

## **Proposta de Aumento de Potência do Reator IPEN/MB-01**

Ulysses d'Utra Bitelli, Rogério Jerez, Mitsuo Yamaguchi , Pedro E.Umbehaum,  
Adimir dos Santos e Cesar Luiz Veneziani  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- (IPEN-CNEN-SP)  
Av. Lineu Prestes 2242 – Cidade Universitária  
05508-000 São Paulo, SP, Brasil  
e-mail: ubitelli@ipen.br

### **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo apresentar os estudos realizados no sentido de solicitar junto a Coordenadoria Geral de Licenciamento e Controle (CGLC) da Comissão Nacional de Energia Nuclear, autorização para aumento da potência de operação do reator IPEN/MB-01 de 100 para 1000 watts, a fim de possibilitar a obtenção de parâmetros nucleares de interesse à Física de Reatores com maior nível de precisão. Para tal, são apresentados os testes operacionais a serem realizados, desde que haja autorização para tal, bem como os códigos computacionais utilizados para análise de segurança e termo-hidráulica do reator que garantem não haver qualquer tipo de problema de segurança decorrente do aumento de potência solicitado.

### **1. INTRODUÇÃO**

O reator IPEN/MB-01 opera desde Novembro de 1988, sendo a sua potência máxima nominal de 100 watts. A princípio esta potência foi considerada suficiente para se atender o objetivo da instalação, ou seja realizar experimentos que possibilitassem a validação das metodologias de cálculo e suas respectivas bibliotecas de dados nucleares utilizada no projeto de núcleos de reatores nucleares. Operar a baixo nível de potência trazia a vantagem de baixos níveis de radiação e como consequência um maior acesso ao núcleo de reator, isso aliado a queima de combustível, considerada desprezível para o nível de fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do reator,  $4,78.10^8$  n/cm<sup>2</sup>.s a 100 watts de potência [1].

Após 16 anos e mais de 1700 operações , constatou-se que alguns tipos de experimentos necessitariam de uma maior potência de operação para se obter dados experimentais com uma melhor estatística. Assim, experimentos de inserção positiva de reatividade para a determinação das constantes de decaimento dos nêutrons atrasados, necessitariam uma excursão de potência com períodos pré-definidos entre 100 e 1000 watts, pois as medidas realizadas entre 1 e 100 watts mostraram-se insuficientes do ponto de vista estatístico para a obtenção de resultados experimentais precisos. Da mesma forma, experimentos para medida do espectro de energia dos nêutrons a partir da ativação de folhas de ativação no núcleo do reator, mostraram-se pouco precisos em regiões do espectro que apresentam materiais cuja seção de choque de ativação se mostram de pequena magnitude, sendo a unica solução, a irradiação destes num fluxo de nêutrons de maior magnitude.

Em vistas destas colocações se iniciou um estudo no sentido de solicitar junto a Coordenadoria Geral de Licenciamento e Controle (CGLC) da Comissão Nacional de Energia Nuclear, uma autorização para aumento da potência de operação do reator IPEN/MB-01 de 100 para 1000 watts, a fim de se proceder aos experimentos acima citados. Para tal, foram realizados cálculos utilizando programas de análise de acidente(FX2-TH) [2] e termo-

hidráulica [3] no sentido de garantir que ao nível de potência solicitado não se tenha qualquer tipo de problema relacionados à segurança do reator. Assim, pretende-se enviar a CGLC um procedimento operacional, contendo a seqüência de passos necessária para se elevar de forma gradativa e segura a potência do reator IPEN/MB-01 de 100 até 1000 watts. Após a aprovação da mesma e com autorização da CGLC é que serão executados os procedimentos.

## **2. DESCRIÇÃO DO REATOR IPEN/MB-01**

O Reator IPEN/MB-01 é uma instalação nuclear que permite a simulação de todas as características nucleares de um reator de grande porte em escala reduzida, sem que haja a necessidade de construir-se um complexo sistema de remoção de calor. Esse tipo de reator é conhecido mundialmente como Reator de Potência Zero ou Unidade Crítica, sendo no nosso caso, projetado para operar a uma potência máxima de 100 watts. Esses reatores representam uma ferramenta básica, que permite aos pesquisadores estudarem não apenas por cálculos teóricos, mas também com medidas experimentais, o desempenho e as características do núcleo de um reator de potência ou de propulsão naval, antes da sua efetiva instalação, simulando as condições de projeto na própria instalação.

