

# **REATORES NUCLEARES DE PESQUISA**

## A – Introdução

Os reatores nucleares podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios: a) energia cinética dos nêutrons em que ocorre a maior parte das fissões, b) material fissil presente em meio ao combustível nuclear, c) configuração do conjunto combustível nuclear + moderador, d) tipo de moderador, e) tipo de refrigerante, f) finalidade a que se destinam. Dentre todos esses critérios, o principal é aquele referente à finalidade a que se destinam os reatores nucleares. Adotando-se este critério de classificação, os reatores nucleares podem ser agrupados em dois tipos principais: os reatores nucleares de pesquisa e os reatores nucleares de potência.

Os reatores nucleares de potência são projetados com a finalidade de gerar energia elétrica, enquanto os reatores nucleares de pesquisa servem como fontes de nêutrons e raios-gama para propósitos diversos, que abrangem desde experimentos em física nuclear básica até irradiações para produção de radioisótopos utilizados em atividades industriais, agrícolas e medicinais.

Ao longo deste capítulo serão estudadas as características e usos principais dos reatores nucleares de pesquisa, com destaque para as instalações desse gênero existentes no âmbito do IPEN/CNEN-SP.

## B – Breve histórico dos reatores nucleares de pesquisa

Os reatores nucleares de pesquisa servem como fontes de nêutrons e raios-gama para propósitos experimentais diversos. A potência térmica desse tipo de reator nuclear geralmente perfaz entre 10 kW e alguns poucos MW. Quando utilizados para a produção de radioisótopos, a potência térmica desses reatores nucleares pode atingir até 30 MW.

A denominação dada aos reatores nucleares de pesquisa varia de acordo com o propósito a que se destina o fluxo de nêutrons deles proveniente. Os *reatores nucleares para teste de materiais* fornecem um fluxo alto de nêutrons rápidos, permitindo estudar o comportamento sob irradiação apresentado por materiais utilizados em reatores nucleares. Os *reatores nucleares para produção de radioisótopos* destinam-se à produção de isótopos radioativos utilizados em atividades industriais, medicinais e agrícolas. Os *reatores nucleares* denominados *conjuntos críticos* ou *unidades críticas* são utilizados principalmente para estudar as propriedades neutrônicas de um arranjo fissil a baixa potência ( $P < 1$  kW). Os *reatores nucleares protótipo* são reatores nucleares de potência baixa que servem como protótipo para reatores nucleares de potência elevada.

O primeiro reator nuclear do mundo, um conjunto crítico, atingiu a criticalidade no dia 02 de Dezembro de 1942. O “Chicago Pile 1” (CP-1), como foi denominado, era constituído por blocos de grafite empilhados (9 m de largura, 9,5 m de comprimento, 6 m de altura, totalizando 1350 toneladas de grafite), com urânio natural metálico sob a forma de barras inserido internamente (52 toneladas) e controlado por folhas de cádmio metálico.

A grande maioria dos reatores nucleares de pesquisa iniciou suas operações entre meados da década de 50 e início da década de 60. Em Abril de 2020, havia no mundo

220 reatores nucleares de pesquisa em operação em 53 países, conforme informações da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

O primeiro reator nuclear de pesquisa brasileiro, denominado IEA-R1, foi instalado no antigo Instituto de Energia Atômica (IEA), hoje Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), situado no Município de São Paulo. Esse reator foi projetado e construído pela empresa estadunidense Babcock & Wilcox Co., de acordo com as especificações fornecidas pela Comissão de Energia Atômica dos EUA. A criticalidade inicial, a primeira do hemisfério sul, foi atingida no dia 16 de Setembro de 1957. Esse reator nuclear é do tipo piscina e, na época da inauguração, era previsto que o mesmo viesse a operar na potência de 5 MW. Entretanto, até Setembro de 1997, o reator nuclear IEA-R1 operou quase sempre apenas a 2 MW, quando foram concluídas diversas reformas que o capacitaram para efetivamente operar a 5 MW.

O segundo reator nuclear de pesquisa brasileiro foi um reator nuclear tipo Triga (IPR-R1) de 100 kW construído pela empresa estadunidense General Atomics para o Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), hoje denominado Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN-MG), situado no Município de Belo Horizonte. Esse reator nuclear iniciou sua operação no dia 11 de Outubro de 1960.

O terceiro reator nuclear de pesquisa brasileiro foi instalado no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN-RJ), situado no Município do Rio de Janeiro. O reator nuclear Argonauta foi construído por técnicos brasileiros que modificaram e adaptaram o projeto estadunidense original, tendo atingido a criticalidade pela primeira vez no dia 20 de Fevereiro de 1965.

No dia 09 de Novembro de 1988 atingiu pela primeira vez criticalidade o quarto reator nuclear de pesquisa brasileiro, denominado IPEN/MB-01, um conjunto crítico projetado e construído inteiramente com tecnologia nacional, resultante da cooperação técnica e científica entre o IPEN/CNEN-SP e a Marinha do Brasil (por meio do atual Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - CTMSP). O IPEN/MB-01 constitui, portanto, o segundo reator nuclear de pesquisa instalado no IPEN/CNEN-SP.

## C – Classificação dos reatores nucleares de pesquisa

Os principais reatores nucleares de pesquisa desenvolvidos no mundo podem ser classificados segundo as características de projeto que apresentam, permitindo distinguir os seguintes tipos: a) homogêneo líquido, b) tanque, c) piscina, d) conjunto crítico seco, e) conjunto crítico tipo tanque, f) conjunto crítico homogêneo, g) Argonauta, h) Triga, i) grafite, j) água pesada, k) alto fluxo neutrônico.

Convém destacar que essa classificação não é estanque, porque diversas características de um tipo de reator nuclear se confundem com as de outro tipo, de maneira que, normalmente, um tipo de reator nuclear se caracteriza pelo detalhe de projeto e instalações experimentais. Entretanto, uma característica comum a quase todos os reatores nucleares de pesquisa de qualquer tipo consiste na não utilização do calor removido do cerne do reator nuclear.

Em seguida, são descritas em linhas gerais as características principais de alguns tipos de reatores de pesquisa mais importantes.

### C.1 – Reatores nucleares tipo piscina

Este tipo de reator nuclear de pesquisa é o mais utilizado em todo mundo, sendo frequentemente denominado reator tipo MTR (sigla para “Materials Testing Reactor”). Apresenta como característica principal o fato do cerne do reator nuclear estar imerso em uma piscina ou tanque contendo água desmineralizada. Trata-se de um reator nuclear heterogêneo, pois o combustível nuclear e o moderador estão separados fisicamente. O combustível nuclear é formado por placas agrupadas em elementos combustíveis, sendo o revestimento de cada placa feito de alumínio. No cerne de cada placa está localizado o material combustível propriamente dito, constituído por uma liga metálica de urânio-alumínio (U-Al) ou por um composto de urânio (geralmente  $U_3O_8$  ou  $U_3Si_2$ ) disperso em matriz de alumínio. Nesses combustíveis, o grau de enriquecimento do urânio em  $^{235}U$  pode ser alto (aproximadamente 93%, tipo HEU, atualmente em desuso) ou baixo (cerca de 20%, tipo LEU). O reator nuclear IEA-R1 se enquadra neste grupo de reatores e será descrito à parte.

