Nesse sentido, é importante e necessária a determinação precisa do coeficiente de vazios em diferentes posições e do coeficiente global de vazios, para que se possa garantir que os efeitos inerentes por si só mantenham o reator em um patamar mínimo de segurança.

## 2. SEGURANÇA E CONTROLE DE REATORES RÁPIDOS: INFLUÊNCIA E EFEITO DOS VAZIOS NO REFRIGERANTE

Um dos aspectos mais polêmicos atualmente com relação às instalações nucleares é a questão de segurança. Dessa forma, conhecer o comportamento do reator em relação à presença de vazios é de extrema importância, pois está diretamente ligado à segurança do projeto.

A avaliação dos parâmetros neutrônicos é de suma importância na análise da segurança de reatores nucleares. Deve-se garantir que os parâmetros neutrônicos estabeleçam uma condição de operação intrinsecamente segura, através da obtenção de coeficientes de reatividade negativos que permitam a realimentação negativa e estável de excursões de potência no núcleo. Para reatores operando no espectro rápido, coeficientes positivos são aceitáveis em determinadas condições de operação, desde que as somatórias dos parâmetros sejam negativas e levem ao retorno das condições de estabilidade. As análises de segurança devem prever a condição de operação segura e o desligamento do núcleo em qualquer condição operacional ou nos eventos postulados de acidentes.

No caso de um reator operando com nêutrons de espectro rápido do tipo LMFBR, a perda de sódio (refrigerante) pode resultar em um grande efeito de reatividade positiva. O sódio pode ser retirado do núcleo ou evaporar-se em um evento de um transiente descontrolado. Tal condição apresenta um importante problema de segurança para um LMFBR, problema esse que não existe para reatores térmicos ou reatores rápidos refrigerados a gás.

O efeito de reatividade da perda de refrigerante é extremamente dependente do espaço. A perda de sódio no centro do núcleo produz um efeito de reatividade altamente positivo, enquanto que a perda de sódio perto da borda produz um efeito negativo. A compreensão de tal comportamento é revelada observando individualmente os quatro fenômenos que contribuem para o efeito total do vazio de sódio [3]:

- a. endurecimento do espectro;
- b. aumento da fuga de nêutrons;
- c. eliminação da captura do sódio;
- d. alteração na auto blindagem.

Os dois primeiros efeitos são grandes e de sinais opostos. Os dois últimos são pequenos. Assim, a maior parte da reatividade de vazios resulta da diferença de dois grandes números, como ilustrado na Figura 1, e esta situação torna difícil um cálculo preciso do efeito líquido.

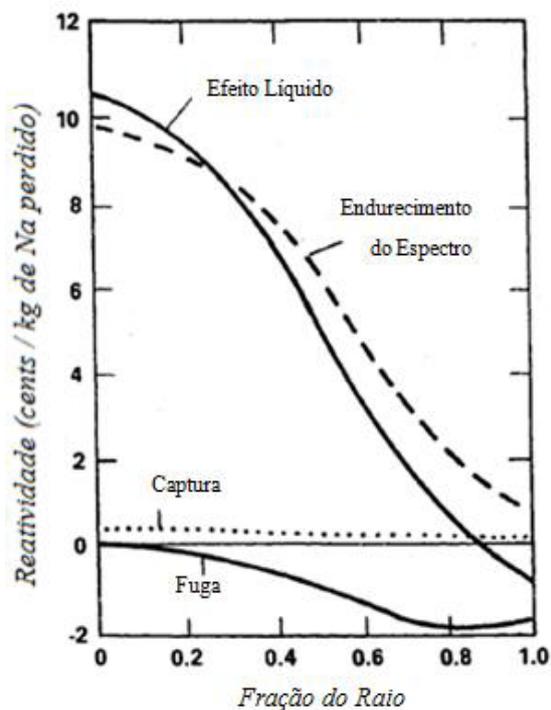


Fig 1: Componentes do coeficiente de vazio de sódio para um LMFBR [3]

Um método alternativo para calcular o efeito da perda de sódio é usar a teoria da perturbação e calcular as quatro contribuições separadamente [3]. O valor absoluto do efeito dos vazios na operação do reator é fortemente influenciado por todas as causas que podem modificar o espectro do fluxo neutrônico, tais como: produto de fissão emitidos durante a queima, isótopos superiores do Plutônio, materiais estruturais, localização das barras de controle, teores diferenciados de combustível, temperatura, dentre outras. Todas estas considerações permitem compreender que o valor absoluto em reatividade de vazio do sódio depende fortemente do reator e da situação considerada. Dessa forma, a determinação integral do efeito de todas as contribuições apresentadas torna-se mais factível e útil frente ao cálculo individualizado e complexo de cada um desses fenômenos separadamente através da Teoria da Perturbação. Essa determinação da influência total do vazio é geralmente realizada por programas e softwares computacionais, como foi feito neste trabalho, através do sistema SCALE, que utiliza o Método de Monte Carlo para resolver problemas por meio de amostragem aleatória.