O primeiro núcleo do Reator IPEN/MB-01 possui a forma de paralelepípedo com dimensões ativas de 39 x 42 x 54,6 cm, sendo constituído de um arranjo de 28 x 26 varetas combustíveis e 48 tubos guias, destinados a inserção das varetas de controle/segurança, responsáveis pelo controle da reação em cadeia e desligamento do reator. Nesta configuração, dita retangular, temos um total de 680 varetas e um excesso de reatividade de aproximadamente 2415 pcm.

No entanto o núcleo do Reator Nuclear IPEN/MB-01 possibilita a montagem de diferentes arranjos críticos, ou seja, configurações de núcleos, uma vez que foi projetado para que apresentasse a versatilidade e a flexibilidade necessárias para tais finalidades. Para tal, a placa matriz que sustenta o núcleo do reator possui 900 furos espaçados entre si por 15 mm, em um arranjo de 30x30. Nesta placa matriz foram montados os arranjos críticos retangulares, quadrado e cilindrizado.

As varetas combustíveis do reator são constituídas de tubos de aço inox AISI-304, contendo em seu interior um total de 52 pastilhas combustíveis de  $UO_2$  enriquecidas a 4,3 %. A altura ativa nominal da coluna de pastilhas é de 54,6 cm, sendo que cada pastilha possui uma altura de 1,05 cm e diâmetro de 0,849 cm. As extremidades não ativas das varetas são preenchidas com pastilhas de  $Al_2O_3$ . Os 48 tubos guias para as varetas absorvedoras de nêutrons (barras de controle e segurança) estão dispostos em 4 grupos, contendo cada um deles 12 varetas absorvedoras, sendo dois grupos de barras de segurança e 2 grupos de controle, dispostos cada um deles em um quadrante do núcleo do reator. Cada conjunto de 12 varetas absorvedoras é unido através de um corpo central, denominado aranha, o qual é ligado a uma haste de acionamento, que por sua vez é conectada a mecanismos acionados por magnetos energizados.

## **3. JUSTIFICATIVA EXPERIMENTAL**

Ao longo dos quase 17 anos da instalação foram realizados vários experimentos, tais como medidas de índices espectrais, coeficiente de reatividade isotérmico, massa crítica, veneno

queimável, densidade de potência, abundância relativa de nêutrons atrasados, espectro de energia dos nêutrons, previsões de criticalidade [3], este último grupo de experimentos, reconhecido como um padrão de comparação internacional (“Benchmark”) [4].

No experimento da medida do espectro de energia dos nêutrons no núcleo do Reator IPEN/MB-01, a distribuição energética é obtida através da ativação de inúmeros detectores de ativação, diminutas folhas metálicas irradiadas na posição central do reator. Assim, são irradiadas folhas dos mais diversos materiais, com diferentes seções de choque de ativação, alguma delas da ordem de barns (Faixa térmica e intermediária do espectro), enquanto outras com seções de choque muito pequenas, da ordem dos milibarns (Faixa rápida do espectro). O fluxo de nêutrons térmicos medido com folhas de ouro e índio, exatamente na posição central do núcleo na sua configuração retangular padrão a 100 watts de potência, é da ordem de  $8,0 \cdot 10^8$  n/cm<sup>2</sup>.s e  $1,0 \cdot 10^9$  n/cm<sup>2</sup>.s, respectivamente para nêutrons térmicos e rápidos ( $E > 0,82$  meV). Assim, as atividades induzidas, após a irradiação à potência máxima do reator em folhas importantes, como titânio, alumínio e ferro entre outras, são extremamente baixas, para a determinação precisa do espectro de energia dos nêutrons na faixa rápida do espectro. Com o reator operando em 1000 watts, obteremos valores de fluxo de nêutrons rápidos da ordem de  $1,0 \cdot 10^{10}$  n/cm<sup>2</sup>.s, possibilitando a obtenção de atividades dez vezes maiores e por consequência medidas de espectro mais precisas, notadamente na região rápida do espectro de energia dos nêutrons.

