

## CURVAS DE REATIVIDADE DAS BARRAS DE CONTROLE DO REATOR IPEN/MB-01

Carlos Roberto Ferreira, Adimir dos Santos,  
Hertz Pasqualetto e Rogerio Jerez

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP  
Caixa Postal 11049  
CEP : 05508-900 - São Paulo, Brasil

### RESUMO

Neste Trabalho são apresentadas as curvas de reatividade das barras de controle de Ag-In-Cd referentes aos arranjos RETANGULAR e QUADRADO do primeiro núcleo do reator IPEN/MB-01. Os resultados obtidos pelo grupo experimental, utilizando a técnica de cinética inversa, são comparados com os calculados utilizando-se as duas metodologias de cálculo em desenvolvimento na Divisão de Física de Reatores-(RAF), a saber: **Metodologia 1:** utiliza a sequência de programas NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION/CITATION, onde o cálculo de homogeneização celular das seções de choque da célula de controle é elaborado no código HAMMER-TECHNION, sendo colapsado em 4 grupos de energia dos neutrons, para os cálculos de difusão de neutrons no CITATION; **Metodologia 2:** emprega a sequência de programas NJOY/AMPX-II(XSDRNPM)/CITATION, onde o cálculo celular é feito no módulo XSDRNPM do sistema AMPX-II. Os resultados calculados para os núcleos RETANGULAR e QUADRADO apresentam boa concordância com os medidos, sendo melhores do que os obtidos em trabalho anterior.

### I. INTRODUÇÃO

Em estudo anterior, Referências [1] e [2], foram comparadas as curvas de reatividade das barras de controle (Ag-In-Cd) e das barras de segurança ( $B_4C$ ), do 1º núcleo retangular do reator IPEN/MB-01. Os valores calculados apresentaram razoável concordância (desvios de -6.85, -13,38 e -11.97, respectivamente, entre os valores calculados e medidos das reatividades integrais totais dos bancos de controle, segurança e o excesso de reatividade do núcleo) com os experimentais obtidos utilizando-se a técnica do período estável, sendo porém, subestimados em relação aos mesmos.

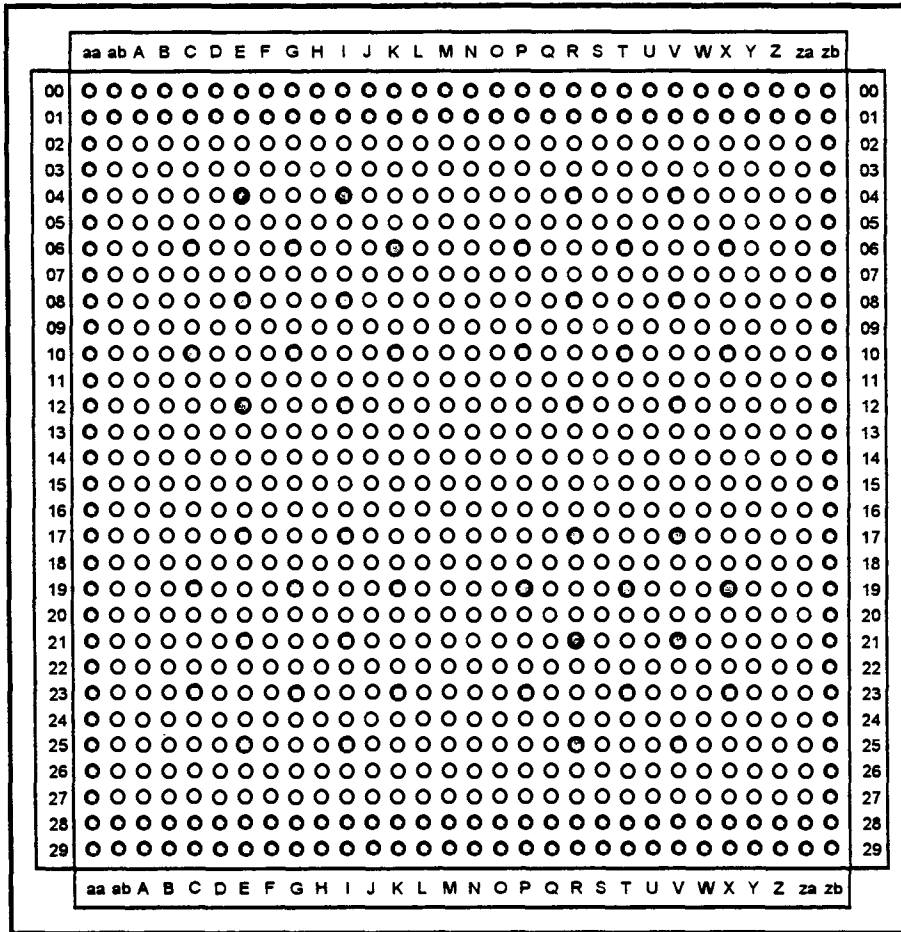
Neste Trabalho, as curvas de reatividades experimentais do banco de controle BCI de Ag-In-Cd, obtidas para dois arranjos do 1º núcleo do reator IPEN/MB-01, RETANGULAR e QUADRADO, são comparadas com os valores calculados. Como ver-se-á adiante, a mesma tendência de subestimação do trabalho anterior, dos valores calculados de reatividades de barras em relação aos experimentais, continuam persistindo, mas os resultados atuais apresentam melhor concordância com os experimentais.

