

UMA CONTRIBUIÇÃO BRASILEIRA PARA O INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS

**Adimir dos Santos¹, Alfredo Abe², Graciete S. A. e Silva¹, Leda C.C.B. Fannaro¹,
Mitsuo Yamaguchi¹, Rinaldo Fuga² e Rogério Jerez¹**

¹ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP

² Divisão de Física de Reatores
Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
Av. Prof. Lineu Prestes 2468
05508-000 São Paulo, SP
221@ctmsp.mar.mil.br

RESUMO

Recentemente o IPEN e CTMSP submeteram ao projeto ICSBEP – International Criticality Safety Benchmark Evaluated Project – um conjunto de experimentos críticos realizados no reator IPEN/MB-01 para ser avaliado como um “benchmark” destinado à validação das metodologias e ferramentas computacionais voltadas para a análise de criticalidade. O conjunto de experimentos críticos consiste de várias configurações do núcleo do reator IPEN/MB-01 com a presença do “baffle” e diferentes quantidades de varetas de veneno queimável de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$.

1. INTRODUÇÃO

O reator nuclear de pesquisa IPEN/MB-01 foi projetado e construído com o objetivo de verificar e validar as metodologias e ferramentas computacionais empregadas no projeto do núcleo do reator do LABGENE, Laboratório de Geração Núcleo-Elétrico, protótipo de um reator para a propulsão de submarinos.

Neste sentido, ao longo dos seus 15 anos de operação, foram realizados inúmeros experimentos, voltados para levantar os parâmetros operacionais e de segurança do reator do LABGENE. O Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP) juntamente com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) submeteu ao ICSBEP (International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project) um dos experimentos realizados na instalação, para ser avaliado como candidato a um “benchmark” (problema padrão).

Os “benchmarks”, ou problemas-padrões, são destinados principalmente para subsidiar a atividade de verificação e validação das ferramentas computacionais empregadas no projeto do núcleo do reator. O “benchmark” proporciona a verificação das metodologias de cálculo e a aplicabilidade e validação da ferramenta computacional. Além disso permite estabelecer as margens de incertezas existentes entre os cálculos e experimentos. Assim, as várias etapas do projeto do núcleo de um reator nuclear, tais como a definição dos parâmetros básicos, a geometria e o arranjo das varetas, enriquecimento e a quantidade de combustível, e de varetas absorvedoras de nêutrons, utilizadas para o controle e o desligamento do reator, obtidas com as ferramentas computacionais, podem ser devidamente avaliadas com apoio do problema-padrão, validando os cálculos.

A avaliação, verificação e validação das ferramentas computacionais utilizadas no projeto são aspectos mandatórios do ponto de vista de licenciamento futuro da instalação, onde requisitos de segurança, tais como a capacidade de desligamento do reator, devem ser comprovados. Dessa forma, a utilização de problemas-padrões constitui-se em uma fase importante de todo o processo de verificação e validação das ferramentas computacionais do projeto de núcleos dos reatores.

2. O PROJETO ICSBEP - INTERNATIONAL CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EVALUATION PROJECT

O projeto denominado de ICSBEP iniciou em outubro de 1992 patrocinado pelo Departamento de Energia do governo dos Estados Unidos da América. O gerenciamento do projeto é conduzido desde a sua criação até os dias atuais pelo INEEL (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory), além disso envolve vários outros laboratórios nucleares dos Estados Unidos da América como LANL (Los Alamos National Laboratory), ORNL (Oak Ridge National Laboratory), ANL (Argonne National Laboratory), LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory), etc. A partir de 1994 com a incorporação do “International Criticality Safety Data Exchange”, o projeto ICSBEP tornou-se também uma atividade oficial do OECD-NEA.