## 3. COEFICIENTE DE REATIVIDADE DE VAZIOS

Existem fatores inerentes a cada reator que podem também perturbar o sistema e acarretar um aumento ou diminuição da reatividade, mesmo que o reator tenha sido posto em operação a uma potência fixa. São eles: a variação de temperatura do núcleo e a geração de espaços vazios no refrigerante. Tais efeitos são mensurados pelos coeficientes de reatividade de temperatura e de vazios, e a fim de assegurar o controle do reator, todo projeto de reator deve apresentar um estudo desse tipo [4].

Nos cálculos de segurança de uma ampla classe de reatores, é importante saber qual é o efeito de reatividade introduzida por um volume de vazio no núcleo e o conhecimento do coeficiente de vazio é também importante durante o projeto inicial e durante a operação diária dos reatores.

O coeficiente de vazios ( $\alpha$ ), objeto de estudo desse trabalho, é a medida da reatividade introduzida por um volume de vazios igual a um por cento (1 %) do volume do refrigerante, e é definido pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{(\rho_{vazio} - \rho_0) V_{vazio}}{V_{refrigerante}}$$

Do ponto de vista de segurança de reatores, o coeficiente de vazios quando é negativo é considerado um aspecto de segurança, porque uma excursão que causaria o borbulhamento do refrigerante/moderador reduziria a reatividade. O reator é dito auto limitante, isto é, tem uma proteção contra acidentes de fuga. O coeficiente de vazio negativo proporcionará também condições de auto regulação, e consequentemente, estabilidade e segurança.

#### 4. O REATOR FBR COMO INSTRUMENTO DE ESTUDO NO IME

O projeto do FBR, objeto de estudo deste trabalho, refere-se a um Reator Rápido Regenerador com núcleo heterogêneo, abastecido com mistura de óxido de plutônio - PuO<sub>2</sub> e óxido de urânio - UO<sub>2</sub> (MOX) e refrigerado a Metal Líquido (sódio - Na). A principal peculiaridade desse reator reside no fato de seu combustível ser independente de urânio enriquecido.

O projeto apresenta três diferentes combustíveis, que se diferem na porção de óxido de plutônio na massa total de combustível. No combustível mais interno é usado o de menor teor de plutônio, correspondente a 25% de óxido de plutônio e 75% de óxido de urânio (Combustível 1). No combustível intermediário (Combustível 2), a parcela de urânio é de 33%, enquanto no combustível localizado mais externamente ao núcleo (Combustível 3) a parcela é de 42%. Esse conceito foi utilizado visando obter um fluxo neutrônico normalizado no núcleo do reator, de forma que o canal quente não tivesse uma amplitude térmica e neutrônica muito superior à das regiões, o que poderia interferir negativamente na segurança e eficiência do reator.

**Tab1:** Fração em Massa dos Isótopos

	Isótopo	Fração em Massa (%)
UO <sub>2</sub>	U-234	0,005
	U-235	0,710
	U-238	99,283
PuO <sub>2</sub>	Pu-238	0,100
	Pu-239	77,316
	Pu-240	19,351
	Pu-241	2,677
	Pu-242	0,553

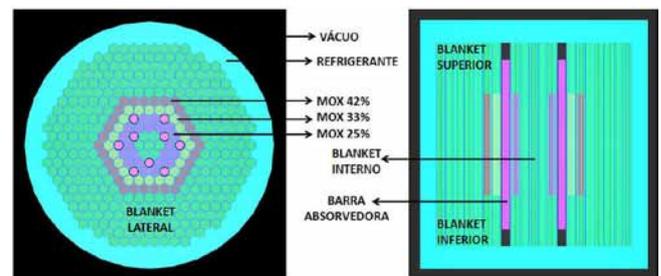
**Tab 2:** Composição do núcleo do reator FBR-IME