### II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 1, mostra em corte horizontal, o arranjo RETANGULAR do núcleo do reator IPEN/MB-01 com os seus bancos de controle de Ag-In-Cd e de segurança de  $B_4C$ , constituídos de 12 varetas absorvedoras de neutrons cada. O arranjo QUADRADO é similar ao RETANGULAR, sendo formado de 26x26 varetas combustíveis, enquanto que, o RETANGULAR é constituído de 28x26 varetas.

As curvas de reatividades integrais dos bancos de controle de Ag-In-Cd, obtidas para os arranjos QUADRADO e RETANGULAR do núcleo do reator IPEN/MB-01 [3], foram determinadas experimentalmente utilizando-se a técnica de cinética inversa incorporada num reatímetro [4] (hardware + software, consistindo de duas câmaras de ionização compensadas para detecção de neutrons, eletrômetro e sistema de aquisição de dados "on-line" incluindo um micro-computador). A equação de cinética inversa, derivada a partir das equações de cinética pontual, dá a evolução temporal da população neutrônica do reator, representada pela reatividade em função do tempo [5], ou seja:

$$\rho(t) = \rho(t_0) + \beta + \Lambda \frac{\dot{n}(t)}{n(t)} - \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i \int n(t') \cdot e^{\lambda_i(t-t')} dt' \quad (1)$$



LEGENDA: ○ Vareta Combustível  
 ● Vareta Absorvedora de Controle  
 ⊙ Vareta Absorvedora de Segurança

Figura 1 - Diagrama Esquemático do Núcleo com a Configuração Retangular (28 X 26 Varetas).

onde:  $\rho(t)$  é a reatividade nuclear em função do tempo;  $\beta$  é a fração efetiva de neutrons atrasados do núcleo;  $n(t)$  é a densidade de neutrons em função do tempo;  $\Lambda$  é o tempo médio de geração de neutrons prontos no núcleo;  $\beta_i$  é a fração de neutrons atrasados do  $i$ -ésimo grupo de precursores e  $\lambda_i$  é a constante de decaimento do  $i$ -ésimo grupo de precursores de neutrons atrasados.

O procedimento experimental consiste em: (a) conectar e calibrar os equipamentos necessários: câmaras de ionização compensada (CIC) e eletrônica associada mais micro-computador; (b) criticalizar o reator em um dado nível de potência, com os bancos de controle BC1 e BC2 inseridos o máximo; (c) movimentar uma das barras de controle para criar uma inserção de reatividade (positiva ou negativa); (d) durante e após a movimentação das barras, acompanhar a reatividade inserida no núcleo do reator no monitor do micro, ou na impressora ou, ainda, pelo monitor gráfico. Excetuando-se o item (a), este procedimento é repetido várias vezes, deslocando-se os

bancos de controle  $\Delta z(\text{cm})$  (enquanto o banco BC1 é retirado o banco BC2 é inserido para compensar a reatividade inserida e retornar o reator para a condição de criticidade).

Procedendo-se desta forma, a inserção de reatividade de cada banco de controle em questão é determinada para cada deslocamento  $\Delta z$ . Consequentemente, a reatividade integral para uma retirada do banco de controle até a posição  $z$ , é a soma das reatividades obtidas em todos os passos  $\Delta z$  percorridos até  $z$ .

