

## UTILIZAÇÃO DO REATOR IPEN/MB-01

Ulysses d'Utra Bitelli\*  
Marino Reis Giada\*\*

\*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Caixa Postal 11049  
05422-970, São Paulo, Brasil  
e-mail: ubitelli@net.ipen.br

\*\*Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo-CTMSP  
05508-900, São Paulo, Brasil  
e-mail: 313@ctmsp.mar.mil.br

### RESUMO

Este trabalho apresenta um resumo das inúmeras atividades desenvolvidas no reator IPEN/MB-01 ao longo dos seus quase 12 anos de operação. De 1988 a 2000, foram realizadas mais de 1200 operações, a grande maioria delas destinada a obtenção de parâmetros nucleares de interesse à área de Física de Reatores. O reator foi ainda largamente empregado no treinamento e retreinamento de operadores de reatores, tanto para seu quadro interno quanto externo.

### I. INTRODUÇÃO

O IPEN/MB-01 é um reator nuclear genuinamente brasileiro, concebido por pesquisadores e engenheiros do IPEN-CNEN/SP e CTMSP, tendo sido financiado e construído pela Marinha do Brasil. Este reator atingiu sua primeira criticalidade às 15 horas e 35 minutos do dia 9 de Novembro de 1988, sendo oficialmente entregue para operação ao IPEN CNEN/SP em 28 de Novembro deste mesmo ano.

O projeto do reator IPEN/MB-01 foi iniciado em 1983 e suas obras foram concluídas em Julho de 1988. No mesmo mês iniciaram-se os testes de comissionamento dos seus vários sistemas. Cumpridas as exigências legais para o seu licenciamento, foi concedida pela CNEN em 19 de Outubro de 1988 a autorização para a sua operação inicial.

O reator IPEN/MB-01 é uma instalação nuclear que permite a simulação de 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 neste caso, projetado para operar a uma potência máxima de 100 watts. Esses reatores constituem uma ferramenta básica, que permite aos pesquisadores estudar 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.

A filosofia que norteou o projeto do reator IPEN/MB-01, foi no sentido de se projetar e testar um núcleo típico para uso em propulsão naval, ou seja, que o controle de reatividade se desse a partir da inserção ou

retirada de barras de controle, contrariando o modelo de muitas unidades críticas em que o controle se dá pelo nível d'água no tanque moderador. Esse controle de reatividade por barras de controle é típico de reatores navais, os quais necessitam de rápidas variações de potência com o objetivo de realizar manobras operativas.

### II. DESCRIÇÃO DO REATOR

O primeiro núcleo do reator IPEN/MB-01 possui a forma de paralelepípedo com dimensões ativas de 39x42x54,6 cm, sendo constituído de um arranjo de 28x26 posições por varetas combustíveis e 48 tubos guias, destinados à 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 combustíveis e um excesso de reatividade de aproximadamente 2400 pcm.

As varetas combustíveis são constituídas por 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 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 de 12 varetas absorvedoras, sendo dois grupos de barras de segurança e dois grupos de barras de controle; cada um deles dispostos em um quadrante do núcleo do reator. As 12 varetas absorvedoras de cada conjunto são unidas por um corpo central, denominado aranha, o qual é ligado por uma haste

de acionamento, que por sua vez é conectada a mecanismos acionados por magnetos energizados.

A reatividade integral de cada barra de controle/segurança (banco com 12 varetas absorvedoras) é suficiente para desligar o reator, ou seja, é de aproximadamente 3200 pcm. As barras de segurança apresentam as mesmas características geométricas das barras de controle, diferenciando-se das mesmas pelo material absorvedor de nêutrons utilizado, no caso  $B_4C$ , e pelo fato de que durante a operação normal do reator, são mantidas totalmente retiradas do núcleo ativo, com o objetivo de desligá-lo com grande margem de segurança. As barras de controle constituem-se de uma liga de Ag-In-Cd encapsulada num revestimento de aço inox austenítico, e são as responsáveis por manter a população de nêutrons do reator constante, quando o mesmo atinge um certo nível fixo de potência, por meio da absorção dos nêutrons em sua material estrutural.