Combustível	Óxido	Fração (%)	Densidade MOX (g/cm <sup>3</sup> )
1	UO <sub>2</sub>	75	11,01
	PuO <sub>2</sub>	25	
2	UO <sub>2</sub>	67	11,05
	PuO <sub>2</sub>	33	
3	UO <sub>2</sub>	58	11,09
	PuO <sub>2</sub>	42	

Com base nesses dados, foi projetado um núcleo simples com 91 elementos de combustível com a mesma geometria dos elementos do reator Joyo (projeto japonês que serviu de base para o início deste estudo) [5]. Da mesma forma, os dados de geometria do revestimento e do envoltório do modelo do reator Joyo foram mantidos, além da temperatura em 523K.

Em seguida, diminuiu-se o teor de <sup>235</sup>U do combustível ao passo que se elevava a fração de dióxido de plutônio no MOX, a fim de compensar a perda de criticalidade em função da redução do <sup>235</sup>U. Dessa forma, chegou-se a um Modelo Definitivo do Reator composto por um núcleo heterogêneo com 75 elementos combustíveis, 9 barras de controle constituídas de Carbeto de Boro (B<sub>4</sub>C) e 7 de blanket interno, o envoltório fértil (onde predomina a conversão de <sup>238</sup>U em <sup>239</sup>Pu) apresentando 6 camadas laterais num total de 295 elementos. O núcleo central possui 90cm de diâmetro, enquanto que todo o reator (com o envoltório lateral) possui 180cm. A altura do reator é de 180 cm, sendo que o núcleo físsil ocupa os 90cm centrais. O tempo de dobramento do reator foi estimado em aproximadamente 28 anos [6].

Esse modelo final foi o projeto utilizado como instrumento de estudo para este trabalho, sendo todas essas informações necessárias para o desenho do reator e a realização das demais simulações através do Sistema SCALE.

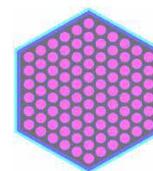


**Fig 2:** Modelo Definitivo do Reator

#### 5. METODOLOGIA DE INSERÇÃO DOS VAZIOS

Este trabalho estipulou a inserção de vazios através da retirada completa do sódio interno aos elementos combustíveis. De fato, esse não é a definição mais real, contudo, como os elementos combustíveis eram pequenos (apótema igual a 3,75cm), o valor absoluto do volume de vazio inserido não era muito grande, mas o teor em relação ao volume total do moderador era significativo.

Dessa forma, o vazio era mais concentrado, resultando em uma melhor análise de sua influência, podendo-se assim analisar o seu efeito (em iguais teores) ao longo das regiões do núcleo, sem a necessidade de aumentar expressivamente o teor nas regiões mais periféricas. A Figura 2 apresenta o modelo do elemento combustível sem vazios que foi utilizado nas simulações deste trabalho, apresentadas nas subseções seguintes. De fato, outras três unidades de elementos combustíveis tiveram de ser definidas no SCALE, pois cada elemento combustível possuía composição diferente de MOX em suas varetas.



**Fig 3:** Elemento Combustível sem Refrigerante

O cálculo do coeficiente de reatividade de vazios requer, contudo, a quantificação do volume de vazios que foi inserido em relação ao volume total de moderador no sistema. Dessa forma, foi determinado qual o volume total de sódio existente no núcleo FBR-IME, e qual o teor de vazios referente à inserção de um elemento combustível sem sódio. Assim, o teor de sódio interno em um elemento combustível é equivalente a aproximadamente 0,98% do volume de sódio total do sistema.

## 6. AVALIAÇÃO DO DESVIO PADRÃO E DA INCERTEZA ESTATÍSTICA

A incerteza é um parâmetro que indica a qualidade de uma medida de uma forma quantitativa. O cálculo da incerteza estatística referente ao valor do coeficiente de vazios  $\alpha$  calculado baseou-se na propagação das incertezas das grandezas de influência desse coeficiente. As únicas grandezas que influenciam no valor de  $\alpha$  são o volume de vazios  $V$ , que provém de definição e não apresenta incerteza, e a Reatividade  $\rho$ , que por sua vez depende apenas do valor do Fator de Multiplicação  $k_{eff}$ . Sendo assim, a incerteza nos valores de  $\alpha$  foi obtida a partir da formulação matemática abaixo.