### C.2 – Reatores nucleares moderados a grafite

O primeiro reator nuclear construído no mundo, o CP-1 (“Chicago Pile 1”), foi um reator deste tipo, e as primeiras instalações destinadas à produção de plutônio também utilizaram este tipo de reator nuclear. Esses reatores nucleares se caracterizam principalmente pelo grande tamanho quando utilizam urânio natural (o que implica em alto custo), apresentando baixa densidade de potência. Possui a vantagem de possibilitar a realização simultânea de vários experimentos, devido ao seu grande tamanho. O combustível nuclear desse tipo de reator nuclear é o urânio natural metálico. A estrutura do reator é constituída por blocos de grafite sobrepostos, que formam um cubo com aproximadamente 6 m de aresta, sem incluir blindagem. A região central dessa estrutura é preenchida com barras de urânio natural metálico para formar o cerne do reator. Para atingir a massa crítica, esse sistema requer o uso de aproximadamente 30 toneladas de urânio natural metálico. O reator é refrigerado a gás, empregando-se  $CO_2$  ou ar atmosférico como refrigerante. A blindagem biológica desse tipo de reator é formada por grandes volumes de concreto com alta densidade.

### C.3 – Reatores nucleares Triga

Triga é uma sigla utilizada para designar “Training, Research, Isotopes, General Atomics”. Esse tipo de reator nuclear foi desenvolvido pela empresa estadunidense General Atomics, tendo entrado em operação pela primeira vez em 1958. Atualmente, é um dos mais utilizados em todo mundo. Há três modelos disponíveis (Mark I, II e III).

A característica principal deste tipo de reator nuclear é o fato do cerne estar imerso em um tanque de alumínio, cheio de água desmineralizada, com 2 m de diâmetro, localizado abaixo do nível do solo a 7 m de profundidade. Os elementos combustíveis têm formato cilíndrico, com o revestimento feito de aço inoxidável ou alumínio, possuindo 3,73 cm de diâmetro e 73 cm de comprimento. A parte ativa (ocupada pelo combustível nuclear) possui 35,6 cm de altura e 3,61 cm de diâmetro, sendo o restante do elemento preenchido por tarugos de grafite, colocados acima e abaixo da parte ativa para servir como refletor de topo e de fundo. Entre esses refletores de grafite e a parte ativa do elemento combustível existem camadas finas de trióxido de samário ( $Sm_2O_3$ ) que funcionam como veneno queimável.

O combustível nuclear desse tipo de reator é hidreto de urânio e zircônio (UZrH), contendo urânio enriquecido em  $^{235}\text{U}$  a 20%. Cada elemento combustível contém 38 g de  $^{235}\text{U}$ . Os átomos de hidrogênio presentes no combustível nuclear são os principais moderadores de nêutrons nesse tipo de reator. A blindagem biológica é constituída, na parte superior, pela água acima do núcleo e, na parte lateral, pela água do tanque (que também tem a função de refrigerante e moderador), pelo concreto que circunda o tanque e pelo próprio solo.

No que se refere às instalações experimentais, os dispositivos de irradiação anexos a este tipo de reator nuclear incluem um tubo central experimental, preenchido com água, que permite a irradiação de amostras sob um fluxo de nêutrons térmicos que perfaz aproximadamente  $5.10^{12}$  nêutrons/cm<sup>2</sup>s. Tais dispositivos são também equipados com sistemas pneumáticos que permitem a introdução e a retirada rápida (em menos de 30 segundos) de amostras do cerne para um terminal remoto, situado a cerca de 30 m de distância. Trata-se de um reator nuclear bastante seguro, pois os coeficientes de reatividade devidos à temperatura apresentam valores negativos elevados.

Em geral, os reatores nucleares Triga apresentam potência baixa na operação em estado estacionário. O Triga Mark - I opera a 250 kW, mesma potência máxima atual do reator nuclear IPR-R1. As três barras de controle são feitas de carbeto de boro ( $\text{B}_4\text{C}$ ), tendo aproximadamente 3,2 cm de diâmetro e 30 cm de comprimento cada, revestidas por aço inoxidável ou alumínio. O mecanismo de acionamento das barras de controle, situado no topo do tanque, é do tipo magneto, possibilitando que o tempo de desligamento do reator nuclear seja menor que dois segundos. Na Figura 1 é mostrada a configuração do cerne do reator nuclear IPR-R1. O cerne do reator nuclear IPR-R1 possui atualmente um total de 63 elementos combustíveis com revestimento de alumínio.

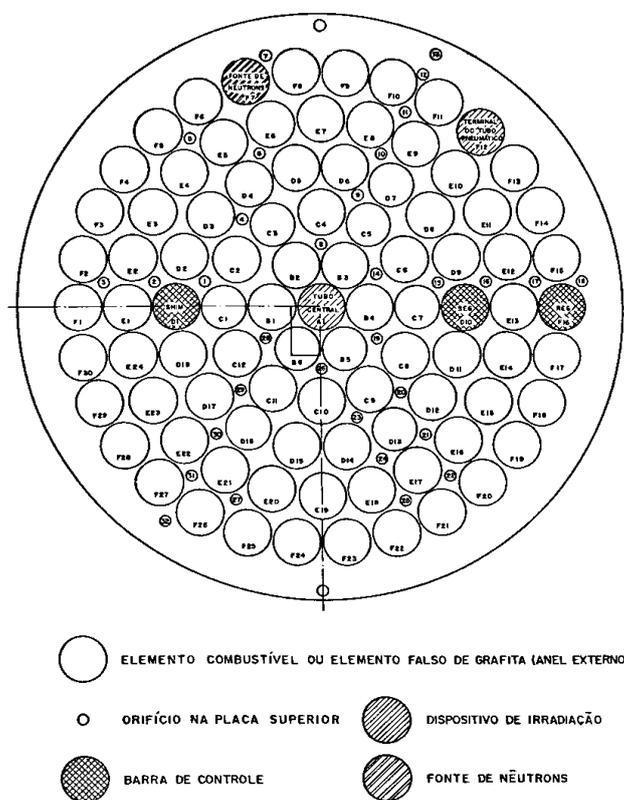


Figura 1 – Configuração do cerne do reator nuclear IPR-R1.

#### C.4 – Reatores nucleares Argonauta

O reator nuclear tipo Argonauta, sigla para “Argonne Nuclear Assembly for University Training”, entrou em operação pela primeira vez em 1957 no Laboratório Nacional de Argonne (EUA), para ser um reator nuclear de baixo custo e servir principalmente para treinamento e experimentos em universidades. O Argonauta foi originalmente projetado para operar a potências de até 10 kW. Posteriormente, vários reatores deste tipo tiveram a potência de operação máxima aumentada para 100 kW.

Para descrever as características principais do reator nuclear Argonauta, será tomado como base o reator nuclear existente no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN-RJ).

O reator nuclear é constituído por dois cilindros de alumínio instalados concêntricamente, de modo a formar um anel cilíndrico. O cilindro de menor diâmetro é preenchido com grafite, sendo denominado como coluna térmica interna. O anel formado entre os dois cilindros se encontra imerso em água desmineralizada e nele estão localizados os elementos combustíveis.

A distribuição dos elementos combustíveis é bastante flexível, sendo quatro as maneiras mais usuais: a) carga unilateral – elementos posicionados em apenas um segmento de anel; b) carga bilateral – elementos posicionados em dois segmentos iguais e simétricos do anel; c) carga uniforme – elementos posicionados uniformemente em todo o anel; d) carga alternada – elementos agrupados dois a dois e formando seis conjuntos distribuídos simetricamente. O fluxo médio de nêutrons e a massa crítica variam bastante com a distribuição adotada.