Todo o núcleo do reator, bem como os mecanismos de acionamento de barras, as guias para as aranhas e o amortecedor de queda de barras, é apoiado por uma estrutura suporte, fixada na parte superior por uma plataforma metálica, e na parte inferior mantida suspensa no interior do tanque moderador, o qual contém água tratada e desmineralizada, utilizada como elemento moderador da energia dos nêutrons.

Além das barras de controle e segurança, o sistema de controle de reatividade inclui um mecanismo de esvaziamento rápido do tanque moderador que provoca o desligamento do reator por perda de moderação. No desligamento por barras, dito de primeiro nível, as 4 barras caem por gravidade no núcleo, a partir do sinal de corte de energia dos magnetos, enquanto no desligamento de segundo nível, além de todas as 4 barras caírem, são abertas duas válvulas tipo borboleta de abertura rápida, de 50,8 cm de diâmetro, situadas na parte inferior do tanque moderador, causando a retirada de toda água do tanque em aproximadamente 4 segundos. A água, como é sabido, é um elemento fundamental para a moderação da energia dos nêutrons rápidos de fissão, termalizando-os e com isso aumentando a probabilidade de fissão dos núcleos de Urânio-235, que é muito maior para os nêutrons de baixa energia, também chamados nêutrons térmicos. A água drenada que cai por gravidade é estocada no primeiro subsolo do reator, mais propriamente no tanque de estocagem, de onde poderá ser novamente bombeada para o tanque do moderador para uma nova operação do reator, ou para tratamento através de filtragem e controle de seu nível de condutividade pela passagem através de um vaso trocador de leito de resina mista, ou ainda para o controle de sua temperatura, fazendo a sua passagem pelos trocadores de calor aquecedores ou resfriadores.

A instrumentação nuclear utilizada no controle e segurança do reator é constituída por 10 canais nucleares, divididos por função em, 2 canais de partida (detetores BF3), 2 de potência (Câmaras de Ionização Compensadas - CIC), 2 canais lineares (Câmaras de Ionização Não Compensadas - CINC), 3 canais de segurança na faixa de potência (2 CINC e 1 detetor B-10) e 1 canal de segurança na faixa de partida (detetor BF3). Estes canais nucleares estão situados ao redor do núcleo, dentro do tanque

moderador em diversas cotas axiais, posicionados dentro de tubos de alumínio estanques à água .

A instrumentação nuclear é responsável pelo processamento dos sinais gerados nos detetores nucleares. Após o processamento, estes sinais são enviados para os indicadores de potência e de período na mesa de controle do reator e para os comparadores de sinais que fazem a lógica de proteção do reator. Existem vários valores de limiar operacional ( "set points") que constituem a rede de intertravamento dos canais nucleares. Assim, só para exemplificar, tem-se:

- Contagem mínima de 2 cps nos canais de partida e em seu respectivo canal de segurança, para habilitar a malha de partida;
- Desligamento por sobrepotência (110 mwatts) de primeiro nível para os canais de partida;
- Desligamento por sobrepotência (120 mwatts) de segundo nível para os canais de partida;
- Desligamento por sobrepotência de primeiro nível (110 watts) para os canais de potência.
- Desligamento por sobrepotência de segundo nível (120 watts) para os canais de potência.

Para se atingir a contagem mínima nos canais lineares e liberar a partida do reator é necessária a utilização de uma fonte de nêutrons de Am-Be de atividade 1 Ci e intensidade  $2,5.10^6$  nêutrons/s. Esta fonte fica armazenada no segundo subsolo do prédio do reator e durante a partida do mesmo é levada, por meio de um pequeno carrinho preso a um cabo de aço, a se posicionar na base inferior do tanque moderador, onde pode então sensibilizar os canais nucleares citados, evitando-se assim que a partida do reator se dê às cegas, ou seja, numa faixa operacional em que os detetores dos canais de partida e de segurança não estejam aptos a monitorar a taxa de crescimento da população de nêutrons.

Outros intertravamentos se fazem presentes nos canais nucleares. Talvez o mais importante seja aquele referente ao período de crescimento da população neutrônica durante a supercriticalidade do reator, situação em que a população de nêutrons cresce exponencialmente. Assim, para períodos menores ou iguais a 17 segundos ocorre o desligamento involuntário ("Scram") de primeiro nível, com a correspondente queda das 4 barras. Para períodos menores ou iguais a 14 segundos ocorre o "Scram" de segundo nível, ou seja, além da queda das quatro barras, ocorre também a abertura das válvulas para escoamento da água do tanque moderador.