Nos experimentos de Determinação das Abundâncias Relativas e Constantes de Decaimento de Nêutrons Atrasados pelo Método dos Múltiplos Transientes, os transientes são produzidos pela rápida remoção de uma amostra absorvedora do núcleo ativo; deve se ressaltar que a constante de decaimento dos nêutrons atrasados relativas ao sexto grupo de precursores de nêutrons atrasados, de meia-vida menor, é de difícil obtenção com essa técnica. Isso ocorre, pois no início do transiente os dados possuem flutuação estatística elevada devido à baixa corrente fornecida pelos detectores de nêutrons, quando o reator está operando a apenas 1 watt. Um procedimento que pode, em princípio, eliminar esta restrição é o de aumentar a potência máxima (100 watts) do reator IPEN/MB-01 e começar o experimento em uma potência tal que a flutuação do sinal de corrente não seja tão acentuada.

Além disso, na técnica de Múltiplos Transientes é necessário na determinação precisa do precursor do primeiro grupo de meia vida longa, acompanhar a rampa de subida de potência por um longo período de tempo, de onde se determina o inverso do período para estimativa do valor de reatividade introduzido na remoção da amostra. Assim, se começarmos o experimento a 1 watt de potência e acompanharmos a rampa até 1000 watts, obteremos o valor de reatividade de forma precisa e conseqüentemente a abundância relativa do primeiro grupo de precursores de nêutrons atrasados.

#### **4. ANÁLISE DE ACIDENTES**

Na análise de acidentes para o reator operando a 1000 watts, foi utilizado o programa FX2-TH, mesmo programa utilizado no Relatório de Análise de Segurança (RAS) do reator IPEN/MB-01 [1,2]. Tal qual no RAS foram postulados uma série de acidentes de inserção de reatividade que insiram uma grande quantidade de reatividade positiva que leve o reator a uma excursão de potência com períodos muito pequenos de tempo. O acidente que insere uma quantidade maior de reatividade positiva é aquele que se postula a queda de caixas de cádmio distribuídas uniformemente no núcleo, utilizadas no mapeamento do fluxo de nêutrons pela técnica de ativação de folhas de ouro. Tal queda simultânea nos parece bastante improvável,

pois as mesmas são presas no interior de uma placa de lucite e apenas fechadas externamente por plásticos adesivos, que teriam que se soltar simultaneamente, ocasionando a queda das mesmas. No entanto por ser essa a pior situação é esse o acidente postulado e que chega a introduzir no núcleo uma reatividade de 549 pcm (0,7\$).

Para a análise desse acidente foi considerada uma modelagem bi-dimensional do núcleo em geometria r-z, com parâmetros neutrônicos em 4 grupos de energia. O transiente é analisado com o programa FX2-TH [2], que resolve a equação de difusão de nêutrons em duas dimensões através do método quase-estático. A realimentação termo hidráulica é considerada via utilização de seções de choque em função da temperatura do combustível e do moderador. O modelo termo-hidráulico considera explicitamente a vareta de combustível, o vazio (“gap”) existente entre pastilhas e revestimento, o revestimento e o refrigerante moderador (água leve).

Na Tabela 1 encontram-se os tempos de desligamento e as sobre potências para queda de caixas de Cd introduzindo 549 pcm de reatividade em diversos níveis de potência. Nota-se que abaixo de 1 watt o desligamento do reator ocorre por período curto (< 17 s para a queda as barras e <14 s para a abertura rápida das válvulas do tanque moderador) e entre 1 e 1000 watts por nível de potência; até aproximadamente 0,50 watt não haverá sobre potência. Na pior condição, que é a queda das caixas de Cd quando o reator é operado a 1000 watts, a sobrepotência chega a 630 %, ocorrendo o desligamento em 1 s. As temperaturas do combustível e do moderador alteram-se muito pouco durante o transiente. Na máxima sobrepotência, a temperatura máxima do combustível não chega a aumentar 1 °C.

Potência (W)	Desligamento		Tempo de Desligamento (s)	Sobrepotência (%)
	Período	Potência		
0,1	X		10,0	0
0,49	X		10,0	2,7
1	X	X	10,0	109
10		X	6,3	110
100		X	2,6	110
1000		X	≈1,0	630

Tabela 1 - Sobrepotência, tempo de Desligamento e mecanismos de SCRAM para o acidente de queda de caixas de Cd em vários níveis de potência.