O projeto tem como objetivo principal identificar e elaborar um conjunto de dados de problemas padrões críticos, para tanto são executados trabalhos extensivos de revisão dos dados e documentação de vários experimentos críticos, compilação e padronização de dados em um formato definido e a execução de cálculos dos experimentos críticos com ferramentas padronizadas. O produto desse esforço constituiu em um “handbook” denominado de International of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, atualmente este “handbook” possui aproximadamente 350 experimentos totalizando mais de 3000 configurações críticas. O resultado desse esforço permitirá no futuro : eliminar os inúmeros experimentos redundantes que possam a vir ser realizado em vários locais, servir de base para o processo de validação de códigos voltados a análise de criticalidade nuclear, planejar, executar e melhorar experimentos, identificar experimentos que possam preencher as lacunas existentes, identificar erros e deficiências existentes nas bibliotecas das seções de choque e também recuperar e preservar o conhecimento gerado nas décadas passadas.

Atualmente, o “handbook” é composto de vários sistemas críticos de diferentes materiais físséis, com diferentes enriquecimentos, diferentes compostos, conforme apresentado na Tabela 1. É importante destacar que o “handbook” é atualizado e a cada ano são submetidos

novos experimentos executados em diversos países, e estes são devidamente avaliados por revisores independentes antes de serem incorporados ao “handbook”.

Tabela 1 – Quantidade de Experimentos e Configurações Críticas Existentes no “Handbook” (Edição de 2004).

| Experimento | Metálico | Solução | Composto | Misto | Total |
|---|----------|---------|----------|-------|-------|
| Plutônio | 94 | 376 | 35 | - | 505 |
| Enriquecimento alto (^{235}U) | 321 | 433 | 172 | 7 | 933 |
| Enriquecimento intermediário (^{235}U) | 16 | 4 | 41 | - | 61 |
| Enriquecimento baixo (^{235}U) | 42 | 90 | 926 | - | 1058 |
| ^{233}U | 10 | 177 | 5 | - | 192 |
| Óxido Misto (PuO_2) | 45 | 48 | 185 | 58 | 336 |

Os critérios adotados pelo INEEL para considerar um determinado experimento como “benchmark” ou problema padrão de criticalidade são determinação de keff (fator de multiplicação efetiva de nêutrons), descrição rigorosa e detalhada do experimento, especificação completa das dimensões geométricas, composição dos materiais, reprodutibilidade e o experimento ter sido publicado em algum periódico com revisão. Os experimentos que inicialmente atendem estes critérios são candidatos à “benchmarks”, no entanto para serem considerados “benchmarks”, os experimentos devem ser minuciosamente analisados quanto a precisão das informações fornecidas, completeza da especificação, o tratamento de erros, qualidade do experimento, resultados apresentados e a adequação aos formatos estabelecidos pelo comitê de revisor.

A verificação de todos os itens é executada em três etapas, a primeira etapa por uma revisão interna, a segunda por revisores externos independentes e, a terceira e última etapa por um comitê de trabalho constituído para aprovar ou não, o experimento como sendo “benchmark”. Maiores detalhes sobre o projeto ICSBEP podem ser obtidos na Internet, no endereço eletrônico : www.ineel.gov ou <http://icsbep.inel.gov/icsbep>.

2.1. Dados “as built” do reator IPEN/MB-01

O levantamento e a compilação dos dados “as built” do reator IPEN/MB-01 é uma das etapas imprescindíveis para a elaboração de um “benchmark”, uma vez que estes dados devem refletir exatamente as propriedades e características do reator onde o experimento é executado. Desta forma, a primeira etapa do trabalho consistiu em avaliar os principais dados do reator utilizados numa modelagem de cálculo típico de reator e obter estes dados na forma “as built” registrados nos vários “data books” da instalação. Os dados mais importantes para os cálculos do núcleo do reator são as dimensões geométricas e a composição de todos os materiais constituintes do núcleo do reator. Dessa forma, concentrou-se na obtenção e análise destes dados.