Existem vários outros intertravamentos que impedem que o reator seja ligado numa condição insegura (intertravamentos de segurança), e intertravamentos que provocam o desligamento do reator (intertravamentos operacionais). Podemos citar alguns que vão desde a abertura da porta de acesso à célula crítica (saguão onde está o núcleo do reator), até condições inadequadas da água moderadora, que tanto pode ser a baixa temperatura da mesma (menor de 17 graus) ou um nível inadequado de resistividade.

Todos os sistemas citados (núcleo, tanque moderador, detetores dos canais nucleares, controle das barras, etc) estão situados dentro de um prédio estanque

mantido à pressão negativa (caso haja uma perda de estanqueidade o ar de fora é que entra), denominado de célula crítica, construído com paredes de concreto com funções de confinamento e blindagem. Um dos intertravamentos de segurança impede a partida do reator caso a pressão negativa no interior da célula crítica não atinja valores operacionais pré-estabelecidos em projeto, e o intertravamento operacional provoca o desligamento automático do reator, caso a pressão negativa diminua em sua magnitude.

De tudo o que foi apresentado de uma forma bastante resumida a respeito dos sistemas que compõem o reator nuclear IPEN/MB-01, podemos ressaltar a enorme preocupação de seus projetistas com a segurança da instalação, justificada por ser este o primeiro reator nuclear inteiramente projetado e construído no Brasil, assim como pela sua localização na Zona Oeste da cidade de São Paulo em área densamente povoada. Outro fato a ser ressaltado é a alta qualificação dos operadores da instalação, credenciados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, advinda de um profissionalismo adquirido dentro de um rígido e contínuo programa de retreinamento.

### III. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Ao longo dos 12 anos de atividade do reator, foram muitos os experimentos realizados. Dentre eles podemos citar como mais importantes, os seguintes:

- Carregamento do núcleo e previsão de criticalidade através da curva 1/M;
- Medida de níveis de radiação para testes de blindagem;
- Calibração de Potência do reator (canais lineares 5 e 6) a partir da medida do fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo por meio da ativação de folhas de ouro;
- Medidas da reatividade integral das barras de controle;
- Medida da distribuição espacial do fluxo de nêutrons rápidos e térmicos a partir da irradiação de folhas de Índio e Ouro;
- Medida do espectro de energia dos nêutrons por ativação de folhas;
- Medida do coeficiente de reatividade de temperatura;
- Medida do coeficiente de reatividade de vazio;
- Medida da curvatura do fluxo de nêutrons (“Buckling”) por ativação de folhas;
- Medida do parâmetro Beta/Lambda através da técnica de análise por ruído;
- Medida do coeficiente Alfa-Rossi;

- Medida da taxa de reação no combustível através da irradiação de folhas de Urânio em varetas combustíveis especiais desmontáveis (Parâmetros  $^{28}\rho$  e  $^{25}\delta$ );
- Medida da razão de conversão modificada ( $C^*$ ) pela técnica de varredura gama em varetas combustíveis;
- Medida da taxa de reação no combustível através da técnica de varredura gama em varetas combustíveis (Parâmetros  $^{28}\rho$  e  $^{25}\delta$ );
- Mapeamento de fluxo com câmara de fissão miniatura.
- Medida da densidade de potência no núcleo do reator pela técnica de varredura gama de varetas combustíveis;
- Calibração de potência pela técnica de análise por ruído.
- Medida do sinal de detectores posicionados fora do núcleo (“out-of-core”);

A contribuição advinda da realimentação dos parâmetros obtidos via cálculo, pelos parâmetros experimentais, resultou em mudanças nas metodologias de cálculo, bem como na utilização de novas e mais precisas bibliotecas de dados nucleares.