Observa-se que, na Referência [3], as reatividades correspondentes aos deslocamentos dos bancos de controle para os dois arranjos combustíveis do núcleo do reator IPEN/MB-01 foram determinadas, também, utilizando-se a técnica do período estável, já utilizada em trabalhos anteriores [1] e [2]. Ainda mais, foram utilizados os novos valores calculados para o núcleo IPEN/MB-01 dos parâmetros cinéticos  $\beta_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $\beta_{ef}$  e  $\Lambda$ , conforme Referência

[6], sendo que para o  $\beta_{ef}$  houve uma grande concordância com os valores experimentais [7].

A Figura 2, abaixo, mostra um esquema simplificado do reator onde são localizados os bancos de controle de Ag-In-Cd, BC1 e BC2, e os bancos de segurança de B<sub>4</sub>C, BS1 e BS2 e, também, os tubos guias (externos ao núcleo) onde são posicionadas as duas câmaras de ionização compensada CIC.

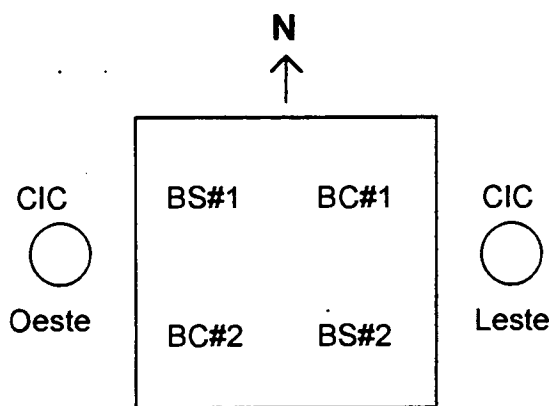


Figura 2. Corte simplificado do núcleo mostrando as localizações dos bancos de controle e de segurança e das câmaras de ionização compensadas (CIC).

### III. METODOLOGIA DE CÁLCULO

As metodologias de cálculos em desenvolvimento na Divisão de Física de Reatores - RAF e empregadas neste Trabalho são duas: a) a Metodologia 1 utiliza a sequência de programas NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION/CITATION [8], sendo que a homogeneização celular é efetuada no código HAMMER-TECHNION; b) a Metodologia 2 segue a mesma sequência de programas, sendo que o HAMMER-TECHNION é substituído pelo módulo XSDRNPM do sistema AMPX-II, para os cálculos de homogeneização celular [9]. Em ambas as metodologias têm-se: 1) o pré-processamento dos dados nucleares é feito com o sistema NJOY; a partir das bibliotecas básicas de dados nucleares ENDF/B-IV e JENDL-2 o NJOY produz bibliotecas de seções de choque pré-processadas pontuais (cerca de 50.000 pontos de energia) e em multigrupo de energia ( estrutura do HAMMER-TECHNION: 30 grupos na região térmica e 54 grupos na região epitérmica; ou numa estrutura de 85 grupos de energia (de uso já frequente na RAF)); 2) a auto-blindagem das ressonâncias resolvidas dos actíneos é efetuada no módulo ROLAIDS do sistema AMPX-II, sendo que as bibliotecas térmica e epitérmica para o código HAMMER-TECHNION são formatadas, respectivamente, nos módulos e NITATH e NITAEF, as quais são versões modificadas do módulo NITAWL do AMPX-II; 3) o código HAMMER-TECHNION (na Metodologia 1) ou o XSDRNPM (na Metodologia 2) prepara as seções de choque macroscópicas homogêneas, colapsadas em 2 e 4 grupos de energia, para as células representativas do reator. 4) Os cálculos de

difusão de neutrons do reator IPEN/MB-01, em multigrupo de energia e diferenças finitas, foram realizados com o programa CITATION em geometria tridimensional (X,Y,Z), com 4 grupos de energia, utilizando-se a estrutura de overlay para o posicionamento correto das barras de controle em suas posições crítica e perturbada (deslocada  $\Delta z$ (cm) com referência à posição crítica).

Para facilitar a execução repetida do programa de difusão de neutrons CITATION, para cada configuração dos bancos de controle, para cada arranjo combustível (cerca de 400 execuções), foi elaborado o programa auxiliar PBARRA.FOR em FORTRAN, o qual simula a movimentação das barras de controle e, a partir de um arquivo base de entrada do CITATION, gera arquivos para cada configuração das barras de controle alterando a malhagem espacial axial e os dados de OVERLAY.