A fabricação do combustível do núcleo do reator IPEN/MB-01 seguiu várias especificações técnicas, normas e procedimentos, assim os registros como a definição dos ensaios de caracterização, quantidade de amostras por lotes, dimensional das pastilhas, etc estão devidamente documentados nos “data books”. Por exemplo, o processamento do combustível foi dividido em 8 lotes de pó de UO_2 . Para cada lote foi efetuado um plano de amostragem não estatístico para o controle da qualidade das pastilhas. O plano de amostragem contempla os parâmetros que não necessitam de um controle rígido estatístico como urânio total, O/U (razão estequiométrica), U-235, gases residuais, ensaio de compressão, terras raras, rugosidade, tório, ceramografia, etc. Para os parâmetros como : densidade, diâmetro, altura e massa foram adotados planos de amostragem estatístico pois, estes foram identificados como mais críticos e sujeitos a perturbação e desvio durante o processo de fabricação.

A análise dos dados contemplou os dados das 680 varetas combustíveis e estabeleceu-se os valores médios e os respectivos desvios. A Figura 1. e 2 ilustram a distribuição da altura ativa das varetas combustíveis do reator IPEN/MB-01.

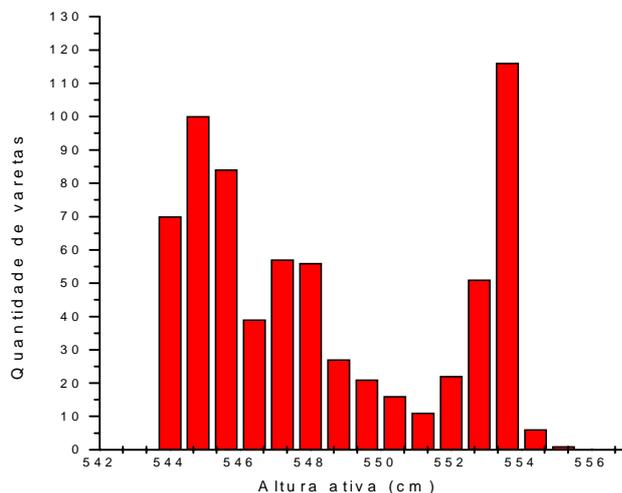


Figura 1. Distribuição das Alturas Ativa das 680 Varetas Combustíveis

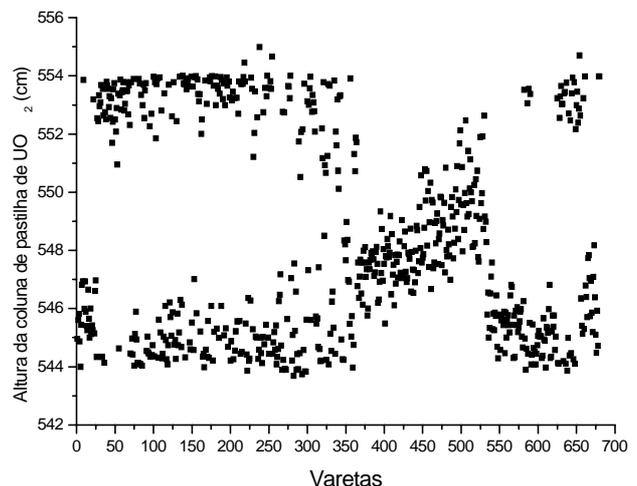


Figura 2. Altura da Coluna de Pastilhas

A Figura 2 complementa a informação existente sobre o comprimento das colunas de pastilhas para cada vareta do núcleo. O eixo das ordenadas do gráfico da Figura 2, representa apenas a numeração atribuída na identificação de cada vareta existente. As varetas do reator IPEN/MB-01 são identificadas através de duas letras e três números (por exemplo UC104). Assim, cada número da ordenada do gráfico representa uma vareta existente no núcleo. Observa-se que as varetas identificadas com os números 001 até aproximadamente 350, possuem comprimento das colunas de pastilhas de UO_2 dispersos praticamente em dois extremos (~ 554 mm e ~ 545 mm), enquanto que no intervalo das varetas identificadas com o número 350 até aproximadamente 500, estes possuem o comprimento da coluna de pastilhas dispersos em torno do valor 548 mm.