$$\alpha \pm \delta_\alpha = \frac{1}{\Delta V} \left( \frac{k_{(\%V)} - 1}{k_{(\%V)}} - \frac{k_0 - 1}{k_0} \right)$$

Após manipulação matemática, temos que:

$$\delta_\alpha = \left| \frac{1}{\Delta V} \left\{ \frac{\bar{\rho}\delta}{\bar{k}(\bar{k}-1)} - \frac{\bar{\rho}_0\delta}{\bar{k}_0(\bar{k}_0-1)} \right\} \right| = \left| \frac{1}{\Delta V} \left\{ \frac{\delta}{\bar{k}^2} - \frac{\delta_0}{\bar{k}_0^2} \right\} \right|$$

Como visto, o valor da incerteza final depende unicamente do valor de  $k_{eff}$  e seu respectivo desvio padrão, ambos obtidos pelas simulações do SCALE. O desvio calculado pelo programa refere-se a um intervalo de confiança de 95%, ou seja, dois desvios padrões.

## 7. AUMENTO DO NÚMERO DE HISTÓRIAS E SIMULAÇÕES

Com o objetivo de se obter melhor avaliação estatística dos valores encontrados para o coeficiente de vazios, a incerteza estatística configuração de inserção de vazios foi obtida a partir da aplicação de duas ações: aumentar o número final de histórias e aumentar o número de simulações.

O aumento do número final de histórias, aumentando-se os parâmetros *default* de nêutrons por geração (NPG) e número de gerações (GEN) do SCALE (203 GEN x 1000 NPG) visava reduzir o desvio padrão encontrado até um valor aceitável, sem, contudo, demandar grande processamento computacional desnecessariamente, de forma a evitar que valores de coeficiente próximos de zero pudessem gerar dúvidas quanto a sua positividade (incursão de potência) ou negatividade (excursão de potência). Após definido o número médio de histórias necessárias para cada simulação (em torno de 812.000), procedeu-se com a variação de GEN e NPG em três combinações (406GEN x 2000NPG, 403GEN x 2015NPG, 400GEN x 2030NPG), de forma a se obter um número de histórias final em cada combinação próximo ao definido anteriormente. Dessa forma, alterando-se os parâmetros GEN e NPG, a semente inicial de propagação neutrônica no Método Monte Carlo era alterada e diferentes valores de  $k_{eff}$  com as respectivas incertezas eram obtidos. De fato, os valores desses parâmetros sofriam pequenas variações entre si, já que o número

de histórias finais eram praticamente os mesmos. Dessa forma, as médias aritméticas simples do valor de  $k_{eff}$  e seu desvio padrão foram obtidas, visando manter as quantidades finais de histórias suficientemente grandes e próximas para se obter valores médios coerentes que fornecessem resultados mais confiáveis para a análise de segurança necessária.

**Tab 3:** Simulações realizadas por configuração de inserção de vazios

Simulação	Gerações (GEN)	Nêutrons por Geração (NPG)	Número de Histórias
1	406	2000	812.000
2	403	2015	812.045
3	400	2030	812.000

## 8. INSERÇÃO DE VAZIOS

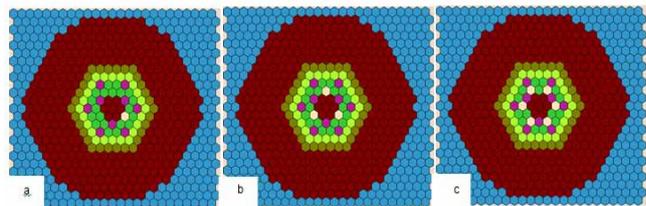
Para uma análise mais apurada da influência dos vazios na reatividade do sistema na temperatura padrão de operação do reator (523K), foi definido um conjunto de simulações que se baseava na variação de alguns parâmetros, mantendo-se os demais constantes, tais quais:

- Porcentagem de vazios inseridos no núcleo; e
- Distância e localização dos vazios;

### 8.1 Alterando o teor de vazios no núcleo

O primeiro grupo de simulações consistiu na variação do teor de vazios por meio do aumento do número de elementos sem sódio na primeira camada de elementos combustíveis do núcleo. Ou seja, substituiu-se elementos do combustível MOX 1 com refrigerante, por elementos do mesmo combustível, porém sem refrigerante.