Um exemplo claro de melhora de metodologia de cálculo pode ser visto a partir do experimento de previsão de criticalidade. A constante de multiplicação efetiva ( $K_{ef}=1,007$ ), obtida nos primeiros cálculos realizados com os códigos Hammer-Citation, apresenta valor superestimado em 700 pcm (0,7%). Posteriormente, analisando-se os experimentos de carregamento e criticalidade, quando foram utilizadas várias metodologias de cálculo celular, constatou-se que a metodologia de cálculo que utiliza os sistemas acoplados NJOY/AMPX-II/Hammer-Technion apresenta resultados muito mais próximos da realidade fenomenológica constatada no experimento, ou seja, um  $K_{ef} = 1,00185$  com apenas 185 pcm de superestimação, ou um desvio de apenas 0,185% em relação ao valor experimental.

Outro exemplo claro de melhoria nos cálculos utilizados para o projeto de reatores a partir do conhecimento de dados experimentais medidos no reator, está na obtenção do parâmetro “coeficiente de temperatura” ( $\alpha$ iso). Inicialmente os cálculos mostravam uma discrepância na faixa de 39 a 66% em relação aos valores experimentais obtidos na faixa de temperatura variando de 20 a 80 °C . Os trabalhos realizados mostraram que as menores discrepâncias são obtidas quando da utilização de diferentes bibliotecas de dados nucleares para cada tipo de nuclídeo em questão. Assim, utilizando-se dados da biblioteca JEF-2 para o U-235, ENDF/B6 para o U-238, ENDF/B3 para S( $\alpha,\beta$ ) do H e ENDF/B4 para os demais nuclídeos, conseguiu-se reduzir essas discrepâncias para

20,6% na faixa de 20-40 °C, 14,2% na faixa de 20-80°C e a apenas 8,5% na faixa de 40-80°C.

Atualmente estão terminando os experimentos para este primeiro núcleo do reator IPEN/MB-01, caracterizado por uma distância entre varetas combustíveis (“pitch”) de 1,5 cm. Foi projetado um segundo núcleo para o reator, cuja montagem está prevista para os anos 2002/2003, em que o “pitch” será de 1,2 cm. Este novo núcleo terá um espectro neutrônico mais duro, ou seja, mais energético, pois terá uma razão combustível/moderador maior do que o primeiro e atual núcleo, simulando o fenômeno existente devido a queima de combustível. Para este segundo núcleo deverão ser refeitos boa parte dos experimentos aqui descritos.

#### **IV. CURSO DE TREINAMENTO DE OPERADORES DE REATORES**

A Marinha do Brasil vem já há algum tempo desenvolvendo um projeto para a construção do primeiro submarino nuclear com tecnologia nacional. Dentre as etapas do projeto destaca-se a necessidade de disponibilizar mão-de-obra altamente qualificada e capacitada a operar o futuro protótipo em terra de uma instalação propulsora nuclear naval denominada INAP (Instalação Nuclear a Água Pressurizada), a ser construída no Centro Experimental de Aramar (CEA) em Iperó, Estado de São Paulo. Neste sentido, foi ministrado um Curso de Formação de Operadores de Reatores Nucleares no ano de 1999, curso este que volta a ser repetido no ano de 2000. No ano passado foram formados um total de 6 operadores, sendo deste total 2 operadores Sênior. Neste ano de 2000 se prevê a formação de mais 3 operadores de reatores.

Para cumprir tal missão, foi elaborado um programa de treinamento adequado ao exame a ser aplicado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) aos candidatos a obtenção da licença de operação. O período de treinamento foi de 10 meses, correspondendo a um total de 840 horas, distribuídas em 3 módulos, descritos a seguir.

- Parte A: Teoria Básica: 240 horas (4 meses);
- Parte B: Sistemas do Reator: 360 horas (6 meses);
- Parte C: Operação do reator: 240 horas realizada simultaneamente às partes A e B;

No módulo A foi abordada toda a teoria de reatores, envolvendo desde física atômica, detecção da radiação, ciclo de nêutrons, multiplicação subcrítica, cinética de reatores, até proteção radiológica, monitoração da radiação na Instalação e controle de efluentes radioativos.