Os elementos combustíveis do reator nuclear são fabricados no IPEN/CNEN-SP. Atualmente há três tipos de elemento combustível em uso nesse reator nuclear, todos contendo placas planas com revestimento de alumínio: a) 4 elementos, cada um contendo 17 placas com 21 g de  $^{235}\text{U}$  por placa; b) 2 elementos, cada um contendo 11 placas com 21 g de  $^{235}\text{U}$  por placa mais 6 placas com 9,84 g de  $^{235}\text{U}$  por placa; c) 2 elementos, cada um contendo 7 placas com 9,84 g de  $^{235}\text{U}$  por placa mais meio prisma de grafite. O conjunto de placas que constitui um elemento combustível é fixado por meio de dois pinos que as atravessam, próximos às extremidades, mantendo um espaçamento de 6,77 mm entre elas. Os elementos podem ser desmontados e placas falsas (feitas só de alumínio) podem ser colocadas no lugar das placas combustíveis. Cada placa combustível possui aproximadamente 7,25 cm de largura e 61,0 cm de comprimento, tendo espessuras de 0,243 cm (placas com 21 g de  $^{235}\text{U}$ ) ou de 0,182 cm (placas com 9,84 g de  $^{235}\text{U}$ ). As placas combustíveis são todas numeradas, mantendo-se em arquivo um catálogo com as características de cada uma delas e sua distribuição nos diversos elementos.

O combustível nuclear empregado no reator é  $\text{U}_3\text{O}_8$  disperso em matriz de alumínio, com urânio enriquecido em  $^{235}\text{U}$  a 19,91%. A massa crítica atual do reator nuclear totaliza aproximadamente 2,1 kg de  $^{235}\text{U}$ .

O cerne central anular do reator nuclear é envolvido por blocos de grafite empilhados e possui uma região de maior comprimento, denominada coluna térmica externa, contendo várias gavetas para introdução de amostras.

Na Figura 2 é mostrada a configuração do cerne do reator nuclear. Nessa configuração, a grafite funciona como moderador e refletor de nêutrons, enquanto a água serve como moderador de nêutrons e refrigerante do cerne do reator nuclear.

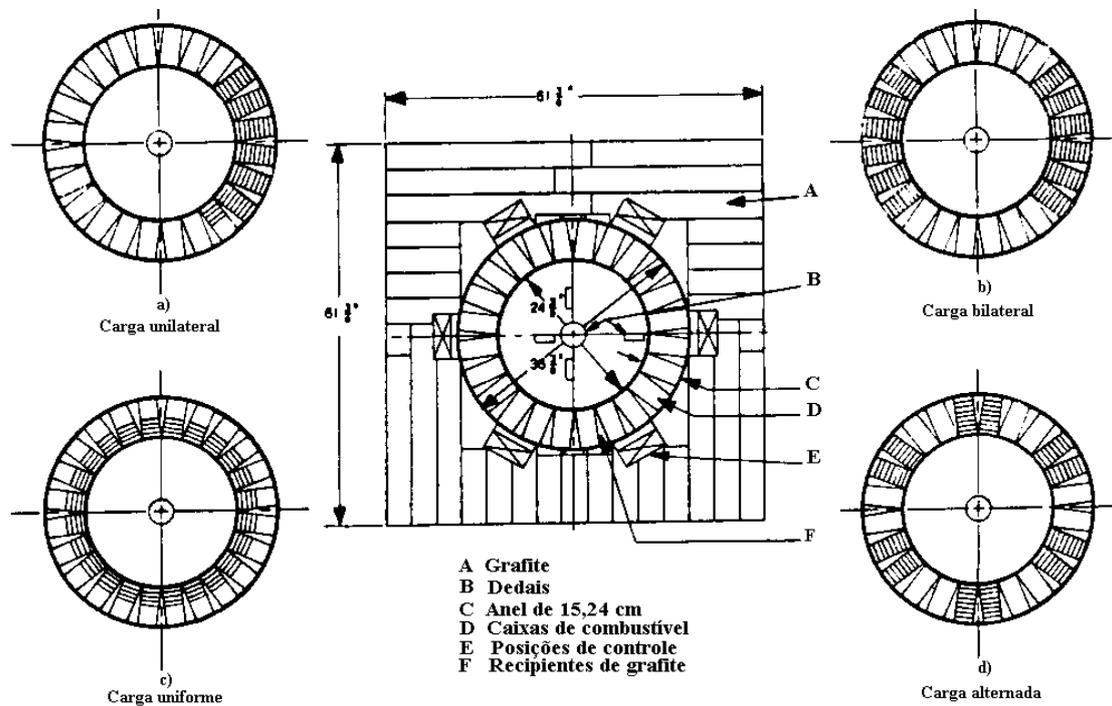


Figura 2 – Configuração do cerne do reator nuclear Argonauta.

Todo o conjunto acima descrito é envolvido por uma blindagem biológica de concreto.

Apesar da potência máxima nominal de projeto do reator nuclear ser 5 kW, o mesmo opera a baixa potência, usualmente 170 W ou 340 W, sendo a potência máxima licenciada para uma operação contínua igual a 500 W. O fluxo máximo de nêutrons térmicos no cerne do reator nuclear perfaz  $10^9$  nêutrons/cm<sup>2</sup>.s.

O controle do reator nuclear é feito por intermédio de seis barras, constituídas por placas de cádmio metálico revestidas com alumínio, sendo três utilizadas como barras de segurança e três utilizadas como barras de controle. As barras se deslocam verticalmente dentro de canais existentes na grafite refletora, situados paralelamente à geratriz do cilindro maior, no entorno do cerne.

Adicionalmente, o controle do reator nuclear pode ser feito mediante drenagem da água e também por borbulhamento de nitrogênio para induzir vazios na água, o que introduz reatividade negativa no cerne. Esse reator nuclear apresenta coeficiente de reatividade negativo, tanto de temperatura como de vazios, característica que o torna inerentemente seguro.

O reator nuclear é utilizado para pesquisa em física de reatores nucleares, irradiação de amostras, ensaios não destrutivos (principalmente neutrografia), teste de materiais e treinamento de pessoal.

## C.5 – Conjuntos críticos

Esse tipo de reator nuclear constitui um laboratório para a montagem segura e eficiente de sistemas de reação de fissão nuclear em cadeia auto-sustentada com baixa potência (da ordem de alguns Watts), enfatizando-se a flexibilidade em se realizar mudanças experimentais. A função principal dessas instalações é permitir estudos das características neutrônicas para diferentes composições e configurações de cerne de reatores nucleares de potência, mediante simulações em escala de muito baixa potência. Esse tipo de reator é também conhecido pela denominação de “mock-up”. Pelo fato de operarem à temperatura ambiente e potência muito baixa, esses reatores não necessitam de sistemas de refrigeração.

Existem dois tipos de conjunto crítico: os secos e os tipo tanque. Os conjuntos críticos secos são empregados no estudo de reatores nucleares refrigerados a gás, sendo construídos em forma de mesa partida, ou seja, o arranjo crítico é dividido em duas partes que se tornam críticas quando juntas. O primeiro arranjo deste tipo foi o conjunto crítico denominado Jezebel, formado por uma esfera metálica de plutônio subdividida em duas semiesferas, destinado ao estudo da massa crítica do plutônio metálico. Um conjunto análogo utilizando  $^{235}\text{U}$  metálico puro foi denominado Godiva.

Os conjuntos críticos tipo tanque têm sido utilizados como simulador neutrônico de reatores nucleares de potência moderados e refrigerados a água ou a água pesada. Nesse caso, o cerne a ser estudado é montado dentro de um tanque na configuração pretendida, sendo esse tanque posteriormente completado com o moderador (água ou água pesada). O controle de reatividade nesse tipo de reator nuclear é geralmente efetuado por meio de barras de controle e por drenagem do fluido moderador.

No Brasil, o conjunto crítico tipo tanque é a unidade crítica IPEN/MB-01, com potência máxima de 100 W, localizado nas dependências do IPEN/CNEN-SP. Em toda a história operacional da unidade crítica IPEN/MB-01, dois cerne diferentes foram utilizados, demonstrando a grande versatilidade desse tipo de reator nuclear. Ao longo das três primeiras décadas de operação da unidade crítica IPEN/MB-01, entre 1988 e 2018, foi utilizado o cerne tipo vareta. A partir de 2020, passou a ser utilizado o cerne tipo placa na unidade crítica IPEN/MB-01. Uma descrição sumária desses cerne e da finalidade de sua utilização é apresentada a seguir.