A Tabela 2. apresenta os principais parâmetros relacionados à obtenção da densidade do combustível e, por sua vez a concentração dos núclídeos constituintes do combustível.

Tabela 2. Os Valores Médios das Dimensões da Pastilha de UO_2 na Vareta Combustível do Reator IPEN/MB-01

| Parâmetro | Valor médio | Desvio padrão |
|--|-------------|---------------|
| Diâmetro da pastilha (mm) | 8.4894 | 0.0048 |
| Altura ativa da coluna de pastilhas (mm) | 548.4 | 3.544 |
| Massa de UO_2 por vareta combustível (g) | 315.912 | 2.386 |

Utilizando as expressões abaixo e os valores da Tabela 2, obtém-se a densidade e o respectivo desvio.

$$\rho_{UO_2} = \frac{4M}{\pi D^2 L},$$

$$\sigma_{\rho_{UO_2}}^2 = \left(\frac{\partial \rho_{UO_2}}{\partial M} \right)^2 \sigma_M^2 + \left(\frac{\partial \rho_{UO_2}}{\partial D} \right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial \rho_{UO_2}}{\partial L} \right)^2 \sigma_L^2 = \left(\frac{4}{\pi D^2 L} \right)^2 \sigma_M^2 - \left(\frac{8M}{\pi D^3 L} \right)^2 \sigma_D^2 - \left(\frac{4M}{\pi D^2 L^2} \right)^2 \sigma_L^2$$

O procedimento descrito foi executado para os vários dados como : diâmetro e espessura do encamisamento, diâmetro e distância centro a centro entre os furos das placas suporte inferior, intermediária e superior, etc. Adicionalmente foram executadas reanálise e caracterizações com as amostras, medições e aferições de todas as dimensões normalmente envolvidas nas modelagens.

2.2. Experimento de Criticalidade

Realizou-se um experimento com o objetivo de obter várias configurações críticas sem a presença das barras de controle inseridas no núcleo ativo do reator. Para as várias configurações críticas obtidas foi sempre considerado um núcleo com a presença do baffle (chapas de aço em volta do núcleo), conforme a as ilustração esquemática da Figura 3. No total foram determinadas 5 configurações críticas sem a presença das barras de controle, duas configurações dentre as cinco foram obtidas somente com varetas combustíveis e, as configurações restantes com a presença de varetas de veneno queimável de Al_2O_3 - B_4C .

