AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Determinação Experimental de Parâmetros de Física de Reatores
Utilizando Refletor de Água Pesada no Reator IPEN/MB-01**

Reinaldo de Melo Maeda

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores

Orientador:
Prof. Dr. Adimir dos Santos

São Paulo
2012

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Determinação Experimental de Parâmetros de Física de Reatores
Utilizando Refletor de Água Pesada no Reator IPEN/MB-01**

Reinaldo de Melo Maeda

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador:
Prof. Dr. Adimir dos Santos**

**São Paulo
2012**

*Dedico esta dissertação, resultado do esforço
de muitos, à minha família.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por tudo.

E também, às demais pessoas que contribuíram para que isto se concretizasse, dentre eles, em especial, Celso Garnica Mota, Marcelo Luís Ramos Coelho, Carlos Eduardo Lopes da Cruz e Rudá Corrêa da Costa Junior, pelas motivações e incentivos.

Aos colegas do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, CF(EN) Honaiser, CC(EN) Silva Serra, Alfredo Yuuitiro Abe e Rinaldo Fuga, sem os quais as dificuldades enfrentadas seriam maiores.

Ao pessoal do Reator Nuclear IPEN/MB-01, Ulysses d'Utra Bitelli, Rogério Jerez, Ricardo Diniz, César Luiz Veneziani, Reginaldo Gilioli, Marco Antonio Sabo e Monteiro

A todo o pessoal do Centro de Coordenação de Estudos da Marinha em São Paulo, pelo inestimável apoio prestado.

À Marinha do Brasil.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

Ao professor, e orientador, Dr. Adimir dos Santos.

*“If I have seen further it is by standing
on the shoulders of giants.” (Se vi mais
longe foi por estar sobre os ombros de
gigantes).*

Sir Isaac Newton

Determinação Experimental de Parâmetros de Física de Reatores
Utilizando Refletor de Água Pesada no Reator IPEN/MB-01

Reinaldo de Melo Maeda

RESUMO

Este trabalho apresenta a realização de experimentos no reator nuclear IPEN/MB-01 submetido à presença de um refletor com água pesada instalado na sua face oeste. Após a instalação do refletor no reator foram conduzidos três tipos de experimentos: A calibração das barras de controle, a verificação da influência do aumento da temperatura do moderador na reatividade e a medição das taxas de reações por meio da irradiação de fios e folhas de ativação. Devido às propriedades nucleares de interação de nêutrons com água pesada, notadamente sua elevada capacidade de espalhamento e sua baixa capacidade de absorção, é possível notar alterações no funcionamento do reator observadas pelas mudanças dos padrões de retiradas e inserções de barras de controle no núcleo. Essas alterações são apresentadas no decorrer do trabalho.

**Experimental Determination of Reactor Physics Parameters
Using Heavy Water Reflector at the IPEN/MB-01 Research Reactor Facility**

Reinaldo de Melo Maeda

ABSTRACT

This work presents the accomplishment of experiments in the IPEN/MB-01 research nuclear under presence of a heavy water reflector installed in its western wall. After reflector's assembly in the reactor, three types of experiments were conducted: The control rod calibration, the check of temperature's influence increasing under reactivity and the measurement of reaction rates by means wires and foil's activation. Due to the properties of neutron interaction with heavy water, especially their high scattering and low absorption cross sections, pattern changes operation could be observed by the control rods moving inside the core. These observations will be the focus of this work

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIGURA 2.1 – Vista frontal do esquema de montagem da caixa refletora de água pesada no núcleo do reator.
- FIGURA 2.2 – Vista superior da montagem da caixa refletora de água pesada no núcleo do reator.
- FIGURA 3.1 – Perfil dos fluxos térmicos e rápidos na interface núcleo e refletor para um reator refletido.
- FIGURA 4.1 – Vista em perspectiva da caixa refletora, refletor, que foi instalada no núcleo do reator.
- FIGURA 4.2 – Três vistas da caixa refletora que foi instalada no núcleo do reator.
- FIGURA 4.3 – Desenho esquemático mostrando um corte do tanque moderador onde se encontra o núcleo e o posicionamento da caixa refletora após sua instalação na face oeste.
- FIGURA 4.4 – Procedimento para enchimento do refletor com água leve.
- FIGURA 4.5 – Procedimento para enchimento do refletor com água pesada.
- FIGURA 4.6 – Diagrama esquemático mostrando o posicionamento inicial das barras de controle com a BC 1 totalmente inserida e a BC 2 totalmente retirada.
- FIGURA 4.7 – Diagrama esquemático do tanque moderador mostrando a distribuição dos detectores em torno do núcleo.
- FIGURA 4.8 – Diagrama esquemático da disposição das placas de sustentação do núcleo e das varetas e as cotas das varetas combustíveis e de controle/segurança.
- FIGURA 4.9 – Frequência das posições do banco de controle BC2 versus a posição para um dado estado crítico.
- FIGURA 4.10 – Posicionamento horizontal de termopares no núcleo.
- FIGURA 4.11 – Reatividade ao longo do tempo no decorrer dos experimentos de calibração de barras de controle.
- FIGURA 4.12 – Perspectiva em detalhes do refletor.
- FIGURA 4.13 – Vistas em detalhes do refletor e o seu posicionamento em relação ao Núcleo Ativo.
- FIGURA 4.14 – Gráfico da evolução da temperatura ao longo dos experimentos. Medições de 12 termopares posicionados em diferentes posições do núcleo.

- FIGURA 4.15 – Régua onde se fixam o fio ou a folha do ouro para a irradiação.
- FIGURA 4.16 – Corte transversal do núcleo na cota correspondente à metade do comprimento ativo das varetas mostrando o posicionamento da régua para irradiação do fio e da folha no núcleo do reator.
- FIGURA 4.17 – Mecanismo com a régua fechada.
- FIGURA 4.18 – Mecanismo com a régua aberta.
- FIGURA 4.19 – Vista do mecanismo introduzido e encaixado no núcleo com a régua fechada.
- FIGURA 4.20 – Vista do mecanismo introduzido e encaixado no núcleo com a régua aberta.
- FIGURA 4.21 – Diagrama de blocos do sistema de detecção e contagem.
- FIGURA 4.22 – Princípio do detector semiconductor de HPGe.
- FIGURA 4.23 – Gráfico mostrando a curva de irradiação, em azul e em vermelho, a curva de decaimento, a partir do fim da irradiação em (t, A_0) .
- FIGURA 4.24 – Diagrama esquemático mostrando os efeitos da cobertura de cádmio.
- FIGURA 5.1 – Curva de calibração da barra de controle BC2 para o núcleo operando com refletor cheio de água leve.
- FIGURA 5.2 – Curva de calibração da barra de controle BC2 para o núcleo operando com refletor de água pesada.
- FIGURA 5.3 – Gráfico com variação da reatividade de acordo com o aumento da temperatura do moderador para o núcleo operando com refletor de água leve.
- FIGURA 5.4 – Gráfico com variação da reatividade de acordo com o aumento da temperatura do moderador para o núcleo operando com refletor de água pesada.
- FIGURA 5.5 – Atividade de saturação térmica normalizada numa seção transversal do núcleo, no canal 14-15 e na metade do comprimento ativo das varetas combustíveis.
- FIGURA 5.6 – Fluxo térmico obtido com o MCNP numa seção transversal na metade do comprimento ativo das varetas combustíveis.
- FIGURA 5.7 – Comparação entre os resultados experimentais e os calculos pelo MCNP. Seção transversal do núcleo, no canal 14-15 e na metade do comprimento ativo das varetas combustíveis.
- FIGURA B.1 – Gráfico para a folha nua irradiada no núcleo com refletor de D₂O.

- FIGURA B.2 – Gráfico para a folha coberta com Cd irradiada no núcleo com refletor de D₂O.
- FIGURA B.3 – Gráfico para a folha nua irradiada no núcleo sem refletor.
- FIGURA B.4 – Gráfico para a folha coberta com Cd irradiada no núcleo sem refletor.
- FIGURA C.1 – Vista aérea do reator IPEN/MB-01
- FIGURA C.2 – Diagrama esquemático das placas matriz e espaçadoras.
- FIGURA C.3 – Diagrama esquemático das cavidades e furos da placa matriz.
- FIGURA C.4 – Diagrama esquemático das placas suporte.
- FIGURA C.5 – Detalhes da placa suporte inferior.
- FIGURA C.6 – Diagrama esquemático das especificações da vareta combustível.
- FIGURA C.7 – Mecanismo de controle.
- FIGURA C.8 – Diagrama esquemático das varetas absorvedoras.
- FIGURA D.1 – Bancada experimental para espectrometria gamma de folhas.
- FIGURA D.2 – Fotografias dos equipamentos que compõem a bancada experimental do sistema de aquisição de dados da ORTEC.
- FIGURA D.3 – Sistema para espectrometria gamma dos fios de ouro.
- FIGURA D.4 – Diagrama esquemático da bancada experimental com detector HPGe da CANBERRA.
- FIGURA D.5 – Fotografias dos equipamentos que compõem a bancada experimental do sistema de aquisição de dados da CANBERRA.
- FIGURA D.6 – Diagrama esquemático do sistema de movimentação do suporte de fios de ouro.
- FIGURA D.7 – Diagrama em Blocos do Sistema de Movimentação.
- FIGURA D.8 – Tela para a entrada dos dados.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1	–	Valores de α para diversos núcleos alvos
TABELA 1.2	–	Parâmetros de colisão
TABELA 1.3	–	Poder de moderação e Razão de moderação
TABELA 4.1	–	Parâmetros Experimentais de Nêutrons Atrasados do Reator IPEN/MB-01.
TABELA 4.2	–	Dados medidos para a calibração das barras de controle. Refletor cheio de água leve.
TABELA 4.3	–	Tratamento estatístico para obtenção da reatividade, $\Delta\rho$, em pcm.
TABELA 4.4	–	Dados medidos para a calibração das barras de controle. Refletor cheio de água pesada.
TABELA 4.5	–	Tratamento estatístico para a obtenção da reatividade, $\Delta\rho$, em pcm. Refletor cheio de água pesada.
TABELA 4.6	–	Retirada de BC2 em função da temperatura do moderador. Refletor de água leve.
TABELA 4.7	–	Retirada de BC2 em função da temperatura do moderador. Refletor de Água Pesada.
TABELA 4.8	–	Características dos detectores de fios e folhas de ativação.
TABELA 5.1	–	Posições das BC igualmente retiradas para o estado crítico.
TABELA 5.2	–	Valores integrais da reatividade das barras de controle. Configuração padrão com refletor cheio de água leve.
TABELA 5.3	–	Parâmetros de ajustamento de curva A1, A2, x0 e dx para os dados experimentais de reatividade da BC2. Refletor cheio de água leve.
TABELA 5.4	–	Valores integrais da reatividade das barras de controle. Configuração padrão com refletor cheio de Água Pesada.
TABELA 5.5	–	Parâmetros de ajustamento de curva A1, A2, x0 e dx para os dados experimentais de reatividade da BC2. Núcleo com refletor cheio de água pesada.
TABELA 5.6	–	Medidas do Excesso de Reatividade.
TABELA 5.7	–	Variação da reatividade com o aumento da temperatura. Núcleo operando com refletor de água leve.
TABELA 5.8	–	Variação da reatividade com o aumento da temperatura. Núcleo operando com refletor de água pesada.

TABELA 5.9	–	Medidas da variação de reatividade com a temperatura.
TABELA 5.10	–	Resultado das atividades de saturação para o reator operando com refletor de água pesada.
TABELA 5.11	–	Valores da Razão de Cádmiu utilizado nos cálculos da atividade de saturação térmica.
TABELA 5.12	–	Resultado das atividades de saturação térmicas.
TABELA 5.13	–	Atividade de saturação dos fios para o refletor com água leve.
TABELA 5.14	–	Atividades de saturação dos fios para o refletor com água pesada.
TABELA 5.15	–	Atividade de saturação térmica.
TABELA 5.16	–	Razões de Cádmiu.
TABELA B.1	–	Atividades iniciais para as folhas nuas e cobertas com Cd irradiadas no reator operando com refletor de D2O e sem refletor, respectivamente.
TABELA B.2	–	Resultado das Atividades de Saturação para reator operando com refletor de D2O.
TABELA B.3	–	Resultado das Atividades de Saturação para reator operando sem refletor.
TABELA C.1	–	Dados geométricos médios das placas espaçadoras, baseados nos dados de fabricação.
TABELA C.2	–	Dados médios das varetas combustíveis e respectivos desvios padrões baseados nos dados de fabricação.
TABELA C.3	–	Composição do aço inoxidável do encamisamento (% peso).
TABELA C.4	–	Características dos combustíveis por lote.
TABELA C.5	–	Composição dos materiais.
TABELA C.6	–	Análise do moderador do reator IPEN/MB-01
TABELA D.1	–	Características dos equipamentos da bancada experimental de espectrometria gama.
TABELA D.2	–	Características dos equipamentos da bancada experimental de espectrometria gama de varetas combustíveis.
TABELA D.3	–	Módulos eletrônicos que compõem o sistema de movimentação.
TABELA D.4	–	Módulos eletrônicos que compõem o sistema de movimentação desenvolvidos no IPEN.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIEA	Atomic International Energy Agency
BC	Barra de controle ou banco de controle
BC1	Barra de controle ou banco de controle nº 1
BC2	Barra de controle ou banco de controle nº 2
CANDU	Canadian Deuterium
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CIC	Câmara de ionização compensada
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CP-3	Chicago Pile – Reator 3
E	Energia
E_0	Energia de referência
E_a	Energia do nêutrons num instante anterior a uma interação
E_d	Energia do nêutrons num instante posterior a uma interação
ENSI	Empresa Neuquina de Servicios de Ingenieria
FIG.	Figura
IEA	Instituto de Energia Atômica. É a designação antiga do atual IPEN
IEA-R1	Instituto de Energia Atômica- Reator nº 1
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPEN/MB-01	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Marinha do Brasil - Reator nº 1
LABVIEW	
MAB	Mecanismo de acionamento de barra de controle
MB	Marinha do Brasil
NPD	Nuclear Power Demonstration
NRU	National Research Universal

NRX	National Research X-metal / National Research eXperimental
P _{BC}	Posição da barra de controle
pcm	Unidade de medida de reatividade
PM	Poder de moderação de um material
PWR	Pressurized Water Reactor – Reator de Água Pressurizada
RM	Razão de moderação de um material
RMB	Reator Multipropósito Brasileiro
T	Temperatura
TAB.	Tabela
u	Letargia

LISTA SÍMBOLOS

α	Razão do número de massa
β	Fração de nêutrons atrasados
Δu	Decréscimo médio logarítmico de energia por colisão
γ	Radiação gamma
λ	Constante de decaimento
Λ	Ttempo de geração de nêutrons prontos
ρ	Reatividade
Σ	Seção de choque macroscópica
σ	Seção de choque microscópica
ξ	Decréscimo médio logarítmico de energia por colisão
A	Número de massa
A, B	Indicam a posição de uma barra de controle
D	Deutério
D_2O	Água pesada
eV	Elétron Volt
H	Hidrogênio
k	Coeficiente, ou fator, de multiplicação
k_{eff}	Coeficiente, ou fator, de multiplicação efetivo
MeV	Mega elétron-Volt

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Fundamentos teóricos	20
2. OBJETIVO	25
3. REVISÃO DA LITERATURA	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1. A água pesada e a caixa refletora	32
4.2. Calibração de barras de controle	38
4.2.1. Descrição geral	38
4.2.2. O Método da Cinética Inversa para medidas de reatividade e o sistema de aquisição de dados	46
4.2.3. Obtenção dos valores médios de reatividades e erros devido às incertezas dos parâmetros cinéticos	50
4.2.4. A calibração das barras de controle para o reator operando com refletor cheio de água leve	51
4.2.5. A calibração das barras de controle para o reator operando com refletor cheio de água pesada	57
4.3. Influência da temperatura	64
4.3.1. Influência da temperatura com refletor cheio de água leve	65
4.3.2. Influência da temperatura com refletor cheio de água pesada	66
4.4. Irradiação de fios e folhas de ouro	68
4.4.1. Mecanismo de suporte de fios e folhas de ativação para Irradiação no núcleo	70
4.4.2. Os sistemas de detecção e contagem	73
4.4.3. Técnica de ativação neutrônica	75
4.4.4. Atividade de saturação obtida a partir de um sistema de contagem.....	81
4.4.5. Atividade de saturação térmica	82

5. RESULTADOS E ANÁLISES	85
5.1. Curvas de calibração de barras de controle	85
5.1.1. A reatividade introduzida pelo refletor, suportes e estruturas	85
5.1.2. Refletor cheio de água leve	86
5.1.3. Refletor cheio de água pesada	89
5.1.4. Comparação do excesso de reatividade entre os casos refletor cheio de água leve e refletor cheio de água pesada	92
5.2. Reatividades para a variação de temperatura	93
5.2.1. Variação de temperatura para o núcleo com o refletor cheio de água leve	94
5.2.2. Variação de temperatura para o núcleo com o refletor cheio de água pesada	95
5.2.3. Comparação da variação de reatividade com a temperatura entre os casos refletor cheio de água leve e refletor cheio de água pesada	96
5.3. Taxas de reação	97
5.3.1. Taxa de reação térmica a partir de detectores de folhas de ouro cobertas com cádmio e nuas	97
5.3.2. Taxa de reação térmica a partir de detectores de fios de ouro cobertos com cádmio e nus	99
5.3.3. Distribuição de fluxo e perfil da taxa de reação termica com MCNP	103
6. CONCLUSÕES	106
7. ANEXOS	108
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

1. INTRODUÇÃO

Os Reatores Nucleares a cada dia ganham espaço no mundo, seja para a produção de energia elétrica, como os reatores de potência, ou para atividades acadêmicas, de pesquisa e de produção de radioisótopos para a indústria e medicina, como no caso dos reatores de pesquisa.

No Brasil, temos as Usinas Nucleares Angra 1, Angra 2 e Angra 3 (em construção) que são reatores nucleares de potência, refrigerados à água pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactors), produzindo energia elétrica para a população. Além disso, há reatores de pesquisa, como o IEA-R1 e o IPEN/MB-01, ambos localizados no IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, que são utilizados para produção de radioisótopos, fins acadêmicos e científicos.

A necessidade de utilização dos reatores nucleares de maneira econômica e segura exige que se tenham boas condições de projeto e análise neutrônica dos mesmos. A área de Física de Reatores desempenha uma função primordial nesse aspecto, simulando todo o comportamento dos vários parâmetros neutrônicos como reatividade durante o período de vida do reator nuclear.

Controlar um reator significa manusear com segurança o sistema a fim de se obter um resultado desejado, e por isso é importante que se tenha boa estimativa dos parâmetros envolvidos no reator.

Vários são os parâmetros que alteram a reatividade de um reator nuclear, por exemplo, a temperatura de operação (condições termohidráulicas) e o consumo do combustível nuclear. A simulação desses vários parâmetros neutrônicos é efetuada por códigos de computador especialmente projetados para esse propósito. Exemplos típicos são os códigos HAMMER-TECHNION [1] e CITATION [2]. Em decorrência desse aspecto é de fundamental importância a existência de problemas padrões (benchmarks) para a validação desses códigos e biblioteca de dados nucleares associadas. Nesse aspecto o reator IPEN/MB-01 pode dar uma contribuição fundamental pelo fato de ser um sistema de características e de composições bem estabelecidas.

Um dos grandes problemas atuais da área nuclear refere-se à produção de radioisótopos para aplicação na medicina nuclear. Após sofrer defeito em seu reator nuclear, em maio de 2009, a empresa canadense MDS Nordion, responsável por 40% do fornecimento mundial de molibdênio-99, interrompeu suas atividades, causando uma crise no mercado de radiofármacos e, conseqüentemente, na área da medicina nuclear. Radiofármacos são fármacos radioativos utilizados no diagnóstico ou tratamento de doenças e disfunções do organismo humano (fármaco é qualquer droga utilizada com fim medicinal). Até então, somente cinco reatores atendiam à demanda mundial. Hoje, apenas três estão operando, o que contribui para agravar a crise.

O molibdênio-99 importado serve para produzir geradores de tecnécio-99m, o radiofármaco usado em mais de 80% dos procedimentos adotados na medicina nuclear, cujo papel é fundamental no diagnóstico de doenças associadas ao coração, fígado, rim, cérebro, pulmão, tireóide, estômago e sistema ósseo, entre outras. Em termos de massa, o Brasil consome cerca de 1 mg por semana de tecnécio-99m. É importante destacar que, por se tratar de uma questão de saúde, os países produtores atendem prioritariamente a suas demandas internas, comercializando apenas o excedente de produção. Além disso, a medicina nuclear é uma das especializações que mais crescem no mundo. Todos os reatores comerciais têm idade superior a 40 anos, próximos do encerramento da sua vida útil [3].

No Brasil, a evolução da medicina nuclear seguiu o padrão internacional, tendo hoje a relevante participação de 4,4% do mercado mundial. Isso corresponde a mais de 3 milhões de procedimentos médicos por ano. No entanto, em termos per capita, esse atendimento ainda é proporcionalmente inferior a muitos países como a Argentina (2,6 vezes menor) e os Estados Unidos (6,2 vezes menor), o que torna inevitável o crescimento da área.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), dentro de suas atribuições legais, vem executando por meio de sua unidade conveniada, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), mais de 95% das atividades inerentes ao monopólio federal relativo à produção de radioisótopos de meia-vida acima de 120 minutos [4].

Em maio de 2010, o ministro da Ciência e Tecnologia, Sérgio Rezende, anunciou a liberação pelo Conselho do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico, vinculado a seu ministério, de R\$ 50 milhões para a elaboração o projeto básico e licenciamento ambiental do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). O investimento total, distribuído ao longo de seis anos, é de R\$ 850 milhões. O empreendimento, de concepção inteiramente nacional, dotará o país de um reator nuclear e instalações associadas, com capacidade para prestar os seguintes serviços ao país: produzir radioisótopos e fontes radioativas para a saúde, indústria, agricultura e meio ambiente, realizar testes de irradiação de materiais e combustíveis nucleares, realizar pesquisas científicas e tecnológicas com feixes de nêutrons [5].

Um dos principais componentes do RMB é o refletor de água pesada (D_2O). Esse refletor tem a função principal de expandir a área de irradiação de materiais tornando possível a produção simultânea de vários radioisótopos de interesse à medicina nuclear, à indústria e agricultura. Além disso, no refletor de água pesada será possível a irradiação de materiais de interesse para a área de Engenharia Nuclear e várias outras atividades importantes. De interesse fundamental para o projeto do RMB será o impacto causado por esse tipo de refletor nas características neutrônicas do núcleo reator, decorrente das propriedades nucleares da água pesada.

1.1. Fundamentos teóricos

Uma das principais razões para a utilização da água pesada nos reatores decorre das suas propriedades de moderação e reflexão de nêutrons.

Recorda-se que os núcleos leves tem a capacidade de diminuir muito a energia cinética dos nêutrons nas colisões elásticas. Isto pode ser comprovado por meio do fator α , que relaciona as energias cinéticas antes e após as colisões numa única interação [6].

$$E_d = \alpha \cdot E_a \quad (1.1)$$

Onde, os índices a e d referem-se a situação antes e depois, e α é a razão do número de massa (A) do núcleo alvo dada por:

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \quad (1.2)$$

O valor de α varia desde zero e tende para o valor 1 quando o número de massa cresce. Como mostrada pela equação (1.1), a energia cinética do nêutron após a colisão elástica pode ser reduzida de uma pequena fração ou totalmente perdida dependendo da massa (A) do núcleo colidido, como se demonstra na TAB. 1.1. Conforme-se vê, α tende para um com o crescimento do número de massa, portanto, os núcleos pesados possuem pouca capacidade de diminuição de energia após uma colisão elástica, ao contrário dos núcleos leves.

TABELA 1.1 – Valores de α para diversos núcleos alvos.

Núcleo	A	α	$\frac{1-\alpha}{2}$
Hidrogênio	1	≈ 0	0,5
Deutério	2	0,111	0,444
Berílio	9	0,640	0,180
Carbono	12	0,716	0,142
Ferro	56	0,931	0,034
Urânio	238	0,983	0,008

Na última coluna da TAB. 1.1 apresentam-se os valores médios da perda de energia¹, observando-se que os núcleos leves, como o do H e do D , promovem a perda de aproximadamente 50% da energia incidente do nêutron.

Sussessivamente a cada colisão os nêutrons vão perdendo energia. Desta forma, a partir de uma determinada energia de referência (E_0), a cada colisão o nêutron tem sempre uma quantidade de menor de energia (E). Para quantificar esse comportamento foi

¹ Obtida a partir da expressão da média $\bar{E}' = \int_{\alpha E}^E E \cdot P(E \rightarrow E') dE$, onde $P(E \rightarrow E') dE = \frac{1}{E(1-\alpha)} \alpha E < E' < E$

utilizado o conceito de letargia (u) [7], que comporta-se de modo oposto à diminuição da energia E , sendo expressa por:

$$u = \ln \frac{E_0}{E} \quad (1.3)$$

À medida que a energia diminui o nêutron fica mais letárgico. Em termos médios, a variação da letargia entre sucessivas colisões é expressa apenas como função do número de massa [8]. É chamada de decréscimo médio logarítmo de energia por colisão²:

$$\xi = \overline{\Delta u} = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \left(\frac{A+1}{A-1} \right) \quad (1.4)$$

Na TAB. 1.2 apresentam-se os valores da letargia de alguns materiais, destacando-se os de interesse: Do hidrogênio, da água comum, do deutério e da água pesada.

² Obtida a partir da expressão da média $\overline{\Delta u} = \int_{\alpha E}^E \ln \left(\frac{E}{E'} \right) \cdot P(E \rightarrow E') dE$, onde $P(E \rightarrow E') dE = \frac{1}{E(1-\alpha)}$ $\alpha E < E' < E$

TABELA 1.2 – Parâmetros de colisão³

Núcleo	A	α	ξ
Hidrogênio	1	0	1,000
H ₂ O		*	0,920 ⁺
Deutério	2	0,111	0,725
D ₂ O		*	0,509 ⁺
Berílio	9	0,640	0,209
Carbono	12	0,716	0,158
Ferro	56	0,931	0,0357
Urânio	238	0,983	0,0084

* Não definido

+ Um valor médio adequado

A partir do decréscimo médio logarítmo de energia por colisão pode-se determinar o número médio de colisões necessárias para que se atinja um determinado valor de letargia média, tendo o nêutron uma energia inicial E_0 [9].

$$n = \frac{\ln \frac{E_0}{E}}{\xi} \quad (1.5)$$

A fim de permitir uma melhor comparação dos materiais moderadores estabelecem-se duas novas grandezas, o poder de moderação (PM) e a razão de moderação (RM), levando-se em consideração a densidade atômica e as seções de choque de espalhamento elástico e de absorção [10].

$$PM = \xi \cdot \Sigma_s \quad (1.6)$$

³ Adptado de Lamarsh, J. R. *Introduction to Nuclear Reactor Theory*.

$$RM = \frac{\xi \cdot \Sigma_s}{\Sigma_a} \quad (1.7)$$

Todas essas informações podem ser resumidas e exemplificadas para alguns materiais na TAB. 1.3.