Determinados os valores dos fatores de multiplicação efetivos nas condições do reator crítico e reator perturbado, devido à movimentação dos bancos de controle BC1 ou BC2, conforme as configurações experimentais, calcula-se o valor da reatividade inserida por meio das expressões:

$$\Delta\rho(z, \Delta z) = \frac{k_2 - k_1}{k_1 k_2} \cdot 10^5 \text{ (pcm)}$$

$$\rho(z) = \sum \Delta\rho(z, \Delta z) \text{ (pcm)} \quad (2)$$

onde,  $k_1$  é o fator de multiplicação efetivo correspondente a posição crítica das barras;  $k_2$  é o fator efetivo de multiplicação de neutrons do reator perturbado, isto é, barras de um banco de controle deslocadas  $\Delta z$  centímetros da posição crítica;  $\Delta\rho$  é a inserção de reatividade correspondente a movimentação de um banco de controle  $\Delta z$  (cm);  $\rho(z)$  é a reatividade integral do banco de controle em questão, inserido até a posição  $z$ (cm).

### IV. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos das Figuras 3 até 8 e Tabelas 1 a 3. As curvas integrais de reatividades, obtidas experimentalmente [3] e calculadas com o código CITATION, são mostradas nos gráficos das Figuras 3 e 6, respectivamente, para os núcleos, RETANGULAR e QUADRADO, onde os pontos de reatividades calculados foram ajustados por mínimos quadrados, por polinômios de 3º grau. As curvas diferenciais de reatividades correspondentes, Figuras 4 e 7, foram obtidas por derivação das curvas integrais. As Figuras 5 e 8 mostram as flutuações nos cálculos do  $k_{ef}$  crítico com o CITATION para os dois casos. As Tabelas mostram, respectivamente, as reatividades integrais totais calculadas e medidas do banco de controle BC1, para os núcleos QUADRADO e RETANGULAR, os excessos de reatividade e as posições críticas experimentais de máxima inserção das barras.

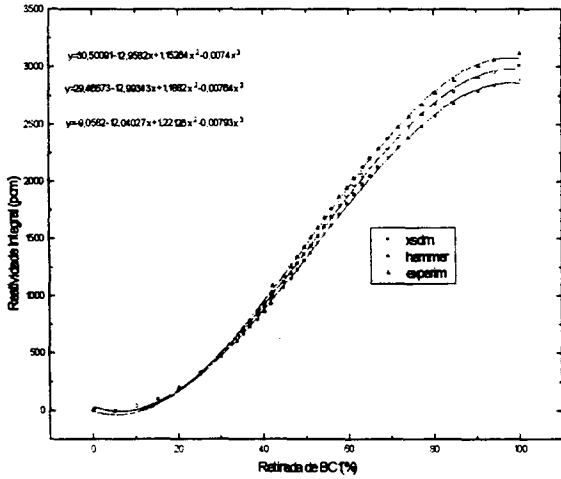


Figura 3. Reatividade Integral de BC1 (pcm): Núcleo Retangular.

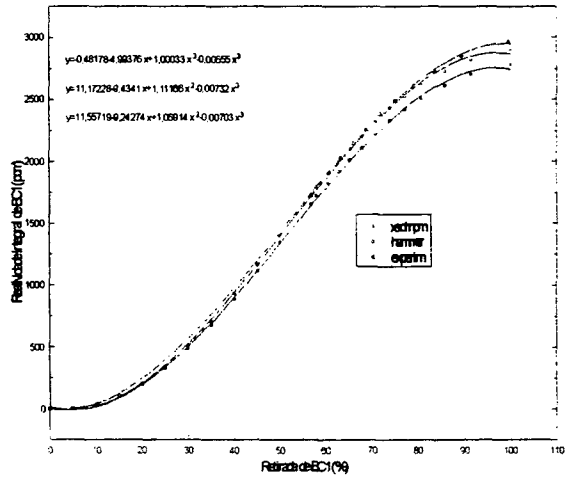


Figura 6. Reatividade Integral de BC1 (pcm): Núcleo Quadrado.