Inicialmente realizou-se a simulação com a presença de apenas um elemento sem sódio (teor de vazios equivalente a 0,98%) na região mais central do núcleo. Em seguida, replicou-se o número de elementos sem sódio ao redor dessa região, de forma a se obter mais cenários alterando-se apenas o teor de vazios: núcleo com 3 elementos sem sódio (2,93% de vazios) e núcleo com 6 elementos sem sódio (5,87% de vazios).



**Fig 4:** Variação do teor de vazios: a) núcleo com 1 (um) elemento sem sódio; b) núcleo com 3 (três) elementos sem sódio; c) núcleo com 6 (seis) elementos sem sódio.

Tomou-se o cuidado para que o teor de vazios não alcançasse um valor muito alto, dispondo um maior número de elementos sem sódio pelo núcleo, de forma que a simulação não representasse uma quantidade irreal de bolhas no sódio, uma vez que o ponto de ebulição do sódio em pressão ambiente (1073K) é muito superior ao da temperatura média de operação do reator (523K).

### 8.2 Alterando a distância e a localização dos vazios

O passo seguinte do estudo consistiu na alteração da posição dos elementos sem sódio, fixando-se, nesse caso, o teor de vazios total do sistema em cada grupo de simulações.

Fixados os teores de vazios, as simulações seriam agrupadas

em quatro configurações relativas à posição: Região 1, Região 2, Região 3 e Região 4. A Região 1 corresponderia ao anel de Elemento Combustível 1 mais interno, e a Região 4 corresponderia ao anel de Elemento Combustível 3, mais externo, sendo a Região 2 e 3 referentes aos anéis intermediários de Elemento Combustível 1 e 2, respectivamente. Cabe ressaltar que os elementos sem vazios de cada região são diferentes uns dos outros em alguns casos, uma vez que a concentração de MOX varia entre as regiões.

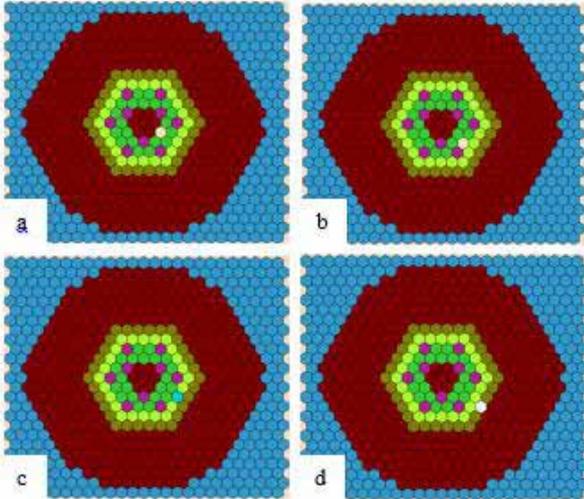


Fig 5: Variação da posição para 1 (um) elemento sem sódio: a) Região 1; b) Região 2; c) Região 3; d) Região 4;

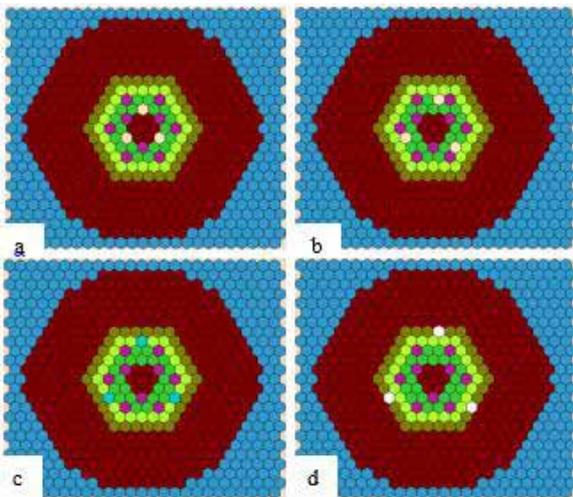


Fig 6: Variação da posição para 3 (três) elementos sem sódio: a) Região 1; b) Região 2; c) Região 3; d) Região 4;