### C.5.1 – Cerne tipo vareta da unidade crítica IPEN/MB-01

O moderador utilizado no cerne tipo vareta é água desmineralizada. O cerne do reator nuclear, contido em um tanque de aço inoxidável com dimensões ativas de 39 cm x 42 cm x 54,6 cm, é composto por um arranjo de 28 x 26 varetas cilíndricas, das quais 680 são varetas combustíveis, 24 são barras de controle e 24 são barras de segurança. Cada vareta combustível é constituída por um tubo de aço inoxidável AISI-304 com comprimento total de 1,19 m e diâmetro externo de 9,8 mm, fechado nas extremidades e pressurizado, que contém em seu interior 52 pastilhas cilíndricas de dióxido de urânio ( $\text{UO}_2$ ) com enriquecimento em  $^{235}\text{U}$  igual a 4,3%. Os 48 tubos guias para as barras de controle e segurança estão dispostos em 4 grupos, cada um deles contendo 12 barras, sendo 2 grupos de barras de segurança e 2 grupos de barras de controle. Cada grupo está posicionado em um quadrante do cerne do reator nuclear. As barras de controle e de segurança têm as mesmas dimensões das varetas combustíveis, sendo revestidas com

aço inoxidável AISI-304. As barras de controle são feitas de uma liga de prata-índio-cádmio (Ag-In-Cd, na proporção respectivamente de 80%-15%-5%), enquanto as barras de segurança são feitas de carbeto de boro ( $B_4C$ ).

O cerne tipo vareta da unidade crítica IPEN/MB-01 teve como objetivo construir e testar um cerne típico para uso em propulsão naval de submarinos, ou seja, no qual o controle de reatividade fosse efetuado a partir da inserção ou da retirada de barras de controle, contrariando o modelo de muitos conjuntos críticos, em que o controle se dá pelo nível de fluido moderador no tanque. O controle de reatividade mediante o uso de barras de controle é típico de reatores nucleares navais, projetados para proporcionar rápidas variações de potência, a fim de se empreenderem manobras de fuga ou de perseguição.

#### C.5.2 – Cerne tipo placa da unidade crítica IPEN/MB-01

O moderador utilizado no cerne tipo placa é água desmineralizada. O cerne do reator nuclear, contido em um tanque de aço inoxidável com dimensões ativas de 32,50 cm x 45,25 cm x 61,50 cm, é composto por um arranjo de 4 x 5 posições prismáticas retangulares iguais, das quais 19 são ocupadas por elementos combustíveis tipo placa e 1 é ocupada por um bloco de alumínio maciço. Posicionadas lateralmente em torno do cerne, quatro caixas preenchidas totalmente com água pesada ( $D_2O$ ) constituem os refletores. Nessa configuração, o controle do reator nuclear é efetuado mediante quatro barras absorvedoras de nêutrons, sendo que uma é utilizada em função de controle e as outras três são empregadas como barras de segurança.

Todos os 19 elementos combustíveis contidos no cerne são do tipo MTR (sigla para “Materials Testing Reactor”). Compõem-se de 21 placas combustíveis planas paralelas cada um, montadas mecanicamente em dois suportes laterais de alumínio com ranhuras, os quais mantêm a sustentação e o paralelismo entre as placas combustíveis. Tanto a primeira quanto a última placa de cada elemento combustível são denominadas placas externas e a diferença em relação às outras 19 placas internas consiste no fato de que naquelas a moldura tem bordas superiores e inferiores maiores e o revestimento é mais espesso. As dimensões externas de cada elemento combustível perfazem (8,05 cm x 8,05 cm) por 104,50 cm de altura.

As placas combustíveis contêm um cerne, onde está localizado o combustível nuclear propriamente dito, revestido por duas camadas de alumínio. As dimensões de cada placa combustível externa são (0,150 cm x 7,50 cm) por 82,50 cm de altura, enquanto as dimensões de cada placa combustível interna são (0,135 cm x 7,50 cm) por 65,50 cm de altura. A distância entre duas placas combustíveis sucessivas em um mesmo elemento combustível perfaz 0,245 cm. A espessura do cerne de cada placa combustível é igual a 0,061 cm.

O combustível nuclear presente no cerne de cada placa combustível é fabricado no IPEN/CNEN-SP e consiste em  $U_3Si_2$  disperso em matriz de alumínio, contendo 2,80 gU/cm<sup>3</sup>, com grau de enriquecimento do urânio em  $^{235}U$  igual a 19,75%.

No fundo das ranhuras de cada suporte lateral de alumínio são fixados, de modo alternado, 11 fios metálicos de cádmio (Cd) em canaletas menores, totalizando 22 fios por elemento combustível, que funcionam como veneno queimável para o controle da

densidade de potência do núcleo e do excesso de reatividade ao longo do tempo de vida do elemento combustível. Cada fio metálico de cádmio possui diâmetro igual a 0,04215 cm e comprimento igual a 40,0 cm. O cádmio foi empregado como veneno queimável por causa da elevada seção de choque para absorção de nêutron térmico (~20 mil b) exibida pelo  $^{113}\text{Cd}$  (isótopo que constitui 12,22% do cádmio natural).

O bloco de alumínio presente entre os elementos combustíveis representa os irradiadores de materiais nas posições internas do cerne tipo placa do reator nuclear IPEN/MB-01. Esse bloco é feito de alumínio puro maciço e tem a forma de um prisma retangular com dimensões iguais a 8,05 cm de espessura, 8,05 cm de largura e 83,50 cm de altura. Na extremidade inferior desse bloco há um bocal para possibilitar o encaixe na placa matriz.

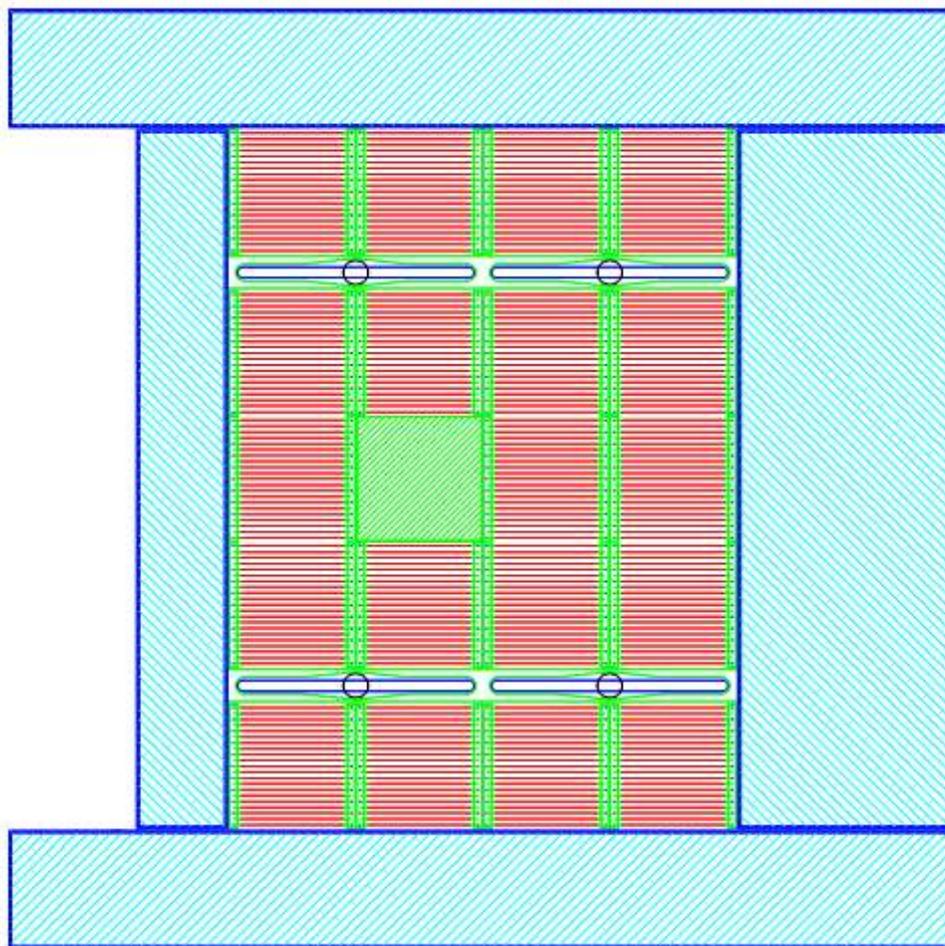
Os refletores do reator nuclear IPEN/MB-01 são quatro caixas feitas de alumínio, com espessura de 0,3 cm, preenchidas com água pesada ( $\text{D}_2\text{O}$ ) e posicionadas nas laterais da parte ativa do cerne do reator nuclear. Os volumes das caixas de água pesada foram definidos tendo como critério a disponibilidade de espaço no cerne do reator nuclear. As caixas de água pesada foram construídas com uma altura 0,5 cm maior nas partes superiores e inferiores do que a altura ativa do cerne do reator nuclear, conferindo aos refletores simetria axial em relação ao cerne. As dimensões das caixas de água pesada posicionadas nas laterais superior e inferior do cerne são 7,625 cm de espessura, 60,80 cm de largura e 62,00 cm de altura. As dimensões da caixa de água pesada posicionada na lateral direita do cerne são 14,00 cm de espessura, 45,25 cm de largura e 62,00 cm de altura. As dimensões da caixa de água pesada posicionada na lateral esquerda do cerne são 5,80 cm de espessura, 45,25 cm de largura e 62,00 cm de altura. A caixa de água pesada posicionada na lateral esquerda do cerne foi construída com volume menor para que seja possível efetuar experimentos de rampa de potência.