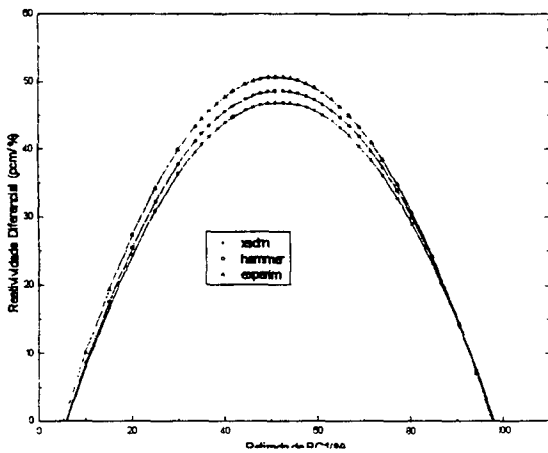


Figura 4. Reatividade Diferencial (pcm/ %retirada): Núcleo Retangular.

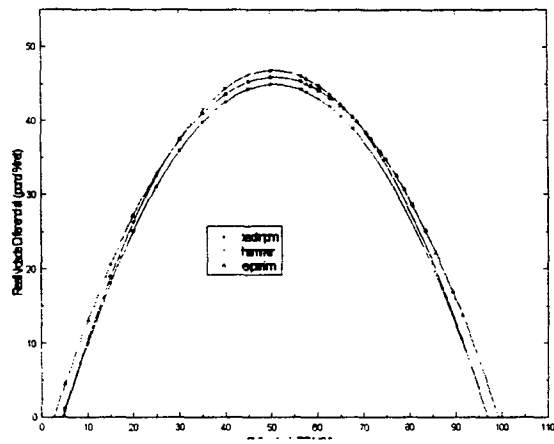


Figura 7. Reatividade Diferencial (pcm/ %retirada): Núcleo Quadrado.

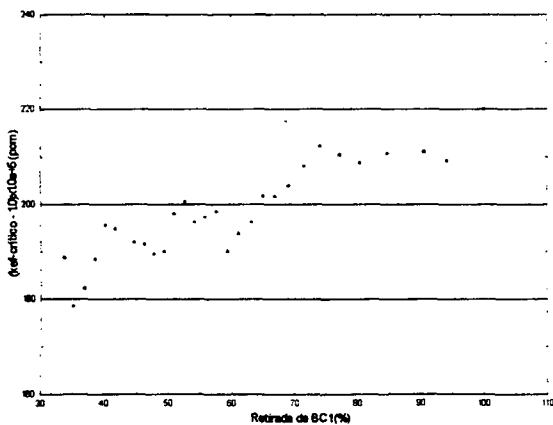


Figura 5. Flutuação no Cálculo de  $k_{eff}$ -crítico (pcm): Núcleo Retangular.

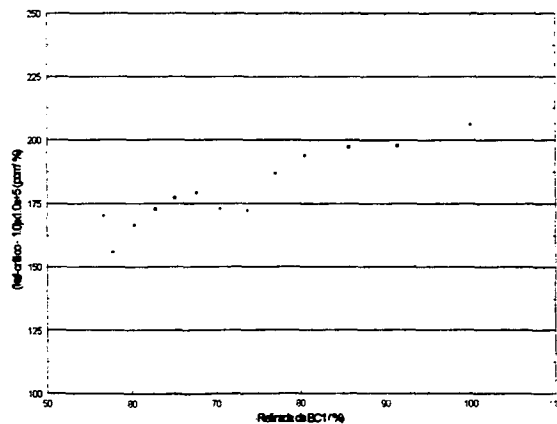


Figura 8. Flutuação no Cálculo de  $k_{eff}$ -crítico (pcm): Núcleo Quadrado.

TABELA 1. Valores Integrais de Reatividades dos Arranjos Quadrado e Retangular do Núcleo do Reator IPEN/MB-01.

Reatividade Integral de BC1 (pcm)	MEDIDO	HAMMER/CITATION	XSDRNPM/CITATION	$\delta_1(\%)$	$\delta_2(\%)$	$\delta_3(\%)$
NÚCLEO QUADRADO	2964,75	2906,24	2782,78	-1,97	-6,14	-4,25
NÚCLEO RETANGULAR	3115,30	3009,58	2889,54	-3,39	-7,25	-3,99

TABELA 2. Excessos de Reatividades do Núcleo do Reator IPEN/MB-01 Referentes aos Arranjos Quadrado, Retangular.