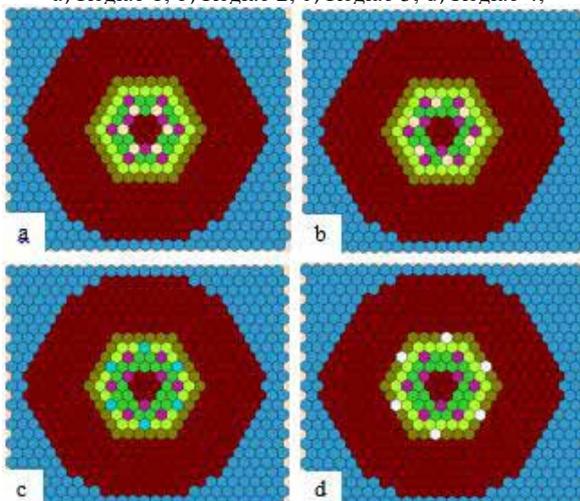


Fig 7: Variação da posição para 6 (seis) elementos sem sódio: a) Região 1; b) Região 2; c) Região 3; d) Região 4;

Tais elementos foram posicionados em regiões dispersas ao núcleo de forma a se obter uma gama de resultados mais abrangentes e coerentes, uma vez que o modelo definitivo do reator possui diversas particularidades.

## 9. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE VAZIOS PARA O REATOR

As seções a seguir apresentarão as médias obtidas pela alteração da combinação GEN e NPG (alteração da semente inicial de propagação) para cada configuração estabelecida pelos parâmetros variáveis (a porcentagem de vazios inseridos e a distância/localização dos vazios), as quais serão as bases para as análises de segurança.

Tab 4: Configurações e resultados médios de inserção de vazios a 523K

%Vvazio	Região	keff	δkeff	ρ	Δρ	α	δα
FBRIME	-	1,1400	0,0008	0,12281	-	-	-
0,98%	1	1,1408	0,0007	0,12342	0,00062	0,06277	0,00793
2,93%	1	1,1403	0,0008	0,12304	0,00023	0,00788	0,00176
5,87%	1	1,1402	0,0008	0,12299	0,00018	0,00306	0,00088
0,98%	2	1,1405	0,0008	0,12317	0,00036	0,03663	0,00267
2,93%	2	1,1402	0,0008	0,12296	0,00015	0,00525	0,00176
5,87%	2	1,1396	0,0008	0,12247	-0,00033	-0,00568	0,00087
0,98%	3	1,1397	0,0009	0,12260	-0,00021	-0,02094	0,00265
2,93%	3	1,1394	0,0007	0,12232	-0,00049	-0,01664	0,00260
5,87%	3	1,1388	0,0008	0,12191	-0,00090	-0,01531	0,00002
0,98%	4	1,1396	0,0007	0,12250	-0,00031	-0,03142	0,01305
2,93%	4	1,1388	0,0008	0,12191	-0,00090	-0,03067	0,00083
5,87%	4	1,1379	0,0008	0,12119	-0,00162	-0,02758	0,00084

### 9.1 Análise da variação da porcentagem de vazios

Os resultados da análise da influência do teor de vazios para a variação da reatividade e para o coeficiente de reatividade de vazios a 523 K encontram-se apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