O reator nuclear IPEN/MB-01 possui quatro barras absorvedoras de nêutrons metálicas idênticas, feitas de háfnio (Hf), sendo três barras segurança e uma de controle. Cada barra absorvedora de nêutrons tem o formato de uma placa com 0,70 cm de espessura, 15,20 cm de largura e 63,50 cm de altura. O movimento vertical de cada barra absorvedora de nêutrons ocorre dentro de uma coluna guia de alumínio, fixada na placa matriz, sendo acionado por meio de uma haste guia, a qual é fixada diretamente acima da barra. Quando essas barras estão totalmente inseridas no cerne do reator nuclear, elas ficam 1,0 cm abaixo da parte ativa.

O cerne tipo placa do reator nuclear IPEN/MB-01 foi proposto, prioritariamente, com a finalidade de prover embasamento experimental para a validação dos métodos de cálculo neutrônico utilizados no projeto do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), iniciado em 2008 visando construir no Brasil um reator nuclear de alto fluxo neutrônico.

Secundariamente, o cerne tipo placa do reator nuclear IPEN/MB-01 pode ser utilizado para simular reatores moderados a água, possibilitando a verificação experimental dos métodos de cálculo, da efetividade de barras de controle e da resposta do cerne do reator nuclear a inserções de reatividade.

Na Figura 3 é mostrada esquematicamente a configuração do cerne tipo placa do reator nuclear IPEN/MB-01.



### LEGENDA

	<b>Elemento Combustível</b>		<b>Caixa de Água Pesada</b>
	<b>Bloco de Alumínio</b>		<b>Barra Absorvedora de Nêutrons feita de Háfnio</b>

Figura 3 – Diagrama esquemático da configuração do cerne tipo placa do reator nuclear IPEN/MB-01.

#### C.6 – Reatores nucleares de alto fluxo neutrônico

Este tipo de reator nuclear é destinado principalmente à pesquisa do desempenho de materiais sob irradiação, utilizando para tanto um fluxo de nêutrons elevado (em geral maior que  $10^{14}$  nêutrons/cm<sup>2</sup>.s). Exemplos são os reatores RHF (França), BR-2 (Bélgica), HFR (Holanda), FRM II (Alemanha), HFIR (EUA), HANARO (Coreia do Sul) e OPAL (Austrália).

Desde 2008 encontra-se em desenvolvimento no Brasil o projeto do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), cuja finalidade consiste em construir um reator nuclear de alto fluxo neutrônico com laboratórios anexos, que será destinado tanto à pesquisa científica quanto à auto-suficiência nacional na produção de radioisótopos para uso medicinal, industrial e agrícola.

## D – Reator nuclear IEA-R1

O IEA-R1, um reator nuclear de pesquisa do tipo piscina aberta, foi projetado e construído pela empresa estadunidense Babcock & Wilcox Co., de acordo com as especificações fornecidas pela Comissão de Energia Atômica dos EUA.

O edifício do reator nuclear IEA-R1 está localizado nas dependências do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), na Cidade Universitária, em São Paulo. O reator nuclear é propriedade da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) e está sob a guarda do IPEN.

A primeira criticalidade desse reator nuclear foi atingida no dia 16 de Setembro de 1957, e desde então o mesmo vem sendo utilizado extensivamente na produção de radioisótopos, em análise de materiais por ativação, em experimentos científicos que utilizam tubos de irradiação e no treinamento de pessoal, atendendo a demandas de todas as áreas do IPEN/CNEN-SP e também a solicitações externas.

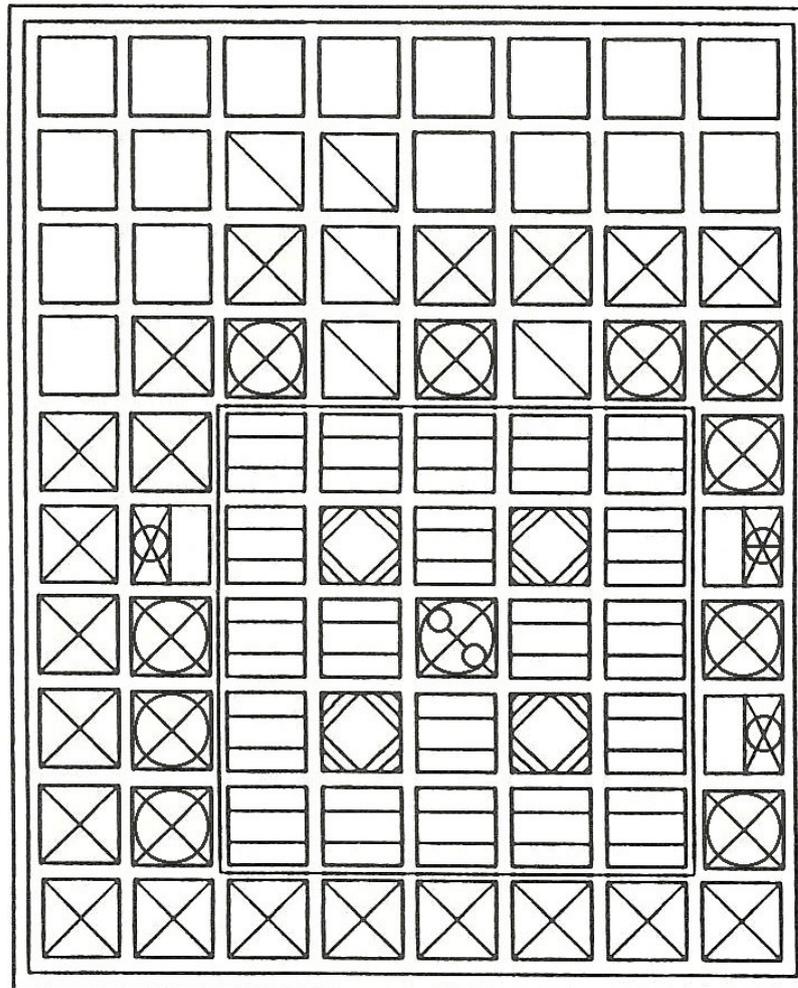
Apesar de ter seu cerne projetado para 5 MW, até 1961 não havia um regime definido de operação para o reator nuclear IEA-R1 e a potência variou entre 200 kW e 2 MW. A partir de 1961, o reator nuclear passou a operar a uma potência definida de 2 MW. Entre 1971 e 1991, várias modificações foram sendo introduzidas no reator nuclear para adequar as suas instalações a normas de segurança mais recentes. Em 1995, o IPEN/CNEN-SP decidiu capacitar o reator nuclear IEA-R1 para operar a 5 MW, sua potência nominal de projeto. O reator nuclear passou então por diversas reformas e modernizações que, concluídas em Setembro de 1997, permitiram aumentar a potência máxima de operação para 5 MW.