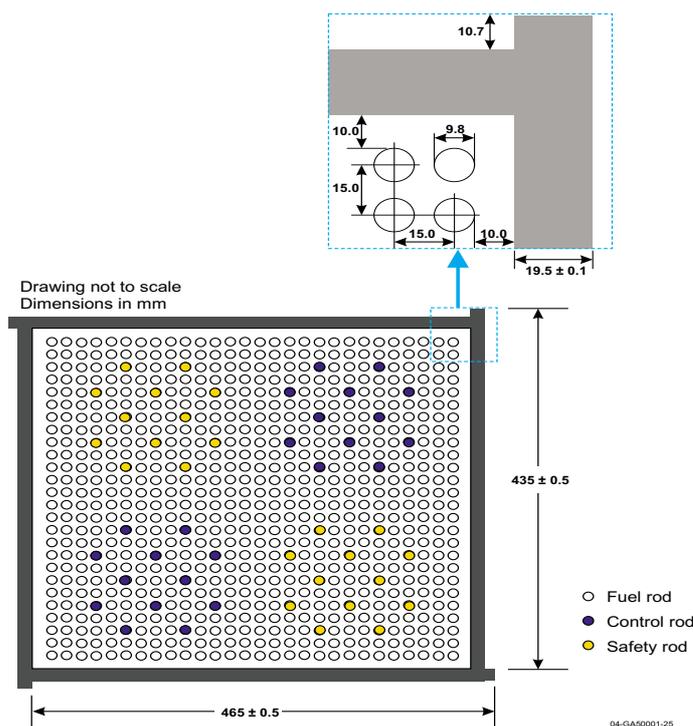


Figura 3 –Ilustração Esquemática do Núcleo com o “Baffle” de Aço Inox

A Tabela 3 apresenta os valores dos resultados experimentais para o fator de multiplicação de nêutrons das configurações consideradas e, observa-se uma excelente qualidade dos valores experimentais obtida mediante a um controle da temperatura do sistema.

Tabela 3. Valores de k_{eff} Medidos para as Configurações Críticas e as Respectivas Temperaturas

| Caso | k_{eff} | Temperatura(°C) |
|------|-----------------------|------------------|
| 1 | 0.99996 ± 0.00002 | 20.40 ± 0.06 |
| 2 | 1.00006 ± 0.00002 | 20.47 ± 0.05 |
| 3 | 1.00009 ± 0.00002 | 20.51 ± 0.06 |
| 4 | 1.00007 ± 0.00002 | 20.62 ± 0.08 |
| 5 | 0.99993 ± 0.00004 | 20.59 ± 0.10 |

3. CONCLUSÕES

O trabalho submetido foi avaliado em várias etapas, por diferentes revisores independentes e da própria comissão e ao final do processo o ICSBEP seguindo o recomendação e o parecer dos revisores considerou o experimento como “benchmark”. A edição de setembro do “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments” já apresenta o experimento com a codificação LEU-COMP-THERM-77 /1/. Dessa forma, o reconhecimento internacional da instalação e experimentos executados demonstra a

qualidade do trabalho desenvolvido nos últimos 15 anos no reator IPEN/MB-01. O Brasil dessa forma figura como o único país do hemisfério sul com a contribuição neste projeto do ICSBEP, conforme mostrado na Figura 4. , extraído do endereço eletrônico : www.ineel.gov ou <http://icsbep.ineel.gov/icsbep>.

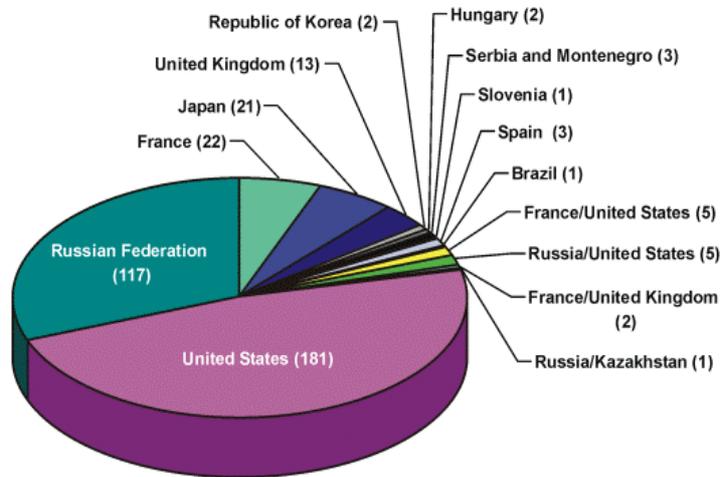


Figura 4. Países com Contribuição em Termos de “Benchmark” para o ICSBEP

REFERÊNCIAS

1. Santos, A.; Abe, A.; Silva, G. S. A.; Fanaro, L. C. C. B.; Yamaguchi M., Fuga, R. e Jerez, R.; “*Critical Loading Configurations of the IPEN/MB-01 Reactor, LEU-COMP-THERM-007*”, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments – NEA/NSC/DOC (95)03 – September 2004 Edition.