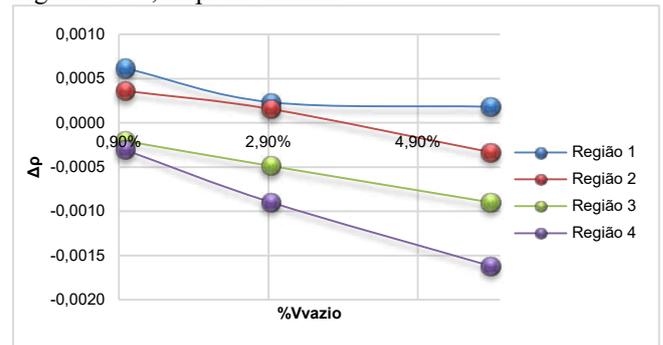


Fig 8: Análise do teor de vazios a 523K:  $\Delta\rho \times \%Vvazio$

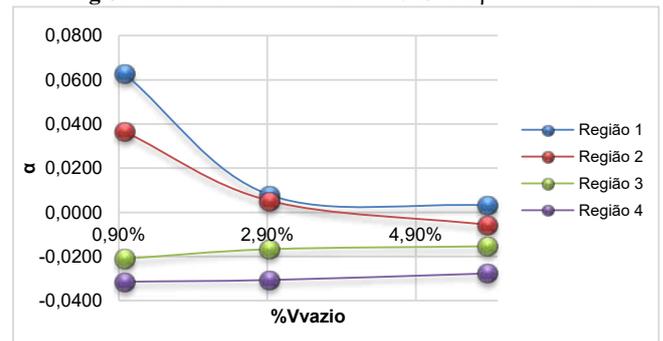


Fig 9: Análise do teor de vazios a 523K:  $\alpha \times \%Vvazio$

Foi verificado inicialmente o comportamento do coeficiente de vazios ao se alterar o teor de vazios, mantendo-se a distância média dos vazios inseridos em relação ao eixo central do núcleo. Para isso, como apresentado no capítulo anterior, foi retirado todo o sódio interno de um, três e seis elementos combustível em quatro diferentes regiões do núcleo, o que gerou teores de vazios em torno de 0,98%, 2,93% e 5,87%, respectivamente.

Observando a Figura 8 é possível perceber uma tendência negativa para a variação da reatividade do sistema para a existência de até 6% de vazios no volume do refrigerante, ou seja, o aumento do teor de vazios acarreta uma diminuição na reatividade do sistema a 523K, independentemente da região onde as bolhas foram formadas. Isso pode ser explicado pelo aumento da fuga ocasionada pelo aumento da ausência de sódio.

Contudo, verifica-se também que a taxa de redução é menor nas regiões mais centrais (Região 1 e 2) do que nas regiões mais periféricas (Região 3 e 4). Isso ocorre porque a perda de sódio de uma unidade de volume do núcleo perto do centro do núcleo aumenta pouco a contribuição da fuga porque o gradiente de fluxo é baixo e, portanto, a fuga por centímetro cúbico é pequena [3].

A alteração na taxa de variação da reatividade em função da porcentagem de vazios existente no núcleo é a definição matemática do coeficiente de reatividade de vazios, e pode ser analisada pela Figura 9.

Para a análise da influência dos vazios na temperatura de operação do reator, verificou-se que a existência de vazios na Região 1 ocasionaria valores positivos para  $\Delta\rho$  e  $\alpha$  em qualquer porcentagem de vazios dentro do intervalo analisado inseridos no refrigerante. Além disso, valores positivos para esses parâmetros também poderiam ser encontrados para inserções de vazios de até 3% aproximadamente na Região 2 do núcleo. Isso ocorre porque a perda de sódio no núcleo resulta na diminuição da moderação dos nêutrons (endurecimento do espectro), de modo que a energia média de nêutrons aumenta. Isso produz um efeito de reatividade positivo devido ao aumento da importância do nêutron com o aumento da energia para reatores de espectro rápido como o FBR-IME [3]. Esse efeito é acentuado nas regiões mais centrais do núcleo, visto que, além de o fluxo neutrônico ser maior nessas regiões, o grande efeito de endurecimento espectral não é contrabalançado por uma grande contribuição da fuga para esses casos.

Apesar de a variação da reatividade do sistema ser negativa com o aumento do teor de vazios, ou seja, o aumento da porcentagem de vazios ocasiona redução da reatividade do sistema, a taxa de variação dessa reatividade é cada vez menor para maiores teores de vazio nas Regiões 1 e 2 do núcleo do reator. Nesses casos, sugere-se que a importância do efeito de endurecimento espectral vai sendo neutralizada pelo aumento da importância do efeito fuga. Contudo, esse aumento é suficientemente grande para tornar os valores de  $\Delta\rho$  e  $\alpha$  negativos apenas a partir da inserção de mais de 3% de vazios no sistema na segunda região do núcleo.

De fato, o valor absoluto do efeito dos vazios na operação do reator é fortemente influenciado por todas as causas que podem modificar a importância neutrônica de cada região do núcleo, como materiais estruturais, localização das barras de controle, teores diferenciados de

combustível, presença de envoltório, geometria do núcleo, dentre outras. Esse fato justifica as peculiaridades não-lineares do sistema, requerendo a análise caso-a-caso para as diferentes configurações propostas, ratificando ainda mais a necessidade da análise global do coeficiente de reatividade de vazios para o reator FBR-IME.