## 5. ANÁLISE TERMO HIDRAÚLICA

Para o cálculo de temperaturas para o reator operando a 1000 watts de potência, foi desenvolvido um modelo térmico que é basicamente um conjunto de equações de balanço de fluxo de calor, uma para cada nó, que juntamente com as correlações para cálculo do coeficiente de película, número de Reynolds, número de Prandt, Nusselt, Grashof e condições de contorno estabelecidas, são resolvidas simultaneamente com o EES [3].

Tendo em vista a simetria geométrica e térmica do problema, pode-se limitar o modelo a meia vareta dividida radialmente ao meio. A vareta combustível e o fluido refrigerante são subdivididos em n nós na direção axial, igualmente espaçados. Na direção radial, tem-se um nó no centro da vareta combustível, um na superfície da pastilha combustível, um na superfície interna do revestimento, um na superfície externa do revestimento e um no fluido

refrigerante, onde são calculadas as temperaturas  $T_{cc}$ ,  $T_{ec}$ ,  $T_{ir}$ ,  $T_{er}$  e  $T_f$ , respectivamente. As trocas térmicas consideradas no modelo são baseadas na condução de calor transversal na pastilha combustível, convecção entre a superfície externa da pastilha combustível e o vazio entre pastilhas e encamisamento (“gap”), convecção entre o “gap” e a superfície interna do revestimento, convecção entre a superfície externa do revestimento e o fluido em escoamento e transporte entálpico devido ao escoamento do fluido.

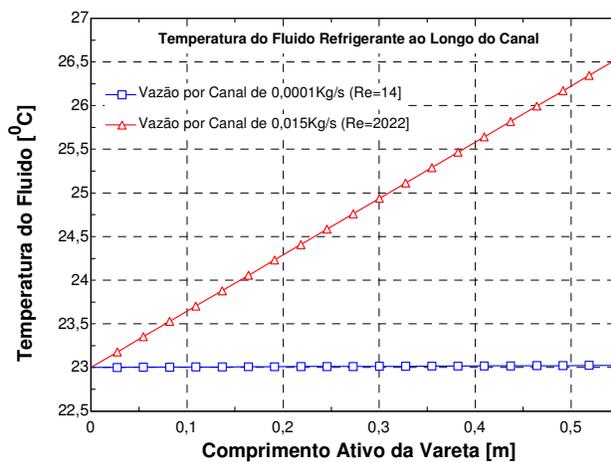
A temperatura da água é admitida constante e igual a 23,0 °C uma vez que a variação de temperatura pode ser considerada desprezível, aproximadamente 0,29 °C/h, em função do grande volume de água no tanque moderador, aproximadamente de 3000 l e o tempo de operação para a realização dos experimentos nunca superior a 8 horas.

As condutâncias térmicas para o combustível, “gap”, revestimento, coeficiente de película do refrigerante e transporte entálpico são  $G_c$ ,  $G_{hg}$ ,  $G_r$ ,  $G_{hf}$  e  $G_f$ , respectivamente. Desprezou-se a condução de calor axial na vareta e no fluido. A distribuição de potência nas varetas foi considerada uniforme.

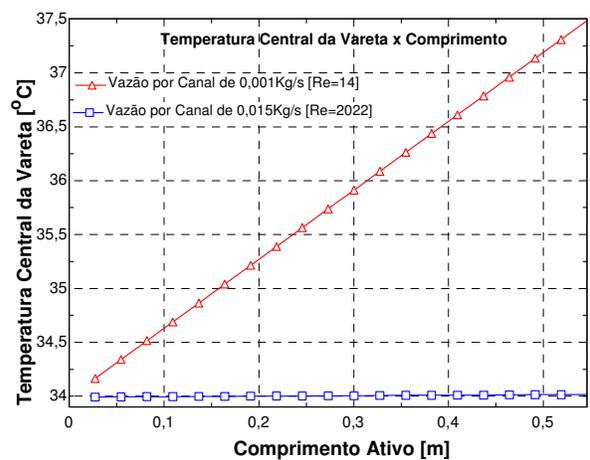
Para uma potência de operação de 1000W e um regime de circulação natural, em praticamente toda a faixa de regime laminar ( $Re = 14$  a  $Re = 2022$ ), observa-se na Figura 3 que a temperatura do fluido refrigerante atinge o valor de 26,5 °C para  $Re = 14$  e para  $Re = 2022$ , a temperatura do fluido refrigerante praticamente não se altera atingindo o valor de 23,34 °C.

A temperatura central da vareta combustível, conforme visualizado na Figura 4, atinge o valor de 37,5°C para  $Re = 14$  e para  $Re = 2022$ , a temperatura central do combustível praticamente não se altera ao longo do canal atingindo o valor de 34,04 °C.

Assim, concluímos que a operação do reator à potência de 1000 watts não acarretará em nenhum aumento de temperatura significativo, seja no moderador ou na vareta combustível, que venha a comprometer a segurança e as especificações técnicas do Reator IPEN/MB-01 [5].



**Figura 1 - Temperatura do moderador (fluido) ao longo do canal.**



**Figura 4 - Temperatura no centro da vareta combustível.**

## 6. TESTES OPERACIONAIS FINAIS

Comprovado que o aumento de temperatura de 100 watts para 1000 watts não provoca qualquer impacto na segurança do reator, seja num transiente de potência devido a uma reatividade positiva, seja na operação regular do reator, procederemos a verificação da linearidade de respostas dos canais nucleares do Reator IPEN/MB-01, isto após prévia autorização da Coordenadoria Geral de Licenciamento e Controle (CGLC) da CNEN.

Valores de sensibilidade dos detectores fornecidos pelos fabricantes aliados aos valores extrapolados de 100 para 1000 watts dos valores de fluxo de nêutrons, estimados no RAS do primeiro núcleo [1], nos fazem prever que não teremos saturação nos sinais dos mesmos, todavia isto deve ser comprovado experimentalmente. Para tal, serão realizados testes de elevação de potência de 100 em 100 watts, onde serão ajustados em cada um deles, os valores de desligamentos (“set-points”) de sobre potência em 10% e 20%, respectivamente, para o desligamento por queda de barras de controle e segurança e esvaziamento do tanque moderador, através das válvulas de abertura rápida que escoam a água por ação da gravidade até o tanque de estocagem. Medidas recentes mostram que o tempo de desligamento das barras é de 500 ms, enquanto no caso da retirada de moderador é de apenas 1 s ao longo da região ativa de combustível e de 4 s para todo o tanque moderador [5,6]. Assim, os dois sistemas de desligamento do Reator IPEN/MB-01, absolutamente independentes um do outro, desligam o reator em menos de 1 segundo, caso haja uma excursão de potência acima de um valor pré-estabelecido, ou seja, por valores de potência superiores a 10% e 20% do valor nominal de potência máximo estipulado.

Assim, serão feitas medidas dos sinais dos canais nucleares, em 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 watts. Em cada uma destas medidas, serão ajustados os valores de desligamentos por sobre potência em 10% acima dos valores de potência, para queda das barras e 20% acima, para abertura das válvulas do tanque moderador.

Constatado que os canais não sofrem qualquer tipo de saturação e que respondem linearmente até 1000 watts, não serão necessárias quaisquer medidas no sentido de afastar do núcleo os canais que não apresentem linearidade em suas respostas. Caso contrário se iniciará estudos visando a realocação dos mesmos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Bitelli, U. d’U. *Calibração de Potência do Reator IPEN/MB-01 Através do Mapeamento do Fluxo de Nêutrons Térmicos por Detectores de Ativação*. V Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 1994.
- [2] SHOBER, R. A.; DALY, T. A.; FERGUSON, D. R. "FX2-TH: A two-dimensional nuclear reactor kinetics code with thermal-hydraulic feedback", ANL-78-97, Argonne National Laboratory, October 1978.
- [3] S. A. KLEIN AND F.L. ALVARADO. *Engineering Equation Solver (EES) - Version 4.334W*, dez. de 1996.
- [4] SANTOS, A, AT ALL. *Critical Loading Configurations of the IPEN/MB-01 Reactor*. NEA/NSC/DOC (95) 03/IV, Leu-COMP-Therm-077, 2004.
- [5] Yoriyaz, Hélio. *Especificação Técnica para o Projeto Nuclear da Unidade Crítica*. São Paulo, relatório técnico IPEN, ver.3, R10-IP3-213PR-4EN-001, Julho de 1988.
- [6] Jerez, Rogério. Operador senior do Reator IPEN/MB-01, comunicação pessoal.