O cerne do reator nuclear tem a forma de um paralelepípedo, sendo composto por elementos combustíveis e refletores encaixados verticalmente em furos existentes na placa matriz, que se encontra suspensa por uma estrutura de alumínio. A placa matriz possui um total de 80 furos, dispostos segundo um arranjo 8 x 10. As dimensões da placa matriz são 82,86 cm x 63,97 cm x 11,43 cm.

A configuração atual do cerne inclui um total de 24 elementos combustíveis, posicionados segundo um arranjo 5 x 5. A posição central do arranjo não é ocupada por um elemento combustível, mas sim por um elemento de irradiação feito de berílio (designado pela sigla EIBE).

Dentre os 24 elementos combustíveis, 4 são elementos especiais, projetados para permitir a inserção das barras de controle, sendo por esse motivo denominados elementos combustíveis de controle. Cada elemento combustível de controle possui um total de 12 placas combustíveis planas paralelas. Os outros 20 elementos combustíveis, denominados elementos combustíveis padrão, são do tipo MTR (sigla para “Materials Testing Reactor”). Compõem-se de 18 placas combustíveis planas paralelas cada um, montadas mecanicamente em dois suportes laterais de alumínio com ranhuras, os quais mantêm tanto a sustentação quanto o paralelismo entre as placas combustíveis. As dimensões externas de cada elemento combustível perfazem (7,6 cm x 8,0 cm) por 88,0 cm de altura.

Na Figura 4 é ilustrada a configuração típica do cerne do reator nuclear IEA-R1.



**LEGENDA**

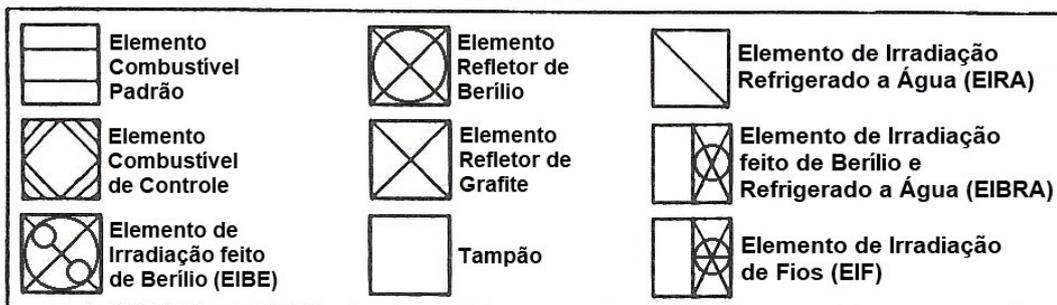


Figura 4 – Diagrama esquemático da configuração típica do cerne do reator nuclear IEA-R1.

Na Figura 5 é mostrada a seção longitudinal de um elemento combustível padrão e a estrutura de duas placas combustíveis sucessivas desse elemento.

As placas combustíveis contêm um cerne, onde está localizado o combustível nuclear propriamente dito, revestido por duas camadas de alumínio. A espessura de cada placa combustível totaliza 0,152 cm, enquanto que a distância entre duas placas combustíveis sucessivas em um mesmo elemento combustível perfaz 0,289 cm. A espessura do cerne depende do tipo de combustível nuclear utilizado, sendo atualmente igual a 0,076 cm.

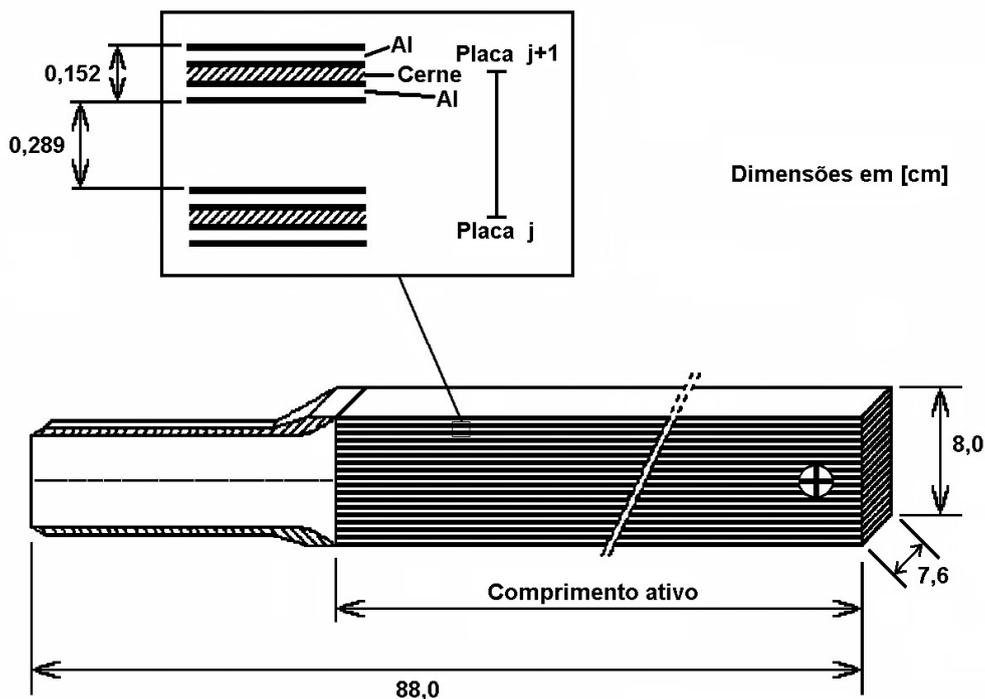


Figura 5 – Seção longitudinal de um elemento combustível padrão utilizado no reator nuclear IEA-R1, mostrando em detalhe a estrutura de duas placas combustíveis sucessivas desse elemento.

Ao longo dos 63 anos de operação do reator nuclear IEA-R1, foram usados os seguintes tipos de combustível nuclear:

- a) Liga U-Al contendo  $1,8 \text{ gU/cm}^3$ , na qual o urânio apresenta 20% de enriquecimento em  $^{235}\text{U}$ , fabricado nos EUA, utilizado entre 1957 e 1976;
- b) Liga U-Al contendo  $0,6 \text{ gU/cm}^3$ , na qual o urânio apresenta 93,15% de enriquecimento em  $^{235}\text{U}$ , fabricado principalmente nos EUA, mas também na França, utilizado entre 1968 e 1997;
- c)  $\text{UAl}_X$  (onde  $X = 2 - 4$ ) disperso em matriz de alumínio, contendo  $1,9 \text{ gU/cm}^3$ , com grau de enriquecimento do urânio em  $^{235}\text{U}$  igual a 20%, fabricado na Alemanha, utilizado entre 1981 e 1996;
- d)  $\text{U}_3\text{O}_8$  disperso em matriz de alumínio, contendo  $1,9 \text{ gU/cm}^3$ , com grau de enriquecimento do urânio em  $^{235}\text{U}$  igual a 19,75%, fabricado no IPEN/CNEN-SP, utilizado entre 1988 e 2004;
- e)  $\text{U}_3\text{O}_8$  disperso em matriz de alumínio, contendo  $2,3 \text{ gU/cm}^3$ , com grau de enriquecimento do urânio em  $^{235}\text{U}$  igual a 19,75%, fabricado no IPEN/CNEN-SP, utilizado entre 1996 e 2014;
- f)  $\text{U}_3\text{Si}_2$  disperso em matriz de alumínio, contendo  $3,0 \text{ gU/cm}^3$ , com grau de enriquecimento do urânio em  $^{235}\text{U}$  igual a 19,75%, fabricado no IPEN/CNEN-SP, utilizado desde 1999.