Excesso de Reatividade do Núcleo	MEDIDO	CALC.	$\delta(\%)$
NÚCLEO QUADRADO	1317,20	1340,65	+1,78
NÚCLEO RETANGULAR	2457	2334,15	-5,00

TABELA 3. Posições Críticas Com os Dois Bancos de Controle Retirados o Mínimo (Máxima Inserção que Permite a Criticalização do Núcleo): Arranjos Quadrado, Retangular e Cilíndrico.

	Posição de BC1 (%) de Retirada	Posição de BC2 (%) de Retirada
NÚCLEO QUADRADO	68,52	71,76
NÚCLEO RETANGULAR	58,8	58,8

## V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os gráficos 3 e 6 comparam as curvas integrais de reatividades experimentais e calculadas para os dois arranjos do 1º núcleo do reator IPEN-MB-01, respectivamente, arranjos RETANGULAR e QUADRADO, onde os pontos calculados foram ajustados por mínimos quadrados, com polinômios de 3º grau, cujas equações são dadas nos gráficos. A tendência observada nas Referências [1] e [2], em que os valores das reatividades calculadas são inferiores aos valores medidos, é mantida. Os cálculos utilizando as seções de choque das barras de controle geradas com a Metodologia 1 (HAMMER-TECHNION) apresentam maior concordância com os valores experimentais: desvios de -1,97 % para o

núcleo quadrado e de -3,39 % para o núcleo retangular. Já os cálculos efetuados com as seções de choque das barras de controle obtidas com a Metodologia 2 (XSDRNPM) apresentam desvios correspondentes de -6,14 % e -7,25 % em comparação com os medidos. Todos estes desvios mencionados encontram-se listados na Tabela 1, juntamente com os valores integrais totais do banco de controle BC1 (Ag-In-Cd), para as duas configurações do núcleo, QUADRADA e RETANGULAR.

As Figuras 4 e 7 mostram as curvas diferenciais de reatividades do banco BC1 (Ag-In-Cd) de controle para os dois núcleos, obtidas por derivação das curvas integrais correspondentes. Como esperado, estas curvas apresentam propriedades compatíveis com as discutidas para as curvas integrais que as originaram.

As Figuras 5 e 8 mostram que as flutuações nos valores dos  $k_{eff}$ -críticos calculados com o código CITATION situam-se numa faixa de 50 pcm, o que demonstra a consistência dos métodos de cálculos, não introduzindo nenhuma tendência com as configurações dos bancos de controle.

Finalmente, a Tabela 2 relaciona os excessos de reatividades dos 2 núcleos, calculados e medidos, onde observam-se desvios de +1,78 % e -5,00 %, respectivamente, para os núcleos quadrado e retangular. Como já foi mencionado para as reatividades, os valores calculados são, em geral, subestimados em comparação, com os medidos, exceto, neste caso, para o excesso de reatividade do núcleo quadrado, onde o excesso de reatividade calculado é 1,78% maior do que o medido, mas estando dentro da faixa do erro experimental avaliado em 7 % [10]. A Figura 3 mostra as posições críticas de máxima injeção dos bancos de controle. Estes resultados apresentam, em geral, a mesma tendência do estudo anterior mostrado nas Referências [1] e [2], sendo porém melhorado uma vez que os parâmetros cinéticos  $\beta_{ef}$ ,  $\beta_i$ ,  $\lambda_i$  e  $\Lambda$  foram reavaliados para o núcleo IPEN/MB-01 [7]. Como possíveis fontes de discordâncias, pode-se enumerar as seguintes:

(a) os erros experimentais, não mostrados nos gráficos, mas estimados em  $\pm 5\%$ , pois somente o eletrômetro utilizado no processo de detecção tem uma incerteza especificada de  $\pm 3\%$  e os parâmetros cinéticos utilizados na equação de cinética inversa (ou na equação inhour) também incluem erros: o  $\beta_{ef}$  reavaliado para execução deste Trabalho [6] e [7], apresenta um desvio estimado em cerca de 3,5 %. Observa-se que o processo aqui chamado

“experimental” é na realidade um processo híbrido, uma vez que inclui equações que apresentam parâmetros calculados!