No módulo B foram abordados todos os sistemas, bem como todos os procedimentos necessários para a operação segura do reator. Assim, foram estudados os sistemas elétricos, sistemas de ar comprimido, sistemas de combate a incêndio, ponte rolante, Estruturas do núcleo, descrição de manuseio e armazenamento de varetas combustíveis, os diversos sistemas de água da Instalação, os

diversos sistemas de ventilação e ar condicionado, Instrumentação e controle do reator, sistemas de proteção e intertravamentos, especificações técnicas, análise de acidentes, plano de proteção radiológica (PER), análise de acidentes específica para o reator IPEN/MB-01, revisão de matéria, entrega de relatórios e prova simulada para licenciamento de operadores.

No módulo C, realizado simultaneamente aos módulos A e B, o candidato participou da operação do reator, inicialmente na condição de observador, sempre acompanhado pelos operadores licenciados da Instalação, e posteriormente, mediante o julgamento do Supervisor de Operação (Operador Sênior licenciado), passou à condição de operador assistente, anotando as condições operacionais do reator sentado à mesa de controle, bem como participando do preenchimento da lista de verificação inicial, ao ligar o reator, e da lista de verificação final no seu desligamento. Após o candidato ter demonstrado conhecimento e segurança adequados, o mesmo é solicitado a operar o reator em condições de partida (“start-up”), sempre acompanhado pelo Supervisor da Operação ou um Operador licenciado do reator. Finalmente, o candidato a Operador passa a participar de experimentos, tais como calibração de barras de controle, medidas de excesso de reatividade do núcleo e medidas de coeficientes de reatividade.

Com relação ao sistema de avaliações, adotou-se o critério de provas escritas mensais no módulo A. Para o módulo B, além das provas mensais, adotou-se também avaliações em campo dos vários sistemas, e relatórios mensais. No módulo C a avaliação se baseou nos relatórios dos experimentos realizados.

O aproveitamento mínimo é de 70% em cada uma das avaliações. Caso não seja atingido esse valor, o candidato é novamente reavaliado no prazo de 1 semana.

Cada candidato tem suas atividades do treinamento arquivadas e registradas em pastas individuais, bem como “Curriculum Vitae”, exames médicos, relatórios, provas, folhas de frequência, etc. Durante o curso os alunos utilizam vários documentos de referência, tais como apostilas de teoria básica, proteção radiológica, descrição e operação do reator, além de vários documentos internos da instalação e normas da CNEN.

#### **V. CONCLUSÃO**

O objetivo deste trabalho foi o de divulgar à comunidade nuclear e também a comunidade científica e acadêmica em geral, as principais atividades desenvolvidas no reator IPEN/MB-01. Evidentemente, ao longo destes anos de funcionamento da instalação, outras atividades foram desenvolvidas, tais como cursos internacionais oferecidos a entidades como a Agência Internacional de Energia Atômica, cursos de treinamento para Furnas Centrais Elétricas (atual Eletronuclear), além de experimentos para teses de mestrados e doutorado.

Existem várias outras possibilidades de utilização deste reator, tais como para cursos de graduação de Física de Reatores e Engenharia Nuclear oferecidos para universidades públicas e privadas. O reator pode ser visto

como um grande laboratório aberto a qualquer atividade científica ou acadêmica, como por exemplo, experimentos na área de aplicações médicas que se demonstrem viáveis dentro do espírito de colocar o reator IPEN/MB-01 à disposição da sociedade e dela participar ativamente, contribuindo para o desenvolvimento nacional.

### **REFERÊNCIAS**

[1] Maiorino, José Rubens e Bitelli, Ulysses d'Utra. IPEN/MB-01: Um reator nuclear projetado e construído no Brasil. Revista dos END, N. 23, 1988. Folheto IPEN 1062.

[2] Bitelli, Ulysses d'Utra. Experimentos na Fase de Comissionamento - Comparação com a Metodologia de Cálculo. Relatório Interno RELT 003.R00, Outubro de 1998.

[3] Coelho, Paulo Rogério Pinto et al. Determinação da Massa Crítica e Aproximação da Criticalidade do Reator IPEN/MB-01. VII ENFIR, Recife, Pernambuco, 1989.

[4] Pasqualetto, Hertz. Programa de Treinamento para Operadores de Reatores. Relatório Interno CTM-SP, 1999.

### **ABSTRACT**

This work describes the main experiments and the training courses that have been made during the last twelve years. From 1988 to 2000 more than 1200 operations were developed for measurements of reactor physics parameters and training purposes.