Cabe destacar que, desde Setembro de 1997, opera-se o reator nuclear IEA-R1 utilizando exclusivamente combustíveis nucleares nacionais, dos tipos d), e) e f), todos fabricados no próprio IPEN/CNEN-SP. Em 2012 foi atingida a marca histórica de 100 elementos combustíveis fabricados no IPEN/CNEN-SP. Desde 2014, utiliza-se no reator nuclear IEA-R1 apenas o combustível nuclear nacional do tipo f).

Os combustíveis nucleares fabricados no exterior, irradiados no reator nuclear IEA-R1 e retirados em definitivo do cerne entre 1957 e 1997, distribuídos em um total de 127 elementos combustíveis, foram sendo armazenados a 6 m de profundidade em cestos de aço inoxidável, situados dentro da piscina de estocagem do reator (87 elementos combustíveis) ou em tubos de aço inoxidável envolvidos por concreto localizados no primeiro andar do edifício do reator (40 elementos combustíveis). Em Novembro de 1999, todos esses elementos combustíveis irradiados foram transportados para o Laboratório Nacional de Savannah River, Carolina do Sul, EUA, no âmbito do programa do governo estadunidense intitulado “Foreign Research Reactor Spent Nuclear Fuel Acceptance Program”, que permitiu o retorno de elementos combustíveis irradiados até 2016 em reatores nucleares de pesquisa ou teste, desde que o urânio utilizado na confecção desses elementos tenha sido enriquecido nos EUA. Em Novembro de 2007, uma segunda leva de elementos combustíveis cujo urânio tinha origem estrangeira, que foram irradiados no reator nuclear IEA-R1 e retirados em definitivo do cerne entre 1998 e 2005, totalizando 33 elementos combustíveis, também foi transportada para o Laboratório Nacional de Savannah River, Carolina do Sul, EUA, no âmbito do mesmo programa do governo estadunidense.

Quando o reator IEA-R1 se encontra em operação à potência de 5 MW, o fluxo médio de nêutrons térmicos (energia cinética menor ou igual a 0,625 eV) no cerne ativo totaliza  $3,45 \cdot 10^{13}$  nêutrons/cm<sup>2</sup>s, enquanto o fluxo médio de nêutrons rápidos (energia cinética maior que 0,625 eV) totaliza  $9,45 \cdot 10^{13}$  nêutrons/cm<sup>2</sup>s.

Os elementos refletores são blocos de grafite revestidos em alumínio ou blocos de berílio e apresentam formato geométrico e dimensões externas idênticos aos dos elementos combustíveis. Esses elementos refletores são posicionados ao redor do cerne do reator nuclear, na placa matriz, permitindo uma grande economia de nêutrons por reflexão dos mesmos e, assim, causando uma redução considerável na massa crítica.

O sistema utilizado para irradiações de amostras no cerne do reator nuclear é refrigerado a água, ou seja, as cápsulas padrão de alumínio (com 20 mm de diâmetro e 70 mm de comprimento), nas quais estão contidas as amostras, entram em contato direto com a água de refrigeração do núcleo do reator. Nessas condições, torna-se necessário utilizar dispositivos adequados, denominados genericamente elementos de irradiação, cujas características dependem da amostra a ser irradiada. Um deles é o já mencionado elemento de irradiação feito de berílio (EIBE), posicionado no centro do cerne onde o fluxo de nêutrons é o mais alto do reator nuclear. Para amostras que precisam ser irradiadas durante período superior a uma semana, utiliza-se o elemento de irradiação feito de berílio e refrigerado a água (designado pela sigla EIBRA). Caso o período de irradiação varie entre um dia e uma semana, utiliza-se o elemento de irradiação refrigerado a água (designado pela sigla EIRA). Há também dispositivos projetados especialmente para irradiações de amostras que não se enquadram nos sistemas mencionados, como, por exemplo, o elemento de irradiação de fios (designado pela sigla EIF).

O conjunto formado pelos elementos combustíveis, elementos refletores, elementos de irradiação e placa matriz pode ser movimentado entre as extremidades da piscina. Para tanto, são utilizadas hastes verticais presas à ponte rolante localizada sobre a piscina.

A piscina é construída em concreto com dimensões 5,2 m x 13,7 m x 9,5 m (ver Figura 6). As paredes internas da piscina são revestidas de aço inoxidável, seguindo-se logo abaixo, em sequência, uma camada mais externa de concreto comum, uma membrana de aço carbono e finalmente uma camada externa de concreto de barita. A piscina é dividida em dois compartimentos, que podem ser isolados um do outro por meio do fechamento de uma comporta de alumínio localizada entre ambos. O compartimento próximo à parte semicircular é o compartimento de operação. No compartimento oposto à parte semicircular não é permitido operar ou carregar o reator nuclear.

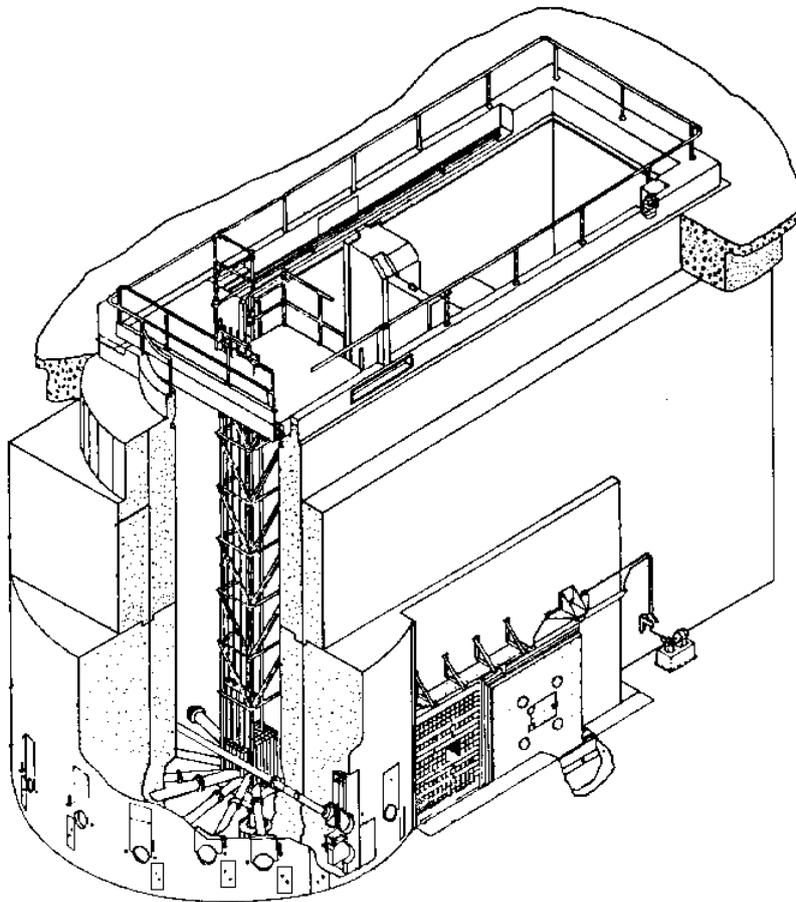


Figura 6 – Panorama geral das instalações do reator nuclear IEA-R1.