(b) toda a sequência de processamento de bibliotecas de dados nucleares, para a homogeneização final dos dados nucleares em 4 grupos de energia no código HAMMER-TECHNION, bem como, no módulo XSDRNPM do sistema AMPX-II, leva um grau de incerteza:

(c) a metodologia de difusão de neutrons, expressa em diferenças finitas utilizada no código CITATION, para os cálculos macroscópicos dos núcleos, certamente apresentam outra fonte de incertezas.

## VI. CONCLUSÃO

As curvas de reatividades calculadas para os bancos de controle de Ag-In-Cd (calculadas para o banco BC1, mas por equivalência e simetria válidas também para o banco BC2), apresentam boa concordância com as curvas experimentais, apresentando desvios geralmente abaixo de 5 % nos valores integrais totais de reatividades das barras e nos excessos de reatividades dos núcleos QUADRADO e RETANGULAR, sendo que os resultados do HAMMER-TECHNION mostram melhor concordância com os medidos do que os obtidos com o XSDRNPM.

Finalmente, nota-se que os desvios encontrados (particularmente, com a Metodologia 1 de cálculo das seções de choque homogêneas das barras de controle) na determinação das reatividades integrais totais de barras de controle e nos excessos de reatividades dos núcleos, são suficientes para atender os padrões internacionais que situam esses desvios na faixa de 5 a 7 %. Consequentemente, em trabalhos futuros recomenda-se a utilização da METODOLOGIA 1: NJOY/AMPX-II/HAMMER/TECHNION/CITATION.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, C. R.: **Calibração das Barras de Controle do LABNEU**. Relatório Técnico RP230041S130-412, IPEN/CNEN-SP (17/12/92).
- [2] Ferreira, C. R.: **Calibração das Barras de Segurança do LABNEU**. Relatório Técnico RP230041S147-412, IPEN/CNEN-SP (12/02/93).
- [3] Pasqualetto, O. H.: **Calibração das Barras de Controle do Reator IPEN/MB-01**. CI nº 08/95 Coordenadoria para Projetos Especiais - COPESP (07/03/95).
- [4] Ferreira, P. S. B.: **Manual do Reatímetro Digital do IPEN - Versão 2.0**. Relatório Técnico R41401850004-414, IPEN/CNEN-SP (23/11/92).

- [5] Ferreira, P. S. B.: **Técnicas Experimentais em Física de Reatores: Reatividade**. Publicação Interna do Laboratório de Neutrônica (LABNEU), COPESP (1992).
- [6] Yamaguchi, M.: **Parâmetros Cinéticos da UCRI**. CI nº 001/95 - COPESP. (31/01/95).
- [7] Santos, A. e Jerez, R.: **Determinação Experimental do  $\beta_{eff}$  do Reator IPEN/MB-01**. Publicação do X Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica (X ENFIR), 7-11 de Agosto de 1995, Águas de Lindóia-SP - Brasil.
- [8] Santos, A., Ferreira, C. R. e Lopez, E. M.: **Elaboração de Uma interface AMPX-II/HAMMER-TECHNION**. IPEN/CNEN-SP. Publicação do 3º Encontro Geral de Energia Nuclear (3ºCGEN), Rio de Janeiro, 22 a 27 de Abril de 1990.
- [9] Ferreira, C. R. e Santos, A.: **Metodologia de Análise de Problemas Padrões Celulares com o XSDRNPM**. Publicação do IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica (IX ENFIR), 25-29 de Outubro de 1993, Caxambu - MG - Brasil.
- [10] Fanaro, L. C. C. B.: **Reatividade das Barras de Controle da UCRI na Configuração Quadrada para 20, 40 e 60 °C**. PSE.RAF.COPESP.004 - RELT.007.R00, IPEN/CNEN-SP (27/05/96).

## VIII. ABSTRACT

The control rod reactivity worths were obtained in the rectangular and square configuration of IPEN/MB-01 Reactor by means of the inverse kinetic method. The two methodologies in development at Reactor Physics Division (RAF) of IPEN, namely: - Methodology 1: NJOY/AMPX-II HAMMER-TECHNION/CITATION and Methodology 2: NJOY/AMPX-II(XSDRNPM)/CITATION - for the calculation of control rod reactivity worths were compared to the experimental values. In first methodology the four group cell homogenization is made by HAMMER-TECHNION code and in the second by the XSDRNPM. Both cases uses the diffusion code CITATION for reactor calculations. The calculated results shows good agreement with the experimental ones, and there have been better results than the ones obtained in later works.