TABELA 1.3 – Poder de moderação e Razão de moderação

Nuclídeo	A	α	ξ	n	PM	RM
H ₂ O	18	*	0,920 ⁺	18,20	3,17	143
D ₂ O	20	*	0,509 ⁺	19,78	0,23	6922
Berílio	9	0,640	0,209	80,11	0,18	153
Carbono	12	0,716	0,158	105,97	0,06	220
Urânio	238	0,983	0,0084	1993,33	0,003	0,009

* Não definido

+ Um valor médio adequado

A avaliação do moderador é mais eficiente tomando-se por base o poder de moderação, pois este leva em consideração a probabilidade de espalhamento elástico dos nêutrons com o moderador. No entanto, as interações podem ainda resultar em absorções e esta possibilidade é representada pela razão entre o poder de moderação e a seção de choque de absorção, grandeza esta definida como Razão de Moderação (RM).

Da análise da TAB. 1.3 conclui-se que os melhores moderadores são aqueles núcleos ou substâncias de baixo número de massa. A água comum é o melhor moderador apresentando o maior poder moderador entre os materiais listados. Porém, devido à sua elevada seção de choque de absorção, comparado com outros moderadores, sua razão de moderação resulta muitas vezes menor que a da água pesada. E, deste modo, para utilização como um refletor de nêutrons, fica demonstrado que os materiais mais indicados são, respectivamente, a água pesada, o carbono e o berílio.

2. OBJETIVO

O objetivo principal desse trabalho é a realização de experimentos de medida de parâmetros neutrônicos do núcleo do reator IPEN/MB-01 quando um refletor cheio de água pesada é instalado na sua face oeste.

A relevância desta implementação é observada na elação do fluxo de nêutrons nas adjacências da região refletora. Deste modo, forma-se nestas interfaces um local de fluxo elavado que expande a área de irradiação, tornando possível seu aproveitamento sem que haja necessidade de interferências no interior do núcleo, como no casos de irradiação de materiais para testes e produção de radioisótopos, além de outras variadas finalidades.

As FIG. 2.1 e 2.2 mostram, respectivamente em vista frontal e em vista superior, os desenhos esquemáticos de montagem do refletor de água pesada no núcleo do reator IPEN/MB-01.

FIGURA 2.1 – Vista frontal do esquema de montagem da caixa refletora de água pesada no núcleo do reator.

FIGURA 2.2 – Vista superior da montagem da caixa refletora de água pesada no núcleo do reator.

Os parâmetros neutrônicos a serem medidos são: Reatividade integral e diferencial das barras de controle, coeficiente isotérmico de reatividade, mapeamento do fluxo neutrônico na região ativa do núcleo e no refletor e ganho de reatividade considerando as situações sem caixa refletora de água pesada e com caixa refletora de água pesada.

O reator IPEN/MB-01 pode ser considerado de extrema importância em estabelecer parâmetros experimentais para a validação de modelos de cinéticas de sistemas críticos, em virtude de ser considerado benchmark internacional em vários experimentos de

configurações crítica [11][12], bem como em vários outros experimentos clássicos de Física de reatores [13].

Portanto, os experimentos visam também a obtenção de dados que permitam comparar o desempenho do reator nuclear IPEN/MB-01 operando com o refletor de água pesada, conforme descrito acima, e sem o refletor de água pesada.

É esperado que nestas condições de operação haja mudanças na reatividade do núcleo do reator quando comparando com uma situação com o refletor cheio de água leve e sem o refletor. O que, por sua vez, alterará os padrões de inserção ou retiradas de barras de controle devido a uma alteração do fluxo neutrônico.

3. REVISÃO DA LITERATURA

A energia advinda de um reator origina-se das reações nucleares que ocorrem no seu núcleo a partir das fissões. De modo sintético, a fissão nuclear é o processo de divisão dos núcleos de U^{235} , em dois outros, ou mais, elementos menores, após ter havido interação com nêutrons. Nesta interação, o núcleo absorve, ou captura, um nêutron incidente resultando na fissão. Cada divisão é acompanhada de liberação de energia, aproximadamente 200 MeV, e mais outros nêutrons. Em média, cada fissão no U^{235} produz 2,5 novos nêutrons. Este fenômeno é o que permite a utilização da fissão como fonte de energia, pois, sob certas condições, os novos nêutrons produzidos podem atingir novos núcleos e, assim, este processo se propaga em uma reação em cadeia autossustentada controlada [14] [15].

Um reator nuclear é um conjunto de equipamentos, projetados e construídos, para que tais reações de fissão em cadeia autossustentada ao longo do tempo sejam realizadas de modo seguro e controlada, permitindo a contínua utilização da energia liberada. O núcleo do reator é a região que contém o material físsil, dispostos em elementos combustíveis, sobre os quais os nêutrons incidem. A quantidade de material físsil e a geometria do seu arranjo são definidas em projeto, e definem o tamanho crítico [16]. Para que as reações em cadeia sejam controladas é necessário manter o equilíbrio da quantidade de nêutrons (“população neutrônica”) no núcleo de modo elas não cresçam indefinidamente, propagando as reações em velocidades elevadas, e nem diminuam a ponto de extinguí-las. O equilíbrio é obtido com materiais absorvedores de nêutrons que, por meio de barras de controles são inseridas ou retiradas do núcleo, controlando assim, a população de nêutrons no reator.

Os nêutrons desempenham papel importante na reação em cadeia, pois são eles que iniciam e mantêm todo o processo. No entanto, nem todos causam fissão. Além da citada interação de absorção pelo combustível, que resulta em fissão, outras interações entre os nêutrons e a matéria, no interior do reator, são possíveis, destacando-se: A absorção por outros materiais, a absorção pelo combustível sem resultar em fissão e a fuga do núcleo. Essas formas de interação são funções tanto da energia do nêutron incidente quanto dos núcleos atingidos podendo resultar, além da fissão, em espalhamentos, em emissão de radiação γ , na emissão de outros nêutrons ou na emissão de partículas

carregadas [17][18]. Essas formas de interação são caracterizadas pelas respectivas seções de choque.

Os nêutrons que induzem a fissão com maior probabilidade são os nêutrons térmicos, os que possuem baixa energia cinética, em torno de 0,025 eV. No entanto, como eles nascem com uma energia média em torno de 2,0 MeV, nêutrons rápidos, devem primeiramente sofrer uma redução de energia, até os níveis de energia termica onde ocorrem a maioria das fissões. A este processo de redução de energia dá-se o nome de moderação, ocorrendo por meio de sucessivas colisões elásticas até que seja absorvido por um núcleo fissil. O meio material no qual a moderação ocorre chama-se moderador, e sua função, portanto, é transformar os nêutron rápidos em térmicos a fim de que possam induzir a fissão nuclear [19].

Outro importante componente dos reatores são os refletores, estruturas e materiais colocados em torno do núcleo dos reatores para refletirem de volta ao seu interior os nêutrons que fogem ou que escapam da sua fronteira. Desse modo, os nêutrons refletidos, que anteriormente estariam perdidos do sistema, podem contribuir novamente para a indução de novas fissões. O refletor permite que haja um aumento da quantidade de nêutrons disponíveis no sistema e é caracterizado por possuir elevada seção de choque de espalhamento e baixa seção de choque de absorção [20]. O uso dos refletores possibilita melhor aproveitamento dos nêutrons, economia do combustível e melhora da utilização da potência do reator. Além de refletir os nêutrons de volta ao núcleo, o refletor também modera os nêutrons rápidos fazendo com que exista uma corrente de nêutrons em direção ao núcleo do reator. Em decorrência disso, em projetos que sejam previstos a utilização de refletores, é possível reduzir a quantidade de combustível ou do percentual de enriquecimento. Nota-se também a ocorrência do fenômeno do achatamento do fluxo térmico, caracterizado pela diminuição do pico do fluxo no interior do núcleo e elevação do mesmo nas regiões mais afastadas, particularmente na interface entre núcleo e refletor [21] [22]. Este fenômeno é previsto analiticamente pela solução da equação da difusão pelo método de dois grupos [23] e mostrado qualitativamente na FIG. 3.1. Nela observa-se que o fluxo de nêutrons térmico aumenta consideravelmente na região de interface entre o reator e o refletor quando comparado com mesma situação com um reator nú (sem refletor).

FIGURA 3.1 – Perfil dos fluxos térmicos e rápidos na interface núcleo e refletor para um reator refletido.

Portanto, a introdução de um refletor de nêutrons constituído de água pesada em uma região delimitada de um reator, que originalmente não havia sido projetado para tê-lo, permite observar tais fenômenos.

A água pesada é um material que tem sido utilizado nas atividades nucleares desde os primeiros dias do seu aparecimento. É formada pela combinação do oxigênio com o isótopo estável do hidrogênio de massa 2, o deutério (D), representada por D_2O . A descoberta do deutério foi feita em 1932 por H. C. Urey, F. G. Brickwedde e G. M. Murphy, que verificaram que o hidrogênio tinha um isótopo de número de massa 2 presente em hidrogênio natural, observando resíduos de hidrogênio de uma coluna de destilação a baixas temperaturas. A concentração foi estimada numa razão de D/H em 1/4000 por medidas de intensidade das linhas de Balmer (Urey, 1932) e em 1/5000 por espectrometria de massas (Bleackney and Gould, 1933) [24].

A água pesada, devido a presença do deutério, além de possuir boa capacidade de moderar os nêutrons (diminuir a sua energia cinética por meio de colisões elásticas), possui também baixa probabilidade de absorvê-los [25].

As características da água pesada para utilização como moderador e refletor de nêutrons já eram conhecidas desde o início do desenvolvimento da era nuclear. Seus principais usos são como refrigerante ou moderadores devido às propriedades apresentadas, quando interagindo com os nêutrons. Após a descoberta da fissão, e durante os primórdios do projeto para a construção do primeiro reator nuclear da história, a água pesada sempre esteve presente na lista de opções dos moderadores de nêutrons. No entanto, devido às dificuldades de processamento e produção em grande escala, necessários à época, para os esforços que culminaram com a construção das primeiras armas atômicas, foi substituída pelo grafite [26]. A primeira indústria para fabricação de água pesada foi a norueguesa Norsk Hydro. Posteriormente, e durante muito tempo, o Canadá desenvolveu e operou outras instalações. [27].

Os processos utilizados para a produção de água pesada são a destilação, eletrólise, trocas catalíticas hidrogênio/água e processo termoquímico Girdler-Sulfider [28]. Atualmente, de acordo com dados da AIEA, existem em operação 7 fábricas que produzem em torno de 694 toneladas por ano. Uma delas, localizada na Argentina, responde por aproximadamente 30% desse montante, as demais estão localizadas na Índia. Os custos de produção variam de 300 US\$/Kg a 500 US\$/Kg. [29][30].

As primeiras aplicações práticas em reatores nucleares iniciaram nos anos de 1940, com a construção do reator Chicago Pile 3 (CP-3), no Argonne Laboratory, sendo o primeiro reator a utilizar a água pesada como elemento moderador [31] [32] [33]. A partir da mesma época o Canadá destacou-se no estudo do emprego da água pesada em reatores nucleares e suas aplicações. Desenvolveu e construiu nas décadas seguintes reatores de pesquisa como o ZEEP (1945), o NRX (1947) e o NRU (1957) [37]. Além do Canadá outros países como França, Inglaterra e Noruega também construíram reatores de pesquisa, que empregavam água pesada como moderadores [38]. Esses reatores formaram a base para o desenvolvimento de reatores de potência como o NPD (1962), o Douglas Point (1968) e o Pickering (1971), e cuja tecnologia é empregada atualmente nos reatores CANDU, que são moderados e resfriados a água pesada [39].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com a proposta do trabalho foi introduzida no núcleo do reator IPEN/MB-01, na sua face oeste, uma caixa de alumínio, que serviu como refletor de nêutrons. Após sua instalação foram realizadas operações programadas com o reator e coletados dados e informações para posteriores análises e conclusões.

Foi utilizada a infraestrutura física, de pessoal e de material disponível no reator IPEN/MB-01, e deste modo foi possível a execução dos experimentos de calibração de barras de controle, verificação da influência da variação da temperatura do moderador na resposta do reator e a irradiação de folhas e fios de ativação. Estes experimentos foram conduzidos sempre em duas etapas distintas: Uma série de operações com o refletor preenchido com água leve e outra série de operações com o refletor preenchido com água pesada.

O reator IPEN/MB-01, semelhantemente a outros reatores nucleares, possui procedimentos específicos para seu funcionamento, que são executados e supervisionados por pessoal especializado. A preparação do reator e o modo de realização dos trabalhos são descritos no decorrer deste capítulo.

4.1. A água pesada e a caixa refletora

A água pesada, disponível e utilizada nos experimentos, encontra-se armazenada em um tambor no Reator IPEN/MB-01 e é oriunda do CDTN tendo sido transportada para o IPEN em 09/12/2009. O tambor, cujo número de registro é 11138, possuía, naquela data, conforme informações do CDTN, um peso bruto de 266,3 Kg. As informações atinentes ao envio e transporte constam do Ofício número 057/SESUP do CDTN. Esta água pesada, por meio de amostra, foi analisada na Empresa Neuquina de Servicios de Ingenieria (ENSI), na Argentina, apresentando como resultado uma concentração molar de D_2O de $99,49 \pm 0,02\%$.

O refletor possui o formato de uma caixa prismática e foi construído com chapas de alumínio. Um desenho da caixa utilizada como refletor é apresentado na FIG. 4.1. O detalhamento das dimensões do refletor é mostrado na FIG. 4.2. A espessura das

chapas é de 5 mm e o seu volume interno resultou aproximadamente 61,652 l. O refletor possui bujões que servem para suspiro, dreno e transferências de água.

1	Fundo	Ch: #5,0 x 508 x 210 mm Alumínio 5052
2	Chapa: Posterior/Anterior	Ch: #5,0 x 620 x 508 mm Alumínio 5052
3	Chapa Lateral	Ch: #5,0 x 620 x 200 mm Alumínio 5052
4	Tampa	Ch: #5,0 x 508 x 210 mm Alumínio 5052
5	Apoio Inferior	Ch: #5,0 x 50 x 50 mm Alumínio 5052
6	Bocal Superior 1/2" NPT	Br. $\phi 36$ x 25 mm Alumínio 6351
7	Respiro 1/4" NPT	Br. $\phi 36$ x 25 mm Alumínio 6352
8	Aba de Fixação	Ch: #5,0 x 50 x 50 mm Alumínio 5052
9	Aba Superior	Ch: #5,0 x 130 x 50 mm Alumínio 5052
10	Reforço Interno	Ch: #5,0 x 200 x 25 mm Alumínio 5052

FIGURA 4.1 – Vista em perspectiva da caixa refletora, refletor, que foi instalada no núcleo do reator.

FIGURA 4.2 – Três vistas da caixa refletora que foi instalada no núcleo do reator.

Para que o reator pudesse operar com o refletor cheio de água leve ou de água pesada foi necessário instalá-lo no interior do tanque moderador, na face oeste e adjacente ao núcleo. Este posicionamento pode ser visualizado de modo generalizado no desenho esquemático da FIG. 4.3 e detalhado na FIG. 4.10.

FIGURA 4.3 – Desenho esquemático mostrando um corte do tanque moderador onde se encontra o núcleo e o posicionamento da caixa refletora após sua instalação na face oeste.

A escolha do alumínio para a construção da caixa foi devido às suas baixas probabilidades de absorção e de espalhamento de nêutrons térmicos, representadas por suas seções de choque, cujos valores são respectivamente $\sigma_a = 0,235$ b e $\sigma_s = 1,4$ b. Isto significa que há uma probabilidade muito baixa de interações de nêutrons térmicos com os átomos da caixa, de modo que ela funciona como um reservatório transparente, delimitando o seu volume interno de água, tanto leve quanto pesada, nesta região do reator e minimizando as interferências no fluxo.

O refletor vazio foi instalado no núcleo em posição predeterminada sendo fixado na própria estrutura do reator por meio de parafusos e calços.

Nas operações com água leve o refletor foi preenchido com a própria água leve do tanque moderador, durante o enchimento deste. Bastou para isso que fossem deixados abertos os bujões e suspiros existentes nas partes inferior e superior do refletor, como mostrado na FIG. 4.4.

FIGURA 4.4 – Procedimento para enchimento do refletor com água leve.

Nas operações com água pesada o refletor foi preenchido com água pesada transferida de um reservatório auxiliar, onde ela encontrava-se originalmente, distante do núcleo. Foram conectadas mangueiras e válvulas entre o refletor e este reservatório auxiliar, além de uma mangueira no supiro superior do refletor, para a saída do ar. A água foi bombeada para o interior do refletor introduzido ar comprimido no reservatório auxiliar, como mostrada na FIG. 4.5.

FIGURA 4.5 – Procedimento para enchimento do refletor com água pesada.

Esses procedimentos foram realizados meticulosamente evitando qualquer vazamento de água pesada para dentro do tanque moderador e esta solução foi adotada devido às dificuldades de manipulação de pesos na plataforma superior do reator e à exiguidade de espaço nesse local. Após o enchimento do refletor com água pesada o reator ficou em condições de ser utilizado nos experimentos.

Nas operações sem refletor não houve modificação ou preparação especial no reator além dos procedimentos de rotina.

Em todos os eventos onde houve necessidade de entrada de pessoal na sala do reator e no tanque moderador, como nas manipulações de detectores de fios e folhas irradiadas, fora da sala do reator, foram adotados os procedimentos de proteção pertinentes, acompanhados por um responsável do serviço de proteção radiológica.

Nas operações, com refletor de água leve, com refletor de água pesada e sem refletor, os experimentos ocorreram como descritos nos itens 4.2, 4.3 e 4.4, a seguir.

4.2. Calibração de barras de controle

4.2.1. Descrição geral

Este experimento foi realizado objetivando a obtenção de dados para a construção da curva de calibração de barras do reator IPEN/MB-01. Os procedimentos necessários à experiência são descritos a seguir.

De modo geral, tanto para a condição do refletor cheio de água leve quanto para a condição do refletor cheio de água pesada, os procedimentos para a calibração de barras de controle é feito por meio da técnica de compensação, que consiste em inserir de modo controlado incrementos de reatividade de aproximadamente 100 pcm, do seguinte modo: Criticaliza-se o reator com a BC1 tão inserida quanto possível no núcleo do reator e a BC2 tão retirada quanto possível, como mostrado na FIG. 4.6.

FIGURA 4.6 – Diagrama esquemático mostrando o posicionamento inicial das barras de controle com a BC 1 totalmente inserida e a BC 2 totalmente retirada.

Em seguida, retira-se a BC1 até uma posição em que o núcleo atinja 100 pcm de reatividade, ficando supercrítico. E por fim, insere-se a BC2, provocando o retorno do núcleo à condição de criticalidade. Repetem-se esses passos até que a BC1 esteja retirada e a BC2 inserida no núcleo, tanto quanto possível, situação inversa da inicial.

O deslocamento das BC é medido em porcentagem do comprimento ativo das varetas combustíveis sendo a origem na placa matriz com o sentido positivo do eixo z adotado conforme mostrou-se na FIG. 4.6. Assim, 0 % corresponde à extremidade inferior da BC, totalmente inserida, e 100 % à extremidade superior, totalmente retirada do núcleo.

A posição das BC é mostrada num indicador digital no painel de controle e a medida de reatividade é obtida a partir de um reatímetro e o valor, em pcm, é mostrado numa interface gráfica de um programa computacional, que também permite gravar os dados de toda a operação a cada segundo.

O arranjo do núcleo para as experiências foi o da configuração padrão das varetas combustíveis, 28 x 26, como mostrado na FIG. 4.7. Duas barras de controle controlam o reator. Elas estão localizadas diagonalmente opostas no núcleo. Os símbolos A e B da FIG. 4.7 referem-se à localização das duas barras de controle, enquanto o símbolo S refere-se às barras de segurança. As barras de segurança são sempre mantidas na posição totalmente retirada durante todo o conjunto de experimentos. Consequentemente, elas não interferem nas medições realizadas. Os símbolos A e B mostrados na FIG. 4.7 referem-se, respectivamente, às barras de controle BC1 e BC2. Nas configurações críticas a barra de controle BC1 foi mantida sempre na mesma posição específica e o controle fino da criticalidade foi obtido pelo sistema de controle automático da barra, posicionando continuamente a barra de controle BC2 em torno da verdadeira posição crítica. A posição da barra de controle BC2 é um dos parâmetros mais importantes para o conjunto de experiências. A posição crítica verdadeira da barra de controle raramente é alcançada.

O sistema da barra de controle do reactor IPEN/MB-01 é composto de:

- Sistema de um controle automático de barra,
- Sistema de acionamento da unidade,
- Mecanismo de acionamento da barra de controle e
- Módulo indicador de posição relativa da barra de controle.

O sistema automático de controle proporciona um controle fino nos níveis de potência e de criticalidade do reator, monitorando continuamente os sinais de um conjunto de detectores "out-of-core", que estão estrategicamente posicionados em torno do núcleo do reator. O sistema de controle automático executa ambas as tarefas por meio do ajuste contínuo da posição da barra de controle. O mecanismo de acionamento da barra de controle (MAB) é composto por um motor de passo acoplado a uma redução mecânica, que permite uma indicação muito precisa da posição da barra de controle. O indicador de posição relativa da barra de controle é constituído por um sensor codificador incremental óptico, acoplado ao mecanismo de acionamento da barra de controle, e um módulo inteligente, o qual permite que a posição da barra de controle possa ser adquirida com precisão de quatro dígitos (em unidades de porcentagem de retirada). Este módulo é ligado a um microcomputador por meio de uma interface serial RS232. Considerando um determinado estado crítico, as posições relativas das barras de controle podem ser escritas em um arquivo de computador a uma taxa de aquisição a cada 60 ms (6×10^{-2} segundos), tornando-se possível realizar análises estatísticas sobre essa variável. O sistema de controle das barras do reator IPEN/MB-01 pode ser considerado um sistema de alta resolução, e sua linearidade foi demonstrada rotineiramente desde que o reator foi ligado inicialmente. O zero relativo do sistema de controle (0% posição retirada) ocorre quando a parte inferior das varetas de absorção (excluindo os tampões de fundo) estão alinhadas com a parte inferior da região do combustível. Este nível de referência ou zero foi calibrada por um padrão mecânico que permite uma precisão de 0,1 mm. A posição mais externa da barra de controle (posição 100% retirada) está localizada a 54,6 cm da extremidade inferior do comprimento ativo do combustível. A FIG. 4.8 mostra esquematicamente onde a barra de controle está localizada em relação ao comprimento ativo da vareta combustível. Desta forma, a posição das barras de controle, durante a operação do reator, pode ser adquirida com um excelente nível de precisão.

FIGURA 4.8 – Diagrama esquemático da disposição das placas de sustentação do núcleo e das varetas e as cotas das varetas combustíveis e de controle/segurança.

As experiências de calibração de barras foram executadas a uma potência de 1W a fim de se ter um detector com apropriada razão sinal-ruído. Esta potência foi monitorada por um canal experimental localizada no lado direito da FIG 4.7 (59,0 cm de distância do núcleo ativo). Para cada posição crítica da barra de controle mencionada neste experimento a posição da barra de controle BC2 foi gravada durante 1 min, perfazendo um total de 1000 posições. Com base nesses dados foi realizada a análise estatística sobre a posição da barra BC2. A FIG. 4.9 mostra a frequência da posição da BC2 versus sua posição para um determinado estado crítico. Esta figura é semelhante a uma forma Gaussiana e mostra uma série de características interessantes. Na região do lado esquerdo da curva, onde $\rho < 0$, o sistema do reator é subcrítico e, inversamente, na região à direita,

onde $\rho > 0$, o sistema do reator é supercrítico. A verdadeira posição crítica, onde $\rho = 0$, ocorre no máximo desta curva. Esta análise foi realizada para cada configuração crítica relatada nesta avaliação e, na posição crítica, o máximo de cada curva respectiva foi considerado ser a verdadeira posição crítica da BC2.

FIGURA 4.9 – *Frequência das posições do banco de controle BC2 versus a posição para um dado estado crítico.*

As incertezas nas flutuações das posições do banco de controle, neste caso, tem sido iguais a um desvio padrão (1σ) da curva Gaussiana mostrada na FIG 4.9. Um valor típico da incerteza da indicação da posição relativa do controle é 0,013% de retirada, que representa 0,07 mm.

A reatividade foi medida por um reatímetro (modelo da cinética inversa, que será detalhado na seção 4.2.2 a seguir) ou usando a curva de calibração da barra de controle. O reatímetro foi usado sempre que a reatividade era pequena (<115 pcm, inserção máxima de reatividade permitido pelo sistema de segurança da instalação). Este equipamento utilizou os sinais de uma câmara de ionização compensada (CIC). Este detector experimental está localizado dentro de um tubo de instrumentação cujo centro foi posicionado a 152,5 mm de distância da linha externa de barras de combustível à face leste

do núcleo. O tubo de instrumentação é feito de alumínio e possui 300 cm de comprimento. O diâmetro interior e exterior são de 9,5 cm e 10 cm, respectivamente. O reatímetro foi essencial para o experimento, visto que permitiu a determinação em tempo real da reatividade como uma função da temperatura e da posição das barras de controle no núcleo. A temperatura no interior do núcleo foi monitorada por um conjunto de termopares e mantida tão próxima quanto possível de 21° C pelo sistema de aquecimento e arrefecimento do reator IPEN/MB-01.

O reator IPEN/MB-01 possui um sistema de aquecimento e arrefecimento e de circulação de água que permite um controle preciso da temperatura no núcleo do reactor. A água entra no tanque moderador a partir da sua parte inferior por meio de um difusor. A função do difusor é homogeneizar a temperatura da água dentro do tanque moderador. A água é circulada continuamente para dentro e para fora do tanque moderador. Dependendo da necessidade, a água pode passar através de um aquecedor ou um resfriador, a fim de aumentar ou diminuir a sua temperatura. Além disso, um tanque de armazenamento de água, juntamente com um aquecedor e um resfriador, pode ser usado para a temperatura pré-estabelecida de água em algum nível específico. Esta água pode ser despejada no interior do tanque moderador para experiências específicas. A temperatura do núcleo do reator pode ser colocada em qualquer intervalo entre 7 °C e 90 °C. Desta maneira, os experimentos podem ser realizados de uma maneira controlada de tal modo que qualquer temperatura especificada no intervalo acima mencionado pode ser conseguida com um elevado grau de precisão.

A temperatura na região do combustível foi monitorada por meio de um conjunto de termopares estrategicamente localizados no núcleo do reactor. Os termopares são feitos de uma liga de Cu-Ni (55% Cu e Ni 45%). O seu diâmetro é de 1,6 mm. Doze unidades de termopares foram utilizados na experiência, e as suas localizações são mostradas na FIG. 4.10.

Suas posições axiais estão dispostas da seguinte maneira:

- T1, T2, T3 e T4 na parte inferior,
- T5, T6, T7 e T8 no meio e
- T9, T10, T11 e T12 na parte superior do núcleo ativo.

Os termopares foram calibrados por um procedimento padrão e sua precisão é $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$. O efeito da reatividade dos termopares foi avaliado ser de $-12,5 \pm 2,0\text{ pcm}$.

FIGURA 4.10 – Posicionamento horizontal de termopares no núcleo.

4.2.2. O Método da Cinética Inversa para medidas de reatividade e o sistema de aquisição de dados

O método da cinética inversa basea-se na solução das equações da cinética puntual, dadas por:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (4.1)$$

e

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (4.2)$$

onde:

$N(t)$ representa o fluxo de nêutrons ou a corrente do detector,

$\rho(t)$ representa a reatividade em função do tempo,

β_i representa a fração de nêutrons atrasados para cada grupo i ,

β representa a fração total efetiva de nêutrons atrasados,

λ_i representa a constante de decaimento para o nêutron atrasado do grupo i ,

$C_i(t)$ representa a concentração do i -ésimo precursor de nêutron atrasado, e

Λ representa o tempo de geração de nêutrons prontos.

Resolvendo a equação (4.2), e substituindo o resultado final na equação (4.1), a seguinte equação para $\rho(t)$ pode ser obtida:

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} + \beta_{eff} - \frac{\Lambda}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t} - \frac{\Lambda}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt' \quad (4.3)$$

Considerando que o reator esteja inicialmente crítico em $t = 0$, pode ser mostrado, para cada grupo i que:

$$C_i(0) = \frac{\beta_i}{\lambda_i \Lambda} N(0) \quad (4.4)$$

A integral na equação (4.3) implica que o fluxo de nêutrons deve ser avaliado em intervalos de tempos discretos $(t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+n})$, uma vez que as medidas online da reatividade é feita empregando-se detectores de nêutrons. Esses detectores de nêutrons fornecem uma resposta dependente do tempo para uma reatividade diferente de zero.

Para simplificar a notação, considere as seguintes definições no instante t_k :

$$X_k = \frac{\Lambda}{n_k} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{t_k} + \beta_{eff} \quad (4.5)$$

$$Y_{ik} = \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t_k} \quad (4.6)$$

onde $C_i(0)$ é dado pela equação (4.4),

$$Z_{ik} = \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t_k} \int_0^{t_k} n(t') e^{\lambda_i t'} dt' \quad (4.7)$$

Deste modo resulta que a reatividade no instante k pode ser escrita como:

$$\rho_k = X_k - \frac{\Lambda}{n_k} \sum_{i=1}^6 Y_{ik} - \frac{\Lambda}{n_k} \sum_{i=1}^6 Z_{ik} \quad (4.8)$$

Do mesmo modo, para um instante t_{k+1} :

$$\rho_{k+1} = X_{k+1} - \frac{\Lambda}{n_{k+1}} \sum_{i=1}^6 Y_{ik+1} - \frac{1}{n_{k+1}} \sum_{i=1}^6 Z_{ik+1} \quad (4.9)$$

onde, agora:

$$X_{k+1} = \frac{\Lambda}{n_{k+1}} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{t_{k+1}} + \beta_{eff} \quad (4.10)$$

$$Y_{ik+1} = Y_{ik} e^{-\lambda_i \Delta t} \quad (4.11)$$

$$Z_{ik+1} = Z_{ik} e^{-\lambda_i \Delta t} + \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t_{k+1}} \int_{t_k}^{t_{k+1}} n(t') e^{\lambda_i t'} dt' \quad (4.12)$$

com $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

Os termos das derivadas da equação (4.3) podem ser escritos como:

$$\left. \frac{dN(t)}{dt} \right|_{t_{k+1}} = \frac{N_{k+1} - N_k}{\Delta t} \quad (4.13)$$

Assumindo também que N pode ser aproximada por uma linha reta, no intervalo Δt com $N(t) = a + bt$, a integral na equação (4.3) resulta:

$$\int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt' \cong \int_{t_k}^{t_{k+1}} (a + bt') e^{\lambda_i t'} dt' = \frac{e^{\lambda_i t_{k+1}}}{\lambda_i} \left(N_{k+1} - \frac{b}{\lambda_i} \right) - \frac{e^{\lambda_i t_k}}{\lambda_i} \left(N_k - \frac{b}{\lambda_i} \right) \quad (4.14)$$

onde $b = \frac{N_{k+1} - N_k}{\Delta t}$.

Este é o algoritmo para a obtenção da reatividade pelo método da cinética inversa. A equação (4.9) para ρ_{k+1} é a equação final.

O início do algoritmo é feito considerando:

$$X_0 = \beta_{eff} \quad (4.15)$$

$$Y_{i,0} = \left(\frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \right) N(0) \quad (4.16)$$

$$Z_{i,0} = 0 \quad (4.17)$$

$N(0)$ é o primeiro valor do fluxo de nêutrons (corrente ou contagens) e é obtido quando o reator está crítico, antes da inserção de reatividade, por exemplo.

O algoritmo para obter a reatividade é executado em um microcomputador e foi escrito em linguagem gráfica LABVIEW. Este algoritmo é alimentado por um sistema de aquisição de dados composto de detectores operando no modo corrente (câmara de ionização compensada), um eletrômetro e uma placa GPIB. Estes sistema de aquisição de dados é executado a uma taxa de uma amostra por segundo. Estes dados podem ser gravados em arquivos no computador para posterior utilização. O reatímetro pode ler estes dados e executá-los novamente para aplicações específicas.

Os parâmetros dos nêutrons atrasados efetivos necessários para as medidas do reatímetro foram avaliados em [60] para o reator IPEN/MB-01 e são apresentados na TAB. 4.1.

TABELA 4.1 – Parâmetros Experimentais de Nêutrons Atrasados do Reator IPEN/MB-01.

<i>Grupo</i>	β_i	λ_i (s ⁻¹)
1	$(2,679 \pm 0,023) \times 10^{-4}$	0,012456 (fixo)
2	$(1,463 \pm 0,069) \times 10^{-3}$	$0,0319 \pm 0,0032$
3	$(1,34 \pm 0,13) \times 10^{-3}$	$0,1085 \pm 0,0054$
4	$(3,10 \pm 0,10) \times 10^{-3}$	$0,3054 \pm 0,0055$
5	$(8,31 \pm 0,62) \times 10^{-4}$	$1,085 \pm 0,044$
6	$(4,99 \pm 0,27) \times 10^{-4}$	$3,14 \pm 0,11$
$\beta_{eff} = (7,50 \pm 0,19) \times 10^{-3}$		
$\Lambda = 31,96 \pm 1,06$ (μs)		

4.2.3. Obtenção dos valores médios de reatividades e erros devido às incertezas dos parâmetros cinéticos

O gráfico abaixo apresenta um perfil temporal da condução dos experimentos. É uma ilustração do foi explicado na introdução da seção 4.2.

FIGURA 4.11 – Reatividade ao longo do tempo no decorrer dos experimentos de calibração de barras de controle.

Os patamares em torno de 100 pcm são os pontos onde foram realizadas as leituras das posições das barras de controle quando o reator estava crítico. Ou seja, cada patamar, também chamado de “medição”, corresponde a uma posição definida das barras de controle. Para se determinar a reatividade nestes patamares foram realizadas análises estatísticas dos dados armazenados nos arquivos, obtendo-se para cada um a média, o desvio padrão e o desvio padrão da média.

Além disso, a fim de se avaliar a influência dos erros das medidas dos parâmetros cinéticos mostrados na TAB. 4.1, o reatímetro foi realimentado com os dados obtidos, subtraindo e somando os erros associados. Assim, as incertezas das medidas da reatividade, devido às incertezas das medidas dos parâmetros de nêutrons atrasados efetivos foram obtidas do seguinte modo: O reatímetro foi novamente executado a partir das leituras dos dados do detector e da adição simultânea dos parâmetros cinéticos nominais para todas as incertezas (em β_i , λ_i e Λ). Esta reatividade foi chamada de ρ^+ . O reatímetro foi novamente executado subtraindo desta vez todas as incertezas dos valores nominais. Esta reatividade foi chamada de ρ^- . As incertezas finais da reatividade, σ_t , devido as incertezas dos parâmetros dos nêutrons atrasados foram calculada por:

$$\sigma_t = \frac{|\rho^+ - \rho| + |\rho^- - \rho|}{2} \quad (4.18)$$

onde ρ é a reatividade medida, determinada a partir dos parâmetros efetivos das frações nominais dos nêutrons atrasados.

4.2.4. A calibração das barras de controle para o reator operando com refletor cheio de água leve

A calibração das barras de controle do reator IPEN/MB-01 com o refletor cheio de água leve, como dito anteriormente, foi feita por meio da técnica da compensação. Inicialmente o reator IPEN/MB-01 foi criticalizado a 1W com as varetas de controle BC1 fixada na posição de 32,70% retirada e as varetas de controle BC2 posicionadas de modo a tornar o reator crítico na posição de 99,74% retirada. Esta configuração da barra de controle foi o ponto de partida, com a BC2 em sua posição máxima possível, de retirada.

Considerando a configuração padrão (28 x 26 varetas de combustíveis), o excesso de reatividade do reator IPEN/MB-01 é de cerca de 2.400 pcm e a retirada de cada uma destas barras de controle está próximo a 3.000 pcm. Portanto, apenas uma barra de controle pode desligar o reator e a posição de partida para a barra de controle BC1, retirada 32,84%, foi a melhor posição alcançada para o início da calibração. O próximo passo foi manter a BC2 retirada 99,74% e mover a BC1 para 34,83%. Esta mudança na configuração da barra de controle tornou o reator supercrítico e a corrente do detector devido à excursão de potência foi transformada em reatividade, empregando-se o reatímetro. A medida de reatividade pelo reatímetro foi de 78,89 pcm. Após isto, a barra de controle BC2 foi retornada ao controle automático e uma nova posição crítica foi atingida. A potência também voltou a 1W. Este processo foi repetido até que a barra de controle BC1 atingisse sua máxima posição possível de retirada. A máxima inserção positiva de reatividade permitida (115 pcm) foi uma restrição em todas as medidas de reatividade.

Os dados obtidos para esta operação são apresentados na TAB. 4.2, onde, o cabeçalho das colunas tem o seguinte significado:

- **Medição** é a sequência das medidas;
- **BC1** e **BC2** referem-se à posição retirada da BC1 e da BC2, respectivamente, com erro 0,013%;
- $\bar{T}$ é a temperatura média do moderador, com o erro de 0,02°C;
- $\Delta\rho$, é a variação de reatividade, dada por $\bar{\rho} \pm \sigma_{\bar{\rho}}$.

TABELA 4.2 – Dados medidos para a calibração das barras de controle. Refletor cheio de água leve.

Medição	BC 1 (%)± 0,013	BC 2 (%)± 0,013	$\bar{T}$ (°C)± 0,02	$\Delta\rho$ (pcm)	
				$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
1	32.84	99.74	21.34	Crítico	
	34.83	99.74	21.22	78.89	0.68
2	34.83	92.42	21.23	Crítico	
	36.81	92.42	21.23	82.38	0.15
3	36.81	87.66	21.24	Crítico	
	38.84	87.66	21.25	90.82	0.52

TABELA 4.2 – Dados medidos para a calibração das barras de controle. Refletor cheio de água leve (Cont.).

Medição	BC 1	BC 2	$\bar{T}$	$\Delta\rho$ (pcm)	
	(%) $\pm$ 0,013	(%) $\pm$ 0,013	($^{\circ}\text{C}$) $\pm$ 0,02	$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
4	38.84	83.73	21.25	Crítico	
	40.53	83.73	21.26	92.28	1.66
5	40.53	80.78	21.26	Crítico	
	42.89	80.78	21.26	115.69	1.09
6	42.89	76.88	21.27	Crítico	
	45.05	76.88	21.27	104.78	1.75
7	45.05	73.65	21.27	Crítico	
	47.11	73.65	21.27	103.90	1.43
8	47.11	70.83	21.27	Crítico	
	48.98	70.83	21.28	96.41	1.48
9	48.98	68.37	21.27	Crítico	
	51.18	68.37	21.28	113.08	1.53
10	51.18	65.69	21.28	Crítico	
	53.22	65.69	21.27	106.40	0.93
11	53.22	63.27	21.27	Crítico	
	55.17	63.27	21.28	95.11	1.38
12	55.17	61.10	21.28	Crítico	
	57.25	61.10	21.28	103.68	0.92
13	57.25	58.83	21.29	Crítico	
	59.31	58.83	21.29	95.87	1.08
14	59.31	56.79	21.29	Crítico	
	61.48	56.79	21.29	100.15	1.86
15	61.48	54.86	21.29	Crítico	
	63.50	54.86	21.29	96.46	0.54
16	63.50	52.96	21.29	Crítico	
	65.79	52.96	21.29	100.67	0.91
17	65.79	50.93	21.29	Crítico	
	68.24	50.93	21.29	97.95	1.41
18	68.24	48.96	21.30	Crítico	
	70.78	48.96	21.31	99.55	0.99
19	70.78	46.97	21.32	Crítico	
	73.55	46.97	21.32	100.94	0.76
20	73.55	44.99	21.32	Crítico	
	76.41	44.99	21.32	98.28	0.87
21	76.41	43.09	21.32	Crítico	
	79.52	43.09	21.33	100.10	1.11
22	79.52	41.17	21.32	Crítico	
	82.54	41.17	21.34	91.24	1.16
23	82.54	39.25	21.34	Crítico	
	86.72	39.25	21.34	100.78	1.28

TABELA 4.2 – Dados medidos para a calibração das barras de controle. Refletor cheio de água leve (Cont.).

Medição	BC 1	BC 2	$\bar{T}$	$\Delta\rho$ (pcm)	
	(%) $\pm$ 0,013	(%) $\pm$ 0,013	($^{\circ}\text{C}$) $\pm$ 0,02	$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
24	86.72	36.98	21.35	Crítico	
	92.07	36.98	21.34	97.39	0.82
25	92.07	34.91	21.33	Crítico	
	99.63	34.91	21.33	95.60	0.38
26	99.63	32.47	21.34	Crítico	
27	99.63	0.00	21.35	-606.31	32.17

Na última parte do experimento foi feito um “rod drop” da BC2 para se obter a reatividade da última posição crítica para a posição onde está barra de controle foi completamente inserida.

Os valores de reatividade, $\Delta\rho = \bar{\rho} \pm \sigma_{\bar{\rho}}$, nas duas últimas colunas na TAB. 4.2 foram obtidos por meio de um tratamento estatístico, levando em consideração os erros experimentais dos parâmetros cinéticos, conforme mostrado na TAB 4.3 a seguir, onde o cabeçalho das colunas tem o seguinte significado:

- **Medição** é a sequência das medidas,
- **N** é o número de pontos utilizados para a realização da estatística.
- **ρ** são os valores do reatímetro, sendo ρ^- e ρ^+ , respectivamente, as reatividades obtidas do reatímetro após a subtração e a adição dos erros dos parâmetros cinéticos, conforme explicado na seção 4.2.3.
- **σ** é o desvio padrão de **ρ** ,
- **σ_m** é o desvio padrão da média de **ρ** ,
- **σ_t** é o erro, calculado conforme a expressão (4.18), $\sigma_t = \frac{|\rho^+ - \rho| + |\rho^- - \rho|}{2}$
- **$\Delta\rho$** é dada por $\bar{\rho} \pm \sigma_{\bar{\rho}}$, onde $\sigma_{\bar{\rho}} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_t^2}$

TABELA 4.3 – Tratamento estatístico para obtenção da reatividade, $\Delta\rho$, em pcm.

Medição	N	ρ		σ (pcm)	σ_m (pcm)	σ_t (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	
			(pcm)				$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
1	80	ρ^-	78.1926	1.30753	0.14619			
	80	ρ	78.8894	1.31477	0.147	0.66663	78.89	0.68
	80	ρ^+	79.5258	1.59145	0.17793			
2	66	ρ^-	82.3617	1.14539	0.14099			
	66	ρ	82.3761	1.20499	0.14832	0.02616	82.38	0.15
	66	ρ^+	82.414	1.27037	0.15637			
3	72	ρ^-	90.4766	3.10321	0.36572			
	72	ρ	90.8167	3.41905	0.40294	0.32614	90.82	0.52
	72	ρ^+	91.1289	3.68638	0.43444			
4	125	ρ^-	91.4323	15.1739	1.35719			
	125	ρ	92.2762	16.1458	1.44412	0.82229	92.28	1.66
	125	ρ^+	93.0768	17.072	1.52696			
5	45	ρ^-	114.624	2.30642	0.34382			
	45	ρ	115.687	2.46721	0.36779	1.02185	115.69	1.09
	45	ρ^+	116.668	2.62517	0.39134			
6	53	ρ^-	103.149	6.1447	0.84404			
	53	ρ	104.775	5.87476	0.80696	1.54810	104.78	1.75
	53	ρ^+	106.246	5.66626	0.77832			
7	47	ρ^-	102.409	1.58797	0.23163			
	47	ρ	103.899	1.49384	0.2179	1.41371	103.90	1.43
	47	ρ^+	105.236	1.60169	0.23363			
8	44	ρ^-	94.8371	1.17305	0.17684			
	44	ρ	96.4122	1.0683	0.16105	1.46859	96.41	1.48
	44	ρ^+	97.7743	1.32282	0.19942			
9	29	ρ^-	111.5	0.98558	0.18302			
	29	ρ	113.078	0.97469	0.181	1.51635	113.08	1.53
	29	ρ^+	114.532	1.04586	0.19421			
10	37	ρ^-	105.486	1.43562	0.23601			
	37	ρ	106.395	1.5469	0.25431	0.89628	106.40	0.93
	37	ρ^+	107.278	1.66903	0.27439			
11	56	ρ^-	94.0532	7.20173	0.96237			
	56	ρ	95.1141	7.11539	0.95083	0.99972	95.11	1.38
	56	ρ^+	96.0526	7.08383	0.94662			
12	41	ρ^-	102.75	1.50824	0.23555			
	41	ρ	103.678	1.56419	0.24429	0.88629	103.68	0.92
	41	ρ^+	104.523	1.64947	0.2576			
13	23	ρ^-	94.7524	1.43534	0.29929			
	23	ρ	95.8658	1.40041	0.29201	1.03546	95.87	1.08
	23	ρ^+	96.8233	1.40753	0.29349			

TABELA 4.3 – Tratamento estatístico para obtenção da reatividade, $\Delta\rho$, em pcm (Cont.).

Medição	N	ρ		σ (pcm)	σ_m (pcm)	σ_t (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	
		(pcm)					$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
14	50	ρ^-	98.2289	1.97725	0.27963			
	50	ρ	100.153	1.85828	0.2628	1.84411	100.15	1.86
	50	ρ^+	101.917	2.14185	0.3029			
15	43	ρ^-	95.9517	1.41217	0.21535			
	43	ρ	96.4618	1.4811	0.22586	0.49283	96.46	0.54
	43	ρ^+	96.9374	1.55796	0.23759			
16	18	ρ^-	99.7586	1.01092	0.23828			
	18	ρ	100.672	1.05794	0.24936	0.88033	100.67	0.91
	18	ρ^+	101.519	1.11472	0.26274			
17	17	ρ^-	97.1157	4.46578	1.08311			
	17	ρ	97.9507	4.77947	1.15919	0.80535	97.95	1.41
	17	ρ^+	98.7264	5.08729	1.23385			
18	35	ρ^-	98.5252	0.95176	0.16088			
	35	ρ	99.5469	0.90084	0.15227	0.97440	99.55	0.99
	35	ρ^+	100.474	0.9256	0.15645			
19	43	ρ^-	100.179	1.00753	0.15365			
	43	ρ	100.94	1.09947	0.16767	0.74576	100.94	0.76
	43	ρ^+	101.67	1.21055	0.18461			
20	43	ρ^-	97.3955	1.05468	0.16084			
	43	ρ	98.2793	1.05885	0.16147	0.85067	98.28	0.87
	43	ρ^+	99.0969	1.12753	0.17195			
21	60	ρ^-	98.9353	0.97058	0.1253			
	60	ρ	100.102	1.00765	0.13009	1.10233	100.10	1.11
	60	ρ^+	101.14	1.28407	0.16577			
22	63	ρ^-	90.0419	1.24036	0.15627			
	63	ρ	91.2397	1.22783	0.15469	1.14570	91.24	1.16
	63	ρ^+	92.3333	1.57982	0.19904			
23	47	ρ^-	99.4446	1.02127	0.14897			
	47	ρ	100.782	0.97505	0.14223	1.27207	100.78	1.28
	47	ρ^+	101.989	1.17599	0.17154			
24	56	ρ^-	96.5431	1.08213	0.14461			
	56	ρ	97.3866	1.04578	0.13975	0.80355	97.39	0.82
	56	ρ^+	98.1502	1.11374	0.14883			
25	37	ρ^-	95.2503	0.32853	0.05401			
	37	ρ	95.602	0.34793	0.0572	0.37451	95.60	0.38
	37	ρ^+	95.9993	0.3693	0.06071			
26	258	ρ^-	-643.89	31.6545	1.97072			
	258	ρ	-606.31	19.6842	1.22548	32.14406	606.31	32.17
	258	ρ^+	-579.6	24.2208	1.50792			

No capítulo 5 serão apresentadas as análises e os resultados deste experimento.

4.2.5. A calibração das barras de controle para o reator operando com refletor cheio de água pesada

Com o refletor cheio de água pesada na região refletora do reator IPEN/MB-01 foi realizado a calibração de BC por meio de uma série de medições. Como já mencionado anteriormente, o refletor construído em chapas de alumínio tipo 5052 com 5 mm de espessura, instalado na face oeste do núcleo IPEN/MB-01 e foi especialmente concebido para essa atividade. As FIG. 4.12 e 4.13 mostram os detalhes desta caixa e o seu posicionamento em relação ao núcleo do reator. Na FIG 4.12 nota-se um corte parcial da chapa frontal por onde se observam os reforços internos destinados a evitar o estufamento da caixa durante o enchimento. A experiência foi realizada com o refletor completamente cheio de água pesada.

FIGURA 4.12 – Perspectiva em detalhes do refletor.

O refletor foi centrado radialmente, bem como axialmente em relação ao centro do núcleo ativo. A distância entre o refletor e a última linha de barras combustíveis é de $15,0 \pm 1,0$ mm. Os lados do núcleo ativo, possuem 414,8 mm, resultante de 27×15 mm (pitch) + 9,8 mm (diâmetro exterior da haste de combustível), e 384,8 mm, resultante de 25×15 mm (pitch) + 9,8 mm (diâmetro exterior da haste de combustível), visto que a configuração do núcleo é 28 x 26 varetas.

FIGURA 4.13 – Vistas em detalhes do refletor e o seu posicionamento em relação ao Núcleo Ativo.

O posicionamento axial do refletor é tal que o eixo central do refletor (630 mm) é paralelo ao eixo central axial do núcleo ativo, e foi possível empregando um suporte especial. Este suporte foi feito de polietileno que possui uma altura de 41,5 mm.

Para o posicionamento radial da caixa refletora em relação ao centro do núcleo utilizou-se parafusos especiais. Estes parafusos fixam os suportes superiores e inferiores na estrutura do reator, e deste modo, o refletor foi posicionado na face oeste do reator IPEN/MB-01. Estes parafusos também permitiram o alinhamento da parede do refletor de modo paralelo à face oeste do núcleo, e também o ajuste com precisão da distância entre o refletor e a última linha de varetas de combustível no núcleo (15 mm).

As grandezas medidas neste experimento foram as reatividades e as posições críticas das barras de controle para várias combinações de BC1 e BC2. O procedimento de medição para este caso, com o refletor cheio de Água Pesada, é muito semelhante àquele apresentado na introdução da seção 4.2.4. Desta vez, no entanto, o primeiro ponto de criticalidade foi obtido com a BC1 retirada 90,38% e a BC2 retirada 0,59%. Os dados da operação com Água Pesada são apresentados na TAB. 4.4, onde o cabeçalho das colunas tem o seguinte significado:

- **Medição** é a sequência das medidas;
- **BC1** e **BC2** referem-se à posição retirada da BC1 e da BC2, respectivamente, como erro de 0,013%;
- $\bar{T}$ é a temperatura do moderador, com erro de 0,02°C;
- $\Delta\rho$, é a variação de reatividade, dada por $\bar{\rho} \pm \sigma_{\bar{\rho}}$.

TABELA 4.4. Dados medidos para a calibração das barras de controle. Refletor cheio de água pesada.

Medição	BC 1 (%) $\pm$ 0.013	BC 2 (%) $\pm$ 0.013	$\bar{T}$ (°C) $\pm$ 0.02	$\Delta\rho$ (pcm)	
				$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
1	90.38	0.59	20.91	Crítico	
	90.38	15.12	20.90	97.75	1.28
2	85.60	15.12	20.93	Crítico	
	85.60	20.12	20.87	107.56	1.68
3	81.48	20.12	20.93	Crítico	
	81.48	24.01	20.94	114.61	1.75
4	77.66	24.01	20.92	Crítico	
	77.66	27.47	20.90	122.31	1.97

TABELA 4.4. Dados medidos para a calibração das barras de controle. Refletor cheio de água pesada (Cont.).

Medição	BC 1 (%) ± 0.013	BC 2 (%) ± 0.013	$\bar{T}$ ($^{\circ}\text{C}$) ± 0.02	$\Delta\rho$ (pcm)	
				$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
5	74.07	27.47	20.91	Crítico	
	74.07	30.01	20.94	102.98	1.20
6	71.21	30.01	20.92	Crítico	
	71.21	32.34	20.95	102.00	1.51
7	68.47	32.34	20.88	Crítico	
	68.47	34.70	20.92	107.35	1.38
8	65.82	34.70	20.84	Crítico	
	65.82	36.62	20.92	96.60	1.80
9	63.52	36.62	20.87	Crítico	
	63.52	38.71	20.92	109.44	2.36
10	61.07	38.71	20.92	Crítico	
	61.07	40.61	20.98	104.31	1.73
11	58.78	40.61	20.92	Crítico	
	58.78	42.30	20.92	93.87	1.35
12	56.75	42.30	20.96	Crítico	
	56.75	44.08	20.95	101.51	1.13
13	54.61	44.08	20.88	Crítico	
	54.61	45.82	20.94	101.23	1.28
14	52.53	45.82	20.88	Crítico	
	52.53	47.49	20.94	98.75	1.50
15	50.50	47.49	20.94	Crítico	
	50.50	49.13	20.96	95.74	1.20
16	48.53	49.13	20.89	Crítico	
	48.53	50.73	20.94	93.67	1.01
17	46.55	50.73	20.93	Crítico	
	46.55	52.38	20.90	93.94	0.73
18	44.65	52.38	20.95	Crítico	
	44.65	54.01	20.94	96.01	0.39
19	42.59	54.01	20.96	Crítico	
	42.59	55.71	20.90	95.95	0.91
20	40.58	55.71	20.96	Crítico	
	40.58	57.39	20.95	96.14	1.17
21	38.44	57.39	20.94	Crítico	
	38.44	59.08	20.97	93.37	1.02
22	36.33	59.08	20.95	Crítico	
	36.33	60.80	20.97	95.67	1.12
23	33.95	60.80	20.96	Crítico	
	33.95	62.72	20.97	97.95	1.22
24	31.38	62.72	20.98	Crítico	
	31.38	64.45	21.03	90.66	0.66

TABELA 4.4. Dados medidos para a calibração das barras de controle. Refletor cheio de água pesada (Cont.).

Medição	BC 1 (%) ± 0.013	BC 2 (%) ± 0.013	$\bar{T}$ (°C) ± 0.02	$\Delta\rho$ (pcm)	
				$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
25	28.86	64.45	21.02	Crítico	
	28.86	66.30	20.97	94.81	0.66
26	25.94	66.30	20.98	Crítico	
	25.94	68.11	20.95	90.23	0.64
27	22.72	68.11	20.93	Crítico	
	22.72	70.10	20.97	97.08	1.21
28	18.58	70.10	20.97	Crítico	
	18.58	72.12	20.94	95.37	0.94
29	13.01	72.12	20.98	Crítico	
	13.01	74.23	20.98	97.27	1.06
30	0.65	74.23	21.01	Crítico	

Do modo semelhante como feito para a água leve, aqui os valores de reatividade, $\Delta\rho = \bar{\rho} \pm \sigma_{\bar{\rho}}$, nas duas últimas colunas da TAB. 4.4 também foram obtidos por meio de um tratamento estatístico, levando em consideração os erros experimentais dos parâmetros cinéticos, conforme mostrado na TAB 4.5 a seguir, onde o cabeçalho das colunas tem o seguinte significado:

- **Medição** é a sequência das medidas,
- **N** é o número de pontos utilizados para a realização da estatística.
- ρ são os valores do reatímetro, sendo ρ^- e ρ^+ , respectivamente, as reatividades obtidas do reatímetro após a subtração e a adição dos erros dos parâmetros cinéticos, conforme explicado na seção 4.2.3.
- σ é o desvio padrão de ρ ,
- σ_m é o desvio padrão da média de ρ ,
- σ_t é o erro, calculado conforme a expressão (4.18), $\sigma_t = \frac{|\rho^+ - \rho| + |\rho^- - \rho|}{2}$
- $\Delta\rho$ é dada por $\bar{\rho} \pm \sigma_{\bar{\rho}}$, onde $\sigma_{\bar{\rho}} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_t^2}$

TABELA 4.5 – Tratamento estatístico para a obtenção da reatividade, $\Delta\rho$, em pcm. Refletor cheio de água pesada.

Medição	N	ρ		σ (pcm)	σ_m (pcm)	σ_t (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	
			(pcm)				$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
1	27	ρ^-	95.33396	3.85866	0.7426			
	27	ρ	97.75185	3.64206	0.70091	2.30234	97.75	1.28
	27	ρ^+	99.93863	3.51949	0.67733			
2	32	ρ^-	105.8014	0.87144	0.15405			
	32	ρ	107.5618	0.77153	0.13639	1.67602	107.56	1.68
	32	ρ^+	109.1535	0.92436	0.16341			
3	48	ρ^-	112.7806	1.00345	0.14483			
	48	ρ	114.61	0.90075	0.13001	1.74855	114.61	1.75
	48	ρ^+	116.2777	1.16445	0.16807			
4	38	ρ^-	120.2505	1.0666	0.17303			
	38	ρ	122.3051	0.95303	0.1546	1.96228	122.31	1.97
	38	ρ^+	124.175	1.07668	0.17466			
5	54	ρ^-	101.7192	1.08518	0.14767			
	54	ρ	102.9832	1.01918	0.13869	1.19345	102.98	1.20
	54	ρ^+	104.1061	1.18453	0.16119			
6	36	ρ^-	100.3899	1.13071	0.18845			
	36	ρ	101.9997	1.14895	0.19149	1.49834	102.00	1.51
	36	ρ^+	103.3865	1.36859	0.2281			
7	40	ρ^-	105.8943	1.10209	0.17426			
	40	ρ	107.3499	1.12221	0.17744	1.37179	107.35	1.38
	40	ρ^+	108.6379	1.28732	0.20354			
8	41	ρ^-	94.7039	1.07826	0.1684			
	41	ρ	96.60185	1.16496	0.18194	1.79053	96.60	1.80
	41	ρ^+	98.28495	1.65896	0.25909			
9	35	ρ^-	106.9737	1.18094	0.19961			
	35	ρ	109.4406	1.33594	0.22581	2.34707	109.44	2.36
	35	ρ^+	111.6678	1.86549	0.31532			
10	38	ρ^-	102.5007	1.26073	0.20452			
	38	ρ	104.3147	1.2097	0.19624	1.72017	104.31	1.73
	38	ρ^+	105.941	1.43965	0.23354			
11	63	ρ^-	92.46443	1.7761	0.22377			
	63	ρ	93.86919	1.24938	0.15741	1.33830	93.87	1.35
	63	ρ^+	95.14102	1.13348	0.1428			
12	47	ρ^-	100.3213	0.90046	0.13135			
	47	ρ	101.5085	0.83944	0.12245	1.12445	101.51	1.13
	47	ρ^+	102.5702	0.97396	0.14207			
13	50	ρ^-	99.87468	1.05416	0.14908			
	50	ρ	101.2297	1.03746	0.14672	1.27644	101.23	1.28
	50	ρ^+	102.4276	1.27944	0.18094			

TABELA 4.5 – Tratamento estatístico para a obtenção da reatividade, $\Delta\rho$, em pcm. Refletor cheio de água pesada (Cont.).

Medição	N	ρ		σ (pcm)	σ_m (pcm)	σ_t (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	
			(pcm)				$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
14	52	ρ^-	97.16879	1.21019	0.16782			
	52	ρ	98.74979	1.06306	0.14742	1.49357	98.75	1.50
	52	ρ^+	100.1559	1.37376	0.19051			
15	35	ρ^-	94.46969	1.00687	0.17019			
	35	ρ	95.73729	0.94046	0.15897	1.18560	95.74	1.20
	35	ρ^+	96.84089	1.04167	0.17607			
16	58	ρ^-	92.60402	0.9492	0.12464			
	58	ρ	93.67303	0.87489	0.11488	1.00094	93.67	1.01
	58	ρ^+	94.60591	1.10592	0.14521			
17	44	ρ^-	93.18134	0.71805	0.10825			
	44	ρ	93.9405	0.67916	0.10239	0.71963	93.94	0.73
	44	ρ^+	94.62061	0.73912	0.11143			
18	37	ρ^-	95.6237	0.54781	0.09006			
	37	ρ	96.00624	0.56602	0.09305	0.38373	96.01	0.39
	37	ρ^+	96.39116	0.59022	0.09703			
19	45	ρ^-	94.99644	0.92431	0.13779			
	45	ρ	95.94516	0.94997	0.14161	0.89726	95.95	0.91
	45	ρ^+	96.79096	1.08678	0.16201			
20	51	ρ^-	94.90192	0.90353	0.12652			
	51	ρ	96.14298	0.88694	0.1242	1.16464	96.14	1.17
	51	ρ^+	97.2312	1.1723	0.16415			
21	58	ρ^-	92.30131	0.98717	0.12962			
	58	ρ	93.37241	0.95056	0.12482	1.00804	93.37	1.02
	58	ρ^+	94.31738	1.1991	0.15745			
22	53	ρ^-	94.46909	0.97853	0.13441			
	53	ρ	95.67083	0.92876	0.12757	1.11492	95.67	1.12
	53	ρ^+	96.69892	1.17975	0.16205			
23	43	ρ^-	96.62379	1.20193	0.18329			
	43	ρ	97.94542	0.95003	0.14488	1.21003	97.95	1.22
	43	ρ^+	99.04384	0.93794	0.14303			
24	49	ρ^-	89.98069	0.8632	0.12331			
	49	ρ	90.65769	0.86831	0.12404	0.64422	90.66	0.66
	49	ρ^+	91.26912	0.96039	0.1372			
25	35	ρ^-	94.14934	1.07635	0.18194			
	35	ρ	94.80846	1.11296	0.18812	0.62830	94.81	0.66
	35	ρ^+	95.40594	1.1743	0.19849			
26	54	ρ^-	89.56481	0.88521	0.12046			
	54	ρ	90.23157	0.88418	0.12032	0.63149	90.23	0.64
	54	ρ^+	90.82778	0.98568	0.13413			

TABELA 4.5 – Tratamento estatístico para a obtenção da reatividade, $\Delta\rho$, em pcm. Refletor cheio de água pesada (Cont.).

Medição	N	ρ		σ (pcm)	σ_m (pcm)	σ_t (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	
			(pcm)				$\bar{\rho}$	$\sigma_{\bar{\rho}}$
27	48	ρ^-	95.81962	1.1517	0.1451			
	48	ρ	97.07797	1.21473	0.15304	1.19639	97.08	1.21
	48	ρ^+	98.2124	1.59128	0.20048			
28	32	ρ^-	94.4033	0.98127	0.16132			
	32	ρ	95.36949	1.04989	0.1726	0.92043	95.37	0.94
	32	ρ^+	96.24416	1.19114	0.19582			
29	27	ρ^-	96.17594	1.02987	0.14015			
	27	ρ	97.26678	1.02862	0.13998	1.04647	97.27	1.06
	27	ρ^+	98.26887	1.2241	0.16658			

No capítulo 5 serão apresentadas as análises e os resultados deste experimento.

4.3. Influência da temperatura

Neste experimento objetiva-se a obtenção de dados que permitam verificar a influência da variação da temperatura do moderador na reatividade do reator IPEN/MB-01 comparando as operações com refletor cheio de água leve e cheio de água pesada.

O aquecimento do moderador foi realizado e controlado por meio de resistências elétricas que encontram-se instaladas no interior do tanque e são ligadas e desligadas a partir da mesa de operação do reator. O incremento da temperatura é controlado por meio da indicação gráfica na tela de um computador.

As medidas da temperatura do moderador são obtidas de termopares instalados no núcleo. Ao todo são 12 termopares que medem a temperatura em diferentes posições, como já mostrado na FIG. 4.8, de modo que o valor representativo da temperatura do moderador é a média das medidas destes termopares. A leitura é feita em graus Celsius numa interface gráfica de um programa computacional, que apresenta tanto os valores individuais quanto a média já calculada da temperatura. O programa computacional também armazena estes dados de temperatura, a cada segundo, durante toda a operação. A FIG. 4.14 mostra um gráfico, construído a partir destes dados, com o comportamento da temperatura durante a execução do experimento podendo-se notar a estabilização da

temperatura nos patamares horizontais, utilizados para calcular e indicar a média das temperaturas.

FIGURA 4.14 – Gráfico da evolução da temperatura ao longo dos experimentos. Medições de 12 termopares posicionados em diferentes posições do núcleo.

4.3.1. Influência da temperatura com refletor cheio de água leve

O reator foi criticalizado com as BC igualmente retiradas em 58,04% e o moderador a uma temperatura inicial, T_i , de 19,17 °C. Em seguida foi realizado o aquecimento da água do tanque moderador para 20,98 °C. Como consequência esse aumento provocou a diminuição da reatividade tornando o reator subcrítico, percebida pela indicação do reatímetro.

Para compensar esta queda adicionou-se reatividade ao núcleo, retirando BC2 até 58,15%, tornando-o crítico novamente. A barra BC1 permaneceu fixa na posição 58,04%. E assim procedeu-se até o moderador atingir 40,37 °C. Buscou-se o estabelecer um gradiente de aquecimento, tão constante quanto possível, em torno de 2 °C.

Os dados obtidos e registrados a partir destes procedimentos são apresentados na TAB 4.6, a seguir, onde:

- $\bar{T}$ é a média das temperaturas,
- $\bar{\sigma}_T$ é o erro associado às temperaturas,
- $\bar{R}_{BC}$ é a média das posições de retirada da BC2 e
- $\bar{\sigma}_{BC2}$, é o erro associado às posições de BC2.

TABELA 4.6 – Retirada de BC2 em função da temperatura do moderador. Refletor de água leve.

Temperatura		Retirada da BC 2	
$\bar{T}$ (°C)	$\bar{\sigma}_T$ (°C)	$\bar{R}_{BC}$ (%)	$\bar{\sigma}_{BC2}$ (%)
19,17	0,05	58,040	0,013
20,98	0,08	58,151	0,013
22,75	0,08	58,278	0,013
24,58	0,08	58,417	0,013
26,59	0,08	58,581	0,013
28,54	0,07	58,752	0,013
30,52	0,07	58,943	0,013
32,26	0,04	59,152	0,013
34,23	0,07	59,379	0,013
36,01	0,07	59,605	0,013
38,33	0,08	59,940	0,013
40,37	0,06	60,241	0,013

Estas médias e erros foram obtidos da estatística dos dados registrados no sistema do reatímetro, que armazenaram as temperaturas e as posições das BC.

No capítulo 5 serão apresentadas as análises e os resultados deste experimento.

4.3.2. Influência da temperatura com refletor cheio de água pesada

Com o refletor cheio de água pesada o reator foi criticalizado nas seguintes condições: BC igualmente retiradas em 48,79 % e o moderador a uma temperatura inicial, T_i , de 19,34 °C. Em seguida foi realizado o aquecimento da água do tanque moderador para 20,81 °C. Como consequência esse aumento provocou a diminuição da reatividade tornando o reator subcrítico, percebida pela indicação do reatímetro.

Para compensar esta queda adicionou-se reatividade, retirando BC2 até 48,85%, tornando-o crítico novamente. A barra BC1 permaneceu fixa na posição 48,79% retirada. E assim procedeu-se até o moderador atingir 41,11 °C. Buscou-se o estabelecer um gradiente de aquecimento, tão constante quanto possível, em torno de 2 °C.

Os dados obtidos e registrados a partir destes procedimentos são apresentados na TAB 4.7, a seguir, onde:

- $\bar{T}$ é a média das temperaturas,
- $\bar{\sigma}_T$ é o erro associado às temperaturas,
- $\bar{R}_{BC}$ é a média das posições de retirada da BC2 e
- $\bar{\sigma}_{BC2}$, é o erro associado às posições de BC2.

TABELA 4.7 – Retirada de BC2 em função da temperatura do moderador. Refletor de Água Pesada.

Temperatura		Retirada da BC 2	
$\bar{T}$ (°C)	$\bar{\sigma}_T$ (°C)	$\bar{R}_{BC}$ (%)	$\bar{\sigma}_{BC2}$ (%)
19.34	0.05	48.788	0.013
20.81	0.08	48.850	0.013
22.61	0.04	48.960	0.013
24.3	0.07	49.081	0.013
26.21	0.04	49.211	0.013
27.87	0.04	49.323	0.013
29.57	0.04	49.466	0.013
31.31	0.04	49.673	0.013
32.79	0.04	49.759	0.013
34.55	0.05	49.937	0.013
36.18	0.07	50.105	0.013
37.93	0.05	50.314	0.013
39.57	0.04	50.486	0.013
41.11	0.05	50.846	0.013

Estas médias e erros foram obtidos da estatística dos dados registrados no sistema do reatímetro, que armazenaram as temperaturas e as posições das BC.

No capítulo 5 serão apresentadas as análises e os resultados deste experimento.

4.4. Irradiação de fios e folhas de ouro

A fim de se determinarem as taxas de reações nucleares realizaram-se quatro operações, sendo duas delas com o refletor cheio de água leve e as outras duas com o refletor cheio de água pesada. Em cada uma destas operações, irradiou-se respectivamente: A folha nua, a folha coberta com cádmio, o fio nú e o fio coberto com cádmio. As folhas foram posicionadas no centro do reator, na intersecção dos canais M-N e 14-15, e na cota correspondente à meia altura do comprimento ativo das varetas combustíveis. Os fios também foram posicionados nesta cota e dispostos ao longo do canal M-N.

A irradiação é parte da técnica conhecida como ativação neutrônica. Fios e folhas de ouro são instaladas no interior do núcleo nas posições onde se desejam medir a intensidade do fluxo de nêutrons. O ouro ao ser irradiado com nêutrons torna-se radioativo emitindo radiações gama (411.8 KeV), conforme a seguinte reação:

Os fios ou folhas de ouro ativados, após serem retirados do reator são encaminhados para um sistema para detecção e contagem a fim de se determinarem as atividades do mesmos. Deste modo, funcionam como detectores indiretos que possibilitam o cálculo das taxas de reações e fluxos, após análise de espectrometria da radiação gamma, a partir da determinação da atividade induzida pela ativação de fios ou folhas de ouro. É necessário, como será visto mais adiante, que a irradiação seja realizada em fios ou folhas nuas e também com a proteção de um revestimento, ou cobertura, neste caso utilizou-se o cádmio, que lhes servirão de filtros para nêutrons de energia térmica. Ou seja, os detectores nus permitem as reações com nêutrons de todas as energias enquanto que os cobertos com cádmio permitem apenas as reações devidos aos nêutrons não térmicos.

Este experimento foi desenvolvido em duas etapas: A primeira, consistiu em submeter os fios e as folhas de ouro ao fluxo de nêutrons no núcleo do reator. Na segunda, realizou-se a análise dos mesmos nas bancadas de detecção e contagem. As irradiações dos fios e das folhas foram realizadas em operações distintas.

A preparação dos fios e das folhas envolveu a seleção, a medição dos fios e das folhas e a montagem do mecanismo de suporte para irradiação no interior do núcleo. Como

suporte utilizou uma régua fabricada em acrílico. O fio foi encaixado e colado com fita adesiva num canal usinado ao longo do seu comprimento. A folha foi encaixada em um furo usinado na região central da régua. A FIG. 4.15 mostra um desenho da régua.

FIGURA 4.15 – Régua onde se fixam o fio ou a folha do ouro para a irradiação.

Esta régua possui uma espessura de 4 mm, que permite sua inserção em qualquer posição do núcleo e em qualquer altura do comprimento ativo onde haja interesse. A seção 4.4.1 apresenta maiores detalhes do mecanismo completo e de como esta régua é inserida. É necessário a determinação prévia da posição de irradiação desejada. Neste caso, a régua foi inserida entre os canais 14-15, conforme mostrado na FIG. 4.16, possibilitando a irradiação das folhas, na posição M-N-14-15 e, dos fios, ao longo do canal M-N.

FIGURA 4.16 – Corte transversal do núcleo na cota correspondente à metade do comprimento ativo das varetas mostrando o posicionamento da régua para irradiação do fio e da folha no núcleo do reator.

A operação de irradiação se processou em três etapas contínuas: Operação inicial, elevação da potência e irradiação propriamente dita, com duração de 1 h a uma potência de 100 W.

A etapa de operação inicial consistiu dos procedimentos para a colocação do reator em funcionamento. Em seguida, na etapa de elevação de potência, o reator teve sua potência aumentada de 0 a 100 W, mantendo-se um período constante. Com auxílio de um cronômetro mediu-se o intervalo de tempo gasto para esta elevação de potência, desde um instante inicial até ser alcançado os 100 W (rampa de potência). O operador, a partir do início da rampa, manteve a constância dos procedimentos para que o aumento fosse gradual. Ao atingir os 100 W, iniciou-se a terceira e última etapa mantendo-se a potência constante durante 1 h, intervalo de tempo de irradiação. Um segundo cronômetro foi utilizado para marcar o tempo a partir do início da irradiação a 100 W, com a finalidade de determinar o tempo de espera, como indicado na FIG. 4.19.

Após 1 h de irradiação o reator foi desligado e, posteriormente à monitoração da equipe de Proteção Radiológica, os fios ou folhas de ativação foram retirados e encaminhados ao sistema de espectrometria gama.

4.4.1. Mecanismo de suporte de fios e folhas de ativação para irradiação no núcleo

Sabendo que os fios ou folhas são detectores pontuais é necessário que os mesmos sejam posicionados nas coordenadas corretas no interior do núcleo. No reator IPEN/MB-01 utiliza-se um mecanismo simples, aqui denominado mecanismo de suporte de fios e folhas de ativação. O mecanismo é composto de uma haste de alumínio e de uma régua de plástico, detalhados adiante, e operados manualmente permitindo o posicionamento de fio ou folhas em qualquer região.

A régua de plástico é presa à haste por um pino articulado. Nela são feitos previamente furos passante e rebaixos que alojam as folhas ou os fios de ativação servindo como um porta amostra. A régua é introduzida no núcleo encaixando-se entre as varetas combustíveis, chamados canais. Como já mostrado, a FIG. 4.16 apresenta um corte transversal do núcleo mostrando, particularmente para o caso deste experimento, a colocação da régua (em verde) no canal 14–15, o que permitiu irradiar, individualmente; o fio, ao longo de todo este canal; e a folha, na intersecção dos canais M-N e 14–15.

As FIG. 4.17 e 4.18 apresentam uma visão mais detalhada do mecanismo. Nelas podem ser vistas a haste de alumínio, a extremidade inferior, o dispositivo de articulação e a régua de plástico com o alojamento de fios e folhas. Este mecanismo, a cada operação, deve ser colocado e retirado do núcleo. Ele é colocado no núcleo após calculadas as posição para irradiação, ou seja, entre quais canais (coordenadas x e y) e em qual cota (coordenada z) deverá permanecer o fio ou a folha. O dispositivo de articulação é movel e pode ser deslizado e fixado, antes de ser levado até o núcleo, em qualquer cota z ao longo da haste de alumínio.

FIGURA 4.17 – Mecanismo com a régua fechada.

FIGURA 4.18 – Mecanismo com a régua aberta.

A extremidade inferior da haste é encaixada em furos pré existentes na estrutura do núcleo dependendo do canal onde se deseja inserir a régua. Toda a manipulação da haste é feita pelos operadores do reator IPEN/MB-01, a partir da plataforma superior do reator.

Devido às restrições de espaço o mecanismo é introduzido no núcleo com a régua de plástico na posição “fechada”, como mostrada na FIG. 4.17. A régua é mantida nesta posição por um fino fio de nylon. Em seguida ela passa para a posição “aberta”,

como na FIG. 4.18 permanecendo nesta posição durante a operação. O movimento da régua em torno do pino de articulação, da posição “fechada” para a posição “aberta”, e vice versa, é realizado pelo peso próprio da régua controlada mediante o tensionamento e a distensão manual de um fino fio de nylon, não mostrado nas figuras.

Por fim, prende-se também a haste metálica à estrutura do reator na sua extremidade superior fixando, todo do mecanismo. É utilizado fita adesiva para permitir um rápido manuseio e um mínimo tempo de exposição à radiação no momento da colocação e retirada deste dispositivo. As FIG. 4.19 e 4.20 mostram o mecanismo junto ao núcleo, respectivamente, nas posições fechada e aberta.

FIGURA 4.19 – Vista do mecanismo introduzido e encaixado no núcleo com a régua fechada.

FIGURA 4.20 – Vista do mecanismo introduzido e encaixado no núcleo com a régua aberta.

TABELA 4.8 – Características dos detectores de fios e folhas de ativação.

Características	Folha	Fio
Diâmetro	7,50 mm	0,25 mm
Espessura / Comprimento	0,20 mm	445 mm
Massa	0,024 g	0.421 g
Material	Ouro infinitamente diluído (99% Al, 1% Au)	Ouro puro

4.4.2. Os sistemas de detecção e contagem

As folhas e o fios de ativação irradiados, respectivamente, são levados até um sistema de detecção e contagem que permitem a determinação de suas respectivas atividades. Esse sistema é formado pelos seguintes equipamentos: detector de radiação gama, amplificador de sinal, multicanal e computador com placa de aquisição de dados e programa para análise de espectros. O diagrama de blocos do sistema é apresentado na FIG. 4.21. As características detalhadas do sistema é mostrada no Anexo D.

FIGURA 4.21 – Diagrama de blocos do sistema de detecção e contagem.

A radiação que incide no detector é transformada em pulsos elétricos que são amplificados e enviados ao analisador de espectros multicanal que contam e separam os pulsos em faixas de energia por canal. No computador, por meio de uma placa de aquisição de dados os pulsos transformados em contagens são analisados e manipulados por meio de programas analisadores de espectros.

O detector utilizado é do tipo semicondutor, de Germânio Hiper Puro (HPGe). O seu funcionamento é baseado nos princípios da eletrônica dos semicondutores e nos fenômenos resultantes da interação da radiação gama com a matéria. Da eletrônica dos semicondutores sabe-se que um material formado a partir da justaposição de dois cristais semicondutores, cada um deles dopados com elementos pentavalentes e trivalentes, respectivamente, permite o fluxo seletivo de uma corrente elétrica quando submetido a uma diferença de potencial em suas extremidades. A dopagem conveniente de um cristal semicondutor com elementos pentavalentes produz um novo cristal com excesso de elétrons livres, denominado cristal do tipo “n”. Se for dopado com elementos trivalentes forma um cristal com predominância de lacunas ou buracos, denominado cristal tipo “p”. Unindo-se um cristal do tipo “n” com um do tipo “p” ocorre um rearranjo destes elétrons

livres e lacunas numa região conhecida como região depletada. Aplicando-se uma diferença de potencial neste novo cristal, de modo que o pólo positivo seja conectado na extremidade tipo “p” e o pólo negativo na extremidade tipo “n”, uma corrente flui através dele, após ser atingido um valor de tensão conhecido como barreira potencial. De modo contrário, se invertermos a polaridade da fonte (polarização inversa) a região depletada agirá como um isolante impedindo a passagem de corrente.

Com esta polarização inversa o cristal é adequado para a detecção pois, quando um fóton atinge o detector interagindo com os átomos do cristal ocorre a formação de pares de elétrons e lacunas, que migrarão sob ação do campo elétrico existente na zona depletada para as regiões “n” e “p”, respectivamente, produzindo pulsos de tensão. Este processo é mostrado na FIG. 4.22.

FIGURA 4.22 – Princípio do detector semicondutor de HPGe.

Os fótons no detector interagem basicamente por três formas: Pelo efeito fotoelétrico, por efeito Compton e por produção de pares.

A intensidade, ou altura, do pulso é proporcional à energia depositada pelo fóton. Os outros dispositivos eletrônicos do sistema, como mostrado na FIG. 4.21, amplificam e realizam a contagem dos pulsos gerados pela fonte de irradiação ao longo do tempo de exposição, discriminando-os por energias. A saída fornecida pelo sistema é um espectro de contagens por energia.

4.4.3. Técnica de ativação neutrônica

Como visto um detector de ativação ao ser submetido a um campo neutrônico de um reator nuclear produz átomos radioativos. A equação que rege tal fenômeno é dada por:

$$\frac{dN}{dt} = N\sigma_{atv}\phi - n\sigma_a\phi - n\lambda \quad (4.19)$$

O interesse nesta equação é obter uma expressão com termos mais simples e com valores mensuráveis, conhecidos ou determináveis experimentalmente, a fim de permitir o cálculo da taxa de reação, que é uma medida proporcional do fluxo neutrônico no núcleo do reator. Para isto desenvolve-se, como mostrado abaixo, uma série de manipulações algébricas da expressão (4.20) que resultarão nas expressões desejadas.

A expressão que rege o fenômeno foi obtida de uma equação de balanço de nêutrons onde a variação ou taxa de núcleos ativados é dada pela diferença entre o que é produzido e o que é perdido, ou seja:

$$(Variação \text{ de núcleos ativados}) = (Núcleos \text{ produzidos}) - (Taxa \text{ de desaparecimento}) \quad (4.20)$$

onde:

$\frac{dn}{dt}$ é a variação de núcleos ativados,

$N\sigma_{atv}\phi$ é a taxa de produção de núcleos ativados e

$n\sigma_a \cdot \phi + n\lambda$ é a taxa da desaparecimento, tanto por absorção quanto por decaimento.

Logo, substituindo estes termos na expressão (4.20) obtém-se:

$$\frac{dn}{dt} = N\sigma_{atv}\phi - n\sigma_a\phi - n\lambda \quad (4.21)$$

onde:

- n é o número de átomos ativados
- N é o número de núcleos alvo presentes no detector
- σ_{atv} é a seção de choque microscópica de ativação, em cm^2
- ϕ é o fluxo neutronico, em n° de nêutrons/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$
- σ_a é a seção de choque microscópica de absorção, em cm^2
- λ é a constante de decaimento dos átomos ativados, em s^{-1}

Por sua vez, o primeiro termo da equação (4.21), que envolve N , é obtido de:

$$\frac{dN}{dt} = -N\sigma_t\phi \quad (4.22)$$

cujas a solução é:

$$N = N_0 e^{-\sigma_t\phi t} \quad (4.22.a)$$

Substituindo (4.22.a) em (4.21) obtém-se:

$$\frac{dn}{dt} = N_0 e^{-\sigma_t\phi t} \sigma_{atv}\phi - n\sigma_a\phi - n\lambda \quad (4.23)$$

Rearranjando a expressão (4.23), tem-se:

$$\frac{dn}{dt} + n(\sigma_a \phi + \lambda) = N_0 e^{-\sigma_t \phi t} \sigma_{atv} \phi \quad (4.24)$$

Para a solução de (4.24) utiliza-se a técnica do fator integrante, que neste caso é $e^{(\sigma_a \phi + \lambda)t}$. Multiplicando ambos os lados por este fator e manipulando, obtém-se:

$$\frac{dn}{dt} e^{(\sigma_a \phi + \lambda)t} + n e^{(\sigma_a \phi + \lambda)t} (\sigma_a \phi + \lambda) = N_0 e^{-\sigma_t \phi t} e^{(\sigma_a \phi + \lambda)t} \sigma_{atv} \phi \quad (4.24.a)$$

$$\frac{dn}{dt} e^{(\sigma_a \phi + \lambda)t} + n e^{(\sigma_a \phi + \lambda)t} (\sigma_a \phi + \lambda) = N_0 e^{-[\sigma_t \phi t - (\sigma_a \phi + \lambda)t]} \sigma_{atv} \phi \quad (4.24.b)$$

Por meio da análise da ordem de grandeza dos termos $\sigma_t \phi$ e $\sigma_a \phi$ conclui-se que ambos são muito menores que a constante de decaimento λ , ou seja:

$$\sigma_t \cdot \phi \ll \lambda \quad \text{e} \quad \sigma_a \cdot \phi \ll \lambda \quad (4.24.c)$$

Assim, (4.24.b) fica:

$$\frac{dn}{dt} e^{\lambda t} + n e^{\lambda t} \lambda = N_0 e^{\lambda t} \sigma_{atv} \phi \quad (4.24.d)$$

O lado esquerdo da expressão (4.24.d) é a diferencial de $n e^{\lambda \cdot t}$. Logo:

$$\frac{d}{dt} [n e^{\lambda \cdot t}] = N_0 e^{\lambda \cdot t} \sigma_{atv} \phi \quad (4.24.e)$$

Integrando:

$$\int d[ne^{\lambda.t}] = \int_0^t (N_0 e^{\lambda.t} \sigma_{atv} \phi) dt \quad (4.24.f)$$

$$ne^{\lambda.t} = \frac{N_0 \sigma_{atv} \phi}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1) \quad (4.24.g)$$

$$n = \frac{N_0 \sigma_{atv} \phi (e^{\lambda t} - 1)}{\lambda \cdot e^{\lambda.t}} = \frac{N_0 \sigma_{atv} \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.24.h)$$

Mas, sabe-se que:

$$N_0 = N \cdot V \quad (4.24.i)$$

E, assim, chega-se ao valor de n em função do tempo de irradiação:

$$n = \frac{NV \sigma_{atv} \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.25)$$

Mas, a partir das definições de seção de choque macrosópica e de atividade inicial, dadas respectivamente por:

$$\Sigma_{atv} = \sigma_{atv} N \quad (4.25.a)$$

e

$$n\lambda = A_0 \quad (4.25.b)$$

chega-se a uma expressão que relaciona atividade inicial com o fluxo neutrônico:

$$A_0 = V \Sigma_{atv} \phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.26)$$

Nota-se que em (4.26) o termo $(1 - e^{-\lambda t})$ tende a um quando o tempo t é muito elevado, pois $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\lambda t} = 0$, ou seja:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (1 - e^{-\lambda t}) = 1 \quad (4.26.a)$$

FIGURA 4.23 – Gráfico mostrando a curva de irradiação, em azul e em vermelho, a curva de decaimento, a partir do fim da irradiação em (t, A_0) .

Numa situação onde o tempo é muito elevado e a expressão (4.26.a) pode ser aplicada, a atividade é conhecida como *atividade de saturação*, designada por A_∞ , conforme indicada na FIG. 4.23. Assim, nesta condição a expressão (4.26) equivale à:

$$A_\infty = V \Sigma_{atv} \phi \quad (4.27)$$

Relembra-se que taxa de reação nuclear (R) é dada por:

$$R = N \cdot A \cdot X \cdot \sigma_{atv} \cdot \phi \quad (4.28)$$

onde X , é a espessura de um alvo.

Comparando as expressões (4.27) e (4.28) nota-se que a atividade de saturação é equivalente à taxa de reação nuclear, portanto:

$$R = A_{\infty} = V\Sigma_{atv}\phi \quad \text{ou} \quad \phi = \frac{A_{\infty}}{V\Sigma_{atv}} \quad (4.29)$$

Comparando também as expressões (4.26) e (4.27), conclui-se que:

$$A_0 = A_{\infty}(1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{ou} \quad A_{\infty} = \frac{A_0}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (4.30)$$

Uma vez obtida a atividade inicial A_0 , durante um tempo de irradiação t , como mostrado na FIG. 4.11, calcula-se a atividade de saturação por meio da expressão (4.30).

A expressão (4.29) também pode ser reescrita em função da massa do detector, e utilizando (4.25.a), torna-se:

$$R = \frac{m}{\rho} N \Sigma_{atv} \phi \quad (4.31)$$

onde: ρ é a massa específica (g/cm^3) e m é a massa (g).

Mas, como:

$$N = \rho \frac{N_{Av}}{M} \quad (4.31.a)$$

onde: N_{Av} é a constante de Avogrado e M é o peso molecular, a expressão (4.32) pode finalmente ser expressa por:

$$R = \frac{N_{Av} m \Sigma_{atv} \phi}{M} \quad (4.32)$$

4.4.4. Atividade de saturação obtida a partir de um sistema de contagem

A taxa de reação nuclear será obtida por meio da contagem da emissões gamma, a partir da seguinte equação, que representa a soma de todas estas emissões capturadas num detector.

$$C = \varepsilon I \int_{t_1}^{t_2} A_0 e^{-\lambda t} dt + BG \quad (4.33)$$

Onde:

C	é a contagem integrada entre os instantes t_1 e t_2
ε	é a eficiência do detector
I	é a abundância do fotopico (%)
$\int_{t_1}^{t_2} A_0 e^{-\lambda t} dt$	é a atividade no instante dt
BG	é a radiação de fundo “background”
λ	é a constante de decaimento (s^{-1})

Resolvendo (4.33) temos:

$$C - BG = \varepsilon I A_0 \int e^{-\lambda t} dt \quad (4.34)$$

$$C - BG = \frac{-\varepsilon I A_0 e^{-\lambda t}}{\lambda} \quad (4.35)$$

Se (4.34) for integrada entre instantes t_1 e t_2 , teremos:

$$C - BG = \left. \frac{-\varepsilon I A_0 e^{-\lambda t}}{\lambda} \right|_{t_1}^{t_2} \quad (4.35.a)$$

t_1 e t_2 , são escolhidos de modo conveniente, conforme FIG. 4.19, sendo definidos:

$$\text{tempo de contagem} \quad t_c = t_2 - t_1 \quad \text{e} \quad (4.35.b)$$

$$\text{tempo de espera} \quad t_e = t_1 \quad (4.35.c)$$

Substituindo esses tempos na expressão (4.35.a), e desenvolvendo, obtém-se:

$$C - BG = \frac{\varepsilon I A_\infty (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_1} (1 - e^{-\lambda t_2 + \lambda t_1})}{\lambda} \quad (4.35.d)$$

$$C - BG = \frac{\varepsilon I A_\infty (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_e} (1 - e^{-\lambda t_c})}{\lambda} \quad (4.35.e)$$

Isolando A_∞ em (4.35.e), obtém-se a expressão para atividade de saturação:

$$A_\infty = \frac{\lambda (C - BG) e^{\lambda t_e}}{\varepsilon I (1 - e^{-\lambda t}) (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (4.36)$$

Observa-se que os termos t_e , t , t_c , I , ε e λ , que compõe a expressão (4.36), possuem valores conhecidos. O termo $(C - BG)$ é a contagem líquida (CL) e resulta dos dados obtidos do sistema de contagem.

4.4.5. Atividade de saturação térmica

Pode-se determinar a atividade de saturação por meio das expressões (4.30), onde o valor da atividade inicial é determinado pelo ajuste de curvas em um gráfico de decaimento a partir dos resultado das contagens.

A atividade de saturação é composta pelas parcelas térmica A_∞^{ter} , intermediária A_∞^{int} e rápida A_∞^{rap} , de modo que:

$$A_{\infty} = A_{\infty}^{ter} + A_{\infty}^{int} + A_{\infty}^{rap} \quad (4.37)$$

Esta atividade corresponde à atividade induzida em um detector do tipo fio ou folha nua, sem nenhum revestimento, A_{∞}^{nua} , quando exposto a um campo neutrônico. O termo devido aos nêutrons rápidos, A_{∞}^{rap} , é desprezível [37][47], e portanto, (4.37) pode ser reescrita apenas como função das parcelas térmicas e intermediárias. Assim, a atividade induzida num fio ou folha nua é:

$$A_{\infty}^{nua} = A_{\infty} = A_{\infty}^{ter} + A_{\infty}^{int} \quad (4.38)$$

Se irradiarmos sob as mesmas condições um fio ou folha cobertos com cádmio determinamos a atividade de saturação intermediária, pois a cobertura de cádmio age como um filtro absorvendo a parcela térmica. Deste modo, apenas a parcela intermediária atinge o fio ou folha de ouro. Isto é ilustrado no esquema da FIG. 4.24.

FIGURA 4.24 – Diagrama esquemático mostrando os efeitos da cobertura de cádmio.

Nota-se também que a cobertura de cádmio, por não ser um filtro perfeito, absorve parcela dos nêutrons intermediários, de modo que A_{∞}^{int} é dada pela expressão (4.40).

$$A_{\infty}^{int} = A_{\infty}^{cd} F_{cd} \quad (4.39)$$

onde, o termo que multiplica A_{∞}^{cd} é necessário para compensar a absorção destes nêutrons intermediários, e é denominado fator de cádmio, F_{cd} . O valor utilizado foi obtido em [41].

Deste modo, determinados experimentalmente A_{∞} e A_{∞}^{int} , resolve-se (4.39), determinando-se a atividade de saturação térmica, que como já visto em (4.12) é uma medida equivalente da taxa de reação nuclear:

$$A_{\infty}^{ter} = A_{\infty}^{nua} - A_{\infty}^{cd} F_{cd} \quad (4.40)$$

Denomina-se a razão entre as atividades de saturação das folhas nuas e cobertas com cádmio, que foram irradiadas, como razão de cádmio, R_{Cd} :

$$R_{cd} = \frac{A_{\infty}^{nua}}{A_{\infty}^{cd}} \quad (4.41)$$

Substituindo (4.42) em (4.41) obtém-se finalmente uma expressão para a atividade de saturação térmica, em função de F_{cd} , R_{Cd} e A_{∞}^{nua} .

$$A_{\infty}^{ter} = A_{\infty}^{nua} \left(1 - \frac{F_{cd}}{R_{cd}} \right) \quad (4.42)$$

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados. Na seção 5.1 apresentam-se os resultados referentes à calibração de barras de controle, na seção 5.2 os resultados da reatividade em função da variação da temperatura do moderador e na seção 5.3 são apresentadas a taxa de reação nuclear e o perfil do fluxo térmico.

5.1. Curvas de calibração de barras de controle

5.1.1. A reatividade introduzida pelo refletor, suportes e estruturas

Inicialmente, a fim de medir a reatividade induzida pelo próprio refletor (caixa de alumínio) e pelos demais componentes necessários à sua montagem, como suportes, apoios, calços e parafusos, o reator IPEN/MB-01 foi previamente criticalizado sem nenhum destes componentes, utilizando a configuração retangular padrão 28 x 26, registrando as posições críticas das BC, quando igualmente retiradas. Posteriormente, o refletor foi instalado na face oeste conforme os procedimentos descritos no capítulo anterior, e em seguida, preenchido com a mesma água leve do tanque moderador. O reator foi novamente criticalizado e as posições das BC, também igualmente retiradas, foram novamente registradas. Em ambas as situações a temperatura do moderador foi monitorada e o seu valor médio mantido à $21,08 \pm 0,04$ °C. Os resultados das posições das barras de controle retiradas são apresentados na TAB. 5.1. Convertendo a diferença nas posições das barras de controle (0,03%) em reatividade, empregando uma curva de calibração de barras de controle, o resultado final é 1,5 pcm, o que é suficientemente pequeno para ser ignorado. Isto demonstra que a alteração de reatividade, devido à presença do refletor cheio de água leve, além dos suportes, abas, parafusos e outros componentes, é desprezível. Como ambos experimentos foram realizados sob idênticas condições conclui-se que o refletor propriamente dito (caixa de alumínio) e demais materiais utilizados para a sua fixação acrescentaram pouquíssima reatividade no núcleo e, deste modo, as operações executadas com o refletor cheio de água leve instalado na face oeste do reator são equivalentes às operações padrões sem a presença do mesmo.

TABELA 5.1 – Posições das BC igualmente retiradas para o estado crítico.

Configuração do núcleo	BC1 (%)	BC2 (%)
sem caixa refletora	58.06	58.06
com refletor cheio de água leve	58.06	58.09

5.1.2. Refletor cheio de água leve

Conforme mostrado anteriormente na TAB. 4.2, foram obtidos os dados dos incrementos de reatividade, $\Delta\rho$, para cada medida de retirada e inserção das BC1 e BC2. Estes mesmos dados foram reorganizados permitindo a obtenção do excesso de reatividade. Para isto fez-se a soma cumulativa destes incrementos de reatividade, mostrado na TAB. 5.2. Nesta tabela, a **Posição da BC2** e $\Delta\rho$, são os valores experimentais médios, obtidos após tratamento estatístico, como explicado na seção 4.2.4. $\Sigma\rho$ e $\sigma_{\Sigma\rho}$, na última coluna, foram obtidos recursivamente fazendo $\Sigma\rho_i = \Sigma\rho_{i-1} + \bar{\rho}_i$ e $\sigma_{\Sigma\rho_i} = \sqrt{(\sigma_{\Sigma\rho_{i-1}})^2 + (\sigma_{\bar{\rho}_i})^2}$, onde o índice $i = (1, \dots, n)$ corresponde à respectiva **Medição**, com $\Sigma\rho_1 = \sigma_{\bar{\rho}_1} = 0$.

TABELA 5.2 – Valores integrais da reatividade das barras de controle. Configuração padrão com refletor cheio de água leve.

Medição	Posição da BC2		$\Delta\rho$		Reatividade Acumulada	
	Retirada (%)	Inserida (%)	$\bar{\rho}$ (pcm)	$\sigma_{\bar{\rho}}$ (pcm)	$\Sigma\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Sigma\rho}$ (pcm)
1	99.74	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00
2	92.42	7.58	78.89	0.68	78.89	0.68
3	87.66	12.34	82.38	0.15	161.27	0.70
4	83.73	16.27	90.82	0.52	252.08	0.87
5	80.78	19.22	92.28	1.66	344.36	1.88
6	76.88	23.12	115.69	1.09	460.05	2.17
7	73.65	26.35	104.78	1.75	564.82	2.78
8	70.83	29.17	103.90	1.43	668.72	3.13
9	68.37	31.63	96.41	1.48	765.13	3.46
10	65.69	34.31	113.08	1.53	878.21	3.78
11	63.27	36.73	106.40	0.93	984.60	3.90
12	61.10	38.90	95.11	1.38	1079.72	4.13
13	58.83	41.17	103.68	0.92	1183.40	4.23
14	56.79	43.21	95.87	1.08	1279.26	4.37

TABELA 5.2 – Valores integrais da reatividade das barras de controle. Configuração padrão com refletor cheio de água leve (cont.).

Medição	Posição da BC2		$\Delta\rho$		Reatividade Acumulada	
	Retirada (%)	Inserida (%)	$\bar{\rho}$ (pcm)	$\sigma_{\bar{\rho}}$ (pcm)	$\Sigma\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Sigma\rho}$ (pcm)
15	54.86	45.14	100.67	0.91	1379.93	4.46
16	52.96	47.04	96.46	0.54	1476.40	4.50
17	50.93	49.07	100.67	0.91	1577.07	4.59
18	48.96	51.04	97.95	1.41	1675.02	4.80
19	46.97	53.03	99.55	0.99	1774.57	4.90
20	44.99	55.01	100.94	0.76	1875.51	4.96
21	43.09	56.91	98.28	0.87	1973.79	5.03
22	41.17	58.83	100.10	1.11	2073.89	5.16
23	39.25	60.75	91.24	1.16	2165.13	5.28
24	36.98	63.02	100.78	1.28	2265.91	5.44
25	34.91	65.09	97.39	0.82	2363.30	5.50
26	32.47	67.53	95.60	0.38	2458.90	5.51
27	0	100.00	606.31	32.17	3065.20	32.64

Obteve-se assim, a curva de calibração da BC2, FIG. 5.1, diretamente da plotagem dos dados da TAB. 5.2, tendo na abscissa os valores de inserção de BC2 e na ordenada a reatividade, $\Sigma\rho$.

FIGURA 5.1 – Curva de calibração da barra de controle BC2 para o núcleo operando com refletor cheio de água leve.

Os pontos marcados com círculos cheios são os valores experimentais. A linha contínua foi traçada por ajuste de pontos utilizando o modelo sigmoidal de Boltzmann, cuja expressão é:

$$\rho = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\left(\frac{P_{BC} - x_0}{dx}\right)}} + A_2 \quad (5.1)$$

onde ρ é a reatividade, P_{BC} é a posição da barra de controle dada em % de inserção, e A_1 , A_2 , A_3 e dx são constantes determinadas no processo dos mínimos quadrados. Os parâmetros A_1 , A_2 , x_0 e dx , resultantes do método de ajustamento para este caso são mostrados na TAB. 5.3. Esta função foi escolhida por que ela ajustou a maioria dos dados das calibrações de barras de controle do IPEN/MB-01.

TABELA 5.3 – Parâmetros de ajustamento de curva A_1 , A_2 , x_0 e dx para os dados experimentais de reatividade da BC2. Refletor cheio de água leve.

Parâmetro	BC2
A_1	- 185,03 ± 16,76
A_2	3220,55 ± 19,68
x_0	47,66 ± 0,22
dx	16,57 ± 0,23

Analisando a TAB. 5.2 e a FIG. 5.2. percebe-se que o excesso de reatividade para a posição mais inserida da BC2, 67,53%, está em torno de 2.458,90 pcm. Por meio da técnica de “rod drop” foi possível avaliar o restante da inserção da BC2, ou seja, quando ela é levada a 100% de inserção, o que resultou em torno 3.065 pcm. Isto é completamente análogo a dizer que a retirada completa de uma BC possui 3.065 pcm, visto que nesta condição a BC1 está totalmente retirada. Deste modo, torna-se claro que a inserção de uma única BC é capaz de desligar o reator. E ainda, para que seja possível criticalizar o reator uma das BC deve ser totalmente retirada, além da outra, cerca de 32,47%.

O excesso de reatividade do núcleo pode ser calculado utilizando-se a expressão (5.1). Como já explicado anteriormente, neste caso ρ é calculada para a posição

crítica BC2, quando BC1=100% e BC2 = 32,47% retiradas. Conforme mostrado na TAB. 4.2 da seção 4.2.4, esta foi a última condição possível de se atingir a criticalidade. Utilizou-se a posição da BC2, P_{BC} , expressa em porcentagem de inserção, visto que o ajustamento dos pontos foi feito obtido com esses valores. Assim, substituindo-se os parâmetros da TAB. 5.3 juntamente com $P_{BC} = (67,530 \pm 0,001)\%$ na equação de ajuste obteve-se 2.431,78 pcm de excesso de reatividade, quando BC1 está totalmente retirada. O erro obtido foi de 5,60 pcm e foi calculado por meio da expressão (5.2), a seguir,

$$\sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial A_1}\right)^2 \sigma_{A_1}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial A_2}\right)^2 \sigma_{A_2}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_0}\right)^2 \sigma_{x_0}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial dx}\right)^2 \sigma_{dx}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P_{BC}}\right)^2 \sigma_{P_{BC}}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_j}\right) \sigma_{x_i x_j}^2} \quad (5.2)$$

onde, as somatórias no radicando foram calculadas para $i \neq j$. Os termos $\sigma_{x_i x_j}^2$, com $x_i = (A_1, A_2, x_0, dx)$ e $x_j = (A_1, A_2, x_0, dx)$ para $x_i \neq x_j$, são as covariâncias entre os respectivos parâmetros. No Anexo A4 é mostrado o desenvolvimento destes termos, além dos termos das derivadas.

Portanto, o excesso de reatividade do núcleo para o reator operando com o refletor cheio de água leve na face oeste é de (2.431,78 ± 5,60) pcm.

5.1.3. Refletor cheio de água pesada

De modo análogo ao descrito na seção anterior, para este caso foram obtidos os dados dos incrementos de reatividade, $\Delta \rho$, a partir da TAB. 4.4, para cada medida de retirada e inserção de BC. Estes mesmos dados foram reorganizados permitindo a obtenção do excesso de reatividade. Para isto, fez-se a soma cumulativa destes incrementos de reatividade, como mostrado na TAB. 5.4. Aqui também $\Sigma \rho$ e σ_{ρ} , na última coluna, foram obtidos recursivamente fazendo $\Sigma \rho_i = \Sigma \rho_{i-1} + \bar{\rho}_i$ e $\sigma_{\Sigma \rho_i} = \sqrt{(\sigma_{\Sigma \rho_{i-1}})^2 + (\sigma_{\bar{\rho}_i})^2}$, onde o índice $i = (1, \dots, n)$ corresponde à respectiva **Medição**, com $\Sigma \rho_1 = \sigma_{\bar{\rho}_1} = 0$.

TABELA 5.4 – Valores integrais da reatividade das barras de controle. Configuração padrão com refletor cheio de Água Pesada.

Medição	Posição da BC2	$\Delta\rho$		Reatividade Acumulada	
	Retirada (%)	$\bar{\rho}$ (pcm)	$\sigma_{\bar{\rho}}$ (pcm)	$\Sigma\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Sigma\rho}$ (pcm)
1	0.59	0.000	0.000	0.000	0.000
2	15.12	97.752	1.284	97.752	1.284
3	20.12	107.562	1.682	205.314	2.116
4	24.01	114.610	1.753	319.924	2.748
5	27.47	122.305	1.968	442.229	3.380
6	30.01	102.983	1.201	545.212	3.587
7	32.34	102.000	1.511	647.212	3.892
8	34.7	107.350	1.383	754.561	4.131
9	36.62	96.602	1.800	851.163	4.506
10	38.71	109.441	2.358	960.604	5.086
11	40.61	104.315	1.731	1064.919	5.372
12	42.3	93.869	1.348	1158.788	5.539
13	44.08	101.509	1.131	1260.296	5.653
14	45.82	101.230	1.285	1361.526	5.797
15	47.49	98.750	1.501	1460.276	5.988
16	49.13	95.737	1.196	1556.013	6.107
17	50.73	93.673	1.008	1649.686	6.189
18	52.38	93.941	0.727	1743.627	6.232
19	54.01	96.006	0.395	1839.633	6.244
20	55.71	95.945	0.908	1935.578	6.310
21	57.39	96.143	1.171	2031.721	6.418
22	59.08	93.372	1.016	2125.093	6.498
23	60.8	95.671	1.122	2220.764	6.594
24	62.72	97.945	1.219	2318.710	6.705
25	64.45	90.658	0.656	2409.367	6.737
26	66.3	94.808	0.656	2504.176	6.769
27	68.11	90.232	0.643	2594.407	6.800
28	70.1	97.078	1.206	2691.485	6.906
29	72.12	95.369	0.936	2786.855	6.969
30	74.23	97.267	1.056	2884.122	7.049

Em seguida, construiu-se a curva de calibração da BC2 para o refletor de água pesada, mostrada na FIG. 5.2, plotando-se na abscissa os valores de retirada de BC2 e na ordenada a reatividade, $\Sigma\rho$.

FIGURA 5.2 – Curva de calibração da barra de controle BC2 para o núcleo operando com refletor de água pesada.

No gráfico os pontos marcados com círculos cheios são os valores experimentais e a linha contínua foi traçada por ajuste de pontos utilizando o modelo sigmoide de Boltzmann, equação (5.1), com os parâmetros A_1 , A_2 , x_0 e dx , resultantes do método de ajustamento, dados na TAB. 5.5.

TABELA 5.5 – Parâmetros de ajustamento de curva A_1 , A_2 , x_0 e dx para os dados experimentais de reatividade da BC2. Núcleo com refletor cheio de água pesada.

Parâmetro	Reatividade BC2
A_1	$-188,15 \pm 27,44$
A_2	$3510,80 \pm 60,47$
x_0	$51,04 \pm 0,45$
dx	$15,19 \pm 0,44$

Para o cálculo do excesso de reatividade deste caso, deve ser observado que, inicialmente, a criticalização do reator foi obtida com BC1=90,38% e BC2=0,59% retiradas, conforme mostrado na TAB. 4.4. Isto revela uma situação diversa da mostrada na

seção anterior, quando para tornar o reator crítico foi necessário retirar uma BC inteira e mais aproximadamente 32,47% da outra.

Aqui, devido à presença da água pesada no interior do refletor, a retirada de apenas uma BC foi suficiente para criticalizar o reator, como pode ser verificado pela última posição possível para a criticalização do reator, de acordo com a TAB. 4.4. Após a realização da compensação, as BC atingiram as seguintes posições retiradas: BC1=0,65%, quase totalmente inserida, e BC2= 74,23%, sendo estas as últimas posições possíveis de criticalização do reator. A partir deste ponto, qualquer tentativa de maior retirada de BC2, no intuito de atingir outro ponto de criticalidade, conduziu o reator a um estado supercrítico, passível de ocorrência de “scram”. E deste modo, sendo esta a última posição de criticalidade, constata-se que, apenas uma das BC não é suficiente para desligar o reator, havendo necessidade de que seja inserida, no mínimo, aproximadamente mais 23,77% da outra BC.

Em virtude da impossibilidade de ser retirada a BC2 além de 74,23%, para o cálculo do excesso de reatividade, utilizou-se a extrapolação dos pontos experimentais, de acordo com a curva de ajuste mostrada na FIG. 5.2. Deste modo, fazendo $P_{BC}=100\%$, na equação (5.1) juntamente com os parâmetros da TAB 5.5 obteve-se $(3.368,91 \pm 42,32)$ pcm de excesso de reatividade. O erro foi calculado pela expressão (5.2).

5.1.4. Comparação do excesso de reatividade entre os casos refletor cheio de água leve e refletor cheio de água pesada

Comparando-se os dois casos analisados em 5.1.2 e 5.1.3 encontrou-se a diferença de $(937,13 \pm 42,69)$ pcm, conforme mostrado na TAB. 5.6.

Portanto, a instalação de um refletor de água pesada na face oeste do reator IPEN/MB-01 aumentou o excesso de reatividade em $(937,13 \pm 42,69)$ pcm.

TABELA 5.6 – Medidas do Excesso de Reatividade.

Caso	Excesso de Reatividade (pcm)
Refletor cheio de Água Pesada	$3.368,91 \pm 42,32$
Refletor cheio de Água Leve	$2.431,78 \pm 5,60$

5.2. Reatividades para a variação de temperatura

Os resultados das respostas do reator devido a um aumento da temperatura do moderador, de 20°C a 40°C, são apresentados, respectivamente, nas FIG. 5.3 e 5.4, para o caso do refletor cheio de água leve e cheio de água pesada.

Nos gráficos as ordenadas aparecem como negativas pois correspondem às perdas de reatividade devido ao aumento da temperatura do moderador, visto que a cada incremento de aproximadamente 2°C houve a necessidade de retirada de BC para manter o reator crítico.

5.2.1. Variação de temperatura para o núcleo com o refletor cheio de água leve

Utilizando a equação (5.1) com os parâmetros A_1 , A_2 , x_0 e dx , dados na TAB. 5.3, e a expressão do erro dada pela expressão (5.2), foram calculadas as reatividades correspondentes à posição de BC 2, resultantes do aumento de temperatura do moderador, e são mostradas na TAB 5.7. Neste experimento a BC1 permaneceu na posição 58,04% retirada.

TABELA 5.7 – Variação da reatividade com o aumento da temperatura para o refletor cheio de água leve.

Temperatura		Inserção da BC 2		Reatividade	
$\bar{T}$ (°C)	$\bar{\sigma}_T$ (°C)	$\bar{R}_{BC}$ (%)	$\bar{\sigma}_{BC2}$ (%)	$\bar{\rho}$ (pcm)	$\sigma_{\bar{\rho}}$ (pcm)
19,17	0,05	41,96	0,01	1227,9	4,1
20,98	0,08	41,85	0,01	1222,4	6,2
22,75	0,08	41,72	0,01	1216,0	6,2
24,58	0,08	41,58	0,01	1209,1	6,2
26,59	0,08	41,42	0,01	1201,0	6,3
28,54	0,07	41,25	0,01	1192,6	6,3
30,52	0,07	41,06	0,01	1183,1	6,3
32,26	0,04	40,85	0,01	1172,8	6,3
34,23	0,07	40,62	0,01	1161,6	6,3
36,01	0,07	40,40	0,01	1150,5	6,3
38,33	0,08	40,06	0,01	1134,2	6,3
40,37	0,06	39,76	0,01	1119,5	6,3

Na FIG. 5.3 é apresentado um gráfico da variação da reatividade com a temperatura, conforme os dados da TAB. 5.7.

FIGURA 5.3 – Gráfico com variação da reatividade de acordo com o aumento da temperatura do moderador para o núcleo opeando com refletor de água leve.

Um valor médio da variação da reatividade com a temperatura, $\bar{\alpha}_\rho \pm \sigma_{\bar{\alpha}_\rho}$, foi obtido a partir destes dados, calculando a razão da variação de reatividade pela variação de temperatura, que representa a perda média de reatividade por unidade de temperatura, onde,

$$\bar{\alpha}_\rho = \frac{\Delta \bar{\rho}}{\Delta \bar{T}} \quad (5.3)$$

e,

$$\sigma_{\bar{\alpha}_\rho} = \bar{\alpha}_\rho \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta \bar{\rho}}}{\Delta \bar{\rho}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta \bar{T}}}{\Delta \bar{T}}\right)^2} \quad (5.4)$$

Deste modo, com o refletor cheio de água leve resultou $\bar{\alpha}_\rho \pm \sigma_{\bar{\alpha}_\rho} = -4,7 \pm 0,3 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$.

5.2.2. Variação de temperatura para o núcleo com o refletor cheio de água pesada

Utilizando a equação de ajuste para a BC2 dada pela expressão (5.1) com os parâmetros $A1$, $A2$, $x0$ e dx dados na TAB. 5.5, e a expressão do erro dada pela expressão (5.2), foram calculadas as reatividades correspondentes à posição de BC2, mostrados na TAB 5.8.

TABELA 5.8 – Variação da reatividade com o aumento da temperatura. Núcleo operando com refletor de água pesada.

Temperatura		Retirada da BC 2		Reatividade	
$\bar{T}$	$\bar{\sigma}_T$	$\bar{R}_{BC}$	$\bar{\sigma}_{BC2}$	$\bar{\rho}$	σ_{ρ}
(°C)	(°C)	(%)	(%)	(pcm)	(pcm)
19,34	0,06	48,79	0,01	1524,2	5,8
20,81	0,07	48,85	0,01	1528,0	5,8
22,61	0,08	48,97	0,01	1535,2	5,8
24,30	0,07	49,08	0,01	1541,9	5,8
26,21	0,08	49,21	0,01	1549,8	5,8
27,87	0,06	49,32	0,01	1556,6	5,9
29,57	0,07	49,47	0,01	1565,3	5,9
31,31	0,04	49,67	0,01	1577,8	5,9
32,79	0,07	49,76	0,01	1583,0	5,9
34,55	0,07	49,94	0,01	1593,9	5,9
36,18	0,08	50,11	0,01	1604,1	5,9
37,93	0,06	50,31	0,01	1616,8	6,0

Na FIG. 5.4 é apresentado um gráfico da variação da reatividade com a temperatura. Neste caso, nota-se que a reatividade foi marcada com valores negativos, visto que o aumento da temperatura provocou uma diminuição da reatividade. Isto fica evidenciado por meio do aumento sucessivo da retirada de BC 2, como mostrado na TAB. 5.8, acima

FIGURA 5.4 – Gráfico com variação da reatividade de acordo com o aumento da temperatura do moderador para o núcleo operando com refletor de água pesada.

Para este caso, refletor cheio de água pesada, a variação média da reatividade com a temperatura resultou $\bar{\alpha}_\rho \pm \sigma_{\bar{\alpha}_\rho} = -5,7 \pm 0,4 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$.

5.2.3. Comparação da variação de reatividade com a temperatura entre os casos refletor cheio de água leve e refletor cheio de água pesada

Os resultados dos dois casos analisados são apresentados na TAB. 5.9.

TABELA 5.9 – Medidas da variação de reatividade com a temperatura.

Caso	Experimento ($\text{pcm}/^\circ\text{C}$)
Refletor cheio de água pesada	$-5,7 \pm 0,4$
Refletor cheio de água leve	$-4,7 \pm 0,3$

A introdução de um refletor cheio de água pesada provoca o aumento da perda média de reatividade por unidade de temperatura, em $(1,0 \pm 0,5) \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$.

Devido a este aumento a operação com o refletor cheio de água pesada torna o reator ainda mais seguro, pois nas ocorrências de elevação acidental da temperatura do moderador, a perda de reatividade será de um pcm por grau Celsius a mais, comparativamente ao caso do refletor cheio de água leve.

5.3. Taxas de reação

5.3.1. Taxa de reação térmica a partir de detectores de folhas de ouro cobertas com Cádmiio e nuas

Após a irradiação de folhas de ouro no centro do reator foram calculadas as atividades de saturação, que correspondem às taxas de reações. A partir dos dados armazenados nos sistemas de contagem e para cada condição de operação do reator, refletor cheio de água leve e refletor cheio de água pesada, respectivamente, calculou-se, primeiramente, utilizando-se a expressão (4.37), as atividades de saturação das folhas cobertas com cádmio, A_{∞}^{Cd} , e nuas, A_{∞}^{nua} , cujos resultados são mostrados na TAB. 5.10.

TABELA 5.10 – Resultado das atividades de saturação para o reator operando com refletor de água pesada.

Tipo do detector	Refletor com água leve		Refletor com água pesada	
	$\overline{A_{\infty}}$ (s ⁻¹)	$\sigma_{\overline{A_{\infty}}}$ (s ⁻¹)	$\overline{A_{\infty}}$ (s ⁻¹)	$\sigma_{\overline{A_{\infty}}}$ (s ⁻¹)
Folha nua (A_{∞}^{nua})	1,85 x 10 ⁵	0,04 x 10 ⁵	1,76 x 10 ⁵	0,04 x 10 ⁵
Folha coberta Cd (A_{∞}^{Cd})	1,37 x 10 ⁵	0,03 x 10 ⁵	1,36 x 10 ⁵	0,03 x 10 ⁵

Em seguida, utilizando-se a expressão (4.41), calcularam-se as razões de cádmio, R_{Cd} , mostradas na TAB. 5.11.

TABELA 5.11 – Valores da Razão de Cádmio utilizado nos cálculos da atividade de saturação térmica.

Núcleo	R_{Cd} Valor $\pm 3,50\%$
Com refletor de água pesada	1.247
Com refletor de água leve	1.341

Deste modo, por meio da expressão (4.42) foi possível determinar as atividades de saturação térmicas médias $\overline{A}_{\infty}^{ter}$ e os erros padrões, mostradas na TAB. 5.12, para todo o conjunto de dados, obtido durante o tempo em que as folhas foram contadas no sistema de detecção. O fator de cádmio, F_{Cd} utilizado, foi de $(1,054 \pm 0,44)\%$, obtido da literatura [41].

TABELA 5.12 – Resultado das atividades de saturação térmicas.

Água leve		Água pesada	
$\overline{A}_{\infty}^{ter}$ (s⁻¹)	$\sigma_{\overline{A}_{\infty}^{ter}}$ (s⁻¹)	$\overline{A}_{\infty}^{ter}$ (s⁻¹)	$\sigma_{\overline{A}_{\infty}^{ter}}$ (s⁻¹)
3,95 x 10 ⁴	0,5 x 10 ⁴	2,72 x 10 ⁴	0,5 x 10 ⁴

Para os cálculos acima o sistema de contagem forneceu os valores das contagens líquidas (CL), ou (Net), utilizadas na expressão (4.36). Além destes dados também foram utilizados os seguintes:

$$\lambda \quad - \quad \text{Constante de decaimento do } ^{197}\text{Au} = 2,98 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$Tc \quad - \quad \text{Tempo de contagem} = 1.200 \text{ s}$$

$$Te \quad - \quad \text{Tempo de espera (núcleo com refletor de D}_2\text{O folha nua)} = 11.101 \text{ s,}$$

$$\text{Tempo de espera (núcleo com refletor de D}_2\text{O folha com Cd)} = 9.000 \text{ s,}$$

$$\text{Tempo de espera (núcleo com refletor de H}_2\text{O folha nua)} = 2.174 \text{ s}$$

$$\text{Tempo de espera (núcleo com refletor de H}_2\text{O folha com Cd)} = 10.080 \text{ s}$$

$$Ti \quad - \quad \text{Tempo de irradiação} = 3.600 \text{ s}$$

$$I \quad - \quad \text{Abundância do fotopico} = 0,9556 \pm 0,0007$$

$$\varepsilon \quad - \quad \text{Eficiência do sistema de contagem} = 0,00929 \pm 0,00021$$

A determinação das taxas de reações térmicas também pode ser feita a partir do valor da atividade inicial na expressão (4.30). O valor de A_0 é obtido por meio de gráficos. Isto pode ser verificado no Anexo B.

5.3.2. Taxa de reação térmica a partir de detectores de fios de ouro cobertos com Cádmio e nús

Para o cálculo da taxa de reação ao longo do fio foi necessário primeiramente o cálculo da atividade de saturação. Assim, A_{∞}^{nu} , a atividade de saturação para o fio nú e $\sigma_{A_{\infty}^{nu}}$, o erro associado, foram calculados respectivamente, por meio das expressões (4.36) e (A.2). Utilizando estas mesmas expressões foram obtidas a atividade de saturação para o fio coberto com cádmio, A_{∞}^{Cd} , e o respectivo erro, $\sigma_{A_{\infty}^{Cd}}$. Os resultados para o refletor com água leve é apresentado na TAB. 5.13 e para o refletor com água pesada na TAB. 5.14.

TABELA 5.13 – Atividade de saturação dos fios para o refletor com água leve.

Canal	Fio nú H ₂ O		Fio com Cd H ₂ O	
	$A_{\infty}^{nu} (s^{-1})$	$\sigma_{A_{\infty}^{nu}} (s^{-1})$	$A_{\infty}^{Cd} (s^{-1})$	$\sigma_{A_{\infty}^{Cd}} (s^{-1})$
20	7.75E+04	1.77E+03	1.49E+04	3.41E+02
40	7.32E+04	1.67E+03	2.55E+04	5.84E+02
60	9.13E+04	2.09E+03	3.08E+04	7.03E+02
80	9.15E+04	2.09E+03	3.55E+04	8.12E+02
100	1.09E+05	2.50E+03	3.63E+04	8.30E+02
120	1.10E+05	2.53E+03	4.35E+04	9.94E+02
140	1.29E+05	2.96E+03	4.71E+04	1.08E+03
160	1.30E+05	2.97E+03	4.91E+04	1.12E+03
180	1.35E+05	3.09E+03	5.07E+04	1.16E+03
200	1.36E+05	3.11E+03	5.15E+04	1.18E+03
220	1.33E+05	3.03E+03	5.31E+04	1.21E+03
240	1.32E+05	3.01E+03	5.19E+04	1.19E+03
260	1.34E+05	3.07E+03	5.16E+04	1.18E+03
280	1.35E+05	3.09E+03	5.02E+04	1.15E+03
300	1.22E+05	2.78E+03	4.71E+04	1.08E+03
320	1.22E+05	2.80E+03	4.55E+04	1.04E+03
340	1.02E+05	2.32E+03	4.19E+04	9.57E+02
360	1.02E+05	2.33E+03	3.76E+04	8.60E+02
380	7.78E+04	1.78E+03	3.29E+04	7.52E+02
400	7.96E+04	1.82E+03	2.85E+04	6.52E+02
414	7.89E+04	1.80E+03	2.33E+04	5.32E+02

TABELA 5.14 – Atividades de saturação dos fios para o refletor com água pesada.

Canal	Fio nú D ₂ O		Fio com Cd D ₂ O	
	A_{∞}^{nu} (s ⁻¹)	$\sigma_{A_{\infty}^{nu}}$ (s ⁻¹)	A_{∞}^{Cd} (s ⁻¹)	$\sigma_{A_{\infty}^{Cd}}$ (s ⁻¹)
20	7.95E+04	1.82E+03	6.66E+03	1.52E+02
40	9.24E+04	2.11E+03	8.53E+03	1.95E+02
60	9.42E+04	2.15E+03	9.29E+03	2.12E+02
80	9.86E+04	2.25E+03	1.02E+04	2.33E+02
100	1.05E+05	2.41E+03	1.05E+04	2.39E+02
120	1.16E+05	2.66E+03	1.17E+04	2.68E+02
140	1.19E+05	2.72E+03	1.20E+04	2.75E+02
160	1.25E+05	2.85E+03	1.23E+04	2.81E+02
180	1.28E+05	2.93E+03	1.29E+04	2.95E+02
200	1.28E+05	2.94E+03	1.28E+04	2.93E+02
220	1.30E+05	2.97E+03	1.26E+04	2.89E+02
240	1.27E+05	2.91E+03	1.29E+04	2.95E+02
260	1.25E+05	2.87E+03	1.24E+04	2.83E+02
280	1.23E+05	2.81E+03	1.19E+04	2.73E+02
300	1.14E+05	2.61E+03	1.13E+04	2.58E+02
320	1.06E+05	2.43E+03	1.04E+04	2.38E+02
340	9.68E+04	2.21E+03	9.55E+03	2.18E+02
360	8.87E+04	2.03E+03	8.83E+03	2.02E+02
380	7.70E+04	1.76E+03	7.70E+03	1.76E+02
400	7.13E+04	1.63E+03	6.69E+03	1.53E+02
414	6.80E+04	1.55E+03	5.41E+03	1.24E+02

Em seguida, utilizando-se dos dados de $A_{\infty}^{nu} \pm \sigma_{A_{\infty}^{nu}}$ das TAB. 5.13 e 5.14, acima, foram calculadas as atividades de saturação térmicas tanto para o caso da água leve quanto para a água pesada, apresentadas na TAB 5.15. Finalmente, nesta tabela, A_{∞}^{ter} representa a atividade de saturação térmica, que equivale à taxa de reação, e $\sigma_{A_{\infty}^{ter}}$ o erro, calculados respectivamente, pelas expressões (4.42) e (A.4).

TABELA 5.15 – Atividade de saturação térmica.

Canal	H ₂ O		D ₂ O	
	$A_{\infty}^{ter} (s^{-1})$	$\sigma_{A_{\infty}^{ter}} (s^{-1})$	$A_{\infty}^{ter} (s^{-1})$	$\sigma_{A_{\infty}^{ter}} (s^{-1})$
20	7.06E+04	1.62E+03	7.53E+04	1.72E+03
40	6.46E+04	1.48E+03	8.72E+04	2.00E+03
60	8.08E+04	1.85E+03	8.87E+04	2.03E+03
80	8.03E+04	1.84E+03	9.26E+04	2.12E+03
100	9.67E+04	2.21E+03	9.93E+04	2.27E+03
120	9.69E+04	2.22E+03	1.09E+05	2.50E+03
140	1.14E+05	2.61E+03	1.12E+05	2.56E+03
160	1.14E+05	2.61E+03	1.17E+05	2.69E+03
180	1.19E+05	2.72E+03	1.21E+05	2.76E+03
200	1.19E+05	2.73E+03	1.21E+05	2.76E+03
220	1.16E+05	2.66E+03	1.22E+05	2.79E+03
240	1.15E+05	2.64E+03	1.20E+05	2.74E+03
260	1.18E+05	2.70E+03	1.18E+05	2.70E+03
280	1.19E+05	2.72E+03	1.16E+05	2.64E+03
300	1.07E+05	2.44E+03	1.08E+05	2.46E+03
320	1.08E+05	2.46E+03	1.00E+05	2.29E+03
340	8.88E+04	2.03E+03	9.12E+04	2.09E+03
360	8.99E+04	2.06E+03	8.35E+04	1.91E+03
380	6.80E+04	1.56E+03	7.25E+04	1.66E+03
400	7.01E+04	1.60E+03	6.73E+04	1.54E+03
414	7.02E+04	1.61E+03	6.46E+04	1.48E+03

Com os dados da TAB. 5.15 é possível apresentar o perfil das atividades de saturação térmicas (taxas de reação) para o refletor cheio de água leve e cheio de água pesada, num gráfico mostrado na FIG. 5.5, onde o **Canal**, representando distância a partir do refletor, é marcado nas abscissas, e as atividades de saturação, representando as taxas de reação, são marcadas na ordenada. Os valores do gráfico foram normalizados com um fator $(1,22 \pm 0,028) \times 10^5 s^{-1}$.

FIGURA 5.5 – Atividade de saturação térmica normalizada numa seção transversal do núcleo, no canal 14-15 e na metade do comprimento ativo das varetas combustíveis.

A área cinza à esquerda das ordenadas representa a região onde foi instalado o refletor. Nesta região adjacente ao refletor observa-se o aumento no perfil da atividade de saturação térmica decorrente da influência da água pesada, desde a posição 0 mm até aproximadamente a posição 120 mm, conforme previsto no desenvolvimento teórico. Este aumento, torna-se mais evidente no interior do refletor e aqui não pode ser constatado visto que a caixa refletora não foi instrumentada para a detecção de atividade no seu interior.

Para o cálculo de $A_{\infty}^{\text{ter}} \pm \sigma_{A_{\infty}^{\text{ter}}}$, mostrada na TAB. 5.15 e FIG. 5.5, também foi preciso determinar preliminarmente as razões de cádmio, R_{Cd} , o que foi feito por meio da expressão abaixo e apresentada na TAB. 5.16, para cada canal [41].

$$R_{CD} = \left[\frac{A_{\infty}^{\text{nu}}}{A_{\infty}^{\text{cd}}} \frac{G_{\text{int}}}{G_{\text{ter}}} + F_{CD} \left(1 - \frac{G_{\text{int}}}{G_{\text{ter}}} \right) \right] \frac{m_{\text{cd}}}{m_{\text{nu}}} \quad (5.5)$$

onde, $G_{\text{int}} = 0,179617 \pm 0,89\%$, $G_{\text{ter}} = 0,920111 \pm 0,06\%$ [41], $m_{\text{nu}} = 0,421g$ e $m_{\text{cd}} = 2,267 + 0,421 = 2,688g$ são, respectivamente, o fator de auto blindagem intermediário, o fator de auto blindagem térmico, a massa do detector de fio sem revestimento e a massa do detector de fio com o revestimento de cádmio.

TABELA 5.16 – Razões de Cádmio.

Canal	H ₂ O		D ₂ O	
	R_{Cd}	$\sigma_{R_{Cd}}$	R_{Cd}	$\sigma_{R_{Cd}}$
20	11.88	0.11	20.28	0.15
40	8.98	0.10	18.90	0.14
60	9.11	0.10	18.05	0.14
80	8.62	0.09	17.45	0.14
100	9.16	0.10	17.95	0.14
120	8.57	0.09	17.78	0.14
140	8.83	0.10	17.74	0.14
160	8.70	0.10	18.06	0.14
180	8.73	0.10	17.78	0.14
200	8.70	0.10	17.89	0.14
220	8.52	0.09	18.21	0.14
240	8.57	0.09	17.69	0.14
260	8.65	0.10	18.04	0.14
280	8.76	0.10	18.20	0.14
300	8.63	0.09	18.03	0.14
320	8.76	0.10	18.16	0.14
340	8.43	0.09	18.04	0.14
360	8.79	0.10	17.92	0.14
380	8.36	0.09	17.87	0.14
400	8.88	0.10	18.68	0.14
414	9.63	0.10	21.05	0.15

5.3.3. Distribuição de fluxo e perfil da taxa de reação térmica com MCNP

Foi realizada uma simulação utilizando o código MCNP, que reproduziu as mesmas condições dos experimentos com o refletor cheio de água pesada. As posições das BC foram simuladas para uma condição crítica, posicionadas igualmente retiradas em 48,08%. O programa executou 10^6 histórias por ciclo (NSRCK=1000000). Uma visualização dos resultados, obtidos por meio do emprego da ferramenta FMESH do código, é apresentada na FIG. 5.6.

FIGURA 5.6 – Fluxo térmico obtido com o MCNP numa seção transversal na metade do comprimento ativo das varetas combustíveis.

Nesta figura é possível verificar a distribuição do fluxo de nêutrons num corte transversal do núcleo, onde a intensidade é dada pela escala gráfica de cores, sendo as cores vermelha, laranja e amarela as mais intensas. Este corte foi feito no meio do núcleo, isto é na metade do comprimento ativo das varetas combustíveis. Além disso, na parte superior da figura apresenta-se o perfil do fluxo obtido de uma seção transversal (linha amarela) neste corte.

Observa-se na parte à esquerda, a região onde foi instalado o refletor de água pesada, o aumento e a expansão da área do fluxo neutrônico, em contraste acentuado com o pico que ocorre no lado direito, região sem refletor de água pesada, mostrando a sua concordância com as expectativas teóricas.

Uma comparação entre os valores calculados pelo MCNP com os calculados a partir da irradiação de fios de ouro, para a região interna do núcleo, é apresentada na FIG.

5.7. Os valores experimentais são os mesmos já mostrados na seção 5.3.2 para o refletor cheio de água pesada e tanto estes quanto os do simulado pelo MCNP estão normalizados. Da análise das curvas apresentadas observa-se a concordância entre os dois cálculos. A média dos erros relativos são, respectivamente 0,22% e 3,22%, para o cálculo com o MCNP e o obtido pelo método experimental.

FIGURA 5.7 – Comparação entre os resultados experimentais e os cálculos pelo MCNP. Seção transversal do núcleo, no canal 14-15 e na metade do comprimento ativo das varetas combustíveis.

6. CONCLUSÕES

A execução dos experimentos visou à obtenção de dados que permitiram verificar as mudanças nas respostas do núcleo reator IPEN/MB-01 às retiradas e inserções das BC, após a instalação de um refletor no formato de uma caixa prismática, completamente preenchida de água pesada na sua face oeste. Foi adotado como referência de comparação o mesmo núcleo, mas desta vez com o refletor completamente preenchido com água leve, a mesma água do moderador, e sob as mesmas condições de operação.

As comparações realizadas tomando como referência o refletor cheio de água leve são similares a adotar como referência o reator operando sem nenhum refletor instalado, ou seja o seu arranjo normal, pois verificou-se que os materiais da caixa refletora e os demais componentes estruturais de sustentação e apoio utilizados na sua fixação não alteraram significativamente o funcionamento do reator. Isto foi verificado comparando-se a realização de duas operações consecutivas, respectivamente, sem refletor e com refletor cheio de água leve.

Verificou-se, conforme apresentado nos três capítulos introdutórios, que a instalação do referido refletor de água pesada proporcionou mudanças significativas no excesso de reatividade do reator provocando alterações nos padrões de retirada de barras de controle. O coeficiente de reatividade de temperatura e o perfil de fluxo térmico também foram alterados.

Analisando os resultados obtidos e apresentados conclui-se que a introdução de um refletor completamente cheio de água pesada na face oeste do Reator IPEN/MB-01 acarretou um aumento no excesso de reatividade do núcleo, no valor de $928,63 \pm 42,69$ pcm. Este aumento foi constatado ao serem comparadas as duas situações distintas de operação a que foram submetidas o reator, respectivamente, com refletor de água pesada e com refletor de água leve. Para o caso da água pesada foi encontrado $3.368,91 \pm 42,32$ e para o caso da água leve $2.431,78 \pm 5,60$ pcm. Esta mudança, com a reatividade do núcleo aumentada, provocou alterações nos padrões de retirada de barras de controle pois constatou-se que a retirada de uma única barra de controle foi suficiente para criticalizar o reator, em contraste com a situação de operação com a água leve, onde, para tornar o reator

crítico, foi necessário a retirada completa de uma barra de controle e mais aproximadamente 32,47%.

De acordo com os dados experimentais verificou-se que o coeficiente de reatividade de temperatura sofreu um aumento de $(1 \pm 0,3)$ pcm/°C no caso do refletor com água pesada. Como o coeficiente é negativo isto significa que a água pesada aumenta a perda de reatividade em 1 pcm a mais do que no caso da água leve, por cada grau Celsius de elevação de temperatura.

A taxas de reações obtidas pelos detectores de folha no caso do refletor cheio de água leve resultou cerca de 45% maior que o caso do refletor cheio de água pesada. A princípio era esperado um resultado inverso. No entanto, sabendo que as folhas foram irradiadas no centro do reator, esta diferença é local pode ser devida à conservação do fluxo total de nêutrons, pois, ao mesmo tempo em que houve diminuição do fluxo nesta posição, nas regiões próximas do refletor houve uma elevação do mesmo.

A constatação da elevação e aplainamento do fluxo nas regiões adjacentes ao refletor, quando cheio de água pesada, pode ser verificada por meio do perfil das taxas de reações nucleares obtidas da irradiação do detector tipo fio de ouro, obtendo-se assim a concordância dos valores calculados com o código MCNP.

Num futuro sugere-se aperfeiçoar este experimento instalando um segundo refletor na face leste do reator de modo a tornar mais simétrico o núcleo em relação a estes mesmos refletores, e que eles sejam instrumentados de modo a permitir medições de temperatura e o cálculo das taxas de reações no seu interior. Deste modo a expectativa é que o excesso de reatividade aumente para 1800 pcm! Sugere-se ainda que os refletores permitam o controle de nível de modo a realizarem experimentos com diferentes quantidades de água pesada no seu interior.

ANEXOS

Os seguintes anexos são apresentados nesta seção:

- Anexo A – Cálculo de Erros
- Anexo B – Atividade de Saturação Térmica Via Gráficos
- Anexo C – O reator IPEN/MB-01
- Anexo D – Os Sistemas de Contagens
- Anexo E – Projeto do Refletor

Os anexos C e D foram adaptados das Ref. [39], [41] e [59].

A – CÁLCULOS DE ERROS

A.1. Cálculo do erro para A_{∞} .

Dada a expressão para a atividade de saturação:

$$A_{\infty} = \frac{CL\lambda e^{\lambda t_e}}{\epsilon I(1 - e^{-\lambda t})(1 - e^{-\lambda t})} \quad (\text{A.1})$$

a incerteza foi calculada por:

$$\sigma_{A_{\infty}} = A_{\infty} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{CL}}{CL}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} \quad (\text{A.2})$$

A.2. Cálculo do erro para A_{∞}^{ter} .

Dada a expressão da atividade de saturação térmica:

$$A_{\infty}^{\text{ter}} = A_{\infty}^{\text{nua}} \left(1 - \frac{F_{\text{Cd}}}{R_{\text{Cd}}} \right) \quad (\text{A.3})$$

a incerteza foi calculada por:

$$\sigma_{\infty}^{\text{ter}} = \sqrt{\left(\frac{A_{\infty}^{\text{ter}}}{A_{\infty}^{\text{nua}}} \right)^2 \sigma_{A_{\infty}^{\text{nua}}}^2 + \left(\frac{A_{\infty}^{\text{nua}}}{R_{\text{Cd}}} \right)^2 \sigma_{F_{\text{Cd}}}^2 + \left(\frac{A_{\infty}^{\text{nua}} F_{\text{Cd}}}{R_{\text{Cd}}^2} \right)^2 \sigma_{R_{\text{Cd}}}^2} \quad (\text{A.4})$$

Os termos entre parenteses no radicando foram obtidos das derivadas parciais de A_{∞}^{ter} , de F_{Cd} e de R_{Cd} conforme mostrado abaixo:

$$\frac{\partial A_{\infty}^{\text{ter}}}{\partial A_{\infty}^{\text{nua}}} = \left(1 - \frac{F_{\text{Cd}}}{R_{\text{Cd}}} \right) = \frac{A_{\infty}^{\text{ter}}}{A_{\infty}^{\text{nua}}} \Rightarrow \left(\frac{\partial A_{\infty}^{\text{ter}}}{\partial A_{\infty}^{\text{nua}}} \right)^2 = \left(\frac{A_{\infty}^{\text{ter}}}{A_{\infty}^{\text{nua}}} \right)^2 \quad (\text{A.4.1})$$

$$\frac{\partial A_{\infty}^{\text{ter}}}{\partial F_{\text{Cd}}} = \frac{-A_{\infty}^{\text{nua}}}{R_{\text{Cd}}} \Rightarrow \left(\frac{\partial A_{\infty}^{\text{ter}}}{\partial F_{\text{Cd}}} \right)^2 = \left(\frac{-A_{\infty}^{\text{nua}}}{R_{\text{Cd}}} \right)^2 = \left(\frac{A_{\infty}^{\text{nua}}}{R_{\text{Cd}}} \right)^2 \quad (\text{A.4.2})$$

$$\frac{\partial A_{\infty}^{\text{ter}}}{\partial R_{\text{Cd}}} = \frac{A_{\infty}^{\text{nua}} F_{\text{Cd}}}{R_{\text{Cd}}^2} \Rightarrow \left(\frac{\partial A_{\infty}^{\text{ter}}}{\partial R_{\text{Cd}}} \right)^2 = \left(\frac{A_{\infty}^{\text{nua}} F_{\text{Cd}}}{R_{\text{Cd}}^2} \right)^2 \quad (\text{A.4.3})$$

A.3. Cálculo do erro para R_{Cd} .

Dada a expressão da razão de cádmio:

$$R_{\text{Cd}} = \frac{A_{\infty}^{\text{nua}}}{A_{\infty}^{\text{Cd}}} \quad (\text{A.5})$$

a incerteza foi calculada por:

$$\sigma_{A_{\infty}} = R_{\text{Cd}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{A_{\infty}^{\text{nua}}}}{A_{\infty}^{\text{nua}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{A_{\infty}^{\text{Cd}}}}{A_{\infty}^{\text{Cd}}} \right)^2} \quad (\text{A.6})$$

A.4. Cálculo do erro para da equação do ajustamento de Boltzman.

Dada a expressão da função $\rho = f(P_{BC})$:

$$\rho = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{P_{BC} - x_0}{dx}}} \quad (A.7)$$

A incerteza associada é calculada por:

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial A_1}\right)^2 \sigma_{A_1}^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial A_2}\right)^2 \sigma_{A_2}^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial x_0}\right)^2 \sigma_{x_0}^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial dx}\right)^2 \sigma_{dx}^2 + C} \quad (A.8)$$

Onde:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial\rho}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial\rho}{\partial x_j}\right) \sigma_{x_i x_j}^2$$

$$C = 2 \left(\frac{\partial\rho}{\partial A_1}\right) \left(\frac{\partial\rho}{\partial A_2}\right) \sigma_{A_1 A_2}^2 + 2 \left(\frac{\partial\rho}{\partial A_1}\right) \left(\frac{\partial\rho}{\partial x_0}\right) \sigma_{A_1 x_0}^2 + 2 \left(\frac{\partial\rho}{\partial A_1}\right) \left(\frac{\partial\rho}{\partial dx}\right) \sigma_{A_1 dx}^2$$

$$+ 2 \left(\frac{\partial\rho}{\partial A_2}\right) \left(\frac{\partial\rho}{\partial x_0}\right) \sigma_{A_2 x_0}^2 + 2 \left(\frac{\partial\rho}{\partial A_2}\right) \left(\frac{\partial\rho}{\partial dx}\right) \sigma_{A_2 dx}^2 + 2 \left(\frac{\partial\rho}{\partial x_0}\right) \left(\frac{\partial\rho}{\partial dx}\right) \sigma_{x_0 dx}^2 \quad (A.8.1)$$

Os termos $\sigma_{x_i x_j}^2$, com $x_i = (A_1, A_2, x_0, dx)$ e $x_j = (A_1, A_2, x_0, dx)$ para $x_i \neq x_j$, são as covariâncias entre os respectivos parâmetros. E, as derivadas são as seguintes:

$$\frac{\partial\rho}{\partial A_1} = \frac{1}{e^{\left(\frac{P_{BC} - x_0}{dx}\right)} + 1} \quad (A.8.2)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial A_2} = 1 - \frac{1}{e^{\left(\frac{P_{BC} - x_0}{dx}\right)} + 1} = 1 - \left(\frac{\partial\rho}{\partial A_1}\right) \quad (A.8.3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_0} = \frac{(A_1 - A_2)e^{\left(\frac{P_{BC} - x_0}{dx}\right)}}{dx \left[1 + e^{\left(\frac{P_{BC} - x_0}{dx}\right)}\right]^2} \quad (\text{A.8.4})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial dx} = \frac{(P_{BC} - x_0)}{dx} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_0}\right) \quad (\text{A.8.5})$$

ANEXO B - ATIVIDADE DE SATURAÇÃO TÉRMICA VIA GRÁFICOS DE CONTAGEM

Para o cálculo da atividade de saturação térmica (A_{∞}^{ter}), correspondente às taxas de reação, foram calculadas primeiramente as atividades iniciais (A_0), por meio do auxílio dos gráficos de contagem. A seguir foram calculadas as atividades de saturação das folhas, cobertas com Cd (A_{∞}^{Cd}) e nuas (A_{∞}^{nua}).

As atividades iniciais (A_0) estão resumidas na TAB. B.1 e foram obtidas dos gráficos mostrados nas FIG. B.1, B.2, B.3 e B.4.

FIGURA B.1 – Gráfico para a folha nua irradiada no núcleo com refletor cheio de água pesada.

A equação do ajuste é dada por: $\ln(y) = A + B \cdot \ln(x)$, onde:

$$A = 2.819646 \pm 0.00138$$

$$B = -3.014743E-6 \pm 8.727181E-9$$

$$R = -0.999109$$

Para $x = t_0 = 0$ determina-se $y = A_0 = (16,771 \pm 0,004) \text{ s}^{-1}$

FIGURA B.2 – Gráfico para a folha coberta com Cd irradiada no núcleo com cheio de água pesada.

A equação do ajuste é dada por: $\ln(y) = A + B \cdot \ln(x)$, onde:

$$A = 2.5572 \pm 0.0015$$

$$B = -2.977404\text{E-}6 \pm 7.260122\text{E-}9$$

$$R = -0.99916$$

Para $x = t_0 = 0$ determina-se $y = A_0 = (12,899 \pm 0,004) \text{ s}^{-1}$

FIGURA B.3 – Gráfico para a folha nua irradiada no núcleo com refletor cheio de água leve.

A equação do ajuste é dada por: $\ln(y) = A + B \cdot \ln(x)$, onde:

$$A = 2.859802 \pm 0.001549$$

$$B = -2.958917\text{E-}6 \pm 1.632527\text{E-}8$$

$$R = -0.997982$$

Para $x = t_0 = 0$ determina-se $y = \mathbf{A_0 = (17,458 \pm 0,004) s^{-1}}$

FIGURA B.4 – Gráfico para a folha coberta com Cd irradiada no núcleo com refletor cheio de água leve.

A equação do ajuste é dada por: $\ln(y) = A + B \cdot \ln(x)$, onde:

$$A = 2.56361 \pm 0.001265$$

$$B = -2.996845E-6 \pm 6.007665E-9$$

$$R = -0.999418$$

Para $x = t_0 = 0$ determina-se $y = \mathbf{A_0 = (12,983 \pm 0,003) s^{-1}}$

TABELA B.1 – Atividades iniciais para as folhas nuas e cobertas com Cd irradiadas no reator operando com refletor cheio de água pesada e cheio de água leve, respectivamente.

Refletor	Folha	Atividade inicial (A_0)		Contagem (CL)	
		Valor (cont/s)	Incerteza (%)	Valor (cont)	Incerteza (%)
Cheio de D ₂ O	Nua	16,771	0,4	20.125,2	0,02
	Cd	12,899	0,4	15.478,8	0,03
Cheio de H ₂ O	Nua	17,458	0,4	20.949,6	0,02
	Cd	12,983	0,3	15.579,6	0,02

Na TAB. B.1 a contagem líquida é obtida pela multiplicação da atividade inicial e do tempo de contagem. Utilizando-se este valor e os dados abaixo na expressão (4.37) foram calculadas as atividades de saturação, A_∞ , e a atividade de saturação térmica, A_∞^{ter} , apresentadas nas TAB. B2 e B3.

λ – Constante de decaimento do ^{197}Au = $2,98 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

T_c – Tempo de contagem = 1200 s

T_e – Tempo de espera = 0 s

T_i – Tempo de irradiação = 3.600 s

I – Abundância do fotopico = $0,9556 \pm 0,0007$

ε – Eficiência do sistema de contagem = $0,00929 \pm 0,00021$

$R_{Cd}^{D_2O}$ – Razão de cádmio para o reator com refletor de D₂O = $1,30 \pm 0,04$

$R_{Cd}^{H_2O}$ – Razão de cádmio para o reator sem refletor = $1,34 \pm 0,04$

TABELA B.2 – Resultado das Atividades de Saturação para reator operando com refletor de água pesada.

Atividade de Saturação (A_{∞})	Valor (s^{-1})	Incerteza	
		(s^{-1})	(%)
Folha nua	177.528,72	4.014,93	2.26
Folha coberta Cd	136.541,83	3.088,10	2.26
Térmica	33.613,64	4.708,10	14.01

TABELA B.3 – Resultado das Atividades de Saturação para reator operando com refletor de água leve.

Atividade de Saturação (A_{∞})	Valor (s^{-1})	Incerteza	
		(s^{-1})	(%)
Folha nua	184.800,93	4.179,37	2.26
Folha coberta Cd	137.431,01	3.108,08	2.26
Térmica	39.948,65	4.762,95	11.92

ANEXO C – O REATOR IPEN/MB-01

C. 1. Histórico

O IPEN/MB-01 é um reator nuclear genuinamente brasileiro, concebido por pesquisadores e Engenheiros do IPEN-CNEN/SP, financiado e construído pela Marinha do Brasil, 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 dos seus vários sistemas. Cumpridas as exigências legais exigidas para o seu licenciamento, foi concedida em 19 de outubro de 1988, pelas resoluções CNEN 23 e 25 a autorização para a sua operação inicial.

O Reator IPEN/MB-01 é uma instalação nuclear que permite a simulação de todas as 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 no nosso caso, projetado para operar a uma potência máxima de 100 watts. Esses reatores representam uma ferramenta básica, que permitem 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, simulando as condições de projeto na própria 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, em que se necessitam de rápidas variações de potência, a fim de se empreenderem manobras de fuga ou de perseguição.

FIGURA C.1 – Vista aérea do reator IPEN/MB-01

C. 2. Descrição detalhada do reator IPEN/MB-01

Todas as dimensões e incertezas associadas, apresentadas nesta seção, são valores de projeto e tolerâncias, respectivamente. Todos os dados reportados neste anexo referem-se à temperatura ambiente (20,5 °C). São apresentados os seguintes componentes:

- a) O tanque moderador e periféricos.
- b) As placas espaçadoras.
- c) As varetas combustíveis e
- d) As varetas de controle, segurança e tubo guia.

C. 2.1. O tanque moderador e periféricos

O tanque moderador, anteriormente mostrados nas FIG. 2.1 e 2.2, é um cilindro de aço inox idável (SS-304) com espessura de 8,5 mm, aberto no topo, medindo 1830 mm de diâmetro externo e 2750 mm de altura. Este tanque possui duas válvulas que permitem a remoção rápida da água de seu interior (~ 5 s). Utiliza-se água leve demineralizada como moderador no reator IPEN/MB-01 e durante a operação normal o nível da água atinge 450 mm acima da superfície superior do combustível, lateralmente a espessura da camada de água é maior que 600 mm, e abaixo do núcleo ativo a camada de água tem espessura mínima de 530 mm.

O reator IPEN/MB-01 possui dois bancos de varetas de controle, que estão localizados diagonalmente opostos no núcleo. Os símbolos A e B na FIG. 2.2 referem-se à localização dos bancos de controle, enquanto o símbolo S refere-se à localização dos dois bancos de segurança.

C. 2.2. Placas espaçadoras

O reator IPEN/MB-01 possui 3 placas espaçadoras (FIG. C.2), sendo que a placa inferior é chamada de placa matriz, o material das placas é o aço inoxidável (SS-304), e todas elas possuem uma forma quadrada de lado $588 \pm 0,5$ mm. A placa matriz tem $22 \pm 0,1$ mm de espessura e consiste de um arranjo quadrado de 30 x 30 cavidades das quais 852 possuem 10,4 mm de diâmetro cujo propósito é sustentar as varetas combustíveis; as 48 posições restantes são furos que são utilizados para fixar os tubos guias das varetas de controle e de segurança. Na FIG. C.3 apresentam-se os detalhes das cavidades e dos furos. O espaçamento entre cavidades e furos (pitch) é de $1,50 \pm 0,01$ cm.

Salienta-se que o arranjo quadrado 30 x 30 refere-se ao número máximo de varetas de combustível e de controle/segurança que podem ser acomodadas no núcleo.

Outra designação, tal como arranjo 28 x 26, encontrada neste anexo refere-se à distribuição de varetas no núcleo utilizadas no experimento.

As placas espaçadoras intermediária e superior têm espessuras, respectivamente, $10,5 \pm 0,1$ mm (valor medido) e $20,0 \pm 0,1$ mm. Estas placas contêm 852 furos com $10,5 \pm 0,2$ mm de diâmetro para as varetas combustíveis; 48 furos com $12,2 \pm$

0,2 mm de diâmetro para os tubos guias das varetas de controle e de segurança e outros 209 furos com 5 mm de diâmetro, cujo propósito é permitir a introdução de termopares, detectores miniatura e outros dispositivos experimentais. A placa espaçadora superior também serve como suporte para os tubos guias das varetas de controle e de segurança.

FIGURA C.2 - Diagrama esquemático das placas matriz e espaçadoras.

FIGURA C.3 – Diagrama esquemático das cavidades e furos da placa matriz.

As FIG. C.4 e C.5 apresentam detalhes das placas matriz e espaçadoras intermediária e superior observando-se que as placas são sustentadas por treliças e este

conjunto mantém todas as varetas: de combustível, controle e de segurança na posição vertical.

FIGURA C.4 – Diagrama esquemático das placas suporte.

FIGURA C.5 – Detalhes da placa suporte inferior.

O livro de dados do reator IPEN/MB-01 contém muitas descrições detalhadas de todos os dados geométricos relacionados com as placas espaçadoras. Mais especificamente, são dados medidos para cada furo tais como, diâmetro e distância para o furo vizinho, e também a profundidade de cada cavidade. Uma máquina do tipo mesa de medida tridimensional foi utilizada para efetuar todas as medidas deste tipo. Inicialmente o equipamento foi calibrado, e a seguir foi estabelecida uma origem para o sistema cartesiano (x,y,z) no canto da placa. A máquina possui um sensor que está diretamente conectado a um sistema eletrônico, que pode especificar a posição do sensor na coordenada (x,y,z) com alto grau de precisão na medida (0,001 mm).

As características geométricas medidas pela máquina tridimensional são: diâmetro, espaçamento entre furos e cavidades, profundidade da cavidade e planicidade da placa. O diâmetro dos furos é medido da seguinte forma: o sensor é posicionado dentro do furo e por movimentos apropriados ele troca sua posição para a borda do furo e marca esta posição no sistema cartesiano; depois que mais duas posições na borda do furo são determinadas, estes pontos determinam um círculo e através de uma relação matemática incorporada ao sistema eletrônico, o diâmetro do furo e também a coordenada de seu centro são obtidos. Esta operação é repetida para todos os furos nas 3 placas espaçadoras.

Na TAB. C.1 apresenta-se o resumo do resultado da análise estatística realizada em todos os dados geométricos referentes às placas espaçadoras, disponíveis no livro de dados do reator IPEN/MB-01. O livro de dados do reator IPEN/MB-01 possui 852 medidas do diâmetro do furo da vareta combustível, 771 medidas da distância entre posições (pitch) por grade espaçadora, 852 medidas de profundidade das cavidades e 934 medidas de planicidade. Existe boa consistência entre os valores medidos dos “pitch” das grades espaçadoras e estes estão muito próximos dos valores de projeto, sendo assim, foi adotado o valor de projeto 15,000 mm com o desvio padrão de 0,0023 mm.

TABELA C.1 – Dados geométricos médios das placas espaçadoras, baseados nos dados de fabricação.

<i>Medida</i>	<i>Placa espaçadora</i>	<i>Valor médio</i> (mm)	<i>Desvio padrão</i> (mm)
Distância entre posições (pitch)	Superior	15,000	0,018
	Intermediária	14,999	0,011
	Matriz	14,999	0,023
Diâmetro do furo para a vareta combustível	Superior	10,454	0,034
	Intermediária	10,449	0,019
	Matriz	10,463	0,016
Profundidade da cavidade	Matriz	12,000	0,010
Linearidade	Matriz	-0,056	0,046

C. 2.3. Varetas combustíveis

A vareta combustível é constituída de um encamisamento (SS-304), pastilhas de UO_2 , pastilhas de Al_2O_3 , uma mola (inconel-600), tubo espaçador e dois tampões, um superior e um inferior (SS-304). O número total de 705 varetas combustíveis foi fabricado para o reator IPEN/MB-01. Na FIG. C.6 apresentam-se as dimensões com as tolerâncias especificadas no projeto do reator. Durante a fabricação das varetas combustíveis algumas quantidades relacionadas com a sua descrição geométrica foram medidas e através delas foram realizadas análises.

FIGURA C.6 – Diagrama esquemático das especificações da vareta combustível.

Por meio da base de dados de fabricação das varetas combustíveis foram derivados os valores médios e também seus respectivos desvios padrões para as seguintes quantidades: diâmetro externo do encamisamento da vareta combustível, diâmetro interno

do encamisamento da vareta combustível, diâmetro da pastilha de UO_2 , altura ativa de combustível, altura da alumina inferior e a massa média de UO_2 por vareta combustível (TAB. C.2). O livro de dados do reator IPEN/MB-01 possui 182 medidas dos diâmetros interno e externo do encamisamento da vareta combustível, escolhidos aleatoriamente do total de 705 varetas; 760 medidas para o diâmetro da pastilha de UO_2 , também escolhidos aleatoriamente; 705 medidas da altura ativa de combustível, da altura da alumina inferior e da massa de UO_2 , ou seja, nestes casos foram realizadas medidas em todas as varetas fabricadas.

TABELA C.2 – Dados médios das varetas combustíveis e respectivos desvios padrões baseados nos dados de fabricação.

<i>Quantidade</i>	<i>Valor médio</i>	<i>Desvio padrão</i>
Diâmetro externo da vareta combustível (mm)	9,8074	0,0169
Diâmetro interno da vareta combustível (mm)	8,5746	0,0243
Diâmetro da pastilha combustível (mm)	8,4894	0,00475
Altura ativa do combustível (mm)	548,4	3,544
Altura da alumina inferior (mm)	90,28	0,09
Massa de UO_2 por vareta combustível (g)	315,912	2,386

C. 2.4. Varetas de controle, segurança e tubo guia

Cada um dos bancos de controle e de segurança é composto por 12 varetas agrupadas e sustentadas por um mecanismo de controle acima do tanque. Na FIG. C.7 apresenta-se uma fotografia com a distribuição dos bancos de controle e de segurança no reator. Deve-se ressaltar que os bancos movem-se no núcleo dentro dos tubos guias.

As varetas absorvedoras são encamisadas com SS-304, os tampões também são de SS-304 e a mola é de Inconel-600. As varetas de controle são preenchidas com pastilhas absorvedoras de uma liga de Ag-In-Cd, enquanto que as varetas de segurança são preenchidas com B_4C . Durante a operação normal os bancos de segurança são completamente retirados do núcleo ativo.

FIGURA C.7 – Mecanismo de controle.

As dimensões da vareta absorvedora são apresentadas na FIG. C.8, sendo o diâmetro do encamisamento igual a 9,8 mm e a espessura da parede 0,6 mm. O tubo guia é de SS-304 com diâmetro externo de $12,00 \pm 0,05$ mm e diâmetro interno de $11,30 \pm 0,05$ mm. A parte inferior do tubo guia fica 5 mm abaixo da placa matriz, como pode ser observado na FIG. C.5. Durante a operação do reator os tubos guias são preenchidos com água, e na sua parte inferior existem 3 pequenos furos para permitir a entrada da água durante o enchimento do tanque e a sua saída no esvaziamento do tanque.

Dimensões em mm
Desenho sem escala

FIGURA C.8 – Diagrama esquemático das varetas absorvedoras.

O sistema de controle do reator IPEN/MB-01 é definido de modo que os posicionamentos dos bancos de controle no núcleo são dados em termos da distância entre a parte inferior do absorvedor e o início do núcleo ativo. A unidade usada é a porcentagem

de retirada que é definida como sendo a fração da altura ativa do núcleo abaixo da região absorvedor a das varetas de controle. Por exemplo, se as varetas de controle estão totalmente inseridas a porcentagem de retirada é zero, por outro lado se as varetas de controle estão totalmente retiradas a porcentagem de retirada é 100, neste caso, a superfície inferior do absorvedor coincide com o topo do núcleo ativo, embora, o tampão da vareta absorvedor a permaneça dentro do núcleo ativo.

A incerteza no posicionamento do banco de controle é dada pelo indicador de posição da vareta de controle. Este equipamento pode determinar a posição com precisão de 4 dígitos. A menor indicação é 00,00 % enquanto a maior é 99,99 %, e a incerteza no indicador de posição é 0,01 %.

Os bancos de segurança basicamente seguem o mesmo padrão, neste caso, por critério de projeto, estes bancos são mantidos retirados em 135 %, ou seja, a superfície inferior da região absorvedora permanece 35 % acima do núcleo ativo. Entretanto, esta condição tem muito, ou nenhum, impacto na criticalidade do sistema.

C. 3. Descrição dos materiais

Os dados dos materiais do reator IPEN/MB-01 vêm de análises detalhadas realizadas no IPEN e em alguns casos também de análises de dados de fabricação. Na TAB. C.3 é apresentada a composição química do aço inoxidável do encamisamento, para as condições de fabricação (PROSIT) e de medidas realizadas pelo IPEN de duas amostras, juntamente com o valor médio recomendado e seu respectivo desvio padrão. O valor médio recomendado é a média aritmética das três composições disponíveis e o desvio padrão calculado de acordo com a fórmula usual de propagação de erros.

Salienta-se que não foram medidas as composições isotópicas referentes ao ^{234}U e ao ^{236}U . Por essa razão, foi assumida a quantidade de 0,034 % de ^{234}U que foi calculada pela interpolação linear entre o urânio natural e o valor de $0,0344 \pm 0,001$ % peso, referente ao combustível enriquecido em 4,4 % em ^{235}U (LEU-THERM-015). Assumiu-se o valor de ± 50 % na incerteza da quantidade de ^{234}U na fabricação do combustível. De acordo com as especificações do IPEN, o combustível novo não contém ^{236}U .

TABELA C.3 – Composição do aço inoxidável do encamisamento (% peso).

<i>Elemento</i>	<i>Fabricação PROSIT</i>	<i>OFICON IPEN</i>		<i>Valor recomendado</i>
		<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	
C	0,020	0,0323	0,0326	$0,0283 \pm 0,0072$
Mn	1,80	1,58	1,68	$1,6867 \pm 0,1102$
P	0,04	0,018	0,020	$0,0260 \pm 0,0122$
S	0,007	0,0135	0,0111	$0,0105 \pm 0,0033$
Si	0,390	0,350	0,460	$0,4000 \pm 0,0557$
Ni	10,13	9,90	10,10	$10,0433 \pm 0,1250$
Cr	18,52	18,10	18,40	$18,3400 \pm 0,2163$
Co	-	0,21	0,22	$0,2150 \pm 0,0071$
Mo	-	0,16	0,18	$0,1700 \pm 0,0141$
Fe	69,093	69,6362	68,8963	$69,0802 \pm 0,3832$

O combustível do reator IPEN/MB-01 foi feito em 8 lotes. Na TAB. C.4 apresenta-se os enriquecimentos bem como as incertezas e o número de varetas combustíveis para cada lote.

TABELA C.4 – Características dos combustíveis por lote.

<i>Lote</i>	<i>Varetas no núcleo</i>	<i>Massa de U</i> (g)	<i>Massa de ^{235}U</i> (g)	<i>Enriquecimento</i> (% em peso)
1	90	25.083,62	1.091,11	$4,350 \pm 0,003$
2	88	25.525,88	1.065,65	$4,345 \pm 0,006$
3	91	25.340,37	1.097,74	$4,332 \pm 0,003$
4	88	24.355,16	1.058,96	$4,348 \pm 0,003$
5	86	24.166,81	1.053,67	$4,360 \pm 0,004$
6	92	25.586,81	1.113,79	$4,353 \pm 0,003$
7	85	23.633,95	1.030,20	$4,359 \pm 0,001$
8	60	16.617,60	721,20	$4,340 \pm 0,004$

O enriquecimento é de fato a média para cada lote, visto que foram feitas medidas em todos os lotes. As varetas combustíveis foram distribuídas aleatoriamente no núcleo e o enriquecimento médio em ^{235}U foi obtido pela ponderação de cada lote de acordo com sua fração em massa de urânio no núcleo como:

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{i=1}^8 f_i \varepsilon_i$$

onde ε_i e f_i são respectivamente, o enriquecimento e a fração em massa de urânio para cada lote.

A incerteza associada ao enriquecimento médio de ^{235}U foi obtida pela propagação de erro padrão:

$$\sigma_{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (f_i \sigma_{\varepsilon_i})^2}$$

onde somente é considerada a incerteza no enriquecimento do ^{235}U no lote (TAB. C.4), visto que a incerteza na massa de urânio é muito pequena e não foi considerada na propagação de erros.

As informações detalhadas da composição dos materiais das varetas de combustível e de controle estão listadas na TAB. C.5. Todas as composições, exceto a quantidade de ^{234}U no combustível, advêm da análise química detalhada realizada pelo IPEN. As incertezas são desvios padrões.

A densidade média de combustível e sua respectiva incerteza foram obtidas considerando-se a conservação da massa total de UO_2 , o valor utilizado foi $315,912 \pm 2,386$ g por vareta combustível (TAB. C.2.2). A densidade média de UO_2 foi calculada com a expressão:

$$\rho_{UO_2} = \frac{4M}{\pi D^2 L} \quad (6)$$

onde D é o diâmetro da pastilha, L a altura físsil e M a massa de UO_2 por vareta combustível. O desvio padrão foi determinado pela propagação de erros considerando-se que não há correlação entre M, D e L, como:

$$\sigma_{\rho_{UO_2}}^2 = \left(\frac{4}{\pi D^2 L} \right)^2 \sigma_M^2 + \left(\frac{8M}{\pi D^3 L} \right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{4M}{\pi D^2 L^2} \right)^2 \sigma_L^2 \quad (7)$$

De acordo com a TAB. A.2.2, $M = 315,912 \pm 2,386$ g, $D = 8,4894 \pm 0,00475$ mm e $L = 548,4 \pm 3,544$ mm e então, $\rho_{UO_2} = 10,1771 \pm 0,1018$ g/cm³.

As densidades dos aços inoxidáveis foram medidas no IPEN, sendo que a técnica de medida seguiu o procedimento descrito na ASTM-B-328/96(2003)⁴. Não foram medidas as densidades para as placas espaçadoras.

⁴ASTM-B-328/96(2003) "Standard Test Method for Density, Oil Content and Interconnected Porosity of Sintered Metal Structural Parts and Oil-Impregnated Bearings"

TABELA C.5 – Composição dos materiais.

Material	Densidade (g/cm ³)	Nuclídeos ^(e)	Fração em peso (1 □)
Combustível UO ₂ ^(a) Enriquecimento: 4,3486% Fração total de urânio: 88,125% ± 0,023% Composição Isotópica do urânio (peso %): ²³⁴ U ^(b) = 0,034 ± 0,0098 ²³⁵ U = 4,3486 ± 0,0021 ²³⁸ U = 95,6174 ± 0,0021	10,1771 ^(c) ± 0,1018	²³⁴ U ^(b)	0,000300 ± 0,000087
		²³⁵ U	0,038319 ± 0,000021
		²³⁸ U	0,842560 ± 0,000021
		O	0,118740 ± 0,00003
		Al	0,000024
		Mg	0,000017
		Fe	0,000037
		B	0,0000002
		Mo	0,000002
		C	0,000283 ± 0,000072
Encamisamento do combustível SS-304	7,9207 ± 0,0005	Mn	0,016867 ± 0,001102
		P	0,000260 ± 0,000122
		S	0,000105 ± 0,000033
		Si	0,004000 ± 0,000231
		Ni	0,100433 ± 0,001250
		Cr	0,183400 ± 0,002163
		Co	0,002150 ± 0,000071
		Mo	0,001700 ± 0,000141
		Fe	0,690802 ± 0,002775
		B	<0,0000002
Alunina (Al ₂ O ₃) O balanço é Al ₂ O ₃ (0,9989)	3,792 ± 0,007	Fe	0,0007
		Cr	0,0003
		Ni	0,0001
		Ag	0,7934 ± 0,0015
Absorvedor da vareta de controle. Liga de Ag-In-Cd	10,007 ± 0,004	In	0,1496 ± 0,0014
		Cd	0,0483 ± 0,001
		C	0,003
		S	0,001
		O	0,0047

TABELA C.5 – Composição dos materiais (cont.).

Material	Densidade (g/cm ³)	Nuclídeos ^(e)	Fração em peso (1%)
Absorvedor da vareta de segurança. Carbeto de boro (B ₄ C)	1,45 ± 0,01	B	0,764300
		C	0,23570
		Fe	0,000300
		Si	0,00020
		Ti	0,00040
Placas espaçadoras (matriz, intermediária e superior) SS-304	-	C	0,00020
		Mn	0,01440
		P	0,00036
		S	0,00003
		Si	0,0050
		Ni	0,09430
		Cr	0,18210
		Mo	0,00060
		Fe	0,70291
Tubo espaçador da vareta de combustível SS-304	8,0040 ± 0,0005	Co	0,0014
		Cr	0,1810
		Mn	0,0132
		P	0,0002
		Si	0,0065
		Fe	0,7171
		Ni	0,0800
		C	0,0006
Tubo guia das varetas de controle e segurança SS-304	7,7150 ± 0,0005	Fe	0,68447
		C	0,00023
		Cr	0,18240
		Ni	0,11500
		Mn	0,0136
		P	0,0003
		Si	0,0040

TABELA C.5 – Composição dos materiais (cont.).

Material	Densidade (g/cm ³)	Nuclídeos ^(e)	Fração em peso (1%)
Moderador Água (H ₂ O)	0,99820 ± 0,00002 ^(c)	H	0,1118944
		O	0,8881056
Mola das varetas combustíveis, de controle e de segurança Inconel-600 (massa da mola: 11,476g)	8,1480 ± 0,0001	Ni	0,7460
		C	0,00027
		Mn	0,0030
		P	0,00012
		S	0,00001
		Si	0,0020
		Fe	0,0900
		Cr	0,1563
		Ti	0,0017
		Cu	0,00060
Encamisamento das varetas de controle e de segurança SS-304	7,9207 ± 0,0005	Fe	0,6771
		C	0,00021
		Mn	0,0136
		P	0,00027
		S	0,00003
		Si	0,00450
		Ni	0,11680
		Cr	0,18360
		Mo	0,00030
		Sn	0,00008
		Cu	0,00180
		Co	0,0017

^(a) Valor médio de todos os lotes.^(b) Não medido (vide texto).^(c) Valor calculado a partir da massa e do volume.^(d) R.C. Weast (editor), Handbook of Chemistry and Physics, 70th Edition CRC Press ISBN-O-8493-0470-9 (1989).^(e) Todas as impurezas dadas nesta tabela têm uma incerteza de aproximadamente 50%

As impurezas da água do moderador foram medidas e estão apresentadas na TAB. C.6.

TABELA C.6 – Análise do moderador do reator IPEN/MB-01

<i>Nuclídeos</i>								<i>pH</i>	<i>Condutividade elétrica</i>
K	Cl	F	Na	Si	Fe	Ca	Mg		
mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/l	µg/Kg	mg/l	mg/l	6,5 a 7,5	µmhos/cm
2,5 a 12	0,1	0,1	0,1	1,0	7,0	0,1	0,1		1,0

ANEXO D – OS SISTEMAS DE CONTAGENS

D. 1. Bancada ORTEC - HPGe (Germânio Hiper Puro)

A bancada experimental utilizada na espectrometria gama das folhas de ouro, está ilustrada na FIG. D.1, consiste de um detector de germânio de alta pureza (HPGe) da EG&G Ortec acoplado a dois reservatórios de nitrogênio líquido para refrigeração; blindagem de chumbo para diminuição da radiação de fundo e com prateleira para o posicionamento das folhas de ouro; fonte de alimentação de alta tensão; amplificador de sinal e um micro computador Pentium III com uma placa de aquisição de dados e um programa para a análise do espectro.

FIGURA D.1 – Bancada experimental para espectrometria gamma de folhas.

Na FIG. 4.10 já foi apresentado um diagrama esquemático que representa o esquema de funcionamento da bancada, neste caso com detector HPGe da ORTEC.

O conjunto de fotografias apresentadas na FIG. D.2 ilustra o arranjo da bancada, composta pelos seguintes equipamentos:

- (a) Conjunto do detector, reservatórios de nitrogênio líquido e blindagem de chumbo.
- (b) Fonte de alta tensão e amplificador.
- (c) Detector dentro da blindagem de chumbo e prateleira para posicionar as folhas de ouro e
- (d) Microcomputador com tela do programa MAESTRO.

(a)

(b)

(c)

(d)

FIGURA D.2 – Fotografias dos equipamentos que compõem a bancada experimental do sistema de aquisição de dados da ORTEC.

As características do detector e da instrumentação associada estão apresentadas na TAB. D.1.

TABELA D.1 – Características dos equipamentos da bancada experimental de espectrometria gama.

Equipamento	Características
Detector	GMX Series HPGe Gamma-X HPGE
	Modelo GMX 40210
	Configuração criostática GG-GMX
	Modelo do reservatório de nitrogênio 0.7-SHP-S
	Modelo do pré-amplificador 237N-S
	Pré amplificador S/N #932
Informações criogênicas	Modelo do filtro de alta tensão 138-S
	Filtro de alta tensão S/N #91
	Capacidade do reservatório 0,77 (l)
	Autonomia do reservatório 16 (h)
Dimensões	Tempo mínimo para o resfriamento do Detector 6 (h)
	Diâmetro do cristal 58,9 (mm)
	Comprimento do cristal 79,0 (mm)
Camadas absorvedoras	Espessura do encamisamento do cristal 3 (mm)
	Espessura de Berílio 0,5 (mm)
Alta tensão	Germânio inativo 0,3 (μ m)
	Modelo ORTEC 659
Amplificador Multicanal	Faixa de operação recomendada -4500 (V)
	Modelo ORTEC 672
	Modelo ORTEC-TRUMP-8K/2K

D. 2. Características de sistema de detecção CANBERRA

A bancada experimental utilizada na espectrometria gama do fio de ouro, ilustrada na FIG. D.3, consiste de um detector de germânio de alta pureza (HPGe) da CANBERRA acoplado a um reservatório de nitrogênio líquido para refrigeração; blindagem de chumbo para diminuição da radiação de fundo; sistema de movimentação do suporte dos fios e instrumentação associada.

FIGURA D.3 – Sistema para espectrometria gamma dos fios de ouro.

A eletrônica associada é toda ela condensada no módulo DSA 2000, que contém o pré-amplificador, o amplificador, o multicanal e a fonte de alimentação de baixa e de alta tensão e um microcomputador com o software Genie 2000, que faz a comunicação entre o microcomputador e o módulo DSA 2000, e também tem a função de realizar a aquisição de dados na espectrometria gama. Salienta-se que o sistema de movimentação do suporte de fios foi desenvolvido no IPEN e uma descrição mais detalhada do sistema é apresentada no subitem D.2.1

Na FIG. D.4 apresenta-se um diagrama esquemático que representa o esquema de funcionamento da bancada.

FIGURA D.4 – Diagrama esquemático da bancada experimental com detector HPGe da CANBERRA.

Os programas Genie 2000 e POSICIONADOR_AUTOMÁTICO_02 (desenvolvido no IPEN) permitem controlar e serem controlados mutuamente, e dessa forma executar as funções de movimentação e medida de espectro nas posições desejadas e por tempo definidos, de acordo com a necessidade do experimentador. O conjunto de fotografias apresentadas na FIG. D.5 ilustra o arranjo da bancada, que contém:

- (a) Conjunto do detector, reservatório de nitrogênio líquido, blindagem de chumbo e sistema posicionamento e movimentação da vareta combustível.
- (b) Alimentador do sistema de movimentação da vareta combustível.
- (c) Controlador de velocidade de movimentação da vareta combustível.
- (d) Indicador de posição da vareta combustível.
- (e) Microcomputador e módulo DAS 2000

As características do detector e da instrumentação associada estão apresentadas na TAB. D.2.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

FIGURA D.5 – Fotografias dos equipamentos que compõem a bancada experimental do sistema de aquisição de dados da CANBERRA.

TABELA D.2 – Características dos equipamentos da bancada experimental de espectrometria gama de vareta combustíveis.

Equipamento	Características	
Detector	HPGE - CANBERRA	
	Modelo	GL 0520S
	Modelo do criostato	790630SL
	Modelo do pré-amplificador	2002CPSL
Características físicas	Diâmetro ativo	25,2 (mm)
	Área ativa	500 (mm)
	Espessura	20 (mm)
	Distância da janela	5 (mm)
	Espessura da janela do criostato	0,5 (mm)
	Material da janela do criostato	Alumínio
Alta tensão	Faixa de operação recomendada	-2000 (V) dc
	Tensão recomendada no ponto de teste do pré-amplificador	-0,13 (V) dc

C. 2.1. Sistema automático de movimentação de vareta combustível

O sistema de movimentação do suporte dos fios de ouro, para a medida de espectrometria gama, é composto por um motor de passo, um fuso e um codificador (encoder), que permitem o deslocamento linear deste suporte, em uma direção horizontal em relação ao detector que permanece fixo, conforme mostrado na FIG. D.6.

FIGURA D.6 – Diagrama esquemático do sistema de movimentação do suporte de fios de ouro.

O motor de passo tem a função de girar o fuso, este por sua vez transmite o movimento e finalmente o codificador estabelece o posicionamento correto do suporte.

Inicialmente este sistema era movimentado manualmente e tornava o trabalho muito limitado.

O desenvolvimento deste projeto, contou com o financiamento da FAPESP o qual possibilitou a aquisição de módulos eletrônicos, que interligados adequadamente permitem o controle automático do sistema de movimentação e de aquisição de dados para a espectrometria gama. Esta automação foi de fundamental importância para a realização das medidas dos índices espectrais pelo método de varredura gama da vareta combustível. Os módulos eletrônicos que compõem o sistema de movimentação são mostrados nas TAB. D.3 e D.4.

TABELA D.3 – Módulos eletrônicos que compõem o sistema de movimentação.

Módulo	Identificador	Fabricante	Características
Interface eletrônica para comunicação remota entre um computador tipo PC e a configuração da bancada.	Módulo 7520	Impac	Converte a porta de comunicação serial RS232C do PC em RS485 (é o padrão utilizado na comunicação entre módulos).
Interface eletrônica definida para fazer a leitura dos pulsos do codificador.	Módulo 7080	Impac	2 contadores de 32 bits independentes e programáveis, acesso via serial RS485 para leitura/ escrita e 2 saídas independentes e programáveis para sinalização de contagem.
Interface eletrônica utilizada para comandar os sinais de direção e parada da Unidade de acionamento de motor de passo.	Módulo 7044	Impac	8 saídas programáveis em coletor aberto, 4 entradas programáveis isoladas.
Fonte de alimentação para alimentar os módulos 7080, 7044 e 7520.		Impac.	Entrada 127 volts ac, Saída 24 volts dc.

Além da aquisição de módulos do mercado, foram desenvolvidos no IPEN os módulos para acionamento e alimentação do motor de passo¹.

TABELA D.4 – Módulos eletrônicos que compõem o sistema de movimentação desenvolvidos no IPEN.

Módulo	Características
Acionamento de motor de passo.	Unidade de potência que gera as fases necessárias para o funcionamento do motor de passo. O controle de velocidade de movimentação é realizado através de um potenciômetro de 0 a 80 RPM. Saídas para 5 fases de 1,2 ampéres cada, 2 entradas de sinais de parada e 1 entrada de sinal de sentido de giro do motor, com alimentação de 12 volts e 2 ampéres.
Alimentação	Utilizado para alimentar o módulo de acionamento do motor de passo. Entrada de 127 volts ac, Saída 12 volts dc regulada, suporta 2 ampéres de carga máxima.
Computador PC	Windows: 95, 98 ou NT e Porta serial COM1, para gerenciar o sistema de movimentação da vareta. Windows 2000 NT e placa de rede com conector do tipo ethernet, para gerenciar o sistema contagem da vareta.

O sistema eletrônico é operado através de um software de controle onde são introduzidos os parâmetros necessários para a movimentação automática do mecanismo. O computador PC é utilizado tanto para gerenciar o sistema de movimentação da vareta combustível como para acionar o sistema de contagem para a espectrometria gama. Devido ao fato de ter sido adquirido um novo detector HPGe, com toda a eletrônica associada, de fabricação da Canberra.

Através de uma integração de controle entre software e hardware, é possível introduzir parâmetros que possibilitam o funcionamento do sistema de movimentação de forma automática. O software de integração entre os módulos, denominado POSICIONADOR _AUTOMÁTICO_02, foi desenvolvido no IPEN, na linguagem C e permite a excursão linear de 0 a 2000 mm, com precisão máxima de 0,003 mm. Os pontos de paradas dentro da escala linear são livres, assim como o tempo máximo de permanência em cada ponto e são definidos pelo usuário na entrada do programa.

Os dados de entrada são efetuados através do teclado e o menu de opções é visualizado através da tela do vídeo. A função auto-calibra corrige possíveis desvios indesejáveis no sistema mecânico. A eletrônica do sistema além do controle automático possibilita salvar os dados em tempos pré-definidos, através de saída sinalizadora. Na FIG. D.7 mostra-se o diagrama em blocos do sistema de movimentação, e na FIG. D.8 apresenta-se a tela para a entrada dos dados para o programa de movimentação.

FIGURA D.7 – Diagrama em Blocos do Sistema de Movimentação.

FIGURA D8 – Tela para a entrada dos dados.

ANEXO E - PROJETO DO REFLETOR DE ÁGUA PESADA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARHEN, W. RHOTENSTEIN; E. TAVIV. **The Hammer Code System**. Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, NP-565 (October 1978).
2. T. B. FOWLER; D. R. VONDY; G. W. CUNNINGHAN. **Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION**. ORNL-2496, Version 2 (1971).
3. DE AQUINO, AFONSO R.; VIEIRA, MARTHA M. F. **Molibdênio-99, Crise e Oportunidade**. Revista Scientific American Brasil. Ed. 98. 2010. Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/molibdenio-99_crise_e_oportunidade.html>. Acesso em: 06 fev. 2011.
4. IPEN. **Produção de Radioisótopos e Radiofármacos na CNEN – Crise Mundial de Molibdênio-99**. Carta do IPEN aos clientes. Disponível em <<http://www.ipen.br/sitio/?idc=4960>>. Acesso em 06 mai. 2011.
5. AGÊNCIA ESTADO. **Brasil terá novo reator nuclear com custo de R\$ 850 mi**. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,brasil-tera-novo-reator-nuclear-com-custo-de-r-850-mi,547266,0.htm>>. Acesso em: 15 ago.2010.
6. LAMARSH, JOHN R. **Introduction to Nuclear Reactor Theory**. 1.ed. [S. L.]: Addison-Wesley, 1966. p. 166-168.
7. LIVERHANT, SOLOMON E. **Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics**. 1. Ed. [S. L.]: John Willey & Sons, 1960. p. 156.
8. LIVERHANT, SOLOMON E. **Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics**. 1. Ed. [S. L.]: John Willey & Sons, 1960. p. 157.
9. LIVERHANT, SOLOMON E. **Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics**. 1. Ed. [S. L.]: John Willey & Sons, 1960. p. 158.
10. LIVERHANT, SOLOMON E. **Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics**. 1. Ed. [S. L.]: John Willey & Sons, 1960. p. 159.
11. DOS SANTOS, A; FANARO, L.C.C.B; YAMAGUCHI, M; JEREZ, R; ANDRADE E SILVA, G.S; SIQUEIRA, P.T.D; ABE, A.Y; FUGA, R. 2004. **LEU-COMP-THERM-077 Critical Loading Configurations of the IPEN/MB-01 Reactor**. J. Blair Briggs (Ed.), International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NSC/DOC (95)03/I, Nuclear Energy Agency, Paris (September Edition).
12. DOS SANTOS, A; ET AL. 2008. **LEU-COMP-THERM-043 Critical Loading Configurations of the IPEN/MB-01 Reactor with a Heavy SS-304 Reflector**.

International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NSC/DOC (95)03/I, Nuclear Energy Agency, Paris (September Edition).

13. DOS SANTOS, A; SILVA, G.S.A; FANRO, L.C.C.B; YAMAGUCHI, MITSUO; JEREZ, ROGÉRIO; DINIZ, RICARDO; KURAMOTO, RENATO YOICHI RIBEIRO. **IPEN/MB-01-LWR-Coef-Kin-Resr-001: Reactor Physics Experiments in the IPEN/MB-01 Research Reactor Facility.** In: International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments ed.Paris : Nuclear Energy Agency (NEA DATA BANK), 2010, p. 1-332.
14. U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. **DOE Fundamentals Handbook.** Washington, DC: Jan. 1993. v.1, p. 48.
15. U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. **DOE Fundamentals Handbook.** Washington, DC: Jan. 1993. v.1, p.. 56 - 60
16. LAMARSH, JOHN R; BARATA, ANTHONY J. **Introduction to Nuclear Reactor Engineering**, 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2001. pag. 118.
17. KAPLAN, IRWING. **Nuclear Physics**, 2. ed. [S.L]: Addison-Wesley, 1962. p. 565.
18. KAPLAN, IRWING. **Nuclear Physics**, 2. ed. [S.L]: Addison-Wesley, 1962. p. 639.
19. KAPLAN, IRWING. **Nuclear Physics**, 2. ed. [S.L]: Addison-Wesley, 1962. p. 641-644.
20. DUDERSTAD, JAMES J.; HAMILTON, LOUIS J. **Nuclear Reactor Analysis**. 1. Ed. [S.L]: John Willey & Sons, 1976. p. 95.
21. LIVERHANT, SOLOMON E. **Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics**. 1. Ed. [S. L]: John Willey & Sons, 1960. p. 290.
22. LAMARSH, JOHN R; BARATA, ANTHONY J. **Introduction to Nuclear Reactor Engineering**, 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2001. p. 304.
23. LAMARSH, JOHN R. **Introduction to Nuclear Reactor Theory**. 1.ed. [S. L.]: Addison-Wesley, 1966. p. 327-339.
24. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Stable Isotope Hydrology – Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle**. Vienna, 1981. (Technical Reports Series n.º 210).
25. KAPLAN, IRWING. **Nuclear Physics**, 2. ed. [S.L]: Addison-Wesley, 1962. p. 642, 573.

26. SMYTH, HENRY DEWOLF. **Atomic Energy for Military Purposes**. 1. ed. New York, NY: Da Capo Press, 1976. p. 91 e 105.
27. WALTHAM, C. E. A Brief History of Heavy Water. *Physics in Canada*, v. 49, p. 81-86, 1993.
28. MILLER, ALISTAIR I. **Heavy Water: A Manufacturers' Guide for the Hydrogen Century**. *Canadian Nuclear Society Bulletin*, n. 1, v. 22, Feb. 2001.
29. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Nuclear Fuel Cycles Information System**. Disponível em: < <http://infcis.iaea.org>>. Acesso em: 20 dez. 2011.
30. BLAIR P. BROMLEY. **Advanced Heavy Water Reactors (AHWRs)**. In: The 2010 Frédéric Joliot & Otto Hahn Summer School, Aug 25 – Sep 3, 2010, Aix-en-Provence.
31. SMYTH, HENRY DEWOLF. **Atomic Energy for Military Purposes**. 1. ed. New York, NY: Da Capo Press, 1976. p. 141.
32. HOLL, JACK M.; HEWLETT, RICHARD G.; HARRIS, RUTH R. **Argonne National Laboratory, 1946-96**. 1. ed. [S. L.]: University of Illinois Press, 1997.
33. FROST, BRIAN R. T. **A Brief History of Materials R & D at Argonne National Laboratory from the Met Lab to Circa 1995**. Disponível em: <http://www.anl.gov/Science_and_Technology/History/Frosthist.html>. Acesso em: 20 dez. 2011.
34. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Heavy Water Reactors: Status and Projected Development**. Vienna, 2002. p. 7. (Technical Reports Series nº 407).
35. LIVERHANT, SOLOMON E. **Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics**. 1. Ed. [S. L.]: John Willey & Sons, 1960. p. 208-209.
36. BROMLEY, BLAIR P. **Heavy Water Reactors**. In: Joint ICTP-IAEA Workshop on Nuclear Reaction Data for Advanced Reactor Technologies. 19-27 Mai. 2008, Trieste.
37. BITELLI, U.D'UTRA. **Medida e Cálculo da Distribuição Espacial e Energética de Neutrons no Núcleo do Reator IEA-R1**. 1988. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
38. BITELLI, U.D'UTRA. **Medida de Fluxo de Neutrons Térmicos**. In: ZAMBONI, C.B. **Fundamentos da Física de Nêutrons**. São Paulo, SP. Livraria da Física Editora. 2007. p. 55-68.

39. CABELLO, L.C.B.F. **Determinação Experimental de Índices Espectrais por Varredura Gama de Vareta Combustível no Reator IPEN/MB-01.** 2009. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
40. **Course on Small Computers in Research Reactor Operation and Use,** IPEN. São Paulo, 1988
41. GONÇALVES, LUCAS BATISTA. **Calibração dos Canais Nucleares do Reator Ipen/MB-01, Obtida a Partir da Medida da Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons Térmicos no Núcleo do Reator Através da Irradiação de Folhas de Ouro Infinitamente Diluídas.** 2008. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
42. HEHL, W. S. C. **Física de Reatores.** São Paulo, SP: Intituto de Energia Atômica, 1963.
43. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Heavy Water Reactors: Status and Proje Developed.** Vienna. 2002. (Techical Report Series no. 407).
44. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Stable Isotope Hydrology – Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle.** Vienna. 1981. (Technical Reports Series n.º 210).
45. LAMARSH, J. R; BARATTA, A.J. **Introduction to Nuclear Reactor Engineering.** 2001. Prentice Hall. New Jersey.
46. LAMARSH, J. R. **Introduction to Nuclear Reactor Theory.** Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1966. USA.
47. MARQUES, A.F. **Medida do Fluxo de Neutrons Térmicos do Reator I pen/MB-01 com Detectores de Ativação de Fios de ¹⁹⁷Au.** 1995. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
48. MARTINS, F.P.G. **Medida do Espectro de Energia dos Nêutrons no Núcleo do Reator Ipen/MB-01.** 2006. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
49. MURRAY, R.L. **Engenharia Nuclear.** Rio de Janeiro-RJ. Ao Livro Técnico S. A., 1963.
50. SMYTH, H.W. **Atomic Energy for Military Purposes – The Official Report on the Development of the Atomic Bomb under the Auspices of the United States Government, 1940-1945.** Da Capo Press, New York, 1976
51. SYRETT, J. J. **Nuclear Reactor Theory.** London. Ed. London: Temple Press Limited, 1958.

52. US DEPARTMENT OF ENERGY. **Fundamentals Handbook Nuclear - Physics and Reactor, Vol 2 of 2**. Washington, DC. 1993. (DOE-HDBK-1019/2-93)
53. VUOLO, J.H. **Fundamento da Teoria dos Erros**. São Paulo, SP. Editora Edgard Blucher Ltda. 1992.
54. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Technical Reports Series n.º 210. Stable Isotope Hydrology – Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle**. Vienna, 1981.
55. KNOLL, GLENN F. **Radiation Detection and Measurements**. Singapore. John Willey & Sons., 1989.
56. TSOULFANIDIS, NICHOLAS. **Measurement and Detection of Radiation**. Taylor and Francis. 1995.
57. MAFRA, OLGA Y. **Técnicas e Medidas Nucleares**. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda. 1973.
58. THIE, J. A. **Heavy Water Exponential Experiments Using ThO₂ and UO₂**. Pergamon Press. 1961.
59. MURA, LUIS F. L. **Medidas de taxas de reação nuclear e de índices espectrais ao longo do raio das pastilhas combustíveis do reator IPEN/MB-01**. 2011. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
60. SANTOS, A. et al. **Isothermal Experiments of the IPEN/MB-01 Reactor**. 2009. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, Light Water Moderated Reactor – LWR, pp. 58, NEA/NSC/DOC(2006) March.