Os experimentos são realizados com o uso dos tubos de irradiação e dos tubos pneumáticos. Há um total de 11 tubos, sendo dois localizados na parte frontal à coluna térmica e os demais na parede semicircular da piscina, conforme ilustrado na Figura 7.

Os nove tubos de irradiação que estão localizados na parede semicircular da piscina do reator nuclear possuem diâmetros entre 15,24 cm e 20,32 cm, sendo oito radiais e um tangencial.

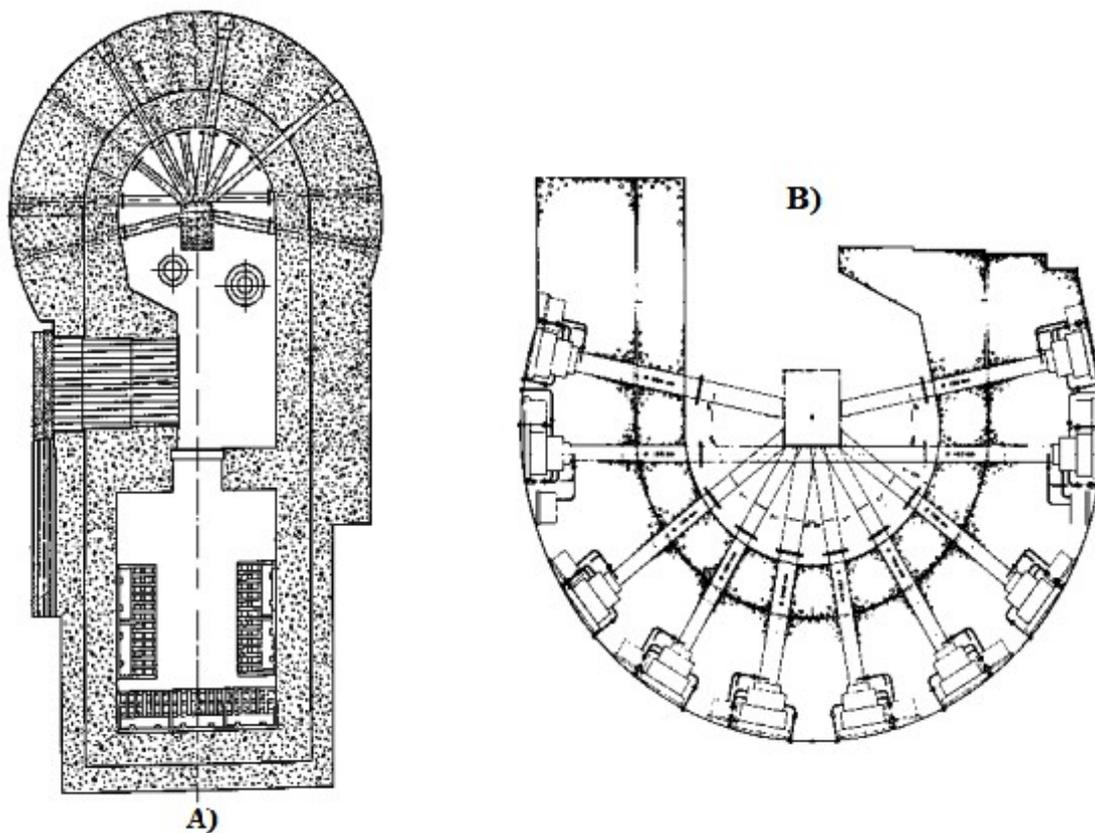


Figura 7 – Diagrama da piscina do reator nuclear IEA-R1: A) seção horizontal da piscina, mostrando o posicionamento dos tubos de irradiação; B) detalhe dos tubos de irradiação.

Todos os 11 tubos de irradiação são feitos de alumínio e, no interior destes, podem ser colocadas amostras para serem irradiadas. Caso necessário, os tubos podem ser preenchidos com água de maneira a prover blindagem adequada aos pesquisadores.

Além do sistema para irradiação de amostras no cerne do reator nuclear, citado anteriormente e baseado no uso de elementos de irradiação, há ainda outros sistemas no reator nuclear IEA-R1 projetados com essa finalidade. Um sistema pneumático de tubos permite a irradiação de amostras durante curto intervalo de tempo. Coloca-se a amostra em um recipiente de alumínio ou polietileno (usualmente denominado “coelho”), que é introduzido no sistema de tubos à baixa pressão e enviado a uma das quatro posições existentes nas proximidades do núcleo. Após a irradiação, o recipiente pode retornar para duas posições diferentes nos laboratórios situados no edifício do reator nuclear.

A irradiação de amostras também pode ser feita utilizando a coluna térmica localizada em uma das paredes laterais do concreto. Essa coluna é geralmente empregada em experimentos com nêutrons térmicos, sendo composta de grafite disposta em blocos com a finalidade de facilitar a formação de gavetas onde podem ser colocadas amostras para irradiação. O baixo fluxo de nêutrons limita, porém, a utilização desse dispositivo.

A água da piscina é desmineralizada e serve como moderador e refletor para os nêutrons, como refrigerante para o cerne do reator nuclear e como blindagem biológica para os operadores e pesquisadores. Quando a potência de operação do reator nuclear é

superior a 200 kW, a circulação é forçada de cima para baixo por intermédio de uma bomba de refrigeração. Para operar abaixo de 200 kW, a refrigeração é feita por convecção natural, não havendo portanto necessidade de bombeamento. Sistemas auxiliares permitem que a água da piscina seja tratada e purificada.

O sistema de refrigeração tem como função retirar o calor produzido nas placas combustíveis, por intermédio da circulação da água da piscina. Esse calor é eliminado para a atmosfera mediante o uso de trocadores de calor e torres de refrigeração. Visando melhorar provisoriamente as condições gerais de refrigeração do cerne do reator nuclear IEA-R1, decidiu-se reduzir a geração de calor no espaçamento existente entre alguns componentes adjacentes. Para tanto, entre início de 2004 e meados de 2014, foram utilizados alguns elementos combustíveis padrão contendo combustível nuclear do tipo e), mas cujas placas combustíveis externas (primeira e décima oitava) tinham metade da densidade de urânio ( $1,15 \text{ gU/cm}^3$ ). Em 2007 foi substituído o trocador de calor original e, em 2014, foi realizada a troca parcial da tubulação do sistema de refrigeração do reator nuclear.

Em valores aproximados, a atual carga total de combustível nuclear do reator nuclear IEA-R1 perfaz 22,5 kg de urânio e contém 4,5 kg de  $^{235}\text{U}$ .

O controle do reator nuclear é efetuado por meio de quatro barras absorvedoras de nêutrons, sendo que uma é utilizada em função de controle e as outras três são empregadas como barras de segurança. Cada uma delas é formada por duas placas feitas de uma liga metálica de prata-índio-cádmio (Ag-In-Cd, na proporção respectivamente de 80%-15%-5%) revestidas com uma fina camada de níquel. As barras absorvedoras de nêutrons possuem a forma de garfo e são sustentadas por um eletroímã fixado a uma haste acoplada ao mecanismo de acionamento, preso à ponte rolante. Em caso de emergência, o eletroímã é desligado e as quatro barras são inseridas rapidamente no cerne do reator nuclear, garantindo assim o desligamento do reator nuclear em menos de um segundo. A barra utilizada na função de controle está diretamente acoplada ao mecanismo de acionamento, sendo movida continuamente para compensar as flutuações de potência verificadas durante a operação do reator nuclear. Todas as barras absorvedoras de nêutrons em uso atualmente no reator IEA-R1 foram fabricadas em 2003 no IPEN/CNEN-SP.

Atualmente, o reator nuclear IEA-R1 é um dos dez mais antigos dentre todos os reatores nucleares de pesquisa operacionais no mundo inteiro.