## 9.2 Análise da variação da posição e distância

Os resultados da análise da posição e da distância para a variação da reatividade e para o coeficiente de reatividade de vazios a 523K encontram-se apresentados nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

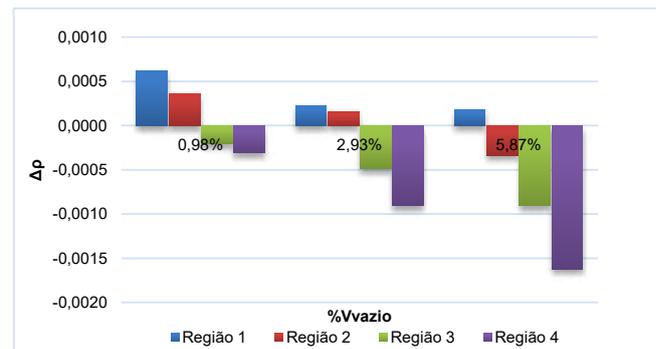


Fig 10: Análise da posição/distância a 523K:  $\Delta\rho \times \%V_{vazio}$

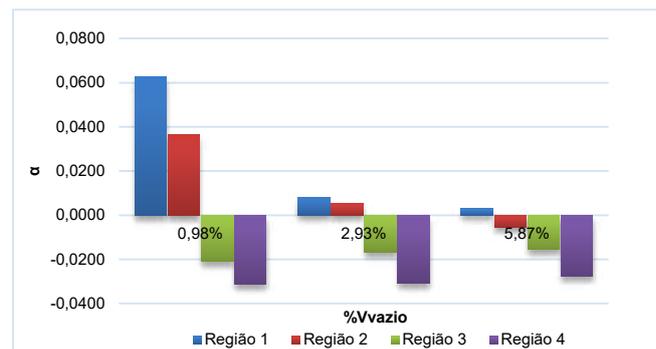


Fig 11: Análise da posição/distância a 523K:  $\alpha \times \%V_{vazio}$

Ao se analisar a formação de teores estabelecidos de vazios em diferentes regiões do núcleo pelas Figuras 10 e 11, verifica-se claramente a redução da variação da reatividade e, conseqüentemente, do coeficiente de reatividade de vazios a medida que o vazio “se desloca” da região central para a região mais periférica, independentemente da dimensão desse vazio. Conforme explicado anteriormente, um mesmo vazio perto da borda do núcleo aumenta a fuga consideravelmente, tornando maior a contribuição negativa da fuga e menor a contribuição positiva do endurecimento espectral [3].

## 10. CONCLUSÃO

Nos cálculos de segurança de qualquer reator, conforme discutido, é importante saber qual o efeito da reatividade introduzida por um volume de vazio no núcleo, fator esse altamente dependente de parâmetros como espaço e fração de vazios.

Conforme discutido anteriormente, verificou-se que, em termos gerais, o coeficiente de reatividade de vazios assumia valores críticos ( $\alpha > 0$ ) para as configurações com as seguintes características:

baixo teor de vazios no refrigerante;

predomínio da formação de vazios nas regiões centrais;

Cabe ressaltar que os valores de variação de reatividade para o sistema são da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$ , ou seja, são valores ainda considerados baixos ( $\Delta\rho < 1\%$ ), tanto positiva quanto negativamente, não sendo capazes de alterar severamente a reatividade final do sistema nessas condições de operação.

Espera-se, contudo, que, em caso de emergência, os efeitos inerentes por si só mantenham o reator em um patamar de segurança. Nesse sentido, numerosos métodos têm sido implementados para reduzir a reatividade devido aos vazios no refrigerante. A maioria das modificações de projeto tem se concentrado em aumentar a componente de fuga da reatividade de vazios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SUN, Kaichao. Analysis of Advanced Sodium-cooled Fast Reactor Core Designs with Improved Safety Characteristics. Suíça, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012.
- [2] ISHIGURO, Yuri. Uma Opção de Projeto Nuclear Brasileiro: Necessidade de Reatores Regeneradores Rápido e Projetos de Núcleos de um Reator Rápido Experimental. Itaipava, IV EN-FIR, 1983..
- [3] WALTAR, Alan E., REYNOLDS, Albert B. Fast Breeder Reactors. USA, University of Virginia. Pergamon Press, 1981.
- [4] DUDERSTADT, James J., HAMILTON, Louis J. Nuclear Reactor Analysis. Department of Nuclear Engineering. The University of Michigan, 1976.
- [5] JUUTILAINEN, Pauli. Simulating the Behaviour of the Fast Reactor JOYO. Interlaken, Suíça. IYNC, 2008.
- [6] OLIVEIRA, Aline Alves. Reator rápido regenerador independente de urânio enriquecido. Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia, 2014.