AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Experimentos no reator IPEN/MB-01 com refletores de aço inoxidável, aço carbono e níquel

GRACIETE SIMÕES DE ANDRADE E SILVA

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

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

**São Paulo
2018**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Experimentos no reator IPEN/MB-01 com refletores de aço inoxidável, aço carbono e níquel

GRACIETE SIMÕES DE ANDRADE E SILVA

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

Orientador:
Prof. Dr. Adimir dos Santos

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2018

Dedico este trabalho às razões do meu viver: ao meu eterno amor, Leonardo, às nossas filhas, Fernanda e Tatiana, e aos nossos netos, Duda e Enrico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Manoel Augusto Simões de Oliveira (*in memorian*) e Elisa Pedro Simões por terem me proporcionado os estudos para chegar até aqui.

Ao meu marido Leonardo Gondim de Andrade e Silva pela insistência na cobrança para que este trabalho fosse iniciado e principalmente pelo carinho, paciência e companheirismo durante todas as fases da execução deste trabalho.

Ao professor, e orientador, Dr. Adimir dos Santos pela valiosa orientação, ensinamentos, e principalmente pela amizade.

Ao amigo Rinaldo Fuga pelo incessante apoio na montagem dos arranjos experimentais e nas soluções dos problemas com as chapas refletoras, além das inúmeras horas de operação do reator IPEN/MB-01, os meus sinceros agradecimentos.

Aos colegas do Reator IPEN/MB-01: Rogério Jerez, Reginaldo Gilioli, Marco Antonio Sabo, Hugo Rodrigues Landim, pelo apoio na realização dos experimentos no reator IPEN/MB-01, sem os quais as dificuldades enfrentadas seriam maiores.

Ao amigo Luiz Antonio Mai pela árdua ajuda no tratamento das chapas de aço carbono.

Ao amigo Mitsuo Yamaguchi pela valiosíssima ajuda na determinação das incertezas experimentais calculadas com o sistema HAMMER-TECHNION/CITATION.

Ao colega Luiz Felipe Liambos pela ajuda na montagem dos experimentos e ensinamentos na aquisição de dados.

Ao colega Pedro Carlos Russo Rossi pelo auxílio na modelagem dos experimentos com o código MCNP.

Em particular aos amigos da Divisão de Físicas de Reatores: Arlindo Gilson Mendonça, Leda Cristina Cabelo Bernardes Fanaro, Luiz Antonio Mai, Mitsuo Yamaguchi, Nanami Kosaka, e Paulo Rogério Pinto Coelho os meus sinceros agradecimentos pela amizade e apoio.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN-CNEN/SP), pela infraestrutura disponível para a realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento dos projetos nº: 2004/14542 e nº: 2011/50516-8, que possibilitaram a aquisição do material e confecção das chapas refletoras, bem como de computadores, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) pela disponibilidade de pessoal e infraestrutura.

A todas as demais pessoas do CEN que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

.

RESUMO

ANDRADE E SILVA, Graciete S. de. *Experimentos no Reator IPEN/MB-01 com Refletores de Aço Inoxidável, Aço Carbono e Níquel*. 2018. 157 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Os experimentos com refletores nucleares de material pesado foram realizados no reator IPEN/MB-01 utilizando-se chapas de aço inoxidável, de aço carbono ou de níquel, num total de 32 chapas de cada material, inseridas adequadamente na face oeste do núcleo do reator. As chapas têm cerca de 3 mm de espessura. A largura e comprimento axial foram suficientes para cobrir todo o núcleo ativo do reator. Tais experimentos foram realizados com cada tipo de material refletor individualmente. Para cada etapa de colocação de chapas foram efetuadas medidas da reatividade devido à inserção destas no núcleo; bem como da posição crítica das barras de controle com BC1 e BC2 igualmente retiradas. Pôde ser observado que o aumento da absorção de nêutrons e consequente diminuição da moderação de nêutrons dominaram toda a física do problema quando foram inseridas poucas chapas de material refletor (cerca de 5 chapas para o aço inoxidável e aço carbono, e 3 chapas no caso do níquel). Na sequência, a reflexão de nêutrons tornou-se importante superando a absorção neutrônica; a reatividade aumentou até ultrapassar a situação sem chapa (excesso de reatividade zero) obtendo-se um acréscimo (ganho líquido) de reatividade com as 32 chapas inseridas (cerca de 162 pcm no caso do aço inoxidável, 37 pcm para o aço carbono e 295 pcm para o níquel). Portanto, observou-se que o núcleo refletido tornou-se mais reativo do que o núcleo sem material refletor. Resultados experimentais inéditos de medidas de reatividade foram obtidos com refletores de níquel. No que concerne a esse tipo de experimento não existe experimento similar na literatura internacional ao realizado no reator IPEN/MB-01. A análise teórica empregando o MCNP-5 e a biblioteca de dados nucleares ENDF/B-VII.0 evidenciou os aspectos físicos de absorção e reflexão de nêutrons nas chapas de material refletor considerados; entretanto apresentou uma discrepância quando a reflexão de nêutrons rápidos domina o fenômeno físico do transporte de nêutrons. Essas tendências foram encontradas independentemente do tipo de refletor pesado empregado nos experimentos.

Palavras-chave: refletor pesado, efeito de reatividade, IPEN/MB-01, ENDF/B-VII.0

ABSTRACT

ANDRADE e SILVA, Graciete S. **IPEN/MB-01 Reactor Experiments with Stainless Steel, Carbon Steel, and Nickel Reflectors.** 2018. 157 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Experiments with heavy-material nuclear reflectors were performed in the IPEN / MB-01 reactor using stainless steel, carbon steel or nickel plates, in a total of 32 plates of each material, properly inserted in the western face of the reactor core. The plates are about 3 mm thick. The axial width and length were sufficient to cover the entire active core of the reactor. Such experiments were performed with each type of reflective material individually. For each step of placement of plates were made measures of reactivity due to the insertion of these in the core; as well as the critical position of the BC1 and BC2 control rods also removed. It could be observed that the increase in neutron absorption and consequent decrease in neutron moderation dominated the whole physics of the problem when a few reflective material plates were inserted (about 5 plates for stainless steel and carbon steel and 3 plates for nickel). Subsequently, neutron reflection has become important overcoming neutron absorption; the reactivity increased until it exceeded the situation without plate (excess of zero reactivity) obtaining an increase (net gain) of reactivity with 32 inserts inserted (about 162 pcm in the case of stainless steel, 37 pcm for carbon steel and 295 pcm for nickel). Therefore, it was observed that the reflected core became more reactive than the core without reflective material. Unpublished experimental results of reactivity measurements were obtained with nickel reflectors. As for this type of experiment, there is no similar experiment in the international literature compared to the IPEN/MB-01 reactor. The theoretical analysis using the MCNP-5 together with nuclear data library ENDF/B-VII.0 evidenced the physical aspects of neutron absorption and reflection in the reflective material plates considered; however, it presented a discrepancy when the reflection of fast neutrons dominates the physical phenomenon of the transport of neutrons. These trends were found independently of the type of the heavy reflector employed in the experiments.

Key words: heavy reflector, reactivity effect, IPEN/MB-01, ENDF/B-VII.0

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Massa e espessura média das chapas de aço inoxidável e de níquel.....	32
Tabela 2.2	– Massa e espessura média das chapas de aço carbono.....	33
Tabela 2.3	– Valores médios da espessura e da massa das chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel.....	34
Tabela 2.4	– Composição química das chapas de aço inoxidável.....	34
Tabela 2.5	– Composição química das chapas de níquel.....	35
Tabela 2.6	– Composição química das chapas de aço carbono.....	35
Tabela 2.7	– Composição química da tinta <i>spray</i> Colorgin branca utilizada nas chapas de aço carbono.....	35
Tabela 2.8	– Espessura total (chapa + água) para o arranjo experimental com aço inoxidável (em mm).....	41
Tabela 2.9	– Espessura total (chapa + água) para o arranjo experimental com aço carbono (em mm).....	42
Tabela 2.10	– Espessura total (chapa + água) para o arranjo experimental com Níquel (em mm).....	43
Tabela 2.11	– Estimativa do <i>gap</i> de água para os experimentos de refletores pesados.....	44
Tabela 2.12	– Parâmetros cinéticos experimentais do reator IPEN/MB-01.....	46
Tabela 2.13	– Incertezas da geometria do reator IPEN/MB-01.....	54
Tabela 2.14	– Incertezas dos materiais do reator IPEN/MB-01.....	55
Tabela 2.15	– Dados geométricos para a simulação computacional.....	61
Tabela 2.16	– Densidades atômicas das chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel para a simulação computacional.....	62
Tabela 3.1	– Reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 e posição crítica de barra em função do número de chapas de aço inoxidável – Experimental após tratamento estatístico.....	64

Tabela 3.2	–	Reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 e posição crítica de barra em função do número de chapas de aço carbono – Experimental após tratamento estatístico.....	65
Tabela 3.3	–	Reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 e posição crítica de barra em função do número de chapas de níquel – Experimental após tratamento estatístico.....	66
Tabela 3.4	–	Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas de aço inoxidável.....	68
Tabela 3.5	–	Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas de aço carbono.....	70
Tabela 3.6	–	Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas de níquel.....	72
Tabela 3.7	–	Incerteza experimental associada às incertezas da composição geométrica e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código CITATION, para o caso sem as chapas refletoras....	74
Tabela 3.8	–	Incerteza experimental associada às incertezas da composição geométrica e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código CITATION, para o caso de 21 chapas de aço inoxidável.....	76
Tabela 3.9	–	Incerteza experimental associada às incertezas da composição geométrica e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código CITATION, para o caso de 21 chapas de níquel.....	77
Tabela 3.10	–	Incertezas oriundas da geometria e dos materiais do reator IPEN/MB- 01, calculadas com o código MCNP-5, para o experimento com 21 chapas de aço inoxidável.....	79
Tabela 3.11	–	Incertezas oriundas da geometria e dos materiais do reator IPEN/MB- 01, calculadas com o código MCNP-5, para o experimento com 21 chapas de aço carbono.....	80
Tabela 3.12	–	Incertezas oriundas da geometria e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código MCNP-5, para o experimento com 21 chapas de níquel.....	81
Tabela 3.13	–	Incertezas totais para o experimento com refletores de aço inoxidável.....	82
Tabela 3.14	–	Incertezas totais para o experimento com refletores de aço carbono.....	83
Tabela 3.15	–	Incertezas totais para o experimento com refletores de níquel.....	84

Tabela 3.16	– Coordenadas das posições críticas de barra para as simulações computacionais dos experimentos com as chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel.....	88
Tabela 3.17	– Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de níquel. Metodologia homogênea.....	90
Tabela 3.18	– Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de níquel. Metodologia explícita 1.....	91
Tabela 3.19	– Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de níquel. Metodologia explícita 2.....	92
Tabela 3.20	– Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel. Metodologia homogênea.....	94
Tabela 3.21	– Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel. Metodologia explícita 1.....	95
Tabela 3.22	– Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel. Metodologia explícita 2.....	96
Tabela 3.23	– Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de aço carbono. Metodologia homogênea.....	97
Tabela 3.24	– Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de aço carbono Metodologia explícita 1.....	98
Tabela 3.25	– Diferença percentual para as chapas refletoras de aço carbono. Metodologia homogênea.....	100
Tabela 3.26	– Diferença percentual para as chapas refletoras de aço carbono. Metodologia explícita 1.....	101
Tabela 3.27	– Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de aço inoxidável. Metodologia explícita 1.....	102
Tabela 3.28	– Diferença percentual para as chapas refletoras de aço inoxidável. Metodologia explícita 1.....	104
Tabela 3.29	– Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel considerando $S(\alpha, \beta)$ da biblioteca ENDF/B-VI.0 – Metodologia explícita 1.....	109

Tabela 3.30	– Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel considerando $S(\alpha,\beta)$ gerado pelo CAB - Metodologia explícita 1.	110
Tabela 3.31	– Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel considerando $S(\alpha,\beta)$ com os dados novos do ^{235}U , ^{238}U e ^{16}O - Metodologia explícita 1.....	111
Tabela A.1	– Dados geométricos médios das placas espaçadoras do reator IPEN/MB-01, baseados nos dados de fabricação.....	126
Tabela A.2	– Dados geométricos médios das varetas combustíveis do reator IPEN/MB-01 e respectivos desvios padrões, baseados nos dados de fabricação.....	129
Tabela A.3	– Composição do aço inoxidável do encamisamento do reator IPEN/MB-01 (% massa).....	133
Tabela A.4	– Características dos combustíveis do reator IPEN/MB-01, por lote.....	133
Tabela A.5	– Composição dos materiais do reator IPEN/MB-01.....	135
Tabela A.6	– Análise do moderador do reator IPEN/MB-01.....	138
Tabela A.7	– Composição isotópica dos materiais do reator IPEN/MB-01.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Diagrama esquemático do tanque moderador e da distribuição dos detectores ao redor do núcleo – Dimensões em cm.....	25
Figura 2.2	– Vista do arranjo experimental para 32 chapas inseridas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01 (Topo).....	27
Figura 2.3	– Gráfico explicativo da forma de aquisição de dados dos experimentos.....	28
Figura 2.4	– <i>Mock-up</i> do experimento de refletores de material pesado.....	29
Figura 2.5	– Vista axial do arranjo experimental – Dimensões em mm.....	30
Figura 2.6	– Detalhes geométricos das chapas de material refletor - Dimensões em mm.....	31
Figura 2.7	– Detalhes do dispositivo de suporte das chapas de material refletor...	36
Figura 2.8	– Detalhes do sistema de parafusos utilizado para ajustar a distância entre a chapa refletora e o núcleo do reator IPEN/MB-01.....	37
Figura 2.9	– Representação esquemática do dispositivo de fixação das chapas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01.....	38
Figura 2.10	– Sistema de compressão das chapas.....	38
Figura 2.11	– Posições escolhidas para medida da espessura total de cada configuração.....	40
Figura 2.12	– Localização dos termopares no núcleo do reator IPEN/MB-01.....	48
Figura 2.13	– Representação radial do modelo computacional explícito para o arranjo experimental com quatro chapas de níquel inseridas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01.....	59
Figura 2.14	– Representação axial da vareta combustível, da barra de controle dentro do tubo guia, do tubo guia da barra de segurança, da chapa de níquel e do <i>gap</i> de água, no modelo computacional explícito para o arranjo experimental com quatro chapas de níquel inseridas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01.....	60
Figura 3.1	– Gráfico da reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 em função do número de chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel, justapostas na sua face oeste – Experimental.....	85

Figura 3.2	– Gráfico da posição crítica de barra em função do número de chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel, justapostas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01 - Experimental.....	86
Figura 3.3	– Gráfico comparativo entre a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 experimental e calculada em função do número de chapas de níquel justapostas na sua face oeste.....	93
Figura 3.4	– Gráfico comparativo entre a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 experimental e calculada em função do número de chapas de aço carbono justapostas na sua face oeste.....	99
Figura 3.5	– Gráfico comparativo entre a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 experimental e calculada em função do número de chapas de aço inoxidável justapostas na sua face oeste...	103
Figura 3.6	– Gráfico comparativo entre a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 experimental e calculada em função do número de chapas de material refletor justapostas na sua face oeste.....	105
Figura 3.7	Gráfico da diferença percentual para a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 em função do número de chapas de material refletor justapostas na sua face oeste.....	106
Figura 3.8	– Reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 de acordo com o número de chapas de níquel para diferentes modelos de espalhamento térmico.....	107
Figura A.1	– Vista aérea do reator nuclear IPEN/MB-01.....	119
Figura A.2	– Alguns detalhes do núcleo do reator IPEN/MB-01.....	121
Figura A.3	– Diagrama esquemático do tanque moderador do reator IPEN/MB-01 (axial).....	122
Figura A.4	– Diagrama esquemático das placas matriz e espaçadoras e as cotas das varetas combustíveis e de controle/segurança do reator IPEN/MB-01.....	124
Figura A.5	– Diagrama esquemático das cavidades e furos da placa matriz do reator IPEN/MB-01.....	125
Figura A.6	– Diagrama esquemático das especificações da vareta combustível do reator IPEN/MB-1.....	128
Figura A.7	Mecanismo de controle do reator IPEN/MB-01.....	130
Figura A.8	– Diagrama esquemático das varetas absorvedoras do reator IPEN/MB-01.....	131

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivo.....	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
1.2	Justificativas.....	18
1.3	Histórico e estado da arte.....	20
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
2.1	O reator IPEN/MB-01.....	24
2.2	Procedimento experimental.....	26
2.2.1	Confecção das chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel.....	30
2.2.2	Dispositivos de suporte e de fixação das chapas de material refletor pesado.	36
2.2.2.1	Dispositivo de suporte das chapas.....	36
2.2.2.2	Dispositivo de fixação das chapas.....	37
2.2.2.3	Reatividade inserida pelos dispositivos de suporte e de fixação das chapas...	39
2.2.3	<i>Gap</i> de água entre as chapas de material refletor pesado.....	39
2.3	Sistema de aquisição de dados.....	44
2.3.1	Reatímetro.....	45
2.3.2	Medidas de temperatura e termopares.....	47
2.4	Análise de incertezas.....	49
2.4.1	Tratamento estatístico e efeito das incertezas dos parâmetros cinéticos.....	50
2.4.2	Efeito das incertezas dos dados geométricos e dos materiais do reator IPEN/MB-01.....	51
2.5	Metodologia de cálculo.....	56
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
3.1	Resultados experimentais.....	63
3.1.1	Tratamento estatístico e efeito das incertezas das medidas dos parâmetros cinéticos.....	63
3.1.2	Efeito das incertezas dos dados geométricos e dos materiais do reator IPEN/MB-01.....	73
3.1.3	Incerteza experimental total.....	82
3.1.4	Reatividade inserida e posição crítica de barra.....	84

3.2	Resultados calculados e comparação com os resultados experimentais...	86
3.2.1	Chapas refletoras de níquel.....	89
3.2.2	Chapas refletoras de aço carbono.....	96
3.2.3	Chapas refletoras de aço inoxidável.....	101
3.2.4	Chapas refletoras de aço inoxidável, aço carbono e níquel – Metodologia explícita 1.....	104
3.2.5	Lei de espalhamento de nêutrons térmicos do hidrogênio ligado à água $S(\alpha, \beta)$	106
4	CONCLUSÕES.....	112
5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
	ANEXO A – O reator IPEN/MB-01.....	119
	A.1 Introdução.....	119
	A.2 Descrição detalhada do reator IPEN/MB-01.....	120
	A.2.1 O tanque moderador e periféricos.....	121
	A.2.2 Placas espaçadoras.....	122
	A.2.3 Vareta combustível.....	127
	A.2.4 Varetas de controle, segurança e tubo guia.....	129
	A.3 Descrição dos materiais.....	132
	ANEXO B – O método da cinética inversa.....	141
	ANEXO C – <i>Input</i> do MCNP-5: posição crítica de barra para 32 chapas de níquel - metodologia de cálculo explícita 1.....	145
	ANEXO D – Análise de incertezas do método da cinética inversa.....	156

1 INTRODUÇÃO

Os reatores nucleares utilizam como princípio básico a fissão de um núcleo de massa atômica elevada (urânio, por exemplo) por meio de um nêutron incidente, gerando, a cada fissão, uma quantidade de energia, produtos de fissão e um ou mais nêutrons; o que permite uma reação em cadeia. Para que a reação em cadeia seja autossustentada é necessário que a produção de nêutrons oriundas das reações de fissão seja igual à remoção por absorções e fugas.

A relação entre a produção e a perda de nêutrons num reator nuclear é caracterizada pelo fator de multiplicação (k) do sistema. Deste modo, para $k = 1$ a reação em cadeia se mantém constante e o reator é classificado como crítico. A reatividade (ρ) é o parâmetro que mede o afastamento do fator de multiplicação em relação ao valor crítico $k = 1$; ou seja, $\rho = (k - 1)/k$.

Os nêutrons produzidos são espalhados aleatoriamente em todas as direções e geralmente estão na região rápida de energia. Um material moderador é usado, no caso de reatores nucleares térmicos, para diminuir a velocidade desses nêutrons para que possam gerar novas fissões e, assim, possibilitar a reação em cadeia. O material absorvedor tem a função de controlar a reação em cadeia visando a segurança do reator. Para minimizar a fuga de nêutrons e, conseqüentemente, melhorar o processo da reação em cadeia, é utilizado um material refletor ao redor do núcleo do reator.

O material refletor tem a função de refletir os nêutrons de volta para o núcleo. Existe uma variedade de materiais que são utilizados como refletores, os quais devem possuir as seguintes propriedades: seção de choque de absorção baixa; densidade alta; seção de choque de espalhamento alta; danos de radiação baixos; resistência à oxidação. Alguns materiais moderadores também possuem as propriedades descritas anteriormente, como é o caso da água leve.

O uso de um material refletor adequado, o qual possui uma posição importante entre os componentes de uma usina nuclear, ajuda a reduzir o tamanho do núcleo do reator; não apenas pela redução do fluxo de nêutrons que escapam do núcleo do reator, mas também pela consequente redução do consumo de material físsil (mais nêutrons estão disponíveis para participar do processo de reação em cadeia). Além disso, um bom refletor reduz a incidência de nêutrons no vaso de pressão aumentando a vida útil do reator. Sendo assim, é de consenso que uma das maneiras de melhorar o custo do ciclo do combustível e estender a vida do reator é reduzir a fuga de nêutrons do núcleo utilizando um refletor.

Refletores de água leve e *baffle* de aço inoxidável (um ou dois cm de espessura) são comumente utilizados em reatores moderados a água leve (LWR – Light Water Reactor), como é o caso dos reatores nucleares Geração II construídos nas décadas de 70 e 80. No entanto, eles não apresentam as melhores características neutrônicas em termos de economia de nêutrons; isto é, economia de material físsil.

Em concepções mais modernas de reatores térmicos (Geração III), como é o caso da geração de reatores térmicos avançados denominados de EPR (European Power Reactor), utiliza-se um novo componente denominado refletor pesado (uma das características que o torna diferente dos LWR). Esta concepção de reatores nucleares encontra-se hoje em desenvolvimento na França, pela AREVA. Quatro unidades estão em construção, uma na Finlândia, outra na França e duas na China. Dentre as várias mudanças inseridas nos reatores EPR, destaca-se, aqui, a introdução deste novo tipo de refletor feito de aço inoxidável SS-304.

Os refletores de aço inoxidável (com aproximadamente 10 cm de espessura) limitam a fuga radial, particularmente por *back scattering* de nêutrons rápidos para o núcleo. As melhorias devido ao uso de refletores pesados são sumarizadas a seguir (SANTAMARINA, et al., 2008):

- melhor economia devido ao refletor: ao reduzir o fluxo de nêutrons que escapam do núcleo, o combustível nuclear é melhor utilizado (mais nêutrons participam do processo de reação em cadeia) permitindo, assim, uma redução do custo do ciclo do combustível com a redução do enriquecimento do material físsil (0,1 % de ^{235}U)

necessário para uma determinada queima ou para aumentar a queima de um determinado enriquecimento;

- distribuição de potência radial otimizada, a qual melhora a segurança e a queima do combustível irradiado (1,3 %);
- limitação dos danos de radiação no vaso de pressão devido à redução da fluência rápida (melhor moderação de nêutrons com energia $E_n > 1 \text{ MeV}$), possibilitando a extensão da vida útil do reator de 35-40 anos para 60 anos.

Em particular, a escolha de um refletor pesado adequado requer o desenvolvimento de validações de novas metodologias de cálculo para se levar em consideração a quantidade de material e seus efeitos neutrônicos. O desenvolvimento de computadores cada vez mais velozes tem propiciado a utilização de sofisticados métodos matemáticos e de modelagem como os dos códigos de Monte Carlo e determinísticos, os quais têm se tornado de uso crescente em vários centros de pesquisa no mundo.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é efetuar e analisar experimentos de refletores de aço inoxidável, aço carbono e níquel - estes dois últimos para dar subsídios à análise neutrônica do aço inoxidável - na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01 para verificação e validação de metodologias de cálculo e de bibliotecas de dados nucleares associadas em utilização pela comunidade científica internacional.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- efetuar medidas da reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 devido à inserção de chapas de aço inoxidável, de aço carbono ou de níquel, (num total de até 32

chapas de cada material refletor) na sua face oeste, bem como das posições críticas de barra correspondentes, com as barras de controle BC1 e BC2 igualmente retiradas, ou seja, na mesma posição axial;

- efetuar a simulação computacional dos experimentos realizados com o código MCNP-5 utilizando as bibliotecas básicas de dados nucleares avaliados ENDF/B-VII.0.
- avaliar a metodologia utilizada por meio da comparação entre os resultados obtidos por simulação computacional e os resultados experimentais.

1.2 Justificativas

Nos processos de validação e verificação de metodologias de cálculo e bibliotecas de dados nucleares associadas, a existência de experimentos que possam ser considerados padrões de comparação (*benchmarks*) é de fundamental importância. Nesse aspecto o reator IPEN/MB-01, o primeiro totalmente projetado e construído no Brasil constituindo um marco fundamental no desenvolvimento das ciências e tecnologias nucleares no país, tem dado uma contribuição fundamental pelo fato de ser um sistema de características e de composições bem estabelecidas.

O reator IPEN/MB-01 tem sido considerado *benchmark* internacional em vários experimentos de configurações críticas (DOS SANTOS et al., 2004b, DOS SANTOS, et al., 2008a) bem como em vários outros experimentos clássicos de Física de Reatores (DOS SANTOS et al., 2009). Sua primeira criticalidade ocorreu em 9 de novembro de 1988 e desde então vêm sendo desenvolvidas pesquisas em vários ramos da área de física de reatores; tais como: teste real do núcleo no que concerne aos aspectos neutrônicos como reatividade, distribuição de fluxo e potência; simulação em escala real dos parâmetros neutrônicos para avaliar o desempenho do núcleo do reator e otimizar o seu projeto; validação de métodos de cálculo e bibliotecas de dados nucleares utilizados em projetos de reatores nucleares.

Dentre os vários experimentos já realizados no reator IPEN/MB-01, destaca-se aqui o experimento denominado “Resposta de Detectores *Out-of-Core*” (ABE et al., 2000),

cujo escopo inicial era obter resultados experimentais que servissem de padrão de comparação para o cálculo do posicionamento de detectores que servem de canais de fonte e de controle da reação em cadeia. No decorrer deste experimento, grandezas outras, como a reatividade inserida em função do número de chapas de aço inoxidável introduzidas na face oeste do núcleo do reator (DOS SANTOS et al., 2008b), acabaram gerando resultados experimentais de igual importância ou superior aos propósitos iniciais. Verificou-se que existe uma competição entre absorção e reflexão de nêutrons nas chapas de aço inoxidável; a reatividade inicialmente diminui devido à absorção de nêutrons nas chapas de aço inoxidável e conforme se aumenta o número de chapas, a reflexão se torna importante e a reatividade do sistema aumenta.

O aço inoxidável é composto em boa parte (aproximadamente 70 % de teor de massa) por ferro. O restante é constituído de níquel, cromo e uma pequena quantidade de manganês. O aço carbono é composto quase que totalmente por ferro (mais de 99 % no teor de massa).

Experimentos com refletores de aço carbono foram realizados no Conjunto Crítico tipo Tanque (Tank-type Critical Assembly - TCA) do JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) (TAHARA, SEKIMOTO e MIYOSHI, 2001; TAHARA e SEKIMOTO, 2002), no Japão, mas com chapas refletoras mais espessas.

O experimento proposto neste trabalho utilizando aço inoxidável é o único da literatura internacional que mostra experimentalmente o comportamento da reatividade em função da espessura do refletor, demonstrando a competição entre a absorção neutrônica e a reflexão de nêutrons. Este aspecto é importantíssimo para o desenvolvimento da próxima geração de reatores térmicos EPR (European Power Reactor). Experimentos similares foram efetuados no reator EOLE (SANTAMARINA et al., 2008), na França, mas com o refletor de aço inoxidável sendo uma peça única.

Os resultados experimentais da reatividade induzida pela inserção de chapas refletoras de níquel, em função do número das mesmas, constituem valores inéditos na literatura da área de Física de Reatores. Estes tipos de experimentos não existem na literatura internacional, são únicos de sua classe e darão um respaldo importante para a

validação de métodos de cálculo e biblioteca de dados nucleares associados para o tratamento de refletores de aço inoxidável.

A análise teórica destes experimentos evidenciou a aplicabilidade de métodos baseados na solução da equação de transporte com dados nucleares da biblioteca ENDF/B-VII.0.

Cabe ressaltar que todos estes experimentos já foram submetidos e aprovados, como *benchmark* internacional pelo IRPhE (*International Reactor Physics Benchmark Experiments*), patrocinado pelo NEA Data Bank. Além do mais, o reator EPR, que utiliza refletor de aço inoxidável, constitui um candidato em potencial para a aplicação dos resultados obtidos neste trabalho.

1.3 Histórico e estado da arte

Desde o início da década de 1950, quando foram construídas as primeiras instalações nucleares, até os dias de hoje, a tecnologia nuclear está em constante processo de evolução, sempre com o objetivo de aperfeiçoar os projetos de usinas, visando torná-las mais seguras e redução do custo e do tempo de construção.

Atualmente, o mundo conta com cerca de 450 usinas nucleares em operação em mais de 30 países e, aproximadamente, 60 em construção. Empresas e nações que desenvolvem esse tipo de energia buscam triplicar o número de usinas até 2050.

Modelos diferentes de reatores nucleares são classificados de acordo com as suas gerações. Os reatores da Geração I foram os primeiros desenvolvidos nas décadas de 1950 e 60, a maioria deles utilizava urânio natural como combustível e grafite como elemento moderador. Nos dias atuais, todos foram descomissionados e retirados de operação. Os geradores da Geração II foram desenvolvidos na década de 70 e são os mais comuns em operação atualmente. Tinham uma vida útil de 40 anos. Porém, muitos têm o seu período de operação prolongado em 20 anos, pois se encontram em bom estado de operação e segurança. Normalmente utilizam combustível de urânio enriquecido e são em sua maioria, refrigerados e moderados a água. Os reatores de Geração III/III⁺, a maioria em

construção, são considerados uma evolução dos da segunda geração, com segurança melhorada (utilizam um sistema passivo de segurança; ou seja, sua atuação independe da ação humana ou de equipamentos eletromecânicos) e vida útil prevista de 60 anos (provavelmente poderá ser ampliada). Além disso, os reatores da Geração III⁺ possuem uma estrutura de construção modular que reduz o custo e o cronograma de implantação. Reatores da Geração IV ainda estão em estudo e nenhum deve entrar em operação antes de 2030.

A primeira usina avançada da Geração III/III⁺ foi construída em Kashiwazaki, no Japão, e entrou em operação em 1996 (ABWR – Reatores Avançados a Água Fervente). Vários outros modelos de reatores avançados estão sendo construídos em diferentes países como, por exemplo: os reatores americanos AP1000 (*Advanced Power Reactor*), da Westinghouse; os reatores japoneses APWR (*Advanced Pressurized Water Reactor*), da Mitsubishi; os reatores sul-coreanos APR1400 (*Advanced Pressurized Water Reactor*), da KEPCO; os reatores russos VVER-1200 (*Voda Voda Energo Reactor*), da Rosatom; os reatores franceses EPR (*European Pressurized Water Reactor*), da Areva.

Uma das inovações desta nova geração de reatores é a melhora do custo do ciclo do combustível e redução da fuga de nêutrons do núcleo, com consequente aumento da vida útil do vaso do reator. Com este objetivo um gerenciamento de combustível com baixa fuga de nêutrons foi adotado por UOTINEN¹ (1984, citado por TAHARA, SEKIMOTO e MIYOSHI, 2001, p. 102) sem alterar as estruturas internas do reator. Posteriormente, um refletor radial de aço inoxidável foi utilizado no núcleo de um reator APWR por SUZUKI² (1998, citado por TAHARA, SEKIMOTO e MIYOSHI, 2001, p. 102), reduzindo não só o custo do combustível como também a fluência de nêutrons no vaso do reator.

¹ UOTINEN, V. O. (Section Organizer): *Transactions of the American Nuclear Society*, v. 46, 92, 1984.

² SUZUKI, H. *Proceedings 11th Pacific Basin Nuclear Conference, PBNC98*, v. 1, p. 711, 1998.

Um estudo das constantes *baffle*/refletor para a teoria de difusão com poucos grupos de energia indicou que o aço inoxidável é efetivo como um refletor de nêutrons num reator a água leve, aumentando a reatividade do núcleo (EICH, WILLIAMS e PENG, 1985). A análise de experimentos críticos para avaliação de secção de choque foi realizada com base em cálculos unidimensionais de teoria de difusão com quatro grupos de energia que modelam explicitamente o núcleo homogeneizado e o refletor radial.

BIERMAM e CLAYTON (1981) realizaram vários experimentos de criticalidade com varetas de UO_2 na água, enriquecidas com 2,35% e 4,35% em ^{235}U , para obter dados bem definidos, que servissem de referência (*benchmark*) para refletores de aço espessos. Como resultado, concluiu-se que placas espessas de aço (17,85 cm) submersas em refletores de água refletem melhor os nêutrons do que somente a água. No entanto, no experimento, o efeito de reatividade em função da espessura da placa não foi investigado.

Experimentos de criticalidade foram realizados utilizando o arranjo crítico tipo tanque (TCA), da JAERI, para avaliar o efeito de reatividade devido a placas refletores de ferro em um núcleo moderado a água leve (MURAKAMI, SUZAKI e HIROSE, 1983). A espessura do refletor (0 a 60 mm) e a distância entre o refletor e o núcleo (0 a 120 mm) foram alternadas de forma paramétrica. Observou-se que o nível de água crítico aumentava para espessuras refletoras de aço entre 0 e 15 mm, diminuindo monotonamente para espessuras maiores que 15 mm.

TAHARA, SEKIMOTO e MIYOSHI (2001) e TAHARA e SEKIMOTO (2002) mostraram, em suas pesquisas, resultados experimentais novos da mudança da reatividade do núcleo, constituído de varetas combustíveis e moderado a água leve, em função da espessura de placas refletoras de ferro. O experimento mostrou que refletores de ferro de 15 cm de espessura tornaram o núcleo mais reativo do que a água e que o aumento da espessura de 2,2 cm a 15 cm produziu um ganho de reatividade no núcleo de 1,8 % $\Delta k/k$. O experimento e os cálculos revelaram que o aumento da espessura do *baffle* nos reatores PWR acima de 2,2 cm pode aumentar a reatividade do núcleo e contribuir para economia de custo do ciclo do combustível. Com base nesse resultado, um refletor radial de aço inoxidável foi empregado no APWR, e mostrou-se que uma redução da ordem de 0,07% no enriquecimento em ^{235}U pode ser obtida. Os resultados experimentais foram analisados

com um código de Monte Carlo (MVP) e um de transporte bidimensional (PHOENIX-P) utilizando as bibliotecas de dados avaliados ENDF-B-VI, JENDL-3.2 e uma versão preliminar da JENDL-3.3, possibilitando, portanto, a verificação dos dados de secção de choque para o ferro; valores estes importantes do ponto de vista de projeto do núcleo de um reator.

Dados experimentais mais representativos para os reatores que utilizam um refletor radial de aço inoxidável, como EPR e VVER1000, foram obtidos com o experimento PERLE (Programa de Estudo do Refletor Lourdo dans Eole), o qual foi realizado no reator de potência zero EOLE (SANTAMARINA et al., 2008; Vaglio-Gaudard et al., 2010). O valor da reatividade induzida por este refletor pesado foi medido e comparado com a eficiência de um refletor de água e *baffle* de 2 cm de aço inoxidável (refletor padrão de um PWR). A atenuação do fluxo em função da inserção do aço inoxidável foi medida com câmaras de fissão e folhas de ativação metálicas, utilizando funções de resposta rápida, intermediária e térmica. As análises dos resultados experimentais foram efetuadas com o código de Monte Carlo TRIPOLI4 usando a biblioteca de dados nucleares avaliados JEFF3.1 e forneceram uma estimativa satisfatória da economia devido aos refletores de aço inoxidável; confirmada por um cálculo de k_{eff} crítico dentro de 100 pcm. A interpretação das medidas de atenuação de fluxo mostrou discrepâncias na comparação cálculo/experimento dentro da incerteza experimental.

Estudos comparativos da utilização de um refletor convencional (*baffle* de aço inoxidável de 2,5 cm e água) e um refletor pesado (todo de aço inoxidável) têm sido realizados para estudar os efeitos na distribuição de potência radial e avaliar o impacto do aumento do nível de potência para um núcleo PWR (SARGENI, BURN e BRUNA, 2016); mas trabalhos experimentais novos não foram encontrados na literatura.

Os experimentos propostos neste trabalho servirão de padrões de referência para validação de metodologias de cálculo utilizando códigos de difusão, Monte Carlo ou transporte, bem como verificação de bibliotecas de dados nucleares avaliados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos com refletores nucleares de material pesado foram realizados no reator IPEN/MB-01 utilizando-se chapas de aço inoxidável, de aço carbono ou de níquel, num total de 32 chapas de cada material, justapostas adequadamente na face oeste do núcleo do reator. As chapas têm cerca de 3 mm de espessura. A largura e comprimento axial foram suficientes para cobrir todo o núcleo ativo do reator. Tais experimentos foram realizados com cada tipo de material refletor individualmente.

Para cada etapa de colocação de chapas foram efetuadas medidas da reatividade devido à inserção destas no núcleo; bem como da posição crítica das barras de controle com BC1 e BC2 igualmente retiradas, ou seja, na mesma posição axial.

Durante a execução dos experimentos as barras de segurança foram sempre mantidas na posição totalmente retiradas e a potência do reator foi mantida a 1 W para assegurar uma razão sinal do detector/ruído adequada.

A distribuição de temperatura da água no núcleo e refletor, para todas as configurações experimentais, foi monitorada por um conjunto de 12 termopares, uniformemente distribuídos na região ativa do núcleo do reator, visto que as informações dos valores precisos da temperatura foi um fato relevante para obter-se um valor preciso do ponto de criticalidade do reator.

2.1 O reator IPEN/MB-01

O reator de pesquisa IPEN/MB-01 é uma instalação nuclear de potência zero destinada ao estudo das características neutrônicas de núcleos moderados a água leve, possibilitando a verificação experimental de métodos de cálculo, de estruturas celulares, efetividade de barras de controle e resposta do núcleo a inserções de reatividade; e foi concebido com flexibilidade necessária para testar diferentes configurações do núcleo.

Na Figura 2.1 é mostrado um diagrama esquemático do tanque moderador e da distribuição dos detectores ao redor do núcleo. As características do reator são apresentadas no ANEXO A (DOS SANTOS et al., 2004b; DOS SANTOS et al., 2008a; DOS SANTOS et al., 2013).

Figura 2.1 – Diagrama esquemático do tanque moderador e da distribuição dos detectores ao redor do núcleo – Dimensões em cm

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

O experimento foi realizado com a configuração de núcleo de 28x26 varetas sendo, 680 varetas combustíveis e 48 tubos guias para inserção de barras de controle e de segurança. Duas barras de controle controlam o reator e elas estão localizadas diagonalmente opostas ao núcleo. Os símbolos A e B mostrados na Figura 2.1 referem-se, respectivamente, à localização das barras de controle BC1 e BC2, enquanto o símbolo S refere-se às barras de segurança.

2.2 Procedimento experimental

Como mencionado anteriormente, os experimentos de refletores nucleares de material pesado consistiram na inserção de chapas de aço inoxidável, de aço carbono ou de níquel, num total de até 32 chapas, na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01 com configuração retangular padrão de 28x26 varetas; como mostrado na Figura 2.2. Inicialmente as chapas foram adicionadas uma por vez até a nona chapa, a partir daí foram adicionadas duas chapas por vez até a décima quinta chapa; na sequência, três chapas por vez até a vigésima quarta chapa e, finalmente, foram introduzidas quatro chapas por vez até a trigésima segunda ou última chapa.

Durante a execução do experimento as barras de segurança foram mantidas na posição totalmente retiradas, consequentemente elas não interferiram nas medições realizadas, e a potência do reator foi mantida a 1 W para assegurar uma razão sinal do detector/ruído adequada. A distribuição de temperatura da água no núcleo e refletor, para todas as configurações experimentais, foi ajustada para o valor médio de $21,00 \pm 0,04$ °C.

Para cada etapa de inserção de chapas de material refletor foram efetuadas medidas da reatividade inserida no núcleo, com o auxílio de um reatímetro (descrito na seção 2.3.1), bem como da posição crítica das barras de controle para BC1 e BC2 na mesma posição axial.

Figura 2.2 – Vista do arranjo experimental para 32 chapas inseridas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01 (Topo)

Fonte: adaptado de DOS SANTOS, et al., 2014.

A aquisição dos dados foi realizada da seguinte forma: após a inserção de cada chapa ou conjunto de chapas na face oeste do núcleo, a temperatura da água foi ajustada para o valor desejado e o reator foi tornado crítico (reatividade praticamente zero) mantendo-se as posições das barras de controle igualmente retiradas no mesmo nível. Em seguida, ambas as barras de controle foram levadas à posição de criticalidade do caso

anterior e a variação da reatividade ($\Delta\rho$) entre a situação considerada e a anterior foi medida. Finalmente, após esta etapa, as barras de controle foram levadas à posição de criticalidade correspondente ao caso sem chapas (referência) e a reatividade total inserida (ρ), para a situação considerada, foi medida. Na Figura 2.3 é mostrado um exemplo explicativo da forma de aquisição de dados descrita anteriormente.

Figura 2.3 – Gráfico explicativo da forma de aquisição de dados dos experimentos

Fonte: autor da tese.

Um mecanismo de suporte e fixação das chapas foi especialmente projetado para assegurar o seu correto posicionamento na face oeste do núcleo do reator. Estes suportes foram confeccionados em aço inoxidável e foram fixados na estrutura do reator.

Na Figura 2.4 é mostrado um *mock-up* de madeira construído especialmente, quando do experimento “Resposta de Detectores *Out-of-Core*”, para fornecer detalhes dos mecanismos de montagem dos dispositivos de suporte e de fixação das chapas de material refletor pesado; bem como da localização das mesmas em relação ao núcleo do reator.

Figura 2.4 – *Mock-up* do experimento de refletores de material pesado

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2008b.

A distância entre o núcleo ativo (última fileira de elementos combustíveis) e as chapas refletoras foi controlada por meio de quatro parafusos posicionados no dispositivo de suporte das chapas: dois na face frontal, como mostrado na Figura 2.4, e dois na face oposta. Deste modo, a distância mínima entre o núcleo ativo e a primeira chapa refletora foi mantida em $5,5 \pm 1,0$ mm. Na Figura 2.4 também é mostrado um disco de polietileno, o qual está conectado a duas manivelas especialmente projetadas para comprimir as chapas firmemente.

Na Figura 2.5 mostra-se uma vista axial do arranjo experimental com detalhes do posicionamento das chapas em relação ao núcleo do reator.

Figura 2.5 – Vista axial do arranjo experimental – Dimensões em mm

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2014.

2.2.1 Confecção das chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel

As chapas, num total de 32 para cada material refletor, foram recortadas e furadas a laser objetivando-se uma definição geométrica e dimensões precisas. Na Figura 2.6 são mostrados os detalhes geométricos das chapas de material refletor; os furos são destinados ao manuseio das mesmas, por meio de ganchos apropriados, quando de suas inserções na face oeste do núcleo do reator.

Figura 2.6 – Detalhes geométricos das chapas de material refletor - Dimensões em mm

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2008a.

As 32 chapas de cada material refletor tiveram suas espessuras determinadas, em quatro posições diferentes, utilizando um micrômetro (marca Mitutoyo, de precisão $\pm 0,001$ mm, no caso da chapa de aço carbono) e suas massas determinadas, uma única vez, utilizando uma balança (marca Mettler – modelo P11N) de precisão $\pm 0,1$ g. Cada chapa foi numerada de acordo com a sequência de sua introdução na face oeste do núcleo do reator durante o processo de montagem do arranjo experimental.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as massas e as espessuras médias das chapas de aço inoxidável e de níquel. No caso das chapas de aço carbono, tomou-se o cuidado de eliminar o processo de oxidação das mesmas quando de suas inserções no núcleo do reator, evitando-se, assim, a contaminação da água do reator. Após várias tentativas optou-se pela utilização da tinta *spray* Colorgin branca, possibilitando, deste modo, uma camada protetora fina de tinta minimizando sua interferência nas medidas realizadas. Na Tabela 2.2,

são apresentadas as massas e as espessuras médias das chapas de aço carbono, com e sem tinta. As incertezas mostradas nas Tabelas 2.1 e 2.2 estão em conformidade com a precisão dos equipamentos de medida.

Tabela 2.1 – Massa e espessura média das chapas de aço inoxidável e de níquel

Identificação das Chapas	Aço Inoxidável		Níquel	
	Massa (g)	Espessura Média (mm)	Massa (g)	Espessura Média (mm)
01F	8.843,0±0,1	3,02±0,01	10.605,0±0,1	3,23±0,01
02F	8.818,7±0,1	3,02±0,01	10.605,0±0,1	3,23±0,01
03F	8.845,0±0,1	3,02±0,01	10.610,0±0,1	3,23±0,01
04F	8.789,3±0,1	3,01±0,01	10.605,0±0,1	3,24±0,01
05F	8.803,3±0,1	3,01±0,01	10.600,0±0,1	3,24±0,01
06F	8.788,1±0,1	3,01±0,01	10.530,0±0,1	3,21±0,01
07F	8.791,0±0,1	3,00±0,01	10.605,0±0,1	3,23±0,01
08F	8.776,1±0,1	3,01±0,01	10.605,0±0,1	3,23±0,01
09F	8.807,8±0,1	3,01±0,01	10.600,0±0,1	3,24±0,01
10F	8.826,0±0,1	3,02±0,01	10.600,0±0,1	3,24±0,01
11F	8.794,0±0,1	3,00±0,01	10.620,0±0,1	3,24±0,01
12F	8.780,0±0,1	3,00±0,01	10.570,0±0,1	3,22±0,01
13F	8.829,0±0,1	3,02±0,01	10.560,0±0,1	3,22±0,01
14F	8.773,4±0,1	3,02±0,01	10.565,0±0,1	3,22±0,01
15F	8.831,4±0,1	3,03±0,01	10.610,0±0,1	3,23±0,01
16F	8.804,6±0,1	3,02±0,01	10.560,0±0,1	3,22±0,01
17F	8.779,4±0,1	3,02±0,01	10.530,0±0,1	3,20±0,01
18F	8.791,1±0,1	3,02±0,01	10.630,0±0,1	3,24±0,01
19F	8.818,0±0,1	3,02±0,01	10.635,0±0,1	3,24±0,01
20F	8.789,5±0,1	3,02±0,01	10.625,0±0,1	3,24±0,01
21F	8.799,5±0,1	3,02±0,01	10.550,0±0,1	3,21±0,01
22F	8.783,2±0,1	3,00±0,01	10.540,0±0,1	3,20±0,01
23F	8.804,7±0,1	3,00±0,01	10.510,0±0,1	3,19±0,01
24F	8.796,0±0,1	3,01±0,01	10.510,0±0,1	3,19±0,01
25F	8.813,6±0,1	3,01±0,01	10.520,0±0,1	3,20±0,01
26F	8.806,3±0,1	3,02±0,01	10.560,0±0,1	3,21±0,01
27F	8.825,3±0,1	3,02±0,01	10.520,0±0,1	3,20±0,01
28F	8.793,3±0,1	3,02±0,01	10.520,0±0,1	3,20±0,01
29F	8.799,8±0,1	3,02±0,01	10.500,0±0,1	3,21±0,01
30F	8.847,3±0,1	3,02±0,01	10.515,0±0,1	3,21±0,01
31F	8.828,7±0,1	3,03±0,01	10.620,0±0,1	3,24±0,01
32F	8.848,0±0,1	3,03±0,01	10.585,0±0,1	3,23±0,01

Fonte: autor da tese.

Tabela 2.2 – Massa e espessura média das chapas de aço carbono

Identificação das Chapas	Massa (g)		Espessura Média (mm)	
	Sem Tinta	Com Tinta	Sem Tinta	Com Tinta
01F	8.864,0±0,1	8.882,0±0,1	3,079 ± 0,001	3,098 ± 0,001
02F	8.859,0±0,1	8.880,0±0,1	3,084 ± 0,001	3,115 ± 0,001
03F	8.815,0±0,1	8.836,0±0,1	3,047 ± 0,001	3,090 ± 0,001
04F	8.841,0±0,1	8.861,0±0,1	3,050 ± 0,001	3,100 ± 0,001
05F	8.841,0±0,1	8.859,0±0,1	3,056 ± 0,001	3,132 ± 0,001
06F	8.848,0±0,1	8.868,0±0,1	3,021 ± 0,001	3,052 ± 0,001
07F	8.869,0±0,1	8.890,0±0,1	3,059 ± 0,001	3,087 ± 0,001
08F	8.858,0±0,1	8.875,0±0,1	3,065 ± 0,001	3,130 ± 0,001
09F	8.844,0±0,1	8.864,0±0,1	3,065 ± 0,001	3,115 ± 0,001
10F	8.787,0±0,1	8.806,0±0,1	3,030 ± 0,001	3,080 ± 0,001
11F	8.842,0±0,1	8.860,0±0,1	3,070 ± 0,001	3,122 ± 0,001
12F	8.838,0±0,1	8.860,0±0,1	3,042 ± 0,001	3,100 ± 0,001
13F	8.853,0±0,1	8.875,0±0,1	3,070 ± 0,001	3,125 ± 0,001
14F	8.801,0±0,1	8.823,0±0,1	3,035 ± 0,001	3,115 ± 0,001
15F	8.799,0±0,1	8.820,0±0,1	3,035 ± 0,001	3,080 ± 0,001
16F	8.803,0±0,1	8.824,0±0,1	3,040 ± 0,001	3,050 ± 0,001
17F	8.846,0±0,1	8.866,0±0,1	3,050 ± 0,001	3,090 ± 0,001
18F	8.813,0±0,1	8.824,0±0,1	3,048 ± 0,001	3,100 ± 0,001
19F	8.832,0±0,1	8.852,0±0,1	3,035 ± 0,001	3,100 ± 0,001
20F	8.840,0±0,1	8.861,0±0,1	3,070 ± 0,001	3,090 ± 0,001
21F	8.843,0±0,1	8.865,0±0,1	3,035 ± 0,001	3,070 ± 0,001
22F	8.839,0±0,1	8.860,0±0,1	3,035 ± 0,001	3,075 ± 0,001
23F	8.839,0±0,1	8.861,0±0,1	3,040 ± 0,001	3,090 ± 0,001
24F	8.870,0±0,1	8.892,0±0,1	3,060 ± 0,001	3,105 ± 0,001
25F	8.827,0±0,1	8.848,0±0,1	3,045 ± 0,001	3,080 ± 0,001
26F	8.824,0±0,1	8.846,0±0,1	3,040 ± 0,001	3,075 ± 0,001
27F	8.806,0±0,1	8.828,0±0,1	3,040 ± 0,001	3,070 ± 0,001
28F	8.837,0±0,1	8.859,0±0,1	3,080 ± 0,001	3,130 ± 0,001
29F	8.866,0±0,1	8.886,0±0,1	3,070 ± 0,001	3,110 ± 0,001
30F	8.836,0±0,1	8.856,0±0,1	3,050 ± 0,001	3,100 ± 0,001
31F	8.840,0±0,1	8.862,0±0,1	3,055 ± 0,001	3,085 ± 0,001
32F	8.813,0±0,1	8.835,0±0,1	3,035 ± 0,001	3,085 ± 0,001

Fonte: autor da tese.

Na TAB. 2.3 apresenta-se um resumo dos valores médios de todos os dados geométricos e materiais para os três tipos de chapas utilizadas no presente trabalho, juntamente com as suas incertezas correspondentes.

Tabela 2.3 - Valores médios da espessura e da massa das chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel

Parâmetro	Aço Inoxidável	Aço Carbono	Níquel
Espessura sem Tinta (mm)	$3,01 \pm 0,01$	$3,051 \pm 0,003^{(a)}$	$3,22 \pm 0,01$
Espessura com Tinta (mm)	-	$3,095 \pm 0,004^{(a)}$	-
Fração de Volume da Chapa (%)	100,00	98,58	100,00
Fração de Volume da Tinta (%)	-	1,42	-
Massa sem Tinta (g)	$8.807 \pm 4^{(a)}$	$8.835 \pm 4^{(a)}$	$10.573 \pm 7^{(a)}$
Massa com Tinta (g)	-	8.856 ± 4	-
Densidade sem Tinta (g/cm^3)	$7,91 \pm 0,01$	$7,84 \pm 0,01$	$8,89 \pm 0,01$

^(a) Desvio padrão da média.

Fonte: autor da tese.

Nas Tabelas 2.4 a 2.6 são apresentadas as composições químicas das chapas de aço inoxidável, de níquel e de aço carbono; respectivamente. A composição química da tinta *spray* Colorgin utilizada nas chapas de aço carbono é apresentada na Tabela 2.7.

Tabela 2.4 – Composição química das chapas de aço inoxidável

Elementos	Teores (% em massa)
Mn	$1,185 \pm 0,003$
Si	$0,406 \pm 0,006$
Ni	$8,00 \pm 0,01$
Cr	$18,990 \pm 0,02$
C	$0,0451 \pm 0,0180$
Mo	$0,042 \pm 0,002$
Cu	$0,022 \pm 0,006$
S	$0,0072 \pm 0,0080$
Ti	$0,002395 \pm 3,5\text{E-}05$
Fe	$71,300 \pm 0,207$

Fonte: Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) - Departamento de Materiais Nucleares.

Tabela 2.5 – Composição química das chapas de níquel

Elementos	Teores (% em massa)
Ni	$99,880 \pm 0,003$
C	$0,016 \pm 0,002$
S	$<0,001$
Cu	$0,003 \pm 0,001$
Fe	$0,019 \pm 0,001$
Mn	$0,067 \pm 0,001$
Si	$0,013 \pm 0,001$

Fonte: Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP)- Departamento de Materiais Nucleares.

Tabela 2.6 – Composição química das chapas de aço carbono

Elementos	Teores (% em massa)
Fe	$99,52 \pm 0,01$
Mn	$0,40 \pm 0,01$
C	$0,065 \pm 0,001$
S	$0,014 \pm 0,001$

Fonte: Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) - Departamento de Materiais Nucleares.

Tabela 2.7 – Composição química da tinta *spray* Colorgin branca utilizada nas chapas de aço carbono

Composição		Teores (% em massa)
Óxido de sódio	Na ₂ O	0,2
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	7,4
Dióxido de silício	SiO ₂	5,6
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	0,1
Trióxido de enxofre	SO ₃	Traços (< 0,1%)
Cloreto	Cl	Traços (< 0,1%)
Óxido de cálcio	CaO	0,1
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	0,4
Óxido de titânio	TiO ₂	85,0
Pentóxido de vanádio	V ₂ O ₅	0,5
Óxido de zinco	ZnO	0,1

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

2.2.2 Dispositivos de suporte e de fixação das chapas de material refletor pesado

2.2.2.1 Dispositivo de suporte das chapas

Este dispositivo, confeccionado em cantoneiras de aço inoxidável, foi concebido e construído para suportar as diferentes quantidades de chapas de aço inoxidável quando do experimento “Resposta de Detectores *Out-of-Core*” e é mostrado na Figura 2.7. Neste trabalho foi utilizado o mesmo dispositivo para suportar as chapas de material refletor pesado, justapostas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01.

Figura 2.7 - Detalhes do dispositivo de suporte das chapas de material refletor

Fonte: autor da tese.

A massa máxima permitida no experimento é de 300 kg; razão pela qual foi utilizado o número máximo de 32 chapas. As ranhuras na guia de suporte garantem o posicionamento das chapas durante a configuração e manuseio dos experimentos.

Na Figura 2.8 são mostrados os detalhes do sistema de parafusos para ajuste da distância mínima entre o núcleo ativo e a primeira chapa de material refletor ($5,5 \pm 1,0$ mm).

Figura 2.8 – Detalhes do sistema de parafusos utilizado para ajustar a distância entre a chapa refletora e o núcleo do reator IPEN/MB-01

Fonte: autor da tese.

2.2.2.2 Dispositivo de fixação das chapas

Este dispositivo permite uma fixação firme das chapas de material refletor no dispositivo de suporte das chapas, evitando que as mesmas sofram algum tipo de movimentação durante o enchimento ou esvaziamento do tanque do moderador; tendo também o objetivo de atender as especificações técnicas do Reator IPEN/MB-01 no que se refere ao critério de “Experimento Fixo”.

Na Figura 2.9 é mostrado um esquema simplificado deste sistema de compressão das chapas. A manivela interna comprime as chapas e a externa gira no sentido oposto para apertar o conjunto. Na Figura 2.10 são mostrados os detalhes do sistema de compressão das chapas; bem como da ranhura na guia de suporte, a qual garante o posicionamento adequado das chapas durante a execução do experimento.

Figura 2.9 – Representação esquemática do dispositivo de fixação das chapas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01

Fonte: autor da tese.

Figura 2.10 – Sistema de compressão das chapas

(a)

(b)

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2013.

2.2.2.3 Reatividade inserida pelos dispositivos de suporte e de fixação das chapas

Para a realização dos experimentos propostos neste trabalho, teve-se, inicialmente, a preocupação de estabelecer padrões de referência. Com este objetivo, foram realizadas duas operações de referência para avaliar a contribuição dos dispositivos de suporte e de fixação das chapas nas medidas da reatividade e, consequentemente, obter um parâmetro de comparação para o experimento.

A primeira operação de referência foi feita com o núcleo na configuração padrão (retangular 26x28 varetas) **sem** a presença dos dispositivos de suporte e de fixação das chapas. A segunda operação de referência foi realizada com o núcleo também padrão, mas **com** a presença dos dispositivos de suporte e de fixação das chapas. A distância do dispositivo de fixação (parte dianteira do disco de polietileno de 52 mm de espessura), em relação ao núcleo, foi fixada em 8,5 mm; a qual corresponde à distância aproximada que a primeira placa ficaria do núcleo (5,5 mm) mais a espessura da chapa (~3,0 mm).

A diferença entre a reatividade do núcleo com e sem os dispositivos de suporte e de fixação das chapas foi determinada por intermédio do reatímetro resultando no valor igual a $5,5 \pm 0,2$ pcm. Este valor é pequeno e pode ser desprezível uma vez que está dentro da incerteza dos próprios valores experimentais; mas será considerado como um *bias* (erro sistemático) nas análises teóricas tendo em vista que estes dispositivos não foram incluídos na modelagem computacional dos experimentos.

2.2.3 *Gap* de água entre as chapas de material refletor pesado

Outra grandeza que fez parte dos procedimentos experimentais foi a espessura do *gap* de água entre as chapas visto que elas não são totalmente planas, principalmente as de aço inoxidável e de aço carbono. Este fator foi levado em consideração quando da comparação entre os valores calculados e os medidos.

Para estimar a espessura do *gap* de água entre as chapas, cada chapa ou conjunto de chapas foi cuidadosamente montado fora do reator, na sequência descrita na seção 2.2.1, e efetuou-se a medida da espessura total (chapas mais *gap* de água entre elas)

para cada configuração experimental. Para tanto, foi escolhido um total de sete pontos conforme mostrado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Posições escolhidas para medida da espessura total de cada configuração

Fonte: autor da tese.

Nas Tabelas 2.8 a 2.10 são apresentadas, respectivamente, as medidas das espessuras totais para cada configuração de chapas de aço inoxidável, de aço carbono e de níquel. A precisão do equipamento utilizado para estas medições foi de 0,01 mm. A última coluna corresponde ao valor médio das sete medições e sua incerteza é dada pelo desvio padrão da média. A compilação final dos dados é apresentada na Tabela 2.11, na qual as frações de metal pesado e água são valores médios para o caso de 31 chapas; isto porque a primeira chapa sempre foi tratada explicitamente, independente da metodologia de cálculo adotada para as simulações computacionais dos experimentos, como descrito na seção 2.5.

Tabela 2.8 – Espessura total (chapa + água) para o arranjo experimental com aço inoxidável (em mm)

Número de Chapas	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6	Posição 7	Média
2	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25±0,00
3	9,35	9,55	9,30	9,25	9,50	9,30	9,30	9,36±0,04
4	12,70	12,70	12,40	12,35	12,70	12,70	12,60	12,59±0,06
5	15,60	16,00	15,35	15,30	15,30	15,45	15,30	15,47±0,10
6	19,30	19,45	18,40	18,40	18,50	19,00	18,55	18,80±0,17
7	22,55	22,30	21,35	21,55	21,40	22,50	21,70	21,91±0,20
8	25,10	25,50	24,40	24,40	24,65	25,10	24,40	24,79±0,17
9	28,00	28,60	28,70	27,70	28,10	28,30	28,60	28,29±0,14
11	34,00	34,40	34,00	33,30	33,30	34,10	33,50	33,80±0,16
13	40,50	40,80	40,65	39,70	40,50	40,20	39,60	40,28±0,18
15	48,30	47,00	46,35	45,90	45,50	46,20	46,20	46,49±0,35
18	57,30	56,75	55,40	55,75	54,85	55,50	55,00	55,79±0,34
21	65,95	66,40	66,70	64,40	65,70	65,25	65,00	65,63±0,30
24	76,50	75,80	75,35	75,00	73,70	74,00	72,90	74,75±0,48
28	87,90	88,80	89,35	86,50	87,50	86,65	86,45	97,59±0,44
32	99,60	99,80	100,30	98,30	99,90	98,45	98,40	99,25±0,32

Fonte: autor da tese.

Tabela 2.9 – Espessura total (chapa + água) para o arranjo experimental com aço carbono (em mm)

Número de Chapas	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6	Posição 7	Média
2	6,90	6,40	7,30	6,30	6,35	6,40	6,35	6,57±0,14
3	10,30	10,40	10,40	10,40	9,45	9,50	10,60	10,15±0,18
4	13,00	13,00	13,40	14,60	12,90	12,70	12,90	13,21±0,24
5	16,50	16,70	17,30	18,00	15,90	15,90	18,70	17,00±0,40
6	19,90	20,00	20,80	20,60	19,20	19,70	20,70	20,13±0,22
7	23,10	22,90	23,70	23,20	22,35	22,90	23,10	23,04±0,15
8	26,40	27,10	27,00	28,70	26,50	28,45	28,35	27,50±0,37
9	29,90	29,70	30,10	31,10	29,50	29,90	30,60	30,11±0,21
11	36,50	36,80	36,50	37,20	35,90	35,90	37,55	36,62±0,23
13	42,90	42,30	43,10	44,25	42,50	43,50	44,15	43,24±0,29
15	50,50	51,85	50,45	51,50	49,00	49,40	51,00	50,53±0,39
18	60,90	60,90	60,80	60,60	58,50	58,40	60,45	60,08±0,43
21	71,50	72,80	72,20	71,50	68,25	68,90	71,20	70,91±0,64
24	80,25	80,90	81,85	81,30	77,50	78,50	81,10	80,20±0,61
28	95,90	96,10	95,80	93,80	89,40	90,80	94,00	93,69±1,00
32	108,30	108,50	108,50	108,70	104,70	105,40	108,30	107,49±0,64

Fonte: autor da tese.

Tabela 2.10 – Espessura total (chapa + água) para o arranjo experimental com níquel
(em mm)

Número de Chapas	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6	Posição 7	Média
2	6,60	6,60	6,75	7,80	6,80	6,60	6,80	6,85±0,16
3	9,85	9,90	10,25	9,90	9,90	10,10	10,00	9,99±0,05
4	13,20	13,45	14,05	13,35	13,40	13,85	13,40	13,53±0,11
5	16,45	16,90	17,45	16,70	16,95	16,90	16,90	16,89±0,11
6	19,80	20,00	20,50	20,10	20,00	20,45	20,25	20,16±0,10
7	26,10	26,90	26,40	23,30	24,00	24,60	23,50	24,97±0,56
8	28,00	29,45	28,10	26,40	26,80	27,60	26,60	27,56±0,41
9	30,80	32,20	31,55	30,50	30,15	31,70	30,20	31,01±0,30
11	37,20	38,00	37,80	36,60	37,00	37,80	36,70	37,30±0,21
13	43,55	44,10	44,00	43,20	43,20	43,70	43,30	43,58±0,14
15	50,30	51,45	50,50	49,35	49,80	50,50	49,60	50,21±0,27
18	61,50	61,80	60,40	59,80	59,85	62,10	59,55	60,71±0,40
21	71,20	72,05	71,60	69,90	70,50	72,20	69,25	70,96±0,42
24	82,45	82,80	81,50	79,60	80,15	81,20	79,40	81,01±0,51
28	95,60	95,85	95,30	92,95	93,10	94,10	92,50	94,20±0,52
32	108,55	109,40	109,80	107,10	106,20	107,10	106,00	107,74±0,57

Fonte: autor da tese.

Tabela 2.11 - Estimativa do *gap* de água para os experimentos de refletores pesados

Grandezas		Valores
Aço	Espessura total (32 chapas) (mm)	$96,49 \pm 0,004$
	Espessura total (32 chapas) no arranjo experimental (mm)	$99,25 \pm 0,58$
	Espessura média do <i>gap</i> de água entre chapas (mm)	$0,089 \pm 0,019$
Inoxidável	Fração de volume do metal pesado (31 chapas) (%)	$97,16 \pm 0,01$
	Fração de volume da água (31 chapas) (%)	$2,84 \pm 0,01$
Aço	Espessura total sem <i>gap</i> de água (32 chapas) (mm)	$99,046 \pm 0,004$
	Espessura total (32 chapas) no arranjo experimental (mm)	$107,486 \pm 0,636$
	Espessura média do <i>gap</i> de água entre chapas (mm)	$0,272 \pm 0,021$
	Fração de volume do metal pesado (primeira chapa) (%)	$99,39 \pm 0,01$
	Fração de volume do metal pesado + tinta (31 chapas) (%)	$91,92 \pm 0,01$
	Fração de volume da tinta (primeira chapa) (%)	$0,61 \pm 0,56$
	Fração de volume da tinta (31 chapas) (%)	$1,45 \pm 0,56$
Carbono	Fração de volume da água (31 chapas) (%):	$8,08 \pm 0,56$
	Espessura total sem <i>gap</i> de água (32 chapas) (mm)	$103,110 \pm 0,003$
Níquel	Espessura total no arranjo experimental (32 chapas) (mm)	$107,74 \pm 0,57$
	Espessura média do <i>gap</i> de água entre chapas (mm)	$0,15 \pm 0,02$
	Fração de volume do metal pesado (31 chapas) (%)	$95,56 \pm 0,01$
	Fração de volume da água (31 chapas) (%)	$4,44 \pm 0,01$

Fonte: autor da tese.

2.3 Sistema de aquisição de dados

A intenção aqui é monitorar os eventos da reação em cadeia e também transformar a corrente do detector em reatividade por meio de um reatímetro, que utiliza um modelo matemático de cinética inversa para realizar esta transformação (ANEXO B).

A distribuição de temperatura da água no núcleo e refletor, para todas as configurações experimentais, foi ajustada e mantida tão próxima quanto possível em $21,00 \pm 0,04$ °C, por intermédio do sistema de aquecimento/resfriamento do reator IPEN/MB-01, utilizando um conjunto de 12 termopares.

2.3.1 Reatímetro

Um medidor digital de reatividade, denominado reatímetro, foi utilizado para determinar a reatividade, em tempo real, em função da temperatura da água e do posicionamento das barras de controle no núcleo do reator.

O reatímetro é um equipamento baseado em PC trabalhando em ambiente Windows e por meio de placas de aquisição de dados transforma sinais analógicos, oriundos de detectores nucleares, em sinais digitais. Os dados são processados por intermédio do *software* Labview, o qual realiza os cálculos necessários para a determinação da reatividade, utilizando um algoritmo baseado no modelo da cinética inversa apresentado no ANEXO B (DOS SANTOS et al., 2013). Este algoritmo é obtido a partir das equações de cinética pontual, rearranjadas de modo que a reatividade em função do tempo é dada pela equação:

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} + \beta_{eff} - \frac{\Lambda}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t} - \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt'; \quad (2.1)$$

na qual: $N(t)$ 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_{eff} 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.

Este sistema de aquisição de dados é executado a uma taxa de uma amostra por segundo. Os dados lidos e manipulados em tempo real podem ser gravados continuamente em arquivos tipo “nome.txt” para posterior análise ou apresentação. O reatímetro também pode ler estes dados e executá-los novamente para aplicações específicas.

Este equipamento é ajustado para um duplo modo de operação de maneira que receba os sinais enviados de duas câmaras de ionização compensadas (CIC) localizadas

dentro de tubos de instrumentação cujo centro está posicionado a 152,5 mm de distância da fileira mais periférica de varetas combustíveis nas faces oeste e leste do núcleo. Para este trabalho em particular, uma vez que a face oeste do reator foi ocupada pelas chapas de material refletor pesado, utilizou-se um único detector experimental na face oposta (leste).

No presente trabalho, o reatímetro recebeu informações de corrente proveniente de um detector modelo CC-80, do tipo câmara de ionização compensada operando a uma tensão de 650 V com compensação de 50 V. Esta corrente chega até um eletrômetro Keitley modelo 6485 que por sua vez comunica-se com um PC por meio de uma placa GPIB.

O procedimento adotado em todas as medidas de reatividade foi executar o medidor de reatividade *on line* com os parâmetros cinéticos efetivos nominais apresentados na Tabela 2.12 e gravar o sinal do detector em função do tempo de aquisição para utilização posterior. Para se determinar o valor da reatividade foram realizadas análises estatísticas dos dados armazenados nos arquivos, obtendo-se, para cada caso, a média, o desvio padrão e o desvio padrão da média, tomando-se o cuidado de eliminar os valores de flutuações.

Tabela 2.12 - Parâmetros cinéticos experimentais do reator IPEN/MB-01

Grupo	β_i	$\lambda_i (s^{-1})$
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	$(4,99 \pm 0,27) \times 10^{-4}$	$3,14 \pm 0,11$
$\beta_{eff} = (7,50 \pm 0,19) \times 10^{-3}$		
$\Lambda = 31,96 \pm 1,06 (\mu s)$		

Fonte: DOS SANTOS et al., 2008c.

Cabe ressaltar que os parâmetros cinéticos utilizados neste trabalho foram obtidos experimentalmente no reator IPEN/MB-01 (DOS SANTOS et al., 2004a; DOS SANTOS e DINIZ, 2005; DINIZ e DOS SANTOS, 2006; DOS SANTOS et al., 2008c)

buscando, assim, uma fidelidade maior às condições reais do reator; constituindo-se, atualmente, em um padrão de referência internacional (DOS SANTOS et al., 2009).

2.3.2 Medidas de temperatura e termopares

A distribuição de temperatura da água no núcleo e refletor, para todas as configurações, foi obtida por meio de termopares instalados no núcleo do reator. Ao todo, foram utilizados 12 termopares estrategicamente localizados no núcleo do reator (Figura 2.12), que mediram a temperatura em diferentes posições; de modo que o valor representativo da temperatura do moderador foi a média das medidas destes termopares. Os termopares, cujo diâmetro é de 1,6 mm, são feitos de uma liga de Cu-Ni (55 % de Cu e 45 % de Ni) e suas posições axiais estão dispostas da seguinte maneira: T1, T2, T3 e T4 na parte inferior do núcleo ativo; T5, T6, T7 e T8 na região central; e T9, T10, T11 e T12 na parte superior. A leitura é feita em graus Celsius numa interface gráfica de um programa computacional, que fornece 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.

Figura 2.12 – Localização dos termopares no núcleo do reator IPEN/MB-01

Fonte: DOS SANTOS et al., 2004b.

A temperatura do moderador foi mantida, tão próxima quanto possível, em $21,00 \pm 0,04$ °C por meio do sistema de aquecimento e resfriamento do reator IPEN/MB-01.

O sistema de aquecimento e resfriamento do reator IPEN/MB-01, bem como o de circulação de água, permite um controle preciso da temperatura no núcleo do reator. A água entra no tanque moderador pela sua parte inferior por meio de um difusor, cuja função é homogeneizar a temperatura da água dentro do tanque moderador, e então a água é circulada continuamente para dentro e para fora do tanque. Dependendo da necessidade, a água pode passar através de um aquecedor ou um arrefecedor para aumentar ou diminuir sua temperatura, respectivamente. Este sistema também possui um tanque de estocagem de água, acoplado a um aquecedor e a um arrefecedor, que pode ser utilizado para preestabelecer a temperatura da água em algum valor específico entre 7 °C e 90 °C. Deste modo, os experimentos podem ser realizados de maneira controlada e a temperatura de interesse, no intervalo acima mencionado, pode ser ajustada com um elevado grau de precisão.

É importante observar que medidas de reatividade são muito delicadas e facilmente influenciáveis pela temperatura. Por esta razão, em todas as medidas realizadas procurou-se manter a temperatura do experimento o mais estável possível, e, além de estável, a mais idêntica possível em todos os experimentos, para a comparação posterior dos dados. Para tanto, em cada etapa do experimento tomou-se o cuidado de homogeneizar a temperatura da água e mantê-la, tão próxima quanto possível, em $21,00 \pm 0,04$ °C de maneira que as incertezas na temperatura média final fossem pequenas; garantindo-se, assim, que a reatividade medida sofresse mudanças mínimas com a flutuação da temperatura.

Deve-se ressaltar que os termopares foram calibrados por um procedimento padrão e sua precisão é de $\pm 0,02$ °C (DOS SANTOS et al. 2001); e que o efeito da reatividade dos termopares foi avaliado ser de $-12,5 \pm 2,0$ pcm (DOS SANTOS et al., 2004b).

2.4 Análise de incertezas

A análise de incertezas é de fundamental importância em qualquer trabalho experimental, principalmente quando se pretende realizar um experimento cujo resultado possa ser considerado um padrão de comparação (*benchmark*). Para o presente trabalho, essa análise envolveu a busca de todas as fontes de incertezas que pudessem contribuir para a incerteza total das medidas da reatividade inserida no núcleo quando da introdução das chapas refletoras de material pesado; tanto as experimentais derivadas dos dados medidos, como as resultantes dos dados geométricos e da composição dos materiais do reator IPEN/MB-01.

As incertezas experimentais derivadas dos dados medidos foram determinadas considerando-se duas componentes: a estatística e a sistemática. A componente estatística provém da disseminação dos dados experimentais em torno do valor médio e é dada em termos de um desvio padrão (1σ). A componente sistemática é resultante das incertezas nos parâmetros cinéticos utilizados pelo medidor de reatividade.

As incertezas oriundas dos dados geométricos e dos materiais do reator

IPEN/MB-01 foram estimadas utilizando-se os códigos computacionais HAMMER-TECHNION/CITATION. As secções de choque foram geradas, em poucos grupos de energia, com o código HAMMER-TECHNION (BARHEN et al., 1978). O CITATION - um código 3-D, o qual utiliza a teoria de difusão em multigrupos de energia - (FOWLER et al., 1971) foi utilizado para calcular o valor do k_{eff} para o núcleo do reator. O modelo incluiu todos os detalhes da região do combustível, barras de controle, refletor, entre outros (descritos na seção 2.4.2). O critério de convergência utilizado foi de $1,0 \times 10^{-6}$.

2.4.1 Tratamento estatístico e efeito das incertezas das medidas dos parâmetros cinéticos

As incertezas associadas às medidas da reatividade inserida pelas chapas refletoras são provenientes de duas fontes principais. A primeira relativa à própria estatística da aquisição de dados e a segunda devido à incerteza dos parâmetros cinéticos efetivos utilizados no reatímetro.

Para o tratamento estatístico, os arquivos de reatividade armazenados no sistema de aquisição de dados, durante a execução dos experimentos, foram exportados para o programa de linguagem gráfica ORIGIN (software da “OriginLab Data Analysis and Graphing Software”) e analisados cuidadosamente. Inicialmente os dados foram colocados na forma gráfica para se determinar a região mais apropriada para a análise e desta forma os valores médios, os desvios padrões e os desvios padrões das médias foram obtidos para cada tipo de material refletor e número de chapas.

Para avaliar a influência dos erros das medidas dos parâmetros neutrônicos atrasados efetivos apresentados na Tabela 2.12, o reatímetro foi realimentado com os dados armazenados, subtraindo e somando os erros associados dos parâmetros cinéticos aos valores nominais. Deste modo, a estimativa da incerteza na medida da reatividade devido às incertezas dos parâmetros cinéticos ($\sigma_{\rho_{pc}}$) foi obtida utilizando-se a equação:

$$\sigma_{\rho_{pc}} = \frac{(|\rho^+ - \rho| + |\rho^- - \rho|)/2}{\sqrt{3}}; \quad (2.2)$$

na qual:

$\rho \rightarrow$ é o valor nominal da reatividade medida, isto é: medida com os valores nominais dos parâmetros cinéticos;

$\rho^- \rightarrow$ é a reatividade inferida quando as incertezas dos parâmetros cinéticos são subtraídas, simultaneamente, aos seus correspondentes valores nominais;

$\rho^+ \rightarrow$ é a reatividade inferida quando as incertezas dos parâmetros cinéticos são adicionadas, simultaneamente, aos seus correspondentes valores nominais.

Os símbolos para $\Delta\rho$ seguem o mesmo significado.

A introdução do fator $\sqrt{3}$ advém da abordagem experimental quando das medidas dos parâmetros cinéticos do reator IPEN/MB-01 (DOS SANTOS et al., 2009, seções 1.6 e 2.6). No caso, foram utilizados dois APSD (Auto Power Spectral Density) e um CPSD (Cross Power Spectral Density).

Finalmente, a incerteza associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas refletoras ($\sigma_{\rho_{\text{exp}}}$) é dada pela equação:

$$\sigma_{\rho_{\text{exp}}} = \sqrt{(\sigma_{\rho_m})^2 + (\sigma_{\rho_{pc}})^2}, \quad (2.3)$$

na qual σ_{ρ_m} é o desvio padrão da média.

2.4.2 Efeito das incertezas dos dados geométricos e dos materiais do reator IPEN/MB-01

A avaliação do efeito das incertezas dos parâmetros geométricos e dos materiais da instalação, na reatividade inferida, é um pouco mais complexa, tendo em vista que envolve duas configurações distintas para o núcleo do reator. A reatividade medida para cada situação do experimento iniciou sempre considerando o caso real e o caso anterior ou de referência. Na maioria dos casos, as barras de controle foram posicionadas na posição crítica de barra do caso anterior e a reatividade foi medida utilizando o reatímetro. Do ponto de vista de cálculo, a reatividade entre dois casos consecutivos é proporcional à diferença entre dois fatores de multiplicação efetivos (k_{eff}) calculados.

Como cada k_{eff} calculado carrega a incerteza devido aos dados geométricos e dos materiais da instalação, adotou-se aqui a metodologia aplicada para as medidas de coeficiente de reatividade (DOS SANTOS, et al., 2013).

Deste modo, considere a reatividade dada por:

$$\rho = \frac{k_2 - k_1}{k_2 k_1}, \quad (2.4)$$

na qual k_2 é o fator de multiplicação para o caso perturbado (caso anterior ou de referência), e k_1 é o fator de multiplicação para o caso real.

A incerteza da reatividade pode ser expressa como:

$$\sigma_\rho^2 = \left(\frac{1}{k_1^2} \right)^2 \sigma_{k_1}^2 + \left(\frac{1}{k_2^2} \right)^2 \sigma_{k_2}^2 - 2 \left(\frac{1}{k_1^2} \right) \left(\frac{1}{k_2^2} \right) \sigma_{k_1 k_2}^2, \quad (2.5)$$

na qual σ_{k_1} é a incerteza do fator de multiplicação k_1 , σ_{k_2} é a incerteza do fator de multiplicação k_2 , e $\sigma_{k_1 k_2}^2$ é a covariância destas duas variáveis.

Como k_1 refere-se ao estado crítico ($\cong 1,0000$) e k_2 é muito próximo de 1,0; a equação (2.5) pode ser expressa por:

$$\sigma_\rho^2 = (\sigma_{k_1}^2 + \sigma_{k_2}^2 - 2\sigma_{k_1 k_2}^2). \quad (2.6)$$

Assumindo que todos os parâmetros básicos são independentes, a covariância $\sigma_{k_1 k_2}^2$ pode ser calculada por meio da equação (2.6), que pode ser reescrita como:

$$\sigma_{k_1 k_2}^2 \cong \sum_{I=1}^N \frac{\partial k_1}{\partial p_I} \frac{\partial k_2}{\partial p_I} \sigma_{p_I}^2; \quad (2.7)$$

na qual, p_I refere-se aos N parâmetros básicos do núcleo (enriquecimento de ^{235}U , densidade de UO_2 , diâmetro da pastilha de UO_2 , etc.) e $\sigma_{p_I}^2$ é a variância dos fatores de multiplicação efetivo devido à variância nos parâmetros básicos p_I .

Devido à linearidade entre os fatores de multiplicação efetivos e os parâmetros básicos, pode-se observar que:

$$\sigma_k(p_I) = \frac{\partial k}{\partial p_I} \sigma_{p_I}. \quad (2.8)$$

Deste modo, as equações (2.7) e (2.8) podem ser reescritas como:

$$\sigma_{k_1 k_2}^2 \cong \sum_{I=1}^N \sigma_{k_1}(p_I) \sigma_{k_2}(p_I), \quad (2.9)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{I=1}^N \sigma_k^2(p_I). \quad (2.10)$$

Substituindo-se as equações (2.9) e (2.10) na equação (2.6), a incerteza na medida da reatividade oriunda das incertezas da geometria e materiais da instalação ($\sigma_{\rho_{gm}}$) pode ser obtida por meio da equação:

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho_{gm}}^2 &= \left[\sum_{I=1}^N \sigma_{k_1}^2(p_I) + \sum_{I=1}^N \sigma_{k_2}^2(p_I) - 2 \sum_{I=1}^N \sigma_{k_1}(p_I) \sigma_{k_2}(p_I) \right] \\ &= \sum_{I=1}^N [\sigma_{k_1}^2(p_I) + \sigma_{k_2}^2(p_I) - 2 \sigma_{k_1}(p_I) \sigma_{k_2}(p_I)] \\ &= \sum_{I=1}^N [\sigma_{k_1}(p_I) - \sigma_{k_2}(p_I)]^2. \end{aligned} \quad (2.11)$$

De acordo com a equação (2.11), apenas os termos cujas variações em k , devido às variações nos parâmetros básicos, forem diferentes contribuirão para a somatória. O efeito da incerteza dos parâmetros sobre a reatividade foi calculado considerando, inicialmente, esse efeito no k_{eff} e depois na reatividade inserida pelas chapas, considerando a equação (2.11).

A análise do efeito das incertezas destes parâmetros na reatividade inferida foi realizada em duas etapas: a primeira etapa considerou o efeito dos parâmetros que não mudam com a alteração do estado do reator e a segunda levou em conta o efeito dos parâmetros que dependem do estado do reator.

Para a primeira etapa foram consideradas as incertezas decorrentes do enriquecimento de ^{235}U , da densidade de UO_2 , do diâmetro da pastilha de UO_2 , dos diâmetros externos e internos do encamisamento, do *pitch*, da altura do núcleo ativo, da densidade e composição do encamisamento, da quantidade de ^{234}U , do fator estequiométrico do UO_2 , da densidade da água e da altura da alumina inferior. O efeito das impurezas do combustível (1 pcm) e da água (<1 pcm), na reatividade, foram estimados em DOS SANTOS et al. (2004b) e por serem pequenos, não foram considerados nas análises.

A avaliação da composição e densidade dos materiais e as características geométricas para o núcleo padrão do IPEN/MB-01 (26x28 varetas) são discutidas, com detalhes, em DOS SANTOS et al. (2004b) e DOS SANTOS et al. (2008a); e estão sumarizadas nas Tabelas 2.13 e 2.14.

Tabela 2.13 – Incertezas da geometria do reator IPEN/MB-01

Parâmetro	Valor Médio Medido (mm)	Incerteza relatada no Parâmetro (mm)	Tipo de Incerteza (A ou B)	Número Graus de Liberdade	Incerteza Padrão (mm)
Altura Ativa do Combustível	548,4	3,544	A	705	3,544
Diâmetro da Pastilha Combustível	8,48940	0,00475	A	760	0,00475
Diâmetro Externo do Encamisamento	9,8074	0,0169	A	182	0,0169
Diâmetro Interno do Encamisamento	8,5746	0,0243	A	182	0,0243
<i>Pitch</i> da Vareta Combustível	15,000	0,007	-	-	0,007
Altura da Alumina Inferior	90,28	0,09	A	760	0,09
Distância Chapa-Varetas Combustíveis	5,50	1,00	B	∞	1,00
Espessura Chapa de Aço Inoxidável	3,01	0,01	B	∞	0,01
Espessura Chapa de Aço Carbono	3,095	0,004	B	∞	0,004
Espessura da Tinta – Aço Carbono	0,044	0,001	B	∞	0,001
Espessura Chapa de Níquel	3,22	0,01	B	∞	0,01
<i>Gap</i> de Água – Aço Inoxidável	0,089	0,019	B	∞	0,019
<i>Gap</i> de Água – Aço Carbono	0,272	0,001	B	∞	0,001
<i>Gap</i> de Água – Níquel	0,150	0,001	B	∞	0,001
Posição da Barra de Controle ^(a)	314,6	0,2	-	-	0,2

Fonte: autor da tese.

(a) Distância medida a partir da base do comprimento ativo do combustível. Esta incerteza é composta pela a calibração absoluta do indicador de posição do banco de controle (0,1 mm) mais a do indicador relativo (0,013% = 0,07 mm). A incerteza total é a raiz quadrada da soma dos quadrados de 0,1 mm e 0,07 mm.

A incerteza do tipo A utiliza a distribuição estatística experimental dos parâmetros (que geralmente é gaussiana ou normal); enquanto a incerteza do tipo B baseia-se em métodos que não sejam análises estatísticas, por exemplo: uma distribuição uniforme

(plana) uma vez que a distribuição é desconhecida ou o desvio padrão pode ser obtido das informações do fabricante. A incerteza no *pitch* médio foi obtida combinando as incertezas do diâmetro da vareta e do diâmetro do furo da grade com a incerteza da medição do *pitch* (DOS SANTOS et al., 2008a).

Tabela 2.14 – Incertezas dos materiais do reator IPEN/MB-01

Parâmetro	Valor Médio Medido	Incerteza relatada no Parâmetro	Tipo de Incerteza (A ou B)	Número Graus de Liberdade	Incerteza Padrão
Enriquecimento do ^{235}U (%)	4,3486	0,0021	A	8	0,0021
Densidade da Pastilha de UO_2 (g/cm^3)	10,1771	0,1018	A	705	0,1018
Densidade do Encamisamento (g/cm^3)	7,9207	0,0005	B	∞	$0,0005/\sqrt{3}$
Composição do Encamisamento (%)	Ni 10,0433	Ni 0,1251	A	3	Ni 0,1251
	Cr 18,3400	Cr 0,2163			Cr 0,2163
	Co 0,21500	Co 0,00707			Co 0,00707
	Mo 0,17000	Mo 0,01414			Mo 0,01414
^{55}Mn no Encamisamento (%)	1,68670	0,11015	A	3	0,11015
Razão Estequiométrica do UO_2 (%)	88,125	0,023	A	8	0,023
^{234}U (% massa)	0,041	0,004	B	∞	0,004
^{55}Mn no Aço Inoxidável da Barra (%)	1,531	0,053	A	12	0,053
Densidade da Água (g/cm^3)	0,99820	0,00002	B	∞	0,00002
Densidade da Chapa de Aço Inoxidável (g/cm^3)	7,91	0,01	B	∞	0,01
Densidade da Chapa de Aço Carbono (g/cm^3)	7,84	0,01	B	∞	0,01
Densidade da Chapa de Níquel (g/cm^3)	8,89	0,01	B	∞	0,01
Densidade da Tinta - Aço Carbono (g/cm^3)	1,51	0,17	B	∞	0,17

Fonte: autor da tese.

Como mencionado anteriormente, a incerteza oriunda dos dados geométricos e dos materiais do reator IPEN/MB-01 foi obtida utilizando o sistema HAMMER-TECHNION/CITATION.

Inicialmente calculou-se o efeito das incertezas oriundas dos dados geométricos e de materiais do reator IPEN/MB-01 considerando a posição crítica das barras de controle (BC1 = BC2) para o caso sem chapa. Posteriormente, o efeito das incertezas da geometria e materiais da instalação foi calculado considerando 21 chapas de material refletor.

A segunda etapa desta análise considerou os parâmetros que mudam com a alteração do estado do reator. No caso, foi utilizado o código MCNP-5 (MCNP-5 X-5 MONTE CARLO TEAM, 2003) devido aos recursos de modelagem do sistema; tendo em vista a dificuldade do código de difusão CITATION lidar com um modelo explícito. O desvio padrão do MCNP5 foi de 1 pcm, o que exigiu 4.050 ciclos de 800.000 histórias cada.

2.5 Metodologia de cálculo

A simulação computacional do experimento de refletores de material pesado foi efetuada com o código MCNP-5 (MCNP-5 X-5 MONTE CARLO TEAM, 2003) em conjunto com sua biblioteca de dados nucleares avaliados ENDF/B-VII.0 (CHADWICK et al., 2006). Este código - mundialmente conhecido e utilizado em vários tipos de projetos e pesquisas em transporte de radiação envolvendo nêutrons, fótons e elétrons - possui um potencial que permite trabalhar com geometrias tridimensionais genéricas, que o torna uma ferramenta muito poderosa em cálculos onde a geometria não pode ser representada por formas regulares como cubos, esferas e cilindros. O programa utiliza o método de Monte Carlo e trabalha com bibliotecas de dados nucleares em energia contínua ou discreta, dependendo das necessidades de cálculo, e também permite ao usuário especificar uma variedade bem ampla de fontes, inclusive especificar distribuição de probabilidades independentes para os parâmetros de fonte, tais como: energia, posição e direção.

Para este trabalho, o reator IPEN/MB-01 foi modelado explicitamente com os recursos geométricos do código MCNP-5. Todos os detalhes inerentes ao núcleo e refletores do reator, incluindo as chapas de aço inoxidável, aço carbono ou níquel, foram levados em consideração; com exceção dos dispositivos de suporte e fixação das chapas. A grandeza calculada pelo MCNP-5 foi o fator de multiplicação efetivo (k_{eff}) e a reatividade inserida pelas chapas de material refletor foi calculada utilizando a equação:

$$\rho = \frac{(k_j - k_i)}{(k_j \cdot k_i)}, \quad (2.12)$$

na qual ρ é a reatividade, k é o fator de multiplicação efetivo, o subíndice i refere-se ao

caso em questão e o subíndice j ao caso sem placas ou caso anterior.

Para tanto, o código foi executado no módulo de cálculo de criticalidade “KCODE” que fornece o fator de multiplicação efetivo. O desvio padrão do MCNP-5 foi de 1 pcm, o qual exigiu 4050 ciclos de 800.000 histórias.

Três metodologias de cálculo foram adotadas para as simulações computacionais, a saber:

- Homogênea - a primeira chapa foi tratada explicitamente e a partir da segunda chapa considerou-se uma região homogeneizada de espessura “ t ” que dependeu do número de chapas e do tipo de material (aço inoxidável, aço carbono ou níquel). A homogeneização transformou o *gap* de água, o metal pesado e, quando necessário, a tinta utilizada para a proteção contra a corrosão, numa única região de composição uniforme. No caso da primeira chapa de aço carbono, a tinta foi homogeneizada com o metal pesado.
- Explícita 1 - todas as chapas foram tratadas explicitamente considerando-se um mesmo *gap* de água médio entre elas (conforme apresentado na Tabela 2.5). As chapas de aço carbono foram homogeneizadas com a camada de tinta protetora.
- Explícita 2 - considerou-se cada chapa explicitamente, mas para cada inserção foi calculado o *gap* de água médio para o arranjo em questão.

O modelo computacional compreende uma matriz de 28x26 posições, imersa em um cilindro de água de 100 cm de raio. A água no núcleo está localizada na região entre as 728 varetas (680 varetas combustíveis e 48 tubos guia para inserção das barras de controle e de segurança), entre as chapas refletoras e dentro dos tubos guias. As chapas refletoras foram representadas por paralelepípedos retangulares com largura de 50,8 cm, altura 71,50 cm e espessura de acordo com as Tabelas 2.1 e 2.3; suas bordas e orifícios superiores foram omitidos. A placa matriz inferior foi considerada como uma peça sólida de aço inoxidável, portanto sem furos, com densidade igual ao do revestimento do combustível. A forma do cone da parte inferior das barras de controle foi substituída por

um cilindro de aço inoxidável de 1,67 cm de altura. Os termopares e os detectores experimentais e de controle foram substituídos por água.

Os detalhes que não foram incluídos na simulação computacional foram: a parte superior da vareta combustível, a barra de segurança (totalmente retirada durante todo o experimento) e os dispositivos de suporte e fixação das chapas. Além disso, as impurezas presentes na água e na alumina também foram omitidas.

Nas Figuras 2.13 e 2.14 são mostradas, de forma esquemática, as representações radiais e axiais do modelo geométrico explícito para o arranjo experimental com quatro chapas de níquel no reator IPEN/MB-01; respectivamente. Cabe acrescentar que durante todo o experimento $H_{BC1} = H_{BC2}$ (Figura 2.14).

Como o cálculo da reatividade inserida no núcleo envolve a diferença de dois autovalores de k_{eff} , a contribuição dos tubos de instrumentação e de controle (-21 pcm) e a dos termopares (-12,5 pcm), conforme apresentado em DOS SANTOS et al. (2004b), não foi considerado tendo em vista que este *bias* é cancelado quando do cálculo da reatividade. No entanto, a reatividade induzida pelos dispositivos de suporte e fixação das chapas (5,5 pcm) teve que ser considerada como um *bias* no caso da reatividade total (em relação ao caso sem placas) e no caso do ganho de reatividade para a primeira chapa refletora.

Figura 2.13 – Representação radial do modelo computacional explícito para o arranjo experimental com quatro chapas de níquel inseridas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2013.

Figura 2.14– Representação axial da vareta combustível, da barra de controle dentro do tubo guia, do tubo guia da barra de segurança, da chapa de níquel e do *gap* de água no modelo computacional explícito para o arranjo experimental com quatro chapas de níquel inseridas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01(*)

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2013.

$H_{BC1} = H_{BC2}$.

Na Tabela 2.15 são apresentados os dados geométricos do combustível e das barras de controle. Os tubos guias foram preenchidos com água e os espaços dentro das varetas combustíveis e das barras de controle e de segurança foram mantidos vazios.

As densidades atômicas para todos os materiais utilizados, na simulação computacional dos experimentos propostos neste trabalho, são apresentadas na Tabela A.8 do ANEXO A; com exceção das chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel, as quais são apresentadas na Tabela 2.16.

Tabela 2.15 - Dados geométricos para a simulação computacional

Região Ativa	
Combustível	UO ₂
Diâmetro da pastilha	0,84894 cm
Diâmetro externo do encamisamento	0,98074 cm
Diâmetro interno do encamisamento	0,85746 cm
<i>Pitch</i> (Quadrado)	1,500 cm
Alumina	
Diâmetro	0,847 cm
Diâmetro externo do encamisamento	0,98074 cm
Diâmetro interno do encamisamento	0,85746 cm
Tubo Espaçador de Aço Inoxidável	
Diâmetro interno	0,730 cm
Diâmetro externo	0,850 cm
Barra de Controle	
Material absorvedor	Ag-In-Cd
Diâmetro do material absorvedor	0,832 cm
Diâmetro externo do encamisamento	0,98074 cm
Diâmetro interno do encamisamento	0,85746 cm
Diâmetro externo do tubo guia ^(a)	1,200 cm
Diâmetro interno do tubo guia ^(a)	1,130 cm
Placa Matriz Inferior	
Lado do quadrado	58,8 cm
Espessura	2,2 cm
Refletor Pesado	
Altura	71,50 cm
Largura	50,80 cm
Distância das chapas à última vareta combustível	0,55 cm
<i>Gap</i> de água médio entre as chapas de aço inoxidável	0,09
<i>Gap</i> de água médio entre as chapas de aço carbono	0,27
<i>Gap</i> de água médio entre as chapas de níquel	0,15

Fonte: autor da tese.

(a) Mesmo valor para as barras de segurança.

Tabela 2.16 – Densidades atômicas das chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel para a simulação computacional

Refletor	Nuclídeos	Concentração (átomos/barn-cm)	
		Homogênea (31 chapas)	Explícita
AÇO INOXIDÁVEL	C	$9,4528 \times 10^{-06}$	$9,4528 \times 10^{-06}$
	Mn	$9,9910 \times 10^{-04}$	$9,9910 \times 10^{-04}$
	S	$2,1691 \times 10^{-02}$	$2,1691 \times 10^{-02}$
	Si	$4,5464 \times 10^{-02}$	$4,5464 \times 10^{-02}$
	Ni	$1,7283 \times 10^{-05}$	$1,7283 \times 10^{-05}$
	Cr	$5,4512 \times 10^{-06}$	$5,4512 \times 10^{-06}$
	Mo	$4,2864 \times 10^{-06}$	$4,2864 \times 10^{-06}$
	Fe	$4,0602 \times 10^{-06}$	$4,0602 \times 10^{-06}$
	Cu	$1,1337 \times 10^{-07}$	$1,1337 \times 10^{-07}$
	Ti	$1,2775 \times 10^{-07}$	$1,2775 \times 10^{-07}$
AÇO CARBONO COM TINTA	Na	$7,8812 \times 10^{-07}$	$3,6249 \times 10^{-07}$
	Al	$1,7726 \times 10^{-05}$	$8,1528 \times 10^{-06}$
	P	$1,7206 \times 10^{-07}$	$7,9139 \times 10^{-08}$
	Si	$1,1382 \times 10^{-05}$	$5,2349 \times 10^{-06}$
	Fe	$7,6249 \times 10^{-02}$	$8,3660 \times 10^{-02}$
	Zn	$1,5004 \times 10^{-07}$	$6,9010 \times 10^{-08}$
	Ti	$1,2995 \times 10^{-04}$	$5,9768 \times 10^{-05}$
	V	$6,7142 \times 10^{-07}$	$3,0881 \times 10^{-07}$
	S	$1,8831 \times 10^{-05}$	$2,0564 \times 10^{-05}$
	C	$2,3155 \times 10^{-04}$	$2,5406 \times 10^{-04}$
	Mn	$3,1160 \times 10^{-04}$	$3,4189 \times 10^{-04}$
	O	$3,0111 \times 10^{-03}$	$1,4409 \times 10^{-04}$
	H	$5,3956 \times 10^{-03}$	-
NÍQUEL	Ni	$8,9026 \times 10^{-02}$	$9,1093 \times 10^{-02}$
	Mn	$6,3801 \times 10^{-05}$	$6,5283 \times 10^{-05}$
	C	$6,9690 \times 10^{-05}$	$7,1308 \times 10^{-05}$
	Cu	$2,4698 \times 10^{-06}$	$2,5271 \times 10^{-06}$
	Si	$2,4215 \times 10^{-05}$	$2,4777 \times 10^{-05}$
	S	$1,6313 \times 10^{-06}$	$1,6692 \times 10^{-06}$
	Fe	$1,7798 \times 10^{-05}$	$1,8212 \times 10^{-05}$
	H	$1,5142 \times 10^{-03}$	-
	O	$7,5712 \times 10^{-04}$	-

Fonte: autor da tese.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos experimentos realizados com os três materiais estudados neste trabalho, tanto experimentais como teóricos, são apresentados neste capítulo. Na seção 3.1 são apresentados os resultados experimentais após o tratamento estatístico dos dados armazenados (disseminação dos dados experimentais em torno do valor da média); bem como das incertezas totais para os experimentos, tanto devido às incertezas das medidas dos parâmetros cinéticos como da geometria e dos materiais da instalação. Na seção 3.2 são apresentados os resultados da simulação teórica dos experimentos efetuada com o código MCNP-5, juntamente com a comparação entre os resultados medidos e calculados.

3.1 Resultados experimentais

3.1.1 Tratamento estatístico e efeito das incertezas das medidas dos parâmetros cinéticos

As Tabelas 3.1 a 3.3 apresentam os resultados experimentais, após tratamento estatístico, para as chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel; respectivamente. A primeira coluna refere-se ao número de chapas presentes em cada medida; a terceira coluna refere-se às posições críticas de barra para o correspondente número de chapas; na quarta coluna tem-se a posição crítica de barra para o caso anterior (perturbado); a quinta coluna refere-se à variação de reatividade ($\Delta\rho$) inserida no núcleo entre a situação considerada e a imediatamente anterior; na sétima coluna tem-se a posição crítica de referência (sem chapas); e finalmente na oitava coluna tem-se o valor da reatividade total (ρ) inserida no núcleo (relativa ao caso sem chapa – referência).

Tabela 3.1 - Reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 e posição crítica de barra em função do número de chapas de aço inoxidável – Experimental após tratamento estatístico

Número de Chapas		Posição Crítica ^(a) (%)	Posição Anterior ^(a) (%)	$\Delta\rho \pm \sigma_m^{(b)}$ (pcm)	Posição Crítica ^(a) (%)	Posição de Referência ^(a) (%)	$\rho \pm \sigma_m^{(b)}$ (pcm)
0	BC1	58,07	-	-	58,07	-	-
	BC2	58,07	-	-	58,07	-	-
1	BC1	60,70	58,07	$-249,30 \pm 0,42$	60,70	58,07	$-249,30 \pm 0,42$
	BC2	60,70	58,07		60,70	58,07	
2	BC1	61,72	60,70	$-93,03 \pm 0,25$	61,72	58,07	$-340,46 \pm 0,66$
	BC2	61,72	60,70		61,72	58,07	
3	BC1	62,17	61,72	$-39,91 \pm 0,22$	62,17	58,07	$-383,56 \pm 0,61$
	BC2	62,17	61,72		62,17	58,07	
4	BC1	62,23	62,17	$-5,57 \pm 0,20$	62,23	58,07	$-388,02 \pm 0,69$
	BC2	62,23	62,17		62,23	58,07	
5	BC1	62,26	62,23	$-2,64 \pm 0,25$	62,26	58,07	$-394,09 \pm 0,71$
	BC2	62,26	62,23		62,26	58,07	
6	BC1	62,02	62,26	$21,29 \pm 0,23$	62,02	58,07	$-368,50 \pm 0,68$
	BC2	62,02	62,26		62,02	58,07	
7	BC1	61,84	62,02	$16,55 \pm 0,20$	61,84	58,07	$-353,42 \pm 0,55$
	BC2	61,84	62,02		61,84	58,07	
8	BC1	61,51	61,84	$29,48 \pm 0,07$	61,51	58,07	$-328,12 \pm 0,55$
	BC2	61,51	61,84		61,51	58,07	
9	BC1	61,22	61,51	$26,44 \pm 0,06$	61,22	58,07	$-297,83 \pm 0,31$
	BC2	61,22	61,51		61,22	58,07	
11	BC1	60,61	61,22	$57,38 \pm 0,05$	60,61	58,07	$-246,37 \pm 0,33$
	BC2	60,61	61,22		60,61	58,07	
13	BC1	59,99	60,61	$57,56 \pm 0,05$	59,99	58,07	$-187,74 \pm 0,21$
	BC2	59,99	60,61		59,99	58,07	
15	BC1	59,42	59,99	$54,08 \pm 0,03$	59,42	58,07	$-133,24 \pm 0,12$
	BC2	59,42	59,99		59,42	58,07	
18	BC1	58,71	59,42	$67,66 \pm 0,05$	58,71	58,07	$-64,27 \pm 0,05$
	BC2	58,71	59,42		58,71	58,07	
21	BC1	58,04	58,71	$65,01 \pm 0,05$	58,04	58,07	$1,93 \pm 0,03$
	BC2	58,04	58,71		58,04	58,07	
24	BC1	57,54	58,04	$48,29 \pm 0,04$	57,54	58,07	$51,17 \pm 0,04$
	BC2	57,54	58,04		57,54	58,07	
28	BC1	56,95	57,54	$58,05 \pm 0,05$	56,95	58,07	$109,86 \pm 0,06$
	BC2	56,95	57,54		56,95	58,07	
32	BC1	56,45	56,95	$51,19 \pm 0,05$	56,45	58,07	$162,79 \pm 0,15$
	BC2	56,45	56,95		56,45	58,07	

Fonte: autor da tese.

(a) Incerteza = 0,013%.

(b) Desvio padrão da média.

Tabela 3.2 - Reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 e posição crítica de barra em função do número de chapas de aço carbono – Experimental após tratamento estatístico

Número de Chapas		Posição Crítica ^(a) (%)	Posição Anterior ^(a) (%)	$\Delta\rho \pm \sigma_m^{(b)}$ (pcm)	Posição Crítica ^(a) (%)	Posição de Referência ^(a) (%)	$\rho \pm \sigma_m^{(b)}$ (pcm)
0	BC1	58,00		-	58,00	-	-
	BC2	58,00			58,00		
1	BC1	60,44	58,00	$-231,72 \pm 0,41$	60,44	58,00	$-231,72 \pm 0,41$
	BC2	60,44	58,00		60,44	58,00	
2	BC1	61,57	60,44	$-103,12 \pm 0,30$	61,57	58,00	$-333,78 \pm 1,04$
	BC2	61,57	60,44		61,57	58,00	
3	BC1	61,90	61,57	$-30,16 \pm 0,24$	61,90	58,00	$-363,18 \pm 0,49$
	BC2	61,90	61,57		61,90	58,00	
4	BC1	62,05	61,90	$-14,04 \pm 0,23$	62,05	58,00	$-378,46 \pm 0,82$
	BC2	62,05	61,90		62,05	58,00	
5	BC1	62,03	62,05	$1,76 \pm 0,16$	62,03	58,00	$-377,15 \pm 0,59$
	BC2	62,03	62,05		62,03	58,00	
6	BC1	62,06	62,03	$-3,23 \pm 0,22$	62,06	58,00	$-377,76 \pm 0,85$
	BC2	62,06	62,03		62,06	58,00	
7	BC1	61,71	62,06	$31,13 \pm 0,14$	61,71	58,00	$-347,73 \pm 0,59$
	BC2	61,71	62,06		61,71	58,00	
8	BC1	61,57	61,71	$15,12 \pm 0,11$	61,57	58,00	$-331,04 \pm 0,53$
	BC2	61,57	61,71		61,57	58,00	
9	BC1	61,21	61,57	$30,99 \pm 0,14$	61,21	58,00	$-300,71 \pm 0,32$
	BC2	61,21	61,57		61,21	58,00	
11	BC1	60,79	61,21	$39,54 \pm 0,12$	60,79	58,00	$-264,30 \pm 0,43$
	BC2	60,79	61,21		60,79	58,00	
13	BC1	60,28	60,79	$46,70 \pm 0,12$	60,28	58,00	$-218,29 \pm 0,25$
	BC2	60,28	60,79		60,28	58,00	
15	BC1	59,82	60,28	$43,25 \pm 0,10$	59,82	58,00	$-174,15 \pm 0,21$
	BC2	59,82	60,28		59,82	58,00	
18	BC1	59,30	59,82	$49,54 \pm 0,15$	59,30	58,00	$-124,61 \pm 0,45$
	BC2	59,30	59,82		59,30	58,00	
21	BC1	58,77	59,30	$50,53 \pm 0,12$	58,77	58,00	$-75,01 \pm 0,15$
	BC2	58,77	59,30		58,77	58,00	
24	BC1	58,34	58,77	$41,90 \pm 0,12$	58,34	58,00	$-33,64 \pm 0,11$
	BC2	58,34	58,77		58,34	58,00	
28	BC1	58,00	58,34	$34,01 \pm 0,15$	58,00	58,00	$-0,36 \pm 0,10$
	BC2	58,00	58,34		58,00	58,00	
32	BC1	57,61	58,00	$37,22 \pm 0,11$	57,61	58,00	$37,22 \pm 0,11$
	BC2	57,61	58,00		57,61	58,00	

Fonte: autor da tese.

(a) Incerteza = 0,013%.

(b) Desvio padrão da média.

Tabela 3.3 - Reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 e posição crítica de barra em função do número de chapas de níquel – Experimental após tratamento estatístico

Número de Chapas		Posição Crítica ^(a) (%)	Posição Anterior ^(a) (%)	$\Delta\rho \pm \sigma_m^{(b)}$ (pcm)	Posição Crítica ^(a) (%)	Posição de Referência ^(a) (%)	$\rho \pm \sigma_m^{(b)}$ (pcm)
0	BC1	58,00		-	58,00	-	-
	BC2	58,00			58,00		
1	BC1	61,62	58,00	$-339,38 \pm 0,60$	61,62	58,00	$-339,38 \pm 0,60$
	BC2	61,62	58,00		61,62	58,00	
2	BC1	62,40	61,62	$-70,49 \pm 0,28$	62,40	58,00	$-409,11 \pm 0,78$
	BC2	62,40	61,62		62,40	58,00	
3	BC1	62,43	62,40	$-2,36 \pm 0,16$	62,43	58,00	$-409,14 \pm 0,73$
	BC2	62,43	62,40		62,43	58,00	
4	BC1	62,06	62,43	$32,14 \pm 0,15$	62,06	58,00	$-379,54 \pm 0,47$
	BC2	62,06	62,43		62,06	58,00	
5	BC1	61,69	62,06	$33,44 \pm 0,15$	61,69	58,00	$-343,73 \pm 0,61$
	BC2	61,69	62,06		61,69	58,00	
6	BC1	61,21	61,69	$43,53 \pm 0,13$	61,21	58,00	$-300,08 \pm 0,40$
	BC2	61,21	61,69		61,21	58,00	
7	BC1	60,89	61,21	$28,56 \pm 0,16$	60,89	58,00	$-272,88 \pm 0,42$
	BC2	60,89	61,21		60,89	58,00	
8	BC1	60,33	60,89	$52,15 \pm 0,14$	60,33	58,00	$-220,34 \pm 0,35$
	BC2	60,33	60,89		60,33	58,00	
9	BC1	59,80	60,33	$49,40 \pm 0,14$	59,80	58,00	$-173,71 \pm 0,24$
	BC2	59,80	60,33		59,80	58,00	
11	BC1	58,97	59,80	$79,03 \pm 0,12$	58,97	58,00	$-93,08 \pm 0,13$
	BC2	58,97	59,80		58,97	58,00	
13	BC1	58,26	58,97	$68,58 \pm 0,09$	58,26	58,00	$-25,31 \pm 0,07$
	BC2	58,26	58,97		58,26	58,00	
15	BC1	57,71	58,26	$54,37 \pm 0,12$	57,71	58,00	$28,79 \pm 0,12$
	BC2	57,71	58,26		57,71	58,00	
18	BC1	56,88	57,71	$81,80 \pm 0,10$	56,88	58,00	$110,59 \pm 0,15$
	BC2	56,88	57,71		56,88	58,00	
21	BC1	56,28	56,88	$59,35 \pm 0,11$	56,28	58,00	$169,94 \pm 0,19$
	BC2	56,28	56,88		56,28	58,00	
24	BC1	55,77	56,28	$50,06 \pm 0,10$	55,77	58,00	$220,00 \pm 0,21$
	BC2	55,77	56,28		55,77	58,00	
28	BC1	55,36	55,77	$42,36 \pm 0,11$	55,36	58,00	$262,36 \pm 0,24$
	BC2	55,36	55,77		55,36	58,00	
32	BC1	55,05	55,36	$31,77 \pm 0,10$	55,05	58,00	$294,13 \pm 0,26$
	BC2	55,05	55,36		55,05	58,00	

Fonte: autor da tese.

(a) Incerteza = 0,013%.

(b) Desvio padrão da média.

Um dos requisitos de segurança do reator IPEN/MB-01 é a inserção de uma reatividade positiva máxima de 110 pcm. Este critério foi uma restrição em algumas medidas de reatividade, como no caso das quatro últimas medidas para o experimento com chapas de níquel. Nesta situação, a reatividade total (ρ) foi determinada adicionando-se a variação da reatividade ($\Delta\rho$) entre o caso em consideração e o caso anterior.

Nas Tabelas 3.4 a 3.6 são apresentadas as incertezas experimentais derivadas dos dados medidos (tratamento estatístico e efeito das incertezas das medidas dos parâmetros cinéticos) para as chapas de aço inoxidável, de aço carbono e de níquel; respectivamente. Nestas tabelas, a média correspondente aos termos ρ^- e ρ^+ são, respectivamente, as reatividades obtidas do reatímetro após a execução dos cálculos subtraindo e somando os erros dos parâmetros cinéticos do valor nominal da reatividade medida ρ ; conforme descrito na seção 2.4.1. Nas demais colunas: σ_{ρ_m} é o desvio padrão da média, $\sigma_{\rho_{pc}}$ representa a incerteza devido aos parâmetros cinéticos dada pela equação (2.2) e $\sigma_{\rho_{exp}}$ é incerteza associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas refletoras, dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados de σ_{ρ_m} e $\sigma_{\rho_{pc}}$ (equação 2.3). Os símbolos para $\Delta\rho$ têm o mesmo significado.

Tabela 3.4 – Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas de aço inoxidável

(Continua)

Número de Chapas		ρ (pcm)	σ_{ρ_m} (pcm)	$\sigma_{\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)		$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_m}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)
1	ρ^-	-257,90	0,56			$\Delta\rho^-$	-257,90	0,56		
	ρ	-249,30	0,42	4,65	4,67	$\Delta\rho$	-249,30	0,42	4,65	4,67
	ρ^+	-241,79	0,70			$\Delta\rho^+$	-241,79	0,70		
2	ρ^-	-353,57	1,08			$\Delta\rho^-$	-94,31	0,28		
	ρ	-340,46	0,66	7,13	7,16	$\Delta\rho$	-93,03	0,25	0,70	0,74
	ρ^+	-328,86	0,87			$\Delta\rho^+$	-91,90	0,32		
3	ρ^-	-401,64	1,07			$\Delta\rho^-$	-40,24	0,22		
	ρ	-383,56	0,61	9,71	9,73	$\Delta\rho$	-39,91	0,22	0,19	0,29
	ρ^+	-367,99	0,97			$\Delta\rho^+$	-39,60	0,24		
4	ρ^-	-406,52	1,21			$\Delta\rho^-$	-5,56	0,19		
	ρ	-388,02	0,69	9,97	9,99	$\Delta\rho$	-5,57	0,20	0,00	0,20
	ρ^+	-372,00	0,89			$\Delta\rho^+$	-5,57	0,21		
5	ρ^-	-418,51	1,06			$\Delta\rho^-$	-2,66	0,24		
	ρ	-394,09	0,71	12,72	12,74	$\Delta\rho$	-2,64	0,25	0,01	0,25
	ρ^+	-374,44	0,81			$\Delta\rho^+$	-2,63	0,26		
6	ρ^-	-389,31	1,01			$\Delta\rho^-$	21,07	0,22		
	ρ	-368,50	0,68	11,02	11,04	$\Delta\rho$	21,29	0,23	0,12	0,26
	ρ^+	-351,15	0,80			$\Delta\rho^+$	21,48	0,25		
7	ρ^-	-371,83	1,00			$\Delta\rho^-$	16,38	0,20		
	ρ	-353,42	0,55	9,76	9,78	$\Delta\rho$	16,55	0,20	0,09	0,22
	ρ^+	-338,00	0,69			$\Delta\rho^+$	16,70	0,21		
8	ρ^-	-351,11	0,65			$\Delta\rho^-$	29,73	0,06		
	ρ	-328,12	0,55	11,70	11,71	$\Delta\rho$	29,48	0,07	0,12	0,14
	ρ^+	-310,58	0,55			$\Delta\rho^+$	29,30	0,07		
9	ρ^-	-311,55	0,83			$\Delta\rho^-$	26,76	0,06		
	ρ	-297,83	0,31	7,28	7,29	$\Delta\rho$	26,44	0,06	0,16	0,17
	ρ^+	-286,32	0,49			$\Delta\rho^+$	26,19	0,07		
11	ρ^-	-261,16	0,31			$\Delta\rho^-$	57,54	0,05		
	ρ	-246,37	0,33	7,99	8,00	$\Delta\rho$	57,38	0,05	0,09	0,10
	ρ^+	-233,48	0,34			$\Delta\rho^+$	57,54	0,05		
13	ρ^-	-198,34	0,21			$\Delta\rho^-$	57,66	0,05		
	ρ	-187,74	0,21	5,33	5,34	$\Delta\rho$	57,56	0,05	0,04	0,07
	ρ^+	-179,87	0,23			$\Delta\rho^+$	57,51	0,06		
15	ρ^-	-139,27	0,11			$\Delta\rho^-$	54,44	0,03		
	ρ	-133,24	0,12	3,00	3,00	$\Delta\rho$	54,08	0,03	0,17	0,18
	ρ^+	-128,87	0,14			$\Delta\rho^+$	53,84	0,04		

Tabela 3.4 – Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas de aço inoxidável

(Conclusão)

Número de Chapas		ρ (pcm)	σ_{ρ_m} (pcm)	$\sigma_{\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)		$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_m}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)
18	ρ^-	-66,41	0,05			$\Delta\rho^-$	67,75	0,05		
	ρ	-64,27	0,05	1,15	1,15	$\Delta\rho$	67,66	0,05	0,03	0,06
	ρ^+	-62,41	0,06			$\Delta\rho^+$	67,64	0,05		
21	ρ^-	1,96	0,02			$\Delta\rho^-$	65,11	0,05		
	ρ	1,93	0,03	0,01	0,03	$\Delta\rho$	65,01	0,05	0,04	0,07
	ρ^+	1,91	0,03			$\Delta\rho^+$	64,97	0,06		
24	ρ^-	51,63	0,04			$\Delta\rho^-$	48,66	0,04		
	ρ	51,17	0,04	0,18	0,19	$\Delta\rho$	48,29	0,04	0,19	0,19
	ρ^+	50,99	0,04			$\Delta\rho^+$	48,02	0,05		
28	ρ^-	108,97	0,06			$\Delta\rho^-$	58,35	0,05		
	ρ	109,86	0,06	0,51	0,51	$\Delta\rho$	58,05	0,05	0,15	0,16
	ρ^+	110,74	0,06			$\Delta\rho^+$	57,84	0,06		
32	ρ^-	160,03	0,14			$\Delta\rho^-$	51,57	0,05		
	ρ	162,79	0,15	1,54	1,55	$\Delta\rho$	51,19	0,05	0,18	0,19
	ρ^+	165,38	0,15			$\Delta\rho^+$	50,93	0,05		

Fonte: autor da tese.

Tabela 3.5 – Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas de aço carbono

(Continua)

Número de Chapas		ρ (pcm)	σ_{ρ_m} (pcm)	$\sigma_{\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)		$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_m}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)
1	ρ^-	-241,55	0,56			$\Delta\rho^-$	-241,55	0,56		
	ρ	-231,72	0,41	5,22	5,23	$\Delta\rho$	-231,72	0,41	5,22	5,23
	ρ^+	-223,49	0,55			$\Delta\rho^+$	-223,49	0,55		
2	ρ^-	-353,12	0,84			$\Delta\rho^-$	-104,35	0,32		
	ρ	-333,78	0,70	9,86	9,88	$\Delta\rho$	-103,12	0,29	0,68	0,74
	ρ^+	-318,97	0,74			$\Delta\rho^+$	-102,00	0,39		
3	ρ^-	-383,39	0,89			$\Delta\rho^-$	-29,72	0,23		
	ρ	-363,18	0,50	10,63	10,65	$\Delta\rho$	-30,16	0,23	0,24	0,33
	ρ^+	-346,56	0,64			$\Delta\rho^+$	-30,53	0,25		
4	ρ^-	-398,25	1,00			$\Delta\rho^-$	-14,12	0,24		
	ρ	-378,46	0,66	10,52	10,54	$\Delta\rho$	-14,04	0,25	0,05	0,25
	ρ^+	-361,80	0,89			$\Delta\rho^+$	-13,96	0,26		
5	ρ^-	-397,65	0,90			$\Delta\rho^-$	1,79	0,14		
	ρ	-377,15	0,63	10,98	11,00	$\Delta\rho$	1,76	0,15	0,01	0,15
	ρ^+	-359,62	0,78			$\Delta\rho^+$	1,74	0,16		
6	ρ^-	-401,54	1,02			$\Delta\rho^-$	-3,26	0,16		
	ρ	-377,76	0,75	12,42	12,44	$\Delta\rho$	-3,23	0,17	0,02	0,17
	ρ^+	-358,52	0,80			$\Delta\rho^+$	-3,20	0,18		
7	ρ^-	-377,24	0,74			$\Delta\rho^-$	31,17	0,15		
	ρ	-347,73	0,53	13,07	13,08	$\Delta\rho$	31,13	0,15	0,02	0,15
	ρ^+	-331,95	0,78			$\Delta\rho^+$	31,10	0,16		
8	ρ^-	-348,84	0,89			$\Delta\rho^-$	15,44	0,12		
	ρ	-331,04	0,50	9,47	9,49	$\Delta\rho$	15,12	0,12	0,17	0,21
	ρ^+	-316,01	0,60			$\Delta\rho^+$	14,86	0,13		
9	ρ^-	-315,50	0,75			$\Delta\rho^-$	30,99	0,14		
	ρ	-300,71	0,33	7,98	7,98	$\Delta\rho$	30,99	0,14	0,00	0,14
	ρ^+	-287,87	0,42			$\Delta\rho^+$	30,99	0,16		
11	ρ^-	-279,64	0,58			$\Delta\rho^-$	39,61	0,12		
	ρ	-264,30	0,38	7,92	7,93	$\Delta\rho$	39,54	0,12	0,03	0,13
	ρ^+	-209,36	0,31			$\Delta\rho^+$	39,49	0,13		
13	ρ^-	-229,45	0,48			$\Delta\rho^-$	46,77	0,11		
	ρ	-218,29	0,29	5,80	5,80	$\Delta\rho$	46,70	0,11	0,03	0,12
	ρ^+	-168,24	0,29			$\Delta\rho^+$	46,66	0,13		
15	ρ^-	-181,04	0,39			$\Delta\rho^-$	43,25	0,10		
	ρ	-174,15	0,23	3,69	3,70	$\Delta\rho$	43,25	0,10	0,01	0,10
	ρ^+	-121,98	0,31			$\Delta\rho^+$	43,27	0,12		

Tabela 3.5 – Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas de aço carbono

(Conclusão)

Número de Chapas		ρ (pcm)	σ_{ρ_m} (pcm)	$\sigma_{\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_m}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)
18	ρ^-	-127,46	0,34			$\Delta\rho^-$	49,35	0,13	
	ρ	-124,61	0,22	1,58	1,60	$\Delta\rho$	49,54	0,14	0,10
	ρ^+	-62,41	0,06			$\Delta\rho^+$	49,70	0,16	0,17
21	ρ^-	-76,73	0,21			$\Delta\rho^-$	50,49	0,13	
	ρ	-75,01	0,16	0,94	0,95	$\Delta\rho$	50,53	0,13	0,02
	ρ^+	-73,48	0,18			$\Delta\rho^+$	50,55	0,14	0,13
24	ρ^-	-33,96	0,13			$\Delta\rho^-$	41,97	0,13	
	ρ	-33,64	0,12	0,19	0,22	$\Delta\rho$	41,90	0,13	0,04
	ρ^+	-33,31	0,14			$\Delta\rho^+$	41,85	0,145	0,13
28	ρ^-	0,35	0,12			$\Delta\rho^-$	65,64	0,14	
	ρ	-0,36	0,11	0,35	0,36	$\Delta\rho$	34,01	0,15	0,21
	ρ^+	-0,86	0,13			$\Delta\rho^+$	66,35	0,16	0,26
32	ρ^-	37,36	0,11			$\Delta\rho^-$	37,36	0,11	
	ρ	37,22	0,11	0,07	1,13	$\Delta\rho$	37,22	0,11	0,07
	ρ^+	37,12	0,12			$\Delta\rho^+$	37,12	0,12	0,13

Fonte: autor da tese.

Tabela 3.6 – Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas níquel

(Continua)

Número de Chapas		ρ (pcm)	σ_{ρ_m} (pcm)	$\sigma_{\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)		$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_m}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)
1	ρ^-	-359,60	0,85	10,35	10,37	$\Delta\rho^-$	-359,60	0,85	10,35	10,37
	ρ	-339,38	0,60			$\Delta\rho$	-339,38	0,60		
	ρ^+	-323,75	0,67			$\Delta\rho^+$	-323,75	0,67		
2	ρ^-	-436,40	0,90	13,88	13,91	$\Delta\rho^-$	-71,18	0,28	0,40	0,48
	ρ	-409,11	0,78			$\Delta\rho$	-70,49	0,28		
	ρ^+	-388,30	0,83			$\Delta\rho^+$	-69,82	0,30		
3	ρ^-	-435,05	1,13	13,46	13,48	$\Delta\rho^-$	-2,40	0,16	0,02	0,17
	ρ	-409,14	0,73			$\Delta\rho$	-2,36	0,16		
	ρ^+	-388,41	0,80			$\Delta\rho^+$	-2,32	0,17		
4	ρ^-	-401,83	0,97	11,73	11,74	$\Delta\rho^-$	31,95	0,14	0,11	0,18
	ρ	-379,54	0,47			$\Delta\rho$	32,14	0,15		
	ρ^+	-361,18	0,72			$\Delta\rho^+$	32,32	0,17		
5	ρ^-	-360,10	1,09	8,86	8,88	$\Delta\rho^-$	33,23	0,14	0,11	0,19
	ρ	-343,73	0,61			$\Delta\rho$	33,44	0,15		
	ρ^+	-329,42	0,77			$\Delta\rho^+$	33,62	0,17		
6	ρ^-	-312,23	0,92	6,63	6,65	$\Delta\rho^-$	43,38	0,12	0,08	0,16
	ρ	-300,08	0,40			$\Delta\rho$	43,53	0,13		
	ρ^+	-289,25	0,64			$\Delta\rho^+$	43,67	0,15		
7	ρ^-	-283,32	0,83	5,66	5,68	$\Delta\rho^-$	28,44	0,15	0,06	0,17
	ρ	-272,88	0,42			$\Delta\rho$	28,56	0,16		
	ρ^+	-263,71	0,65			$\Delta\rho^+$	28,66	0,18		
8	ρ^-	-228,37	0,69	4,35	4,37	$\Delta\rho^-$	51,84	0,13	0,17	0,22
	ρ	-220,34	0,35			$\Delta\rho$	52,15	0,14		
	ρ^+	-213,29	0,46			$\Delta\rho^+$	52,43	0,16		
9	ρ^-	-179,05	0,47	2,89	2,90	$\Delta\rho^-$	49,09	0,14	0,17	0,22
	ρ	-173,71	0,24			$\Delta\rho$	49,40	0,14		
	ρ^+	-169,04	0,40			$\Delta\rho^+$	49,68	0,17		
11	ρ^-	-95,00	0,25	1,06	1,06	$\Delta\rho^-$	78,40	0,12	0,35	0,37
	ρ	-93,08	0,13			$\Delta\rho$	79,03	0,12		
	ρ^+	-91,34	0,20			$\Delta\rho^+$	79,62	0,15		
13	ρ^-	-25,06	0,12	0,10	0,13	$\Delta\rho^-$	68,34	0,09	0,14	0,17
	ρ	-25,31	0,07			$\Delta\rho$	68,58	0,09		
	ρ^+	-25,42	0,10			$\Delta\rho^+$	68,82	0,11		
15	ρ^-	29,49	0,11	0,36	0,37	$\Delta\rho^-$	54,19	0,12	0,10	0,16
	ρ	28,79	0,12			$\Delta\rho$	54,37	0,12		
	ρ^+	28,26	0,13			$\Delta\rho^+$	54,53	0,14		

Tabela 3.6 – Incerteza experimental associada às medidas da reatividade inserida pelas chapas níquel

(Conclusão)

Número de Chapas		ρ (pcm)	σ_{ρ_m} (pcm)	$\sigma_{\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)		$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_m}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{pc}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)
18	ρ^-	110,80	0,16			$\Delta\rho^-$	81,31	0,11		
	ρ	110,59	0,15	0,08	0,17	$\Delta\rho$	81,80	0,10	0,27	0,29
	ρ^+	110,51	0,17			$\Delta\rho^+$	82,26	0,12		
21	ρ^-	169,88	0,19			$\Delta\rho^-$	59,08	0,11		
	ρ	169,94	0,19	0,07	0,20	$\Delta\rho$	59,35	0,11	0,15	0,19
	ρ^+	170,12	0,22			$\Delta\rho^+$	59,61	0,13		
24	ρ^-	219,91	0,22			$\Delta\rho^-$	50,03	0,10		
	ρ	220,00	0,21	0,09	0,23	$\Delta\rho$	50,06	0,10	0,02	0,10
	ρ^+	220,23	0,25			$\Delta\rho^+$	50,11	0,12		
28	ρ^-	262,20	0,25			$\Delta\rho^-$	42,29	0,12		
	ρ	262,36	0,24	0,14	0,28	$\Delta\rho$	42,36	0,11	0,04	0,12
	ρ^+	262,67	0,28			$\Delta\rho^+$	42,44	0,13		
32	ρ^-	294,11	0,27			$\Delta\rho^-$	31,92	0,10		
	ρ	294,13	0,26	0,06	0,27	$\Delta\rho$	31,77	0,10	0,07	0,13
	ρ^+	294,33	0,30			$\Delta\rho^+$	31,66	0,11		

Fonte: autor da tese.

3.1.2 Efeito das incertezas dos dados geométricos e dos materiais do reator IPEN/MB-01

Como mencionado na seção 2.4.2, a análise do efeito das incertezas dos dados geométricos e dos materiais do reator IPEN/MB-01 na reatividade inferida, foi realizada em duas etapas.

Primeiramente foi considerado o efeito dos parâmetros que não mudam com a alteração do estado do reator. Para tal, foram consideradas as incertezas decorrentes do enriquecimento de ^{235}U , da densidade de UO_2 , do diâmetro da pastilha de UO_2 , dos diâmetros externos e internos do encamisamento, do *pitch*, da altura do núcleo ativo, da densidade e composição do encamisamento, da quantidade de ^{234}U , do fator estequiométrico do UO_2 , da densidade da água e da altura da alumina inferior.

Neste caso, calculou-se o efeito das incertezas dos parâmetros citados anteriormente nas posições críticas de barra, com o sistema HAMMER-TECHNION/CITATION, considerando a posição crítica das barras de controle (BC1 = BC2) para o caso sem chapa e com 21 chapas.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados dos cálculos efetuados com o código CITATION para a posição crítica de barra (BC1=BC2) do caso sem chapas.

Tabela 3.7 - Incerteza experimental associada às incertezas da composição geométrica e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código CITATION, para o caso sem as chapas refletoras

Parâmetro	Valor do Parâmetro $\pm \sigma$	Δk_{eff}		Incerteza k_{eff} (pcm)
		+ σ (pcm)	- σ (pcm)	
1. Enriquecimento do ^{235}U (%)	$4,3486 \pm 0,0021$	4,2	-4,2	4,2
2. Densidade do UO_2 (g/cm^3)	$10,1771 \pm 0,1018$	5,6	-6,2	6,2
3. Diâmetro da Pastilha de UO_2 (mm)	$8,4894 \pm 0,00475$	<1,0	<1,0	1,0
4. Diâmetro Externo do Encamisamento (mm)	$9,8074 \pm 0,0169$	-14,1	13,7	14,1
5. Diâmetro Interno do Encamisamento (mm)	$8,5746 \pm 0,0243$	12,1	-12,6	12,6
6. <i>Pitch</i> (mm)	$15,000 \pm 0,007$	16,0	-15,0	16,0
7. Altura Ativa do Núcleo (cm)	$54,84 \pm 0,3544$	-1,4	1,0	1,4
8. Densidade do Encamisamento (g/cm^3)	$7,9207 \pm 0,0005$	<1,0	<1,0	1,0
9. ^{55}Mn no Encamisamento (wt %)	$1,6867 \pm 0,11015$	-23,7	23,7	23,7
10. Composição do Encamisamento	Ni= $10,0433 \pm 0,125$ Cr = $18,34 \pm 0,2163$ Co = $0,215 \pm 0,00707$ Mo = $0,17 \pm 0,01414$	-14,0	3,0	14,0
11. ^{234}U (wt %)	$0,041 \pm 0,004$	-17,8	19,0	19,0
12. Razão Estequiométrica do UO_2 (%)	$88,125 \pm 0,023$	<1,0	<1,0	1,0
13. Densidade da Água (g/cm^3)	$0,99820 \pm 0,00002$	<1,0	<1,0	1,0
14. Altura da Alumina Inferior (mm)	$90,28 \pm 0,09$	<1,0	<1,0	1,0
15. Posição da Barra de Controle (cm) ^(a)	$31,44 \pm 0,02$	<1,0	<1,0	1,0
Total ^(b)				42,4

Fonte: autor da tese.

(a) Distância medida a partir da base do comprimento ativo do combustível. Esta incerteza é composta pela calibração absoluta do indicador de posição do banco de controle (0,1 mm) mais a do indicador relativo ($0,013\% = 0,07$ mm).

(b) Incerteza total = $\sqrt{\sum (\Delta k_{\text{eff}})^2}$.

O valor 1σ para o primeiro parâmetro é a incerteza padrão dividida por $\sqrt{8}$ na qual 8 é o número de lotes de combustível. O valor 1σ para os parâmetros 2, 3 e 7 é a incerteza padrão dividida por $\sqrt{680}$ na qual 680 é o número de varetas combustíveis para a configuração do núcleo no decorrer dos experimentos, enquanto que os dos parâmetros 4 e 5 foram divididos por $\sqrt{162}$, no qual 162 é o número de medidas dos diâmetros interno e externo do encamisamento. O valor 1σ do nono e décimo parâmetro é a incerteza padrão dividida por $\sqrt{3}$ na qual 3 é o número de amostras do encamisamento.

Para o parâmetro 10, todos os componentes mencionados nas Tabelas 3.7 a 3.9 (Ni, Cr, Co, Mo) foram alterados simultaneamente, adicionando aos valores nominais das concentrações suas respectivas incertezas divididas por $\sqrt{3}$. A seguir, as secções de choque foram calculadas e, subsequentemente, o k_{eff} empregando o modelo de difusão. A mesma operação foi realizada subtraindo suas respectivas incertezas divididas por $\sqrt{3}$. O valor Δk é dado pela diferença dos dois valores de k_{eff} .

Nas Tabelas 3.8 e 3.9 são apresentados os resultados dos cálculos efetuados com o código CITATION considerando 21 chapas de aço inoxidável e de níquel; respectivamente.

Tabela 3.8 - Incerteza experimental associada às incertezas da composição geométrica e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código CITATION, para o caso de 21 chapas de aço inoxidável

Parâmetro	Valor do Parâmetro $\pm \sigma$	Δk_{eff}		Incerteza k_{eff} (pcm)
		+ σ (pcm)	- σ (pcm)	
1. Enriquecimento do ^{235}U (%)	$4,3486 \pm 0,0021$	4,2	-4,2	4,2
2. Densidade do UO_2 (g/cm^3)	$10,1771 \pm 0,1018$	5,7	-6,2	6,2
3. Diâmetro da Pastilha de UO_2 (mm)	$8,48940 \pm 0,00475$	<1,0	<1,0	1,0
4. Diâmetro Externo do Encamisamento (mm)	$9,8074 \pm 0,0169$	-14,1	13,7	14,1
5. Diâmetro Interno do Encamisamento (mm)	$8,5746 \pm 0,0243$	12,2	-12,7	12,7
6. Pitch (mm)	$15,000 \pm 0,007$	16,0	-15,0	16,0
7. Altura Ativa do Núcleo (cm)	$54,8400 \pm 0,3544$	-1,3	1,0	1,3
8. Densidade do Encamisamento (g/cm^3)	$7,9207 \pm 0,0005$	<1,0	<1,0	1,0
9. ^{55}Mn no Encamisamento (wt %)	$1,68670 \pm 0,11015$	-23,7	23,7	23,7
10. Composição do Encamisamento	Ni = $10,0433 \pm 0,125$ Cr = $18,3400 \pm 0,2163$ Co = $0,21500 \pm 0,00707$ Mo = $0,17000 \pm 0,01414$	-14,0	3,0	14,0
11. ^{234}U (wt %)	$0,041 \pm 0,004$	-17,6	18,8	18,8
12. Razão Estequiométrica do UO_2 (%)	$88,125 \pm 0,023$	<1,0	<1,0	1,0
13. Densidade da Água (g/cm^3)	$0,99820 \pm 0,00002$	<1,0	<1,0	1,0
14. Altura da Alumina Inferior (mm)	$90,28 \pm 0,09$	<1,0	<1,0	1,0
15. Posição da Barra de Controle (cm) ^(a)	$31,44 \pm 0,02$	<1,0	<1,0	1,0
Total ^(b)				42,3

Fonte: autor da tese.

(a) Distância medida a partir da base do comprimento ativo do combustível. Esta incerteza é composta pela calibração absoluta do indicador de posição do banco de controle (0,1 mm) mais a do indicador relativo (0,013% = 0,07 mm).

(b) Incerteza total = $\sqrt{\sum (\Delta k_{\text{eff}})^2}$.

Tabela 3.9 - Incerteza experimental associada às incertezas da composição geométrica e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código CITATION, para o caso de 21 chapas de níquel

Parâmetro	Valor do Parâmetro $\pm \sigma$	Δk_{eff}		Incerteza k_{eff} (pcm)
		+ σ (pcm)	- σ (pcm)	
1. Enriquecimento do ^{235}U (%)	$4,3486 \pm 0,0021$	4,2	-4,2	4,2
2. Densidade do UO_2 (g/cm^3)	$10,1771 \pm 0,1018$	5,7	-6,2	6,2
3. Diâmetro da Pastilha de UO_2 (mm)	$8,48940 \pm 0,00475$	< 1,0	< 1,0	1,0
4. Diâmetro Externo do Encamisamento (mm)	$9,8074 \pm 0,0169$	-14,1	13,7	14,1
5. Diâmetro Interno do Encamisamento (mm)	$8,5746 \pm 0,0243$	12,2	-12,7	12,7
6. <i>Pitch</i> (mm)	$15,000 \pm 0,007$	16,0	-15,0	16,0
7. Altura Ativa do Núcleo (cm)	$54,8400 \pm 0,3544$	-1,3	1,0	1,3
8. Densidade do Encamisamento (g/cm^3)	$7,92070 \pm 0,0005$	<1	<1	1,0
9. ^{55}Mn no Encamisamento (wt %)	$1,68670 \pm 0,11015$	-23,7	23,7	23,7
10. Composição do Encamisamento	Ni = $10,0433 \pm 0,12505$ Cr = $18,3400 \pm 0,2163$ Co = $0,21500 \pm 0,00707$ Mo = $0,17000 \pm 0,01414$	-14,0	3,0	14,0
11. ^{234}U (wt %)	$0,041 \pm 0,004$	-17,6	19,0	19,0
12. Razão Estequiométrica do UO_2 (%)	$88,125 \pm 0,023$	<1,0	<1,0	1,0
13. Densidade da Água (g/cm^3)	$0,99820 \pm 0,00002$	<1,0	<1,0	1,0
14. Altura da Alumina Inferior (mm)	$90,28 \pm 0,09$	<1,0	<1,0	1,0
15. Posição da Barra de Controle (cm) ^(a)	$31,44 \pm 0,02$	<1,0	<1,0	1,0
Total ^(b)				42,4

Fonte: autor da tese.

(a) Distância medida a partir da base do comprimento ativo do combustível. Esta incerteza é composta pela calibração absoluta do indicador de posição do banco de controle (0,1 mm) mais a do indicador relativo (0,013% = 0,07 mm).

(b) Incerteza total = $\sqrt{\sum (\Delta k_{\text{eff}})^2}$.

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 3.7 a 3.9 e de acordo com a equação (2.11), concluiu-se que a contribuição dos parâmetros que não mudam de um estado do reator para outro, na incerteza final, é desprezível. Observou-se apenas uma pequena variação entre os dados mostrados nas tabelas citadas anteriormente. Conclusões semelhantes foram obtidas para o aço carbono, motivo pelo qual estes resultados não foram apresentados aqui.

A segunda etapa desta análise considerou os parâmetros que mudam com a alteração de estado do reator. No caso, foi utilizado o código MCNP-5 devido aos recursos

de modelagem do sistema; tendo em vista a dificuldade do código de difusão CITATION lidar com um modelo explícito. O desvio padrão do MCNP-5 foi de 1 pcm, o que exigiu 4.050 ciclos de 800.000 histórias cada.

Nas Tabelas 3.10 a 3.12 são apresentados os efeitos das incertezas da geometria e materiais da instalação na reatividade inserida pelas chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel; respectivamente, e referem-se ao caso de 21 chapas, como explicado anteriormente. O caso de referência considera o estado crítico sem chapas de material refletor pesado. O segundo conjunto de dados refere-se ao caso de 21 chapas inseridas na face oeste do núcleo do reator, mas com as barras de controle na posição crítica do caso sem chapas. Estes dois casos abordados serviram para se obter a incerteza na reatividade total (ρ) oriunda das incertezas dos materiais e dos dados geométricos. O terceiro conjunto de dados refere-se ao caso de 21 chapas, mas agora as barras de controle foram posicionadas no estado crítico do caso anterior (18 placas); neste caso, obteve-se a incerteza na reatividade entre os casos sucessivos ($\Delta\rho$) associada às incertezas dos materiais e dos dados geométricos.

Tabela 3.10 - Incertezas oriundas da geometria e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código MCNP-5, para o experimento com 21 chapas de aço inoxidável

Parâmetros	Valor do Parâmetro ± σ	Δk _{eff}		Incerteza k _{eff} (pcm)
		+ σ (pcm)	- σ (pcm)	

Caso Referência (Crítico)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	8,0	-9,0	9,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	7,91 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,01± 0,01	<1,0	<1,0	1,0
Total				5,7
Caso Perturbado: Barra de Controle na Posição Crítica do Caso Referência (sem chapa)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	6,0	-7,0	7,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	7,91 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,01 ±0,01	<1,0	<1,0	1,0
Total				4,7
Caso Perturbado: Barra de Controle na Posição Crítica do Caso Anterior (18 chapas)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	6,0	-8,0	8,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	7,91 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,01±0,01	<1,0	<1,0	1,0
Total				5,3

Fonte: autor da tese.

Tabela 3.11 - Incertezas oriundas da geometria e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código MCNP-5, para o experimento com 21 chapas de aço carbono

Parâmetros	Valor do Parâmetro ± σ	Δk _{eff}		Incerteza k _{eff} (pcm)
		+ σ (pcm)	- σ (pcm)	

Caso Referência (Crítico)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	8,0	-9,0	9,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	7,84 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,095± 0,001	<1,0	<1,0	1,0
Total				5,7
Caso Perturbado: Barra de Controle na Posição Crítica do Caso Referência (sem chapa)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	6,0	-7,0	7,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	7,84 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,095 ±0,001	<1,0	<1,0	1,0
Total				4,7
Caso Perturbado: Barra de Controle na Posição Crítica do Caso Anterior (18 chapas)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	6,0	-8,0	8,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	7,84 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,095±0,001	<1,0	<1,0	1,0
Total				5,3

Fonte: autor da tese.

Tabela 3.12 - Incertezas oriundas da geometria e dos materiais do reator IPEN/MB-01, calculadas com o código MCNP-5, para o experimento com 21 chapas de níquel

Parâmetros	Valor do Parâmetro ± σ	Δk _{eff}		Incerteza k _{eff} (pcm)
		+ σ (pcm)	- σ (pcm)	
Caso Referência (Crítico)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	11,0	-11,0	11,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	8,89 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,22± 0,01	<1,0	<1,0	1,0
Total				6,8
Caso Perturbado: Barra de Controle na Posição Crítica do Caso Referência (sem chapa)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	8,0	-9,0	9,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	8,89 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,22 ±0,01	<1,0	<1,0	1,0
Total				5,7
Caso Perturbado: Barra de Controle na Posição Crítica do Caso Anterior (18 chapas)				
1. Distância Chapa-Varetas Combustíveis (mm)	5,50 ± 1,00	8,0	-10,0	10,0/√3
2. Densidade da Chapa (g/cm³)	8,89 ± 0,01	2,0	<1,0	2,0
3. Composição da Chapa		<1,0	<1,0	1,0
4. Espessura da Chapa (mm)	3,22±0,01	<1,0	<1,0	1,0
Total				6,3

Fonte: autor da tese.

Das Tabelas 3.10 a 3.12 pode-se notar que para a reatividade em relação ao caso sem chapas refletoras (ρ), a incerteza associada às incertezas na geometria e materiais do reator IPEN/MB-01 foi de 4,7 pcm para as chapas de aço inoxidável e aço carbono, e 5,7 pcm para as chapas de níquel. Para a condição da reatividade entre os casos ($\Delta\rho$), esta

incerteza foi de 0,4 pcm para o aço inoxidável e o aço carbono, e 0,5 pcm para o níquel. Por similaridade, essas incertezas foram aplicadas a todos os casos dos respectivos experimentos dos refletores pesados.

3.1.3 Incerteza experimental total

As incertezas experimentais totais para todos os experimentos efetuados neste trabalho, tanto as derivadas dos dados medidos como as provenientes da geometria e dos materiais da instalação, são apresentadas nas Tabelas 3.13 a 3.15; nas quais: $\sigma_{\rho_{exp}}$ é a incerteza experimental total (apresentadas nas Tabelas 3.3 a 3.6), $\sigma_{\rho_{gm}}$ considera o efeito das incertezas dos dados geométricos e materiais e σ_{ρ_t} é a incerteza total obtida extraindo-se a raiz quadrada da soma dos quadrados de $\sigma_{\rho_{exp}}$ e $\sigma_{\rho_{gm}}$.

Tabela 3.13 – Incertezas totais para o experimento com refletores de aço inoxidável

Número de Chapas	ρ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{gm}}$ (pcm)	σ_{ρ_t} (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{gm}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_t}$ (pcm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-249,30	4,67	4,7	6,63	-249,30	4,67	4,7	6,63
2	-340,46	7,16	4,7	8,57	-93,03	0,74	0,4	0,84
3	-383,56	9,73	4,7	10,81	-39,91	0,29	0,4	0,49
4	-388,02	9,99	4,7	11,04	-5,57	0,20	0,4	0,45
5	-394,09	12,74	4,7	13,58	-2,64	0,25	0,4	0,47
6	-368,50	11,04	4,7	12,00	21,29	0,26	0,4	0,48
7	-353,42	9,78	4,7	10,85	16,55	0,22	0,4	0,46
8	-328,12	11,71	4,7	12,62	29,48	0,14	0,4	0,42
9	-297,83	7,29	4,7	8,67	26,44	0,17	0,4	0,44
11	-246,37	8,00	4,7	9,27	57,38	0,10	0,4	0,41
13	-187,74	5,34	4,7	7,11	57,56	0,07	0,4	0,41
15	-133,24	3,00	4,7	5,58	54,08	0,18	0,4	0,44
18	-64,27	1,15	4,7	4,84	67,66	0,06	0,4	0,40
21	1,93	0,03	4,7	4,70	65,01	0,07	0,4	0,41
24	51,17	0,19	4,7	4,70	48,29	0,19	0,4	0,44
28	109,86	0,51	4,7	4,73	58,05	0,16	0,4	0,43
32	162,79	1,55	4,7	4,95	51,19	0,19	0,4	0,44

Fonte: autor da tese.

Tabela 3.14 – Incertezas totais para o experimento com refletores de aço carbono

Número de Chapas	ρ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{gm}}$ (pcm)	σ_{ρ_t} (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{gm}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_t}$ (pcm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-231,72	5,23	4,7	7,03	-231,72	5,23	4,7	7,03
2	-333,78	9,88	4,7	10,94	-103,12	0,74	0,4	0,84
3	-363,18	10,65	4,7	11,64	-30,16	0,33	0,4	0,52
4	-378,46	10,54	4,7	11,54	-14,04	0,25	0,4	0,47
5	-377,15	11,00	4,7	11,96	1,76	0,15	0,4	0,43
6	-377,76	12,44	4,7	13,30	-3,23	0,17	0,4	0,43
7	-347,73	13,08	4,7	13,90	31,13	0,15	0,4	0,43
8	-331,04	9,49	4,7	10,59	15,12	0,21	0,4	0,45
9	-300,71	7,98	4,7	9,27	30,99	0,14	0,4	0,42
11	-264,30	7,93	4,7	9,22	39,54	0,13	0,4	0,42
13	-218,29	5,80	4,7	7,47	46,70	0,12	0,4	0,42
15	-174,15	3,70	4,7	5,98	43,25	0,10	0,4	0,41
18	-124,61	1,60	4,7	4,96	49,54	0,17	0,4	0,44
21	-75,01	0,95	4,7	4,80	50,53	0,13	0,4	0,42
24	-33,64	0,22	4,7	4,71	41,90	0,13	0,4	0,42
28	-0,36	0,36	4,7	4,71	34,01	0,26	0,4	0,47
32	37,22	0,13	4,7	4,70	37,22	0,13	0,4	0,42

Fonte: autor da tese.

Tabela 3.15 – Incertezas totais para o experimento com refletores de níquel

Número de Chapas	ρ (pcm)	$\sigma_{\rho_{exp}}$ (pcm)	$\sigma_{\rho_{gm}}$ (pcm)	σ_{ρ_t} (pcm)	$\Delta\rho$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{exp}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_{gm}}$ (pcm)	$\sigma_{\Delta\rho_t}$ (pcm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-339,38	10,37	5,7	11,83	-339,38	10,37	5,7	11,83
2	-409,11	13,91	5,7	15,03	-70,49	0,48	0,5	0,69
3	-409,14	13,48	5,7	14,64	-2,36	0,17	0,5	0,53
4	-379,54	11,74	5,7	13,05	32,14	0,18	0,5	0,53
5	-343,73	8,88	5,7	10,55	33,44	0,19	0,5	0,53
6	-300,08	6,65	5,7	8,76	43,53	0,16	0,5	0,52
7	-272,88	5,68	5,7	8,04	28,56	0,17	0,5	0,53
8	-220,34	4,37	5,7	7,18	52,15	0,22	0,5	0,54
9	-173,71	2,90	5,7	6,40	49,40	0,22	0,5	0,55
11	-93,08	1,06	5,7	5,80	79,03	0,37	0,5	0,62
13	-25,31	0,13	5,7	5,70	68,58	0,17	0,5	0,53
15	28,79	0,37	5,7	5,71	54,37	0,16	0,5	0,52
18	110,59	0,17	5,7	5,70	81,80	0,29	0,5	0,58
21	169,94	0,20	5,7	5,70	59,35	0,19	0,5	0,53
24	220,00	0,23	5,7	5,70	50,06	0,10	0,5	0,51
28	262,36	0,28	5,7	5,71	42,36	0,12	0,5	0,51
32	294,13	0,27	5,7	5,71	31,77	0,13	0,5	0,52

Fonte: autor da tese.

3.1.4 Reatividade inserida e posição crítica de barra

Na Figura 3.1 é mostrado o gráfico da reatividade inserida no núcleo devido à inserção de chapas de material refletor na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01.

Figura 3.1 – Gráfico da reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 em função do número de chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel, justapostas na sua face oeste - Experimental

Fonte: autor da tese.

Pode ser observado que o aumento da absorção de nêutrons, e consequente diminuição da moderação de nêutrons, dominam toda a física do problema quando foram inseridas poucas chapas de material refletor (cerca de 5 chapas para o aço inoxidável e aço carbono, e 3 chapas no caso do níquel). Na sequência, a reflexão de nêutrons tornou-se importante superando a absorção neutrônica; a reatividade aumentou até ultrapassar a situação sem chapa (excesso de reatividade zero) obtendo-se um acréscimo (ganho líquido) de reatividade com as 32 chapas inseridas (cerca de: 162 pcm no caso do aço inoxidável, 37 pcm para o aço carbono e 295 pcm para o níquel). Portanto, pode-se observar que o núcleo refletido tornou-se mais reativo do que o núcleo sem as chapas de material refletor.

Notou-se também que o níquel possui um poder de reflexão maior, há um aumento de reatividade, em relação ao caso referência (sem chapas), após 14 chapas (~4,5 cm) serem inseridas. Isso se deve ao fato deste material ser mais denso que as outras ligas e possuir secção de choque de espalhamento maior. No caso do aço inoxidável este excesso de reatividade, em relação ao caso sem chapas, ocorreu após a inserção de 21 chapas (~6,5 cm); já para o aço carbono este fato tem início após 28 chapas (~9 cm) serem inseridas na

face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01.

Na Figura 3.2 é mostrado o comportamento da posição crítica de barra para os três materiais refletor estudados neste trabalho. Pode-se observar que a posição crítica de barra tem as mesmas características já discutidas para o comportamento da reatividade. A absorção de nêutrons domina o balanço neutrônico quando poucas chapas são inseridas e as barras de controle são retiradas para compensar a perda de reatividade. Na sequência, a reflexão de nêutrons nas chapas refletoras começa a dominar o balanço neutrônico e as barras de controle são inseridas para compensar o ganho de reatividade.

Figura 3.2 – Gráfico da posição crítica de barra em função do número de chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel; justapostas na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01- Experimental

Fonte: autor da tese.

3.2 Resultados calculados e comparação com os resultados experimentais

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações computacionais dos experimentos de refletor de material pesado efetuadas com o código MCNP-5 em conjunto com a biblioteca ENDF/B-VII.0; bem como a comparação entre os resultados experimentais e calculados. Os resultados calculados foram obtidos utilizando-se a

metodologia de cálculo descrita na seção 2.5.

Cabe acrescentar que foram adotadas as três metodologias descritas anteriormente (homogênea, explícita 1 e explícita 2) para as simulações computacionais efetuadas com as chapas refletoras de níquel; isto se deveu ao fato destas chapas serem mais planas que as dos outros materiais refletores estudados. Com base nos resultados obtidos, as duas primeiras metodologias (homogênea e explícita 1) foram empregadas para os refletores de aço carbono. No caso do aço inoxidável só foi utilizada a metodologia denominada explícita 1.

Para minimizar as incertezas associadas aos valores dos fatores de multiplicação efetivos de nêutrons foram utilizadas $8,0 \times 10^5$ histórias (número de nêutrons gerados durante a simulação) resultando em incertezas da ordem de 1 pcm para todas as configurações calculadas.

É importante ressaltar que a incerteza resultante dos cálculos com o MCNP-5 só leva em conta a estatística das partículas simuladas e não a incerteza da seção de choque proveniente das bibliotecas de dados nucleares.

Na Tabela 3.16 são apresentadas as coordenadas das posições críticas de barra para as simulações computacionais dos experimentos com as chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel.

Tabela 3.16 – Coordenadas das posições críticas de barra para as simulações computacionais dos experimentos com as chapas de aço inoxidável, aço carbono e níquel

Número de Chapas	Aço Inoxidável			Aço Carbono			Níquel		
	Posição Crítica BC1=BC2 (%)	Coordenada BC1=BC2 (MCNP)		Posição Crítica BC1=BC2 (%)	Coordenada BC1=BC2 (MCNP)		Posição Crítica BC1=BC2 (%)	Coordenada BC1=BC2 (MCNP)	
		Inserção barra	plug base da barra		Inserção barra	plug base da barra		Inserção barra	plug base da barra
0	58,07	31,70622	30,03622	58,00	31,66800	29,99800	58,00	31,66800	29,99800
1	60,70	33,14220	31,47220	60,44	33,00024	31,33024	61,62	33,64452	31,97452
2	61,72	33,69912	32,02912	61,57	33,61722	31,94722	62,40	34,07040	32,40040
3	62,17	33,94482	32,27482	61,90	33,79740	32,12740	62,43	34,08678	32,41678
4	62,23	33,97758	32,30758	62,05	33,87930	32,20930	62,06	33,88476	32,21476
5	62,26	33,99396	32,32396	62,03	33,86838	32,19838	61,69	33,68274	32,01274
6	62,02	33,86292	32,19292	62,06	33,88476	32,21476	61,21	33,42066	31,75066
7	61,84	33,76464	32,09464	61,71	33,69366	32,02366	60,89	33,24594	31,57594
8	61,51	33,58446	31,91446	61,54	33,60084	31,93084	60,33	32,94018	31,27018
9	61,22	33,42612	31,75612	61,21	33,42066	31,75066	59,80	32,65080	30,98080
11	60,61	33,09306	31,42306	60,79	33,19134	31,52134	58,97	32,19762	30,52762
13	59,99	32,75454	31,08454	60,28	32,91288	31,24288	58,26	31,80996	30,13996
15	59,42	32,44332	30,77332	59,82	32,66172	30,99172	57,71	31,50966	29,83966
18	58,71	32,05566	30,38566	59,30	32,37780	30,70780	56,88	31,05648	29,38648
21	58,04	31,68984	30,01984	58,77	32,08842	30,41842	56,28	30,72888	29,05888
24	57,54	31,41684	29,74684	58,34	31,85364	30,18364	55,77	30,45042	28,78042
28	56,95	31,09470	29,42470	58,00	31,66800	29,99800	55,36	30,22656	28,55656
32	56,45	30,82170	29,15170	57,61	31,45506	29,78506	55,05	30,05730	28,38730

Fonte: autor da tese.

Um dos objetivos deste trabalho é efetuar a comparação entre os valores de reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01, devido à inserção de chapas de aço inoxidável, aço carbono ou níquel na sua face oeste, obtidos experimentalmente e calculados utilizando o código MCNP-5 com a biblioteca de dados avaliados ENDF/B-VII.0.

O desvio entre os valores calculados e os medidos foi obtido utilizando-se a expressão $(C-E)/E$, na qual C e E são, respectivamente, o valor calculado e o valor experimental. A incerteza foi obtida por uma propagação de erro padrão.

3.2.1 Chapas refletoras de níquel

Nas Tabelas 3.17 a 3.19 são apresentados os fatores de multiplicação efetivos de nêutrons obtidos com o código MCNP, para o núcleo do reator IPEN/MB-01, em função do número de chapas de níquel posicionadas junto a sua face oeste; bem como as correspondentes reatividades inseridas, considerando as metodologias denominadas homogênea, explícita 1 e explícita 2; respectivamente. A reatividade total (ρ) inserida no núcleo, para um número específico de chapas, foi obtida somando-se as reatividades parciais até esse ponto.

Tabela 3.17 - Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de níquel. Metodologia homogênea

Número de Chapas	Posição Crítica		Posição Anterior		$\Delta\rho^{(b)}$ (pcm)	$\rho^{(b)}$ (pcm)
	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$		
0	58,00	1,00035	-	-	-	-
1	61,62	1,00052	58,00	0,99693	-341,93	-342,93
2	62,40	1,00063	61,62	0,99985	-66,98	-409,91
3	62,43	1,00070	62,40	1,00063	0,00	-409,91
4	62,06	1,00065	62,43	1,00101	30,95	-378,96
5	61,69	1,00071	62,06	1,00110	44,92	-334,04
6	61,21	1,00071	61,69	1,00117	45,91	-288,13
7	60,89	1,00086	61,21	1,00120	48,91	-239,22
8	60,33	1,00081	60,89	1,00135	48,89	-190,33
9	59,80	1,00068	60,33	1,00125	43,91	-146,42
11	58,97	1,00074	59,80	1,00156	87,80	-58,62
13	58,26	1,00070	58,97	1,00141	66,86	8,24
15	57,71	1,00077	58,26	1,00135	64,87	73,11
18	56,88	1,00067	57,71	1,00155	77,62	150,73
21	56,28	1,00067	56,88	1,00130	62,88	213,60
24	55,77	1,00062	56,28	1,00117	49,91	263,51
28	55,36	1,00071	55,77	1,00115	52,91	316,42
32	55,05	1,00075	55,36	1,00108	36,93	353,35

Fonte: autor da tese.

(a) Incerteza = $\pm 0,00001$.

(b) Incerteza = $\pm 1,41$ pcm.

Tabela 3.18 - Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de níquel. Metodologia explícita 1

Número de Chapas	Posição Crítica		Posição Anterior		$\Delta\rho^{(b)}$ (pcm)	$\rho^{(b)}$ (pcm)
	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$		
0	58,00	1,00035	-	-	-	-
1	61,62	1,00052	58,00	0,99693	-342,93	-342,93
2	62,40	1,00063	61,62	0,99985	-66,98	-409,91
3	62,43	1,00070	62,40	1,00066	3,00	-406,91
4	62,06	1,00066	62,43	1,00100	29,95	-376,96
5	61,69	1,00074	62,06	1,00107	40,93	-336,03
6	61,21	1,00072	61,69	1,00122	47,91	-288,13
7	60,89	1,00093	61,21	1,00122	49,90	-238,22
8	60,33	1,00082	60,89	1,00135	41,90	-196,32
9	59,80	1,00072	60,33	1,00125	43,31	-153,01
11	58,97	1,00077	59,80	1,00155	82,71	-70,30
13	58,26	1,00073	58,97	1,00147	69,84	-0,45
15	57,71	1,00076	58,26	1,00134	60,87	60,42
18	56,88	1,00065	57,71	1,00155	78,82	139,24
21	56,28	1,00066	56,88	1,00131	65,87	205,11
24	55,77	1,00064	56,28	1,00118	51,90	257,01
28	55,36	1,00070	55,77	1,00112	47,92	304,93
32	55,05	1,00074	55,36	1,00107	36,93	341,86

Fonte: autor da tese.

(a) Incerteza = $\pm 0,00001$.

(b) Incerteza = $\pm 1,41$ pcm.

Tabela 3.19 - Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de níquel. Metodologia explícita 2

Número de Chapas	Posição Crítica		Posição Anterior		$\Delta\rho^{(b)}$ (pcm)	$\rho^{(b)}$ (pcm)
	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$		
0	58,00	1,00035	-	-	-	-
1	61,62	1,00052	58,00	0,99693	-342,93	-342,93
2	62,40	1,00062	61,62	0,99986	-65,97	-408,91
3	62,43	1,00068	62,40	1,00065	3,00	-405,91
4	62,06	1,00065	62,43	1,00099	30,95	-374,96
5	61,69	1,00074	62,06	1,00108	42,93	-332,04
6	61,21	1,00073	61,69	1,00118	43,92	-288,12
7	60,89	1,00086	61,21	1,00117	43,92	-244,21
8	60,33	1,00078	60,89	1,00132	45,90	-198,31
9	59,80	1,00071	60,33	1,00122	43,91	-154,39
11	58,97	1,00071	59,80	1,00155	83,81	-70,58
13	58,26	1,00075	58,97	1,00146	74,84	4,25
15	57,71	1,00079	58,26	1,00139	63,86	68,12
18	56,88	1,00067	57,71	1,00155	75,82	143,94
21	56,28	1,00066	56,88	1,00131	63,87	207,81
24	55,77	1,00059	56,28	1,00112	45,92	253,73
28	55,36	1,00070	55,77	1,00114	54,90	308,64
32	55,05	1,00074	55,36	1,00107	36,93	345,57

Fonte: autor da tese.

(a) Incerteza = $\pm 0,00001$.

(b) Incerteza = $\pm 1,41$ pcm.

Na Figura 3.3 são mostrados, na forma de gráfico, os valores experimentais e calculados da reatividade induzida no núcleo do reator IPEN/MB-01, quando da inserção de chapas de níquel na sua face oeste. Observou-se que as três metodologias utilizadas mostram o mesmo comportamento qualitativo evidenciando que os aspectos físicos de absorção e reflexão de nêutrons foram levados em consideração. Do ponto de vista quantitativo, a metodologia de tratar as chapas refletoras de maneira explícita foi melhor do que homogeneizá-las. Quanto às duas formas de considerar as chapas refletoras explicitamente, observou-se que elas são similares, não compensando o trabalho de preparação dos dados de entrada para a simulação computacional. Deste modo, não foi utilizada a metodologia explícita 2 para as simulações computacionais dos experimentos com aço carbono e aço inoxidável; e utilizou-se apenas a metodologia explícita 1 para a simulação dos experimentos com aço inoxidável.

Figura 3.3 – Gráfico comparativo entre a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 experimental e calculada em função do número de chapas de níquel justapostas na sua face oeste

Fonte: autor da tese.

Nas Tabelas 3.20 a 3.22 são apresentados os desvios entre os valores calculados e os medidos para a reatividade inserida devido à inserção de chapas de níquel na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01, considerando-se as três metodologias: homogênea, explícita 1 e explícita 2; respectivamente.

Pode ser observado que no caso da reatividade total inserida (ρ) pelas chapas de níquel calculadas utilizando as metodologias explícita 1 e explícita 2, com exceção de poucos casos, os resultados ficaram dentro do intervalo de incerteza 3σ . No caso da utilização da metodologia homogênea, aproximadamente 40% das simulações computacionais ficaram fora do intervalo 3σ . A diferença de reatividade ($\Delta\rho$) entre cada inserção de chapas ou conjunto de chapas já foi mais difícil de calcular, principalmente por serem valores bem próximos de uma configuração experimental para a outra; neste caso aproximadamente 65% das simulações computacionais ficaram fora do intervalo 3σ , independente da metodologia adotada.

Tabela 3.20 - Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel.
Metodologia homogênea

Número de Chapa	$\Delta\rho$ (pcm)		(C-E)/E (%)	ρ (pcm)		(C-E)/E (%)
	Experimental	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VIL0		Experimental ^(a)	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VIL0	
1	-333,88 $\pm$ 11,83 ^(a)	-342,93	2,71 $\pm$ 6,18	-333,88 $\pm$ 11,83	-342,93	2,71 $\pm$ 6,18
2	-70,49 $\pm$ 0,69	-66,98	-4,99 $\pm$ 1,66	-403,61 $\pm$ 15,03	-409,91	1,56 $\pm$ 6,47
3	-2,36 $\pm$ 0,53	0,00	-100,00 $\pm$ 31,71	-403,64 $\pm$ 14,64	-409,91	1,55 $\pm$ 6,30
4	32,14 $\pm$ 0,53	30,95	-3,72 $\pm$ 2,82	-374,04 $\pm$ 13,05	-378,96	1,31 $\pm$ 6,06
5	33,44 $\pm$ 0,52	44,92	34,34 $\pm$ 3,03	-338,23 $\pm$ 10,55	-334,04	-1,24 $\pm$ 5,37
6	43,53 $\pm$ 0,52	45,91	5,47 $\pm$ 2,10	-294,58 $\pm$ 8,76	-288,13	-2,19 $\pm$ 5,10
7	28,56 $\pm$ 0,53	48,91	71,27 $\pm$ 4,12	-267,38 $\pm$ 8,04	-239,22	-10,53 $\pm$ 5,02
8	52,15 $\pm$ 0,54	48,89	-6,25 $\pm$ 1,75	-214,84 $\pm$ 7,18	-190,33	-11,41 $\pm$ 5,57
9	49,40 $\pm$ 0,55	43,91	-11,11 $\pm$ 1,86	-168,21 $\pm$ 6,40	-146,42	-12,95 $\pm$ 6,30
11	79,03 $\pm$ 0,62	87,80	11,10 $\pm$ 1,41	-87,58 $\pm$ 5,80	-58,62	-33,07 $\pm$ 10,34
13	68,58 $\pm$ 0,53	66,86	-2,51 $\pm$ 1,32	-19,81 $\pm$ 5,70	8,25	-141,60 $\pm$ 42,30
15	54,37 $\pm$ 0,52	64,87	19,31 $\pm$ 1,77	34,29 $\pm$ 5,71	73,11	113,19 $\pm$ 42,56
18	81,80 $\pm$ 0,58	77,62	-5,11 $\pm$ 1,21	116,09 $\pm$ 5,70	150,73	29,84 $\pm$ 9,41
21	59,35 $\pm$ 0,53	62,88	5,94 $\pm$ 1,58	175,44 $\pm$ 5,70	213,60	21,76 $\pm$ 6,05
24	50,06 $\pm$ 0,51	49,91	-0,30 $\pm$ 1,76	225,50 $\pm$ 5,70	263,51	16,86 $\pm$ 4,63
28	42,36 $\pm$ 0,51	52,91	24,88 $\pm$ 2,27	267,86 $\pm$ 5,71	316,42	18,13 $\pm$ 3,92
32	31,77 $\pm$ 0,52	36,93	16,25 $\pm$ 2,99	299,63 $\pm$ 5,71	353,35	17,93 $\pm$ 3,50

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = $\pm$ 1,41 pcm.

Tabela 3.21 - Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel.
Metodologia explícita 1

Número de Chapa	$\Delta\rho$ (pcm)			ρ (pcm)		(C-E)/E (%)
	Experimental	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0		Experimental ^(a)	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0	
1	-333,88 $\pm$ 11,83 ^(a)	-342,93	2,71 $\pm$ 6,18	-333,88 $\pm$ 11,83	-342,93	2,71 $\pm$ 6,18
2	-70,49 $\pm$ 0,69	-66,98	-4,99 $\pm$ 1,66	-403,61 $\pm$ 15,03	-409,91	1,56 $\pm$ 6,47
3	-2,36 $\pm$ 0,53	3,00	-227,12 $\pm$ 42,69	-403,64 $\pm$ 14,64	-406,91	0,81 $\pm$ 6,29
4	32,14 $\pm$ 0,53	29,95	-6,83 $\pm$ 2,79	-374,04 $\pm$ 13,05	-376,96	0,78 $\pm$ 6,05
5	33,44 $\pm$ 0,52	40,93	22,40 $\pm$ 2,90	-338,23 $\pm$ 10,55	-336,03	-0,65 $\pm$ 5,38
6	43,53 $\pm$ 0,52	47,91	10,05 $\pm$ 2,14	-294,58 $\pm$ 8,76	-288,13	-2,19 $\pm$ 5,10
7	28,56 $\pm$ 0,53	49,90	74,76 $\pm$ 4,17	-267,38 $\pm$ 8,04	-238,22	-10,91 $\pm$ 5,02
8	52,15 $\pm$ 0,54	41,90	-19,65 $\pm$ 1,69	-214,84 $\pm$ 7,18	-196,32	-8,62 $\pm$ 5,62
9	49,40 $\pm$ 0,55	43,31	-12,32 $\pm$ 1,85	-168,21 $\pm$ 6,40	-153,01	-9,03 $\pm$ 6,38
11	79,03 $\pm$ 0,62	82,71	4,65 $\pm$ 1,38	-87,58 $\pm$ 5,80	-70,30	-19,73 $\pm$ 10,75
13	68,58 $\pm$ 0,53	69,84	1,85 $\pm$ 1,34	-19,81 $\pm$ 5,70	-0,45	-97,70 $\pm$ 40,57
15	54,37 $\pm$ 0,52	60,87	11,96 $\pm$ 1,72	34,29 $\pm$ 5,71	60,42	76,19 $\pm$ 37,57
18	81,80 $\pm$ 0,58	78,82	-3,64 $\pm$ 1,21	116,09 $\pm$ 5,70	139,24	19,94 $\pm$ 9,09
21	59,35 $\pm$ 0,53	65,87	10,99 $\pm$ 1,60	175,44 $\pm$ 5,70	205,11	16,91 $\pm$ 5,95
24	50,06 $\pm$ 0,51	51,90	3,69 $\pm$ 1,78	225,50 $\pm$ 5,70	257,01	13,98 $\pm$ 4,58
28	42,36 $\pm$ 0,51	47,92	13,10 $\pm$ 2,18	267,86 $\pm$ 5,71	304,93	13,84 $\pm$ 3,86
32	31,77 $\pm$ 0,52	36,93	16,25 $\pm$ 2,99	299,63 $\pm$ 5,71	341,86	14,09 $\pm$ 3,46

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = $\pm$ 1,41 pcm.

Tabela 3.22 – Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel.
Metodologia explícita 2

Número de Chapa	$\Delta\rho$ (pcm)		(C-E)/E (%)	ρ (pcm)		(C-E)/E (%)
	Experimental	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0		Experimental ^(a)	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0	
1	-333,88 ± 11,83 ^(a)	-342,93	2,71 ± 6,18	-333,88 ± 11,83	-342,93	2,71 ± 6,18
2	-70,49 ± 0,69	-65,97	-6,41 ± 1,66	-403,61 ± 15,03	-408,91	1,31 ± 6,47
3	-2,36 ± 0,53	3,00	-227,12 ± 42,69	-403,64 ± 14,64	-405,91	0,56 ± 6,28
4	32,14 ± 0,53	30,95	-3,72 ± 2,82	-374,04 ± 13,05	-374,96	0,25 ± 6,04
5	33,44 ± 0,52	42,93	28,37 ± 2,97	-338,23 ± 10,55	-332,04	-1,83 ± 5,36
6	43,53 ± 0,52	43,92	0,88 ± 2,07	-294,58 ± 8,76	-288,12	-2,19 ± 5,10
7	28,56 ± 0,53	43,92	53,79 ± 3,87	-267,38 ± 8,04	-244,21	-8,67 ± 5,05
8	52,15 ± 0,54	45,90	-11,99 ± 1,72	-214,84 ± 7,18	-198,31	-7,69 ± 5,63
9	49,40 ± 0,55	43,91	-11,10 ± 1,86	-168,21 ± 6,40	-154,39	-8,21 ± 6,40
11	79,03 ± 0,62	83,81	6,04 ± 1,38	-87,58 ± 5,80	-70,58	-19,40 ± 10,76
13	68,58 ± 0,53	74,84	9,13 ± 1,38	-19,81 ± 5,70	4,25	-121,47 ± 41,03
15	54,37 ± 0,52	63,86	17,46 ± 1,76	34,29 ± 5,71	68,12	98,64 ± 40,56
18	81,80 ± 0,58	75,82	-7,30 ± 1,20	116,09 ± 5,70	143,94	23,99 ± 9,22
21	59,35 ± 0,53	63,87	7,62 ± 1,58	175,44 ± 5,70	207,81	18,45 ± 5,98
24	50,06 ± 0,51	45,92	-8,27 ± 1,71	225,50 ± 5,70	253,73	12,52 ± 4,56
28	42,36 ± 0,51	54,90	29,60 ± 2,31	267,86 ± 5,71	308,64	15,22 ± 3,88
32	31,77 ± 0,52	36,93	16,25 ± 2,99	299,63 ± 5,71	345,57	15,33 ± 3,47

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = ± 1,41 pcm.

3.2.2 Chapas refletoras de aço carbono

Nas Tabelas 3.23 e 3.24 são apresentados os fatores de multiplicação efetivos de nêutrons obtidos com o código MCNP-5, para o núcleo do reator IPEN/MB-01, em função do número de chapas de aço carbono justapostas na sua face oeste; bem como as correspondentes reatividades inseridas considerando as metodologias denominadas homogênea e explícita 1, respectivamente. Como mencionado anteriormente, a reatividade total (ρ) inserida no núcleo, para um número específico de chapas, foi obtida somando-se as reatividades parciais até esse ponto.

Tabela 3.23 - Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de aço carbono. Metodologia homogênea

Número de Chapas	Posição Crítica		Posição Anterior		$\Delta\rho^{(b)}$ (pcm)	$\rho^{(b)}$ (pcm)
	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$		
0	58,00	1,00035	-	-	-	-
1	60,44	1,00044	58,00	0,99801	-234,38	-234,38
2	61,57	1,00057	60,44	0,99950	-94,01	-328,39
3	61,90	1,00053	61,57	1,00020	-36,97	-365,36
4	62,05	1,00058	61,90	1,00043	-9,99	-375,35
5	62,03	1,00060	62,05	1,00065	6,99	-368,36
6	62,06	1,00075	62,03	1,00076	15,98	-352,38
7	61,71	1,00063	62,06	1,00097	21,96	-330,42
8	61,54	1,00073	61,71	1,00087	23,96	-306,46
9	61,21	1,00064	61,54	1,00093	19,97	-286,49
11	60,79	1,00074	61,21	1,00113	48,91	-237,58
13	60,28	1,00072	60,79	1,00123	48,90	-188,67
15	59,82	1,00072	60,28	1,00119	46,91	-141,76
18	59,30	1,00081	59,82	1,00133	60,88	-80,89
21	58,77	1,00079	59,30	1,00134	52,89	-28,00
24	58,34	1,00077	58,77	1,00122	42,91	14,91
28	58,00	1,00086	58,34	1,00124	46,91	61,82
32	57,61	1,00083	58,00	1,00120	33,93	95,75

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = $\pm 1,41$ pcm.

Tabela 3.24 - Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de aço carbono. Metodologia explícita 1

Número de Chapas	Posição Crítica		Posição Anterior		$\Delta\rho^{(b)}$ (pcm)	$\rho^{(b)}$ (pcm)
	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$		
0	58,00	1,00035	-	-	-	-
1	60,44	1,00044	58,00	0,99801	-234,38	-234,38
2	61,57	1,00058	60,44	0,99949	-95,01	-329,39
3	61,90	1,00052	61,57	1,00020	-37,97	-367,36
4	62,05	1,00059	61,90	1,00045	-6,99	-374,35
5	62,03	1,00059	62,05	1,00063	4,00	-370,36
6	62,06	1,00080	62,03	1,00078	18,97	-351,39
7	61,71	1,00068	62,06	1,00101	20,96	-330,42
8	61,54	1,00071	61,71	1,00089	20,97	-309,46
9	61,21	1,00071	61,54	1,00099	27,95	-281,50
11	60,79	1,00075	61,21	1,00118	46,91	-234,59
13	60,28	1,00076	60,79	1,00125	49,90	-184,69
15	59,82	1,00075	60,28	1,00122	45,91	-138,78
18	59,30	1,00084	59,82	1,00134	58,88	-79,91
21	58,77	1,00081	59,30	1,00135	50,89	-29,02
24	58,34	1,00078	58,77	1,00126	44,91	15,89
28	58,00	1,00092	58,34	1,00125	46,90	62,79
32	57,61	1,00086	58,00	1,00123	30,93	93,73

Fonte: autor da tese.

(a) Incerteza = $\pm 0,00001$.

(b) Incerteza = $\pm 1,41$ pcm.

Na Figura 3.4 são mostrados, na forma de gráfico, os valores experimentais e calculados da reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01, quando da inserção de chapas de aço carbono na sua face oeste. Neste caso, observou-se que as duas metodologias adotadas são similares.

Figura 3.4 – Gráfico comparativo entre a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 experimental e calculada em função do número de chapas de aço carbono justapostas na sua face oeste.

Fonte: autor da tese.

As Tabelas 3.25 e 3.26 apresentam os desvios entre os valores calculados e os medidos para a reatividade inserida devido à inserção de chapas de aço carbono na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01, considerando-se as metodologias de cálculo homogênea e explícita 1; respectivamente. Pode ser observado que para as duas metodologias adotadas, com exceção de poucos casos, os resultados para ρ ficaram dentro do intervalo de incerteza 3σ . O mesmo comportamento já não ocorreu quando do cálculo de $\Delta\rho$.

Tabela 3.25 - Diferença percentual para as chapas refletoras de aço carbono.
Metodologia homogênea

Número de Chapas	$\Delta\rho$ (pcm)		(C-E)/E (%)	ρ (pcm)		(C-E)/E (%)
	MCNP-5 ^(b)			MCNP-5 ^(b)		
	Experimental	ENDF/B-VI I.0		Experimental ^(a)	ENDF/B-VI I.0	
1	-226,22 $\pm$ 7,03 ^(a)	-234,38	3,61 $\pm$ 5,44	-226,22 $\pm$ 7,03	-234,38	3,61 $\pm$ 5,44
2	-103,12 $\pm$ 0,84	-94,01	-8,84 $\pm$ 1,37	-328,28 $\pm$ 10,94	-328,39	0,03 $\pm$ 5,76
3	-30,16 $\pm$ 0,52	-36,97	22,60 $\pm$ 3,22	-357,68 $\pm$ 11,64	-365,36	2,15 $\pm$ 5,67
4	-14,04 $\pm$ 0,47	-9,99	-28,86 $\pm$ 5,29	-372,96 $\pm$ 11,54	-375,35	0,64 $\pm$ 5,36
5	1,76 $\pm$ 0,43	6,99	297,30 $\pm$ 103,01	-371,65 $\pm$ 11,96	-368,36	-0,89 $\pm$ 5,55
6	-3,23 $\pm$ 0,43	15,98	-594,42 $\pm$ 84,32	-372,26 $\pm$ 13,30	-352,38	-5,34 $\pm$ 6,07
7	31,13 $\pm$ 0,43	21,96	-29,46 $\pm$ 2,18	-342,23 $\pm$ 13,90	-330,42	-3,45 $\pm$ 6,94
8	15,12 $\pm$ 0,45	23,96	58,49 $\pm$ 6,31	-325,54 $\pm$ 10,59	-306,46	-5,86 $\pm$ 5,52
9	30,99 $\pm$ 0,42	19,97	-35,57 $\pm$ 2,10	-295,21 $\pm$ 9,27	-286,49	-2,95 $\pm$ 5,37
11	39,54 $\pm$ 0,42	48,91	23,70 $\pm$ 1,99	-258,80 $\pm$ 9,22	-237,58	-8,20 $\pm$ 5,99
13	46,70 $\pm$ 0,42	48,90	4,71 $\pm$ 1,58	-212,79 $\pm$ 7,47	-188,67	-11,33 $\pm$ 5,85
15	43,25 $\pm$ 0,41	46,91	8,46 $\pm$ 1,69	-168,65 $\pm$ 5,98	-141,76	-15,94 $\pm$ 5,82
18	49,54 $\pm$ 0,44	60,88	22,89 $\pm$ 1,66	-119,11 $\pm$ 4,96	-80,89	-32,09 $\pm$ 6,52
21	50,53 $\pm$ 0,42	52,89	4,67 $\pm$ 1,46	-69,51 $\pm$ 4,80	-28,00	-59,72 $\pm$ 10,13
24	41,90 $\pm$ 0,42	42,91	2,41 $\pm$ 1,75	-28,14 $\pm$ 4,71	14,91	-152,99 $\pm$ 25,21
28	34,01 $\pm$ 0,47	46,91	-28,95 $\pm$ 2,73	5,14 $\pm$ 4,71	61,82	1101,83 $\pm$ 1108,04
32	37,22 $\pm$ 0,42	33,93	-8,84 $\pm$ 1,89	42,72 $\pm$ 4,70	95,75	124,12 $\pm$ 29,13

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = $\pm$ 1,41 pcm.

Tabela 3.26 - Diferença percentual para as chapas refletoras de aço carbono.
Metodologia explícita 1

Número de Chapa	$\Delta\rho$ (pcm)			(C-E)/E (%)	ρ (pcm)			(C-E)/E (%)
	Experimental	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0			Experimental ^(a)	MCNP-5 ^(a) ENDF/B-VII.0		
1	-226,22 $\pm$ 7,03 ^(a)	-234,38	3,61 $\pm$ 5,44		-226,22 $\pm$ 7,03	-234,38	3,61 $\pm$ 5,44	
2	-103,12 $\pm$ 0,84	-95,01	-7,87 $\pm$ 1,37		-328,28 $\pm$ 10,94	-329,39	0,34 $\pm$ 5,77	
3	-30,16 $\pm$ 0,52	-37,97	25,92 $\pm$ 3,26		-357,68 $\pm$ 11,64	-367,36	2,71 $\pm$ 5,68	
4	-14,04 $\pm$ 0,47	-6,99	-50,20 $\pm$ 5,00		-372,96 $\pm$ 11,54	-374,35	0,37 $\pm$ 5,36	
5	1,76 $\pm$ 0,43	4,00	127,03 $\pm$ 65,30		-371,65 $\pm$ 11,96	-370,36	-0,35 $\pm$ 5,56	
6	-3,23 $\pm$ 0,43	18,97	-687,11 $\pm$ 99,02		-372,26 $\pm$ 13,30	-351,39	-5,61 $\pm$ 6,06	
7	31,13 $\pm$ 0,43	20,96	-32,67 $\pm$ 2,16		-342,23 $\pm$ 13,90	-330,42	-3,45 $\pm$ 6,94	
8	15,12 $\pm$ 0,45	20,97	38,67 $\pm$ 5,89		-325,54 $\pm$ 10,59	-309,46	-4,94 $\pm$ 5,53	
9	30,99 $\pm$ 0,42	27,95	-9,80 $\pm$ 2,27		-295,21 $\pm$ 9,27	-281,50	-4,64 $\pm$ 5,35	
11	39,54 $\pm$ 0,42	46,91	18,64 $\pm$ 1,96		-258,80 $\pm$ 9,22	-234,59	-9,35 $\pm$ 5,97	
13	46,70 $\pm$ 0,42	49,90	6,85 $\pm$ 1,59		-212,79 $\pm$ 7,47	-184,69	-13,20 $\pm$ 5,81	
15	43,25 $\pm$ 0,41	45,91	6,15 $\pm$ 1,67		-168,65 $\pm$ 5,98	-138,78	-17,71 $\pm$ 5,79	
18	49,54 $\pm$ 0,44	58,88	18,86 $\pm$ 1,64		-119,11 $\pm$ 4,96	-79,91	-32,92 $\pm$ 6,50	
21	50,53 $\pm$ 0,42	50,89	0,72 $\pm$ 1,44		-69,51 $\pm$ 4,80	-29,02	-58,25 $\pm$ 10,15	
24	41,90 $\pm$ 0,42	44,91	7,17 $\pm$ 1,78		-28,14 $\pm$ 4,71	15,89	-156,46 $\pm$ 25,42	
28	34,01 $\pm$ 0,47	46,90	37,91 $\pm$ 2,73		5,14 $\pm$ 4,71	62,79	1120,78 $\pm$ 1125,28	
32	37,22 $\pm$ 0,42	30,93	-16,90 $\pm$ 1,85		42,72 $\pm$ 4,70	93,73	119,39 $\pm$ 28,69	

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = $\pm$ 1,41 pcm.

3.2.3 Chapas refletoras de aço inoxidável

Na Tabela 3.27 são apresentados os fatores de multiplicação efetivos de nêutrons obtidos com o código MCNP, para o núcleo do reator IPEN/MB-01, em função do número de chapas de aço inoxidável inseridas na sua face oeste; bem como as correspondentes reatividades inseridas, considerando a metodologia explícita 1. Como mencionado anteriormente, a reatividade total (ρ) inserida no núcleo, para um número específico de chapas, foi obtida somando-se as reatividades parciais até esse ponto.

Tabela 3.27 - Fatores de multiplicação efetivos e reatividades inseridas calculadas com o código MCNP-5 para as chapas refletoras de aço inoxidável.
Metodologia explícita 1

Número de Chapas	Posição Crítica		Posição Anterior		$\Delta\rho^{(b)}$ (pcm)	$\rho^{(b)}$ (pcm)
	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$	BC1=BC2 (%)	$k_{eff}^{(a)}$		
0	58,07	1,00044	-	-	-	-
1	60,70	1,00056	58,07	0,99793	-251,41	-251,41
2	61,72	1,00072	60,70	0,99966	-89,98	-341,39
3	62,17	1,00086	61,72	1,00042	-29,97	-371,36
4	62,23	1,00089	62,17	1,00085	-1,00	-373,35
5	62,26	1,00103	62,23	1,00103	13,97	-358,38
6	62,02	1,00107	62,26	1,00128	24,94	-333,44
7	61,84	1,00117	62,02	1,00134	26,94	-306,50
8	61,51	1,00116	61,84	1,00145	27,93	-278,58
9	61,22	1,00117	61,51	1,00146	29,92	-248,65
11	60,61	1,00124	61,22	1,00179	61,82	-186,84
13	59,99	1,00121	60,61	1,00186	61,81	-125,03
15	59,42	1,00125	59,99	1,00183	61,81	-63,22
18	58,71	1,00134	59,42	1,00201	75,75	12,53
21	58,04	1,00131	58,71	1,00200	65,78	78,31
24	57,54	1,00137	58,04	1,00190	58,81	137,13
28	56,95	1,00143	57,54	1,00202	64,78	201,91
32	56,45	1,00141	56,95	1,00193	49,83	251,74

Fonte: autor da tese.

(a) Incerteza = $\pm 0,00001$.

(b) Incerteza = $\pm 1,41$ pcm.

Na Figura 3.5 são mostrados, na forma de gráfico, os valores experimentais e calculados da reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01, quando da inserção de chapas de aço inoxidável na sua face oeste.

Figura 3.5 – Gráfico comparativo entre a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 experimental e calculada em função do número de chapas de aço inoxidável justapostas na sua face oeste.

Fonte: autor da tese.

Na Tabela 3.28 são apresentados os desvios entre os valores calculados e os medidos para a reatividade inserida devido à inserção de chapas de aço inoxidável, na face oeste do núcleo do reator IPEN/MB-01, considerando-se a metodologia de cálculo explícita 1. No caso das chapas de aço inoxidável, pode ser observado que, praticamente, 60% das simulações computacionais da reatividade total inserida ficaram fora do intervalo 3σ e 50% das simulações computacionais da reatividade entre casos sucessivos ficaram dentro do intervalo 3σ .

Tabela 3.28 - Diferença percentual para as chapas refletoras de aço inoxidável.
Metodologia explícita 1

Número de Chapas	$\Delta\rho$ (pcm)		(C-E)/E (%)	ρ (pcm)		(C-E)/E (%)
	Experimental	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0		Experimental ^(a)	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0	
1	-243,80 ± 6,63 ^(a)	-251,41	3,12 ± 2,86	-243,80 ± 6,63	-251,41	3,12 ± 2,86
2	-93,03 ± 0,84	-89,98	-3,28 ± 1,75	-334,96 ± 8,57	-341,39	1,92 ± 2,64
3	-39,91 ± 0,49	-29,97	-24,92 ± 3,65	-378,06 ± 10,81	-371,36	-1,77 ± 2,83
4	-5,57 ± 0,45	-1,00	-82,07 ± 25,37	-382,52 ± 11,04	-373,35	-2,66 ± 2,83
5	-2,64 ± 0,47	13,97	-628,71 ± 108,11	-388,59 ± 13,58	-358,38	-7,77 ± 3,24
6	21,29 ± 0,48	24,94	17,13 ± 7,13	-363,00 ± 12,00	-333,44	-8,14 ± 3,06
7	16,55 ± 0,46	26,94	62,76 ± 9,65	-347,92 ± 10,85	-306,50	-11,90 ± 2,78
8	29,48 ± 0,42	27,93	-5,28 ± 4,97	-322,62 ± 12,62	-278,58	-13,65 ± 3,41
9	26,44 ± 0,44	29,92	13,18 ± 5,66	-292,33 ± 8,67	-248,65	-14,94 ± 2,57
11	57,38 ± 0,41	61,82	7,74 ± 2,58	-240,87 ± 9,27	-186,84	-22,43 ± 3,04
13	57,56 ± 0,41	61,81	7,39 ± 2,57	-182,24 ± 7,11	-125,03	-31,39 ± 2,79
15	54,08 ± 0,44	61,81	14,29 ± 2,77	-127,74 ± 5,58	-63,22	-50,51 ± 2,43
18	67,66 ± 0,40	75,75	11,95 ± 2,19	-58,77 ± 4,84	12,53	-121,33 ± 2,97
21	65,01 ± 0,41	65,78	1,18 ± 2,26	7,43 ± 4,70	78,31	953,72 ± 666,62
24	48,29 ± 0,44	58,81	21,78 ± 3,12	56,67 ± 4,70	137,13	141,97 ± 20,22
28	58,05 ± 0,43	64,78	11,59 ± 2,58	115,36 ± 4,73	201,91	75,03 ± 7,28
32	51,19 ± 0,44	49,83	-2,66 ± 2,88	168,29 ± 4,95	251,74	49,59 ± 4,48

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = ± 1,41 pcm.

3.2.4 Chapas refletoras de aço inoxidável, aço carbono e níquel – metodologia explícita 1

Na Figura 3.6 são mostrados, na forma de gráfico, os valores medidos e calculados (metodologia explícita 1; isto é, todas as chapas foram tratadas explicitamente considerando-se um mesmo *gap* de água médio entre elas) da reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 para os três tipos de refletores de material pesado utilizados neste trabalho. Tanto os valores medidos como os calculados mostraram a competição entre o efeito da captura dos nêutrons térmicos no refletor de material pesado e o efeito do espalhamento de nêutrons rápidos para o núcleo, à medida que a espessura das chapas aumenta. Observou-se, também, que no caso do aço carbono e níquel, até a inserção de 13 chapas, os valores calculados da reatividade inserida no núcleo mostraram uma boa concordância com os valores experimentais; isso já não ocorreu quando a reflexão de nêutrons rápidos domina o fenômeno físico do transporte de nêutrons. No caso do aço inoxidável esta discrepância iniciou-se após a inserção da quinta chapa.

Figura 3.6 – Gráfico comparativo entre a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 experimental e calculada em função do número de chapas de material refletor justapostas na sua face oeste.

Fonte: autor da tese.

Na Figura 3.7 são mostrados, na forma de gráfico, os valores de diferença percentual $((C-E)/E)$ para a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01, considerando os três tipos de refletores utilizados neste trabalho; evidenciando, assim, uma concordância melhor entre os valores calculados e os experimentais quando da utilização de chapas refletoras de níquel.

Figura 3.7 – Gráfico da diferença percentual para a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 em função do número de chapas de material refletor justapostas na sua face oeste.

Fonte: autor da tese.

3.2.5 Lei de espalhamento de nêutrons térmicos do hidrogênio ligado à água $S(\alpha, \beta)$

Com o objetivo de verificar o impacto de outros modelos de espalhamento térmico do hidrogênio ligado à água para as simulações computacionais dos experimentos realizados, que não a oriunda da biblioteca ENDF/B-VII.0, foram considerados três modelos: a lei de espalhamento térmica da biblioteca de dados avaliados ENDF/B-VI.0; a gerada pelo CAB (Centro Atômico Bariloche, Argentina) e a calculada com dados nucleares novos, recentemente concluídos e disponibilizados à comunidade de física de reatores, para o ^{235}U (LEAL, et al., 2016), ^{238}U (SCHILLEBEEKX et al., 2016; KIM et al., 2016) e o ^{16}O (LEAL e IVANOV, 2016). O refletor de níquel foi escolhido para esta avaliação por ter apresentado uma concordância melhor entre os valores experimentais e calculados.

No caso dos dados nucleares novos do ^{235}U , o valor da secção de choque térmica de captura é menor que o da biblioteca ENDF/B-VII (da ordem de 0,64%) e a secção de choque de espalhamento é maior em 7,2%; enquanto a fissão é essencialmente a

mesma em ambas avaliações. A razão captura/ fissão para a ENDF/B e a nova avaliação são 0,1687 e 0,1698, respectivamente.

Quanto ao $S(\alpha, \beta)$ para o hidrogênio ligado na água realizado em Bariloche, as principais diferenças da biblioteca ENDF/B-VII.0 estão na introdução de um modelo de difusão molecular para o movimento translacional e um espectro contínuo de frequência calculado a partir de simulações moleculares dinâmicas (DOS SANTOS, A. e ANDRADE E SILVA, A. S., 2017).

Na Figura 3.8 são mostrados, na forma de gráfico, os valores medidos e calculados da reatividade inserida pelas chapas de níquel no núcleo do reator IPEN/MB-01 (metodologia explícita 1) considerando as quatro leis de espalhamento do hidrogênio ligado na água, mencionadas anteriormente.

Figura 3.8 – Reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01 de acordo com o número de chapas de níquel para diferentes modelos de espalhamento térmico

Fonte: autor da tese.

No caso, tanto os valores medidos como os calculados mostraram a competição entre o efeito da captura dos nêutrons térmicos no refletor de material pesado e o efeito do espalhamento de nêutrons rápidos para o núcleo à medida que a espessura das chapas aumenta. Observou-se, também, que os valores da reatividade inserida no núcleo calculados com $S(\alpha, \beta)$ oriundo da biblioteca ENDF/B-VI apresentaram uma maior discrepância com relação aos valores experimentais do que as demais leis de espalhamento utilizadas; enquanto que os calculados com a lei de espalhamento gerada pelo CAB mostraram uma melhor concordância com os valores experimentais.

Nas Tabelas 3.29 a 3.31 são apresentados os desvios entre os valores calculados e os medidos, para a reatividade inserida no núcleo do reator IPEN/MB-01, devido à inserção das chapas de níquel na sua face oeste, considerando-se as quatro leis de espalhamento do hidrogênio ligado à água, abordadas nesta seção. Da Tabela 3.30 pode ser observado que as incertezas para todas as configurações simuladas computacionalmente com $S(\alpha, \beta)$ gerado em Bariloche ficaram no intervalo 3σ . No caso da lei de espalhamento $S(\alpha, \beta)$ obtida com os dados nucleares novos (^{235}U , ^{238}U , ^{16}O), somente a incerteza para a configuração com 32 chapas ficou fora do intervalo 3σ . Quanto ao $S(\alpha, \beta)$ oriundo da biblioteca de dados nucleares ENDF/B-VI.0, praticamente 50% das configurações calculadas tiveram as incertezas fora do intervalo 3σ .

Tabela 3.29 - Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel considerando $S(\alpha, \beta)$ da biblioteca ENDF/B-VI.0 - Metodologia explícita 1

Número de Chapa	$\Delta\rho$ (pcm)		(C-E)/E (%)	ρ (pcm)		(C-E)/E (%)
	Experimental	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0		Experimental ^(a)	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0	
1	-333,88 ^(a) $\pm$ 11,83	-339,59	1,71 $\pm$ 6,16	-333,88 $\pm$ 11,83	-339,59	1,71 $\pm$ 6,16
2	-70,49 $\pm$ 0,69	-61,89	-12,21 $\pm$ 1,63	-403,61 $\pm$ 15,03	-401,48	-0,53 $\pm$ 6,43
3	-2,36 $\pm$ 0,53	8,89	-477,19 $\pm$ 90,55	-403,64 $\pm$ 14,64	-392,59	-2,74 $\pm$ 6,21
4	32,14 $\pm$ 0,53	29,06	-9,61 $\pm$ 2,76	-374,04 $\pm$ 13,05	-363,53	-2,81 $\pm$ 5,97
5	33,44 $\pm$ 0,52	41,24	23,32 $\pm$ 2,91	-338,23 $\pm$ 10,55	-322,29	-4,71 $\pm$ 5,31
6	43,53 $\pm$ 0,52	46,92	7,78 $\pm$ 2,12	-294,58 $\pm$ 8,76	-275,38	-6,52 $\pm$ 5,03
7	28,56 $\pm$ 0,53	49,81	74,44 $\pm$ 4,16	-267,38 $\pm$ 8,04	-225,57	-15,64 $\pm$ 4,94
8	52,15 $\pm$ 0,54	43,61	-16,38 $\pm$ 1,70	-214,84 $\pm$ 7,18	-181,96	-15,30 $\pm$ 5,50
9	49,40 $\pm$ 0,55	41,32	-16,35 $\pm$ 1,83	-168,21 $\pm$ 6,40	-140,64	-16,39 $\pm$ 6,24
11	79,03 $\pm$ 0,62	83,72	5,92 $\pm$ 1,38	-87,58 $\pm$ 5,80	-56,92	-35,00 $\pm$ 10,28
13	68,58 $\pm$ 0,53	69,48	1,58 $\pm$ 1,34	-19,81 $\pm$ 5,70	-12,74	-164,29 $\pm$ 44,58
15	54,37 $\pm$ 0,52	64,48	18,59 $\pm$ 1,76	34,29 $\pm$ 5,71	77,21	125,16 $\pm$ 44,24
18	81,80 $\pm$ 0,58	76,13	-6,93 $\pm$ 1,20	116,09 $\pm$ 5,70	153,34	32,09 $\pm$ 9,49
21	59,35 $\pm$ 0,53	65,18	9,82 $\pm$ 1,60	175,44 $\pm$ 5,70	218,52	24,56 $\pm$ 6,11
24	50,06 $\pm$ 0,51	57,71	15,28 $\pm$ 1,86	225,50 $\pm$ 5,70	276,23	22,50 $\pm$ 4,72
28	42,36 $\pm$ 0,51	48,52	14,53 $\pm$ 2,19	267,86 $\pm$ 5,71	324,75	21,24 $\pm$ 3,96
32	31,77 $\pm$ 0,52	34,24	7,78 $\pm$ 2,90	299,63 $\pm$ 5,71	358,99	19,81 $\pm$ 3,53

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = $\pm$ 1,41 pcm.

Tabela 3.30 - Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel considerando $S(\alpha, \beta)$ gerado pelo CAB - Metodologia explícita 1

Número de Chapa	$\Delta\rho$ (pcm)		(C-E)/E (%)	ρ (pcm)		(C-E)/E (%)
	Experimental	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0		Experimental ^(a)	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0	
1	-333,88 ^(a) ± 11,83	-351,10	5,16 ± 6,23	-333,88 ± 11,83	-351,10	5,16 ± 6,23
2	-70,49 ± 0,69	-72,74	3,19 ± 1,71	-403,61 ± 15,03	-423,84	5,01 ± 6,55
3	-2,36 ± 0,53	2,89	-222,51 ± 42,00	-403,64 ± 14,64	-420,95	4,29 ± 6,36
4	32,14 ± 0,53	28,76	-10,52 ± 2,75	-374,04 ± 13,05	-392,19	4,85 ± 6,13
5	33,44 ± 0,52	41,21	23,23 ± 2,91	-338,23 ± 10,55	-350,98	3,77 ± 5,46
6	43,53 ± 0,52	44,98	3,33 ± 2,09	-294,58 ± 8,76	-306,00	3,88 ± 5,21
7	28,56 ± 0,53	46,27	62,05 ± 3,99	-267,38 ± 8,04	-259,72	-2,86 ± 5,15
8	52,15 ± 0,54	48,95	-6,14 ± 1,75	-214,84 ± 7,18	-210,78	-1,89 ± 5,74
9	49,40 ± 0,55	42,49	-13,99 ± 1,84	-168,21 ± 6,40	-168,29	0,05 ± 6,58
11	79,03 ± 0,62	81,67	3,34 ± 1,37	-87,58 ± 5,80	-86,62	-1,10 ± 11,41
13	68,58 ± 0,53	70,24	2,42 ± 1,35	-19,81 ± 5,70	-16,38	-17,34 ± 47,02
15	54,37 ± 0,52	61,00	12,19 ± 1,72	34,29 ± 5,71	44,62	30,12 ± 31,95
18	81,80 ± 0,58	78,19	-4,41 ± 1,21	116,09 ± 5,70	122,81	5,79 ± 8,66
21	59,35 ± 0,53	63,29	6,64 ± 1,58	175,44 ± 5,70	186,10	6,08 ± 5,73
24	50,06 ± 0,51	49,57	-0,99 ± 1,76	225,50 ± 5,70	235,66	4,51 ± 4,44
28	42,36 ± 0,51	53,05	25,23 ± 2,27	267,86 ± 5,71	288,71	7,79 ± 3,78
32	31,77 ± 0,52	34,24	7,77 ± 2,90	299,63 ± 5,71	322,95	7,78 ± 3,38

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = ± 1,41 pcm.

Tabela 3.31 - Diferença percentual para as chapas refletoras de níquel considerando $S(\alpha,\beta)$ com os dados novos do ^{235}U , ^{238}U e ^{16}O - Metodologia explícita 1

Número de Chapa	$\Delta\rho$ (pcm)		(C-E)/E (%)	ρ (pcm)		C-E)/E (%)
	Experimental	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0		Experimental ^(a)	MCNP-5 ^(b) ENDF/B-VII.0	
1	-333,88 ^(a) ± 11,83	-347,95	4,22 ± 6,21	-333,88 ± 11,83	-347,95	4,22 ± 6,21
2	-70,49 ± 0,69	-68,09	-3,41 ± 1,67	-403,61 ± 15,03	-416,04	3,08 ± 6,50
3	-2,36 ± 0,53	3,09	-231,01 ± 43,28	-403,64 ± 14,64	-412,95	2,31 ± 6,32
4	32,14 ± 0,53	34,65	7,79 ± 2,93	-374,04 ± 13,05	-378,30	1,14 ± 6,05
5	33,44 ± 0,52	41,52	24,17 ± 2,92	-338,23 ± 10,55	-336,76	-0,43 ± 5,38
6	43,53 ± 0,52	45,79	5,20 ± 2,10	-294,58 ± 8,76	-290,99	-1,22 ± 5,12
7	28,56 ± 0,53	45,99	61,05 ± 3,97	-267,38 ± 8,04	-245,00	-8,37 ± 5,06
8	52,15 ± 0,54	44,28	-15,08 ± 1,70	-214,84 ± 7,18	-200,72	-6,57 ± 5,65
9.	49,40 ± 0,55	45,49	-7,91 ± 1,88	-168,21 ± 6,40	-155,23	-7,71 ± 6,41
11	79,03 ± 0,62	77,72	-1,67 ± 1,35	-87,58 ± 5,80	-77,51	-11,49 ± 11,03
13	68,58 ± 0,53	68,87	0,43 ± 1,34	-19,81 ± 5,70	-8,64	-56,39 ± 42,46
15	54,37 ± 0,52	61,41	12,95 ± 1,73	34,29 ± 5,71	52,77	53,89 ± 34,75
18	81,80 ± 0,58	78,61	-3,89 ± 1,21	116,09 ± 5,70	131,38	13,18 8,88
21	59,35 ± 0,53	62,31	4,99 ± 1,57	175,44 ± 5,70	193,70	10,41 ± 5,82
24	50,06 ± 0,51	53,06	6,01 ± 1,80	225,50 ± 5,70	246,76	9,43 ± 4,51
28	42,36 ± 0,51	51,08	20,56 ± 2,23	267,86 ± 5,71	297,84	11,19 ± 3,83
32	31,77 ± 0,52	38,33	20,65 ± 3,04	299,63 ± 5,71	336,17	12,19 ± 3,43

Fonte: autor da tese.

(a) Foi considerado o *bias* de 5,5 pcm.

(b) Incerteza = ± 1,41 pcm.

4 CONCLUSÕES

Os experimentos de refletores pesados nas instalações do reator de pesquisa IPEN/MB-01 foram realizados com sucesso. As incertezas são bem compreendidas, adequadas e pequenas o suficiente para um experimento de referência (*benchmark*).

Todos os resultados experimentais mostraram claramente a competição entre o efeito da captura de nêutrons térmicos e o efeito da reflexão dos nêutrons rápidos no refletor de material pesado. Inicialmente a reatividade diminui devido à absorção de nêutrons nas chapas de refletor pesado e à medida que o número de chapas aumenta, a reflexão se torna importante e a reatividade do sistema aumenta.

Resultados experimentais inéditos de medidas de reatividade foram obtidos com refletores de níquel colocados na face oeste do reator IPEN/MB-01. No que concerne a esse tipo de experimento não existe experimento similar na literatura internacional ao realizado no reator IPEN/MB-01. Esse aspecto é importantíssimo para o desenvolvimento da geração de reatores térmicos EPR, sendo um candidato em potencial para a aplicação dos resultados obtidos neste trabalho.

Pode-se observar que a metodologia adotada utilizando o código MCNP-5 com a biblioteca de dados avaliados ENDF/B-VII.0 evidenciou os aspectos físicos de absorção e reflexão de nêutrons nas chapas de material refletor considerados; entretanto apresentaram uma discrepância maior quando a reflexão de nêutrons rápidos domina o fenômeno físico do transporte de nêutrons. Além do mais, os valores superestimados dos cálculos para o aço inoxidável podem ser atribuídos às propriedades de reflexão de nêutrons do aço carbono (basicamente ferro) e do níquel. Pode-se salientar, ainda, que embora não se tenha dados experimentais para o cromo, um dos constituintes do aço inoxidável, o que tornaria as comparações aqui descritas mais consistentes, acredita-se que o comportamento deste nuclídeo seria o mesmo que o do aço carbono e o do níquel.

Cabe ressaltar que:

- As simulações computacionais para as posições críticas de barra evidenciaram a aplicabilidade da metodologia de cálculo adotada neste trabalho, tendo em vista que os desvios para os fatores de multiplicação efetivos calculados ficaram abaixo de 100 pcm quando da utilização de chapas refletoras de níquel (Tabelas 3.17 a 3.18) e de aço carbono (Tabelas 3.23 e 3.24); e abaixo de 150 pcm para as chapas de aço inoxidável (Tabela 3.27).
- A maior contribuição na estimativa das incertezas experimentais da reatividade inserida pelas chapas refletoras está associada às incertezas das medidas experimentais dos parâmetros cinéticos do reator IPEN/MB-01 (Tabelas 3.4 a 3.6).

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Quando as chapas de refletores pesados são colocadas na face oeste do reator IPEN/MB-01, inicialmente a água é removida e a moderação dos nêutrons diminui devido à remoção dos elementos leves, como o hidrogênio. Na sequência, a absorção de nêutrons aumenta devido à secção choque de nêutrons térmicos para os refletores de material pesado ser maior do que a da água. Finalmente, a reflexão de nêutrons aumenta à medida que as chapas são inseridas no núcleo do reator como consequência do processo de espalhamento de nêutrons rápidos, uma vez que a secção de choque de espalhamento de nêutrons para estes tipos de refletores é maior do que a da água. Na realidade, o comportamento da reatividade do reator é uma competição desses três efeitos.

Diante dos efeitos citados anteriormente, sugere-se:

- Avaliar o efeito da variação da espessura de água entre a última fileira de varetas combustíveis e a primeira chapa de refletor pesado.
- Repetir os experimentos com chapas mais espessas minimizando, assim, o efeito do *gap* de água entre chapas.
- Estudar outros materiais refletores pesados, como por exemplo: cromo (constituente do aço inoxidável), zircaloy e cobre (material utilizado em reatores rápidos).

Do ponto de vista de obtenção das incertezas experimentais na reatividade, sugere-se elaborar um algoritmo para que as mesmas sejam obtidas na fonte do reatímetro (ANEXO D); uma vez que a maior contribuição no cálculo das incertezas experimentais se deve aos parâmetros cinéticos do reator.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, A. Y.; FANARO, L. C. C.; FUGA, R.; JEREZ, R.; COELHO, P. R. P.; MENDONÇA, A. G.; DOS SANTOS, A.; MOREIRA, J. M. L.; ANGIOLETTO, E.; ANDRADE E SILVA, G. S.; DINIZ, R. Experimento sobre detetores out-of-core no reator IPEN/MB-01. In: XII ENFIR, 15-20 de Outubro, 2000, Rio de Janeiro, RJ. ***Proceedings XII Encontro de Física de Reatores e Termohidráulica***.

BARHEN, J.; RHOTENSTEIN, W.; TAVIV, E. The Hammer Code System. Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, NP-565 (October 1978).

BIERMAN, S. R.; CLAYTON, E. D. Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 and 4.31 wt% ^{235}U -Enriched UO_2 Rods in Water with Steel Reflecting Walls. ***Nuclear Technology***, v. 54, p. 131-144, 1981.

CHADWICK, M. B.; OBLOZINSKY, P.; HERMAN, M.; GREENE, N. M.; McKNIGHT, R. D.; SMITH, D. L.; YOUNG, P. G.; MacFARLANE, R. E.; HALE, G. M.; FRANKLE, S. C.; KAHLER, A. C.; KAWANO, T.; LITTLE, R. C.; MADLAND, D. G.; MOLLER, P.; MOSTELLER, R. D.; PAGE, P. R.; TALOU, P. ... VAN DER MARCK, S. C. ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. ***Nuclear Data Sheets***, v. 107, n. 12, p. 2931-3060, 2006.

DINIZ, R.; DOS SANTOS, A. Experimental Determination of the Decay Constants and Abundances of Delayed Neutrons by Means of Reactor Noise Analysis. ***Nuclear Science and Engineering***, v. 152, p. 125-142, 2006.

DOS SANTOS, A.; FUGA, R.; JEREZ, R.; ABE, A. Y.; FILHO, E. A. A Proposal for Benchmarking ^{235}U Nuclear Data. ***Nuclear Science and Engineering***, v. 137, p. 52-69, 2001.

DOS SANTOS, A.; DINIZ R.; FANARO L. C. C. B.; JEREZ R.; ANDRADE E SILVA G. S.; YAMAGUCHI, M. The experimental determination of the effective delayed neutron parameters: β_{eff} , $\beta_{\text{eff}}/\Lambda$ and Λ of the IPEN/MB-01 reactor. In: PHYSOR-2004, April 25-29, 2004a, Chicago, IL, USA. ***Proceedings of The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments***.

DOS SANTOS, A.; ANDRADE E SILVA, G. S.; FANARO, L. C. C. B.; YAMAGUCHI, M.; JEREZ, R.; FUGA, R.; ABE, A.Y. 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), 2004b.

DOS SANTOS, A.; DINIZ, R. A Noise Analysis Approach for Measuring Effective Delayed Neutron Parameters in the IPEN/MB-01 Reactor. In: ND2004, Sept. 2004, Santa Fe, USA. ***Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology***, v. 769, p. 1397-1400, 2005.

DOS SANTOS, A.; ANDRADE E SILVA, G. S.; FANARO, L. C. C. B.; YAMAGUCHI, M.; JEREZ, R.; ABE, A. Y.; FUGA, R. LEU-COMP-THERM-043 Critical Loading Configurations of the IPEN/MB-01 Reactor with a Heavy SS-304 Reflector. J. Blair Briggs, Ed., International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NSC/DOC (95)03/I, Nuclear Energy Agency, Paris (September Edition), 2008a.

DOS SANTOS, A.; JEREZ, R.; BITELLI, U.; FANARO, L. C. C. B.; ANDRADE E SILVA, G. S.; KURAMOTO, R.; MENDONÇA, A. G.; FUGA, R.; ABE, A. Y.; VAGLIO-GAUDARD, C. Heavy reflector experiment in the IPEN/