

CALIBRAÇÃO DE POTÊNCIA DO REATOR IEA-R1  
PELA TÉCNICA DE ATIVAÇÃO

Ulysses d'Utra Bitelli  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
IPEN-CNEN/SP

RESUMO

Neste trabalho é apresentada a curva de calibração de Potência do Reator IEA-R1, obtida pela técnica de ativação por folhas, a partir da relação existente entre o fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo, corrente da CIC do canal linear e taxa de reação em folhas de Au posicionadas fora do núcleo.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da potência de operação de um reator de pesquisa como o Reator IEA-R1 é fundamental na avaliação da queima de combustível no núcleo (conseqüentemente, estimar o tempo de vida de uma dada configuração), pois o mesmo é função do fluxo neutrônico, que só pode ser corretamente avaliado por cálculos neutrônicos (função da potência), já que medidas ao longo de todo o núcleo são feitas esporadicamente, dada a dificuldades das mesmas [1].

Além disso, tal conhecimento é importante em aspectos ligados à segurança (o Reator IEA-R1 está licenciado para operar à potência máxima de 2 MW) e à produção de radioisótopos.

A potência gerada numa dada região do núcleo do reator (por exemplo: elemento combustível ou ao longo de todo núcleo), pode ser avaliada experimentalmente pela expressão

$$P = G \cdot \Sigma_f \cdot \Phi \cdot F \cdot R \cdot V \quad (1)$$

sendo G a energia recuperável por fissão,  $\Sigma_f$  a seção de choque média macroscópica de fissão para nêutrons térmicos,  $\Phi$  o fluxo médio de nêutrons térmicos, F o inverso do fator de desvantagem térmica ( $\Phi_{\text{FUEL}} / \Phi_{\text{MOD}}$ ), R o fator de fissão rápida e V o volume ocupado pelo combustível na região geradora da potência (elemento combustível ou todo o núcleo).

O fator F leva em conta que na medida do fluxo, o mesmo se realiza no meio moderador, através da irradiação de folhas de ouro nuas e cobertas com cádmio, introduzidas no interior do elemento combustível (canal de refrigeração), a fim de se obter a distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos axialmente à placa combustível do mesmo (mapeamento do fluxo de nêutrons térmicos). Assim, tal fator corrige o fluxo para o interior da placa combustível, onde estão se processando as fissões e se está gerando a potência. Tal fator pode ser avaliado por cálculos neutrônicos celulares, bem como o fator R e  $\Sigma_f$  [2]. O fator R leva em conta a parcela das fissões rápidas e conseqüentemente a potência devido a nêutrons

rápidos. A seção de choque média de fissão  $\Sigma_f$  é obtida para cada elemento combustível, levando-se em conta a queima do mesmo. O valor adotado para a energia recuperável por fissão G é de  $3,2 \times 10^{-11}$  J (200 MeV).

Na Tabela 1 podemos visualizar os fatores R e F, bem como  $\Sigma_f$  obtidos [2] para cada elemento combustível do Reator IEA-R1.

O elemento combustível padrão do Reator IEA-R1 é composto de um estojo que contém em seu interior 18 placas combustíveis, distanciadas entre si 2,89 mm, espaço este responsável pela moderação e refrigeração, através da água (canal de refrigeração). Assim, o volume de combustível de um elemento combustível sem queima, ao longo das 18 placas combustíveis, é de 3746,57 cm<sup>3</sup>.

Podemos, também avaliar a potência do reator, através da proporcionalidade existente entre potência e fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo ( $\Phi_N$ ), tendo em vista que efeitos de realimentação termohidráulica na reatividade do sistema são desprezíveis ao nível de potência máxima de operação do Reator IEA-R1 (2 MW). Assim, sabemos do código CITATION o valor do fluxo médio de nêutrons térmicos a 2 MW. Se medirmos  $\Phi_N$ , através de uma simples relação de linearidade Potência versus  $\Phi_N$ , podemos obter a potência do reator em que se realizaram as medidas de  $\Phi_N$ , relacionando com o nível de corrente da câmara de ionização compensada (CIC) do canal linear e a taxa de reação de folhas de ouro (Au) nuas situadas num dispositivo cheio d'água à aproximadamente 20 cm da placa matriz (suporte dos elementos refletores e combustíveis do núcleo).

DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A obtenção do fluxo de nêutrons a partir das medidas de taxas de reação em folhas de Au nuas e cobertas com cádmio (Cd) pode ser vista em trabalho publicado no IX ENFIR [1].

Foram inseridas 486 folhas de Au (metade nua e metade coberta com Cd) no núcleo do Reator IEA-R1 ao longo de 27 elementos combustíveis (EC). A partir de interpolação polinomial, obteve-se o fluxo médio de nêutrons térmicos ( $\Phi_N$ ) no núcleo do Reator IEA-R1.

O valor de  $\Phi_N$  foi obtido apenas para um nível de potência correspondente a um valor de corrente de 4,95 nA na CIC do canal linear. Concomitantemente, foram irradiadas oito (8) folhas de Au nuas num dispositivo situado fora do núcleo com o objetivo de se obter a razão entre  $\Phi_N$  e a taxa de reação média (AS) das mesmas.

Devido a problemas de refrigeração do núcleo a níveis de potências superiores a 100kW não se pode inserir folhas de ativação no núcleo, mas se pode realizar medidas de taxa de reação fora do mesmo ("Out-of-Core"). Considerando que a razão  $\Phi_N/AS$  se mantém constante para um mesmo posicionamento de barras de controle e devido a inexistência de efeitos de realimentação termohidráulica, conhecida esta razão, podemos obter  $\Phi_N$  a diferentes níveis de potência, relacionando-os aos níveis de corrente da CIC do canal linear.

#### RESULTADOS OBTIDOS

O fluxo médio de nêutrons térmicos ( $\Phi_N$ ) obtido no núcleo do Reator IEA-R1 a partir da ativação de 486 folhas de Au em seu núcleo, para uma corrente na CIC do canal linear de 4,95 nA é dado abaixo:

$$\Phi_N = (1,56 \pm 0,10) \times 10^9 \text{ n/cm}^2\text{s} \quad (2)$$

Sabendo-se que o fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do Reator IEA-R1, com o mesmo operando a 2 MW e a mesma configuração de barras (Elementos de controle 119, 122 e 120 retirados 750 mm do núcleo ativo) é de  $1,553 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$  (dado pelo código CITATION [3]), podemos através da relação linear potência versus  $\Phi_N$ , obter a potência correspondente ao fluxo ( $\Phi_N$ ) medido. Logo

$$P = 200,98 \pm 12,06 \text{ watts} \quad (3)$$

Este nível de fluxo e potência está totalmente correlacionado às posições de barras citadas anteriormente, bem como a distribuição espacial das taxas de reação de folhas de Au (diâmetro 10 mm e espessura 0,0125 mm) situadas fora do núcleo, dentro de um dispositivo inundado d'água (Figura 1). A taxa de reação média nas folhas de Au nuas (AS), obtidas a partir de um ajuste polinomial à sua distribuição espacial é dada a seguir

$$AS = (9,80 \pm 0,02) \times 10^5 \text{ Bq/g} \quad (4)$$

A relação obtida, entre  $\Phi_N$  e AS à potência de 200,98 watts é de  $(1,5931 \pm 0,104) \times 10^3$  unidades de fluxo por Bq/g. Esse valor é utilizado para se obter  $\Phi_N$  e a correspondente potência nos demais níveis de corrente da CIC do canal linear, visto que a distribuição espacial de AS no dispositivo se mantém constante com o aumento da potência, conforme foi constatado no experimento.

Na Figura 1 é apresentada a curva de calibração do Reator IEA-R1, obtida plotando-se os valores de potência obtidos e os correspondentes valores de corrente da CIC, do canal linear. A Tabela 2 mostra os valores de corrente da CIC, bem como os valores de potência obtidos.

Tabela 2: Potência do Reator IEA-R1 em Função de Corrente da CIC do Canal Linear.

Potência (watts)	Corrente na CIC (nA)
200.98	4.95
1345.00	38.20
8140.00	191.00
37496.00	1100.00
86990.00	2200.00
155990.00	4400.00
1700000.00	33500.00
2280000.00	62000.00

NOTA: Incerteza de 6 % (Nível de Confiança de 95 %)

A equação de calibração de potência, obtida a partir do ajuste dos pontos da Tabela 2, pelo método dos mínimos quadrados é dada por:

$$P \text{ (watts)} = \text{Exp} (A \ln (I \text{ (nA)}) + B) \quad (5)$$

sendo A e B os valores dos coeficientes do ajuste e I o valor da corrente (nA) da CIC do canal linear. Os valores dos coeficientes A e B são dados abaixo:

$$A = 1.00 \pm 0.11$$

$$B = 3.67 \pm 0.62$$

Cumpra salientar que esta equação foi obtida para as posições dos elementos de controle 119, 122 e 120 retirados 750 mm do núcleo ativo, com o elemento de controle 138 compensando a reatividade do núcleo nas diferentes irradiações (variação máxima de 750 a 847 mm de retirada), na configuração de núcleo 165B.

A fim de testar a metodologia empregada na obtenção da potência, optou-se em se utilizar um outro caminho, ou seja, a utilização da equação (1) em cada elemento combustível (EC), a fim de se obter a potência dissipada em cada Elemento ( $P_{EC}$ ). Assim, na Tabela 3 temos  $P_{EC}$  e a correspondente potência dissipada nos mesmos. Sabemos que a potência dissipada nos elementos de controle do Reator IEA-R1 é responsável por 11,58 % da potência do reator na configuração de barras do experimento [3]. Fazendo-se a somatória das potências dissipadas nos EC, sabendo-se que eles são responsáveis por 88,42 %, obtemos a potência total gerada no núcleo como sendo de 192,98 watts.

Este valor está dentro do nível de incerteza (6%) obtido, assumindo-se a linearidade potência versus  $\Phi_N$ , o que demonstra a validade do mesmo.

Tabela 3: Potência Dissipada em cada EC (watts) a Partir da Equação (1)

EC	P <sub>EC</sub>
80	6.01
81	4.84
91	4.24
95	4.53
98	5.00
99	5.73
102	5.41
105	4.05
107	5.50
108	5.35
109	6.07
111	4.45
112	7.21
123	7.11
124	6.21
125	5.94
126	5.95
127	7.50
129	2.16
130	9.98
131	10.71
132	8.84
133	8.91
134	9.27
135	9.41
136	5.46
137	5.09
Elementos de Controle*	22.35
TOTAL	192.98 watts

\* Valor calculado pelo código CITATION [3].

### CONCLUSÃO

O resultado obtido pela técnica de ativação permite obter calibração de potência do Reator IEA-R1 numa ampla faixa de potência que varia de 200 watts a 2 MW.

Outras técnicas de calibração de potência, como balanço térmico e análise por ruído, apresentam problemas na obtenção nessa faixa de potência. Assim, a técnica de balanço térmico só é passível de utilização à potência máxima (2 MW) onde a diferença de temperatura do refrigerante na entrada e saída do núcleo é significativa (~ 3° C), enquanto o método de análise por ruído começa a ter problemas acima de 500 kW de potência, onde os pequenos efeitos de realimentação termohidráulica (desprezíveis no método por ativação) são suficientes para dificultar a obtenção do parâmetro potência.

Finalmente, como proposta futura de trabalho, sugerimos a simulação em cálculo (CITATION) e em novos experimentos, da obtenção de AS em diferentes configurações do núcleo do Reator IEA-R1, para o mesmo posicionamento de barras de controle citados neste trabalho. Caso AS, (taxa de reação média das folhas de ouro nuas irradiadas fora do núcleo) se mantenha constante, a calibração não necessitará ser obtida em cada mudança de configuração do núcleo. Neste caso, a calibração obtida neste trabalho será passível de ser utilizada em qualquer configuração de núcleo do Reator IEA-R1.

### REFERÊNCIAS

- [1] Bitelli, Ulysses d'Utra - Medida da Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons Térmicos no Núcleo do Reator IEA-R1 - IX ENFIR, Caxambu, MG, 1993.
- [2] Pintaud, M. e Santos, A. - Comparação Teoria/Experimento do Mapeamento do Fluxo de Nêutrons do Reator IEA-R1 - XI ENFIR, Caxambu, MG, 1993.
- [3] Pintaud, Marcelo - Comunicação Pessoal - COPESP - Coordenadoria para Projetos Especiais - MM.

TABELA I

Elemento Combustível	$\Sigma_f$	P	R
105	2.9499-02	1.0080	1.0498
111	2.9060-02	1.0080	1.0485
102	2.9116-02	1.0080	1.0494
131	4.2304-02	1.0100	1.0691
129	2.3238-02	1.0100	1.0677
98	2.9217-02	1.0080	1.0488
123	3.2434-02	1.0088	1.0585
132	4.4718-02	1.0103	1.0714
112	2.9037-02	1.0080	1.0518
81	2.8839-02	1.0082	1.0481
80	2.9047-02	1.0080	1.0484
130	4.2115-02	1.0100	1.0684
109	2.8927-02	1.0080	1.0482
124	3.2094-02	1.0088	1.0581
134	4.4941-02	1.0103	1.0716
125	3.3337-02	1.0090	1.0596
135	4.5106-02	1.0103	1.0718
126	3.2119-02	1.0086	1.0582
108	2.8691-02	1.0080	1.0478
133	4.5071-02	1.0103	1.0718
99	2.9356-02	1.0080	1.0489
136	4.5715-02	1.0103	1.0725
107	2.8737-02	1.0080	1.0489
127	3.3378-02	1.0086	1.0596
95	2.8728-02	1.0080	1.0479
137	4.5743-02	1.0103	1.0726
91	2.8871-02	1.0080	1.0481

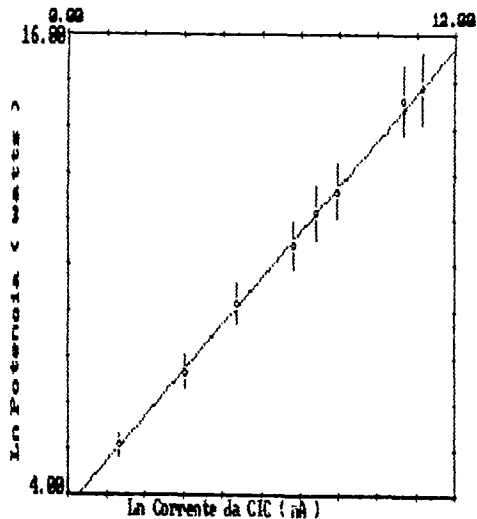
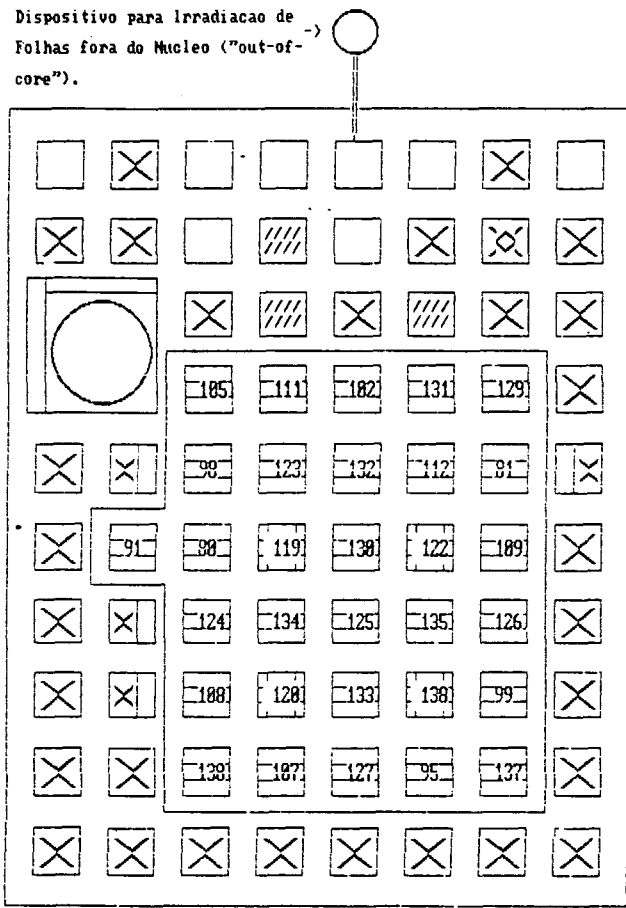


Fig.1- Curva de calibração de potência da CIC do Reator IEA-R1.

Dispositivo para Irradiação de Folhas fora do Núcleo ("out-of-core").



- |  |                                   |  |                                   |
|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
|  | Elemento Combustível Padrão       |  | Fonte de Neutrons                 |
|  | Elemento Combustível de Controle  |  | Tampao                            |
|  | Elemento Refletor                 |  | Elemento de Irradiação            |
|  | Elemento de Irradiação de Grafite |  | Elemento de Irradiação de Silício |

Fig.2- Núcleo do Reator IEA-R1.

**ABSTRACT**

This work presents the procedure used to obtain the Calibration Power for the MTR Research Reactor IEA-R1 in the 200 W to 2 MW range.

Ratios among average thermal neutron flux, capture reaction rate in bare gold foils, irradiated inside special disposal ("Out-of-Core"), and ionization chamber signal (linear channel), were determined to obtain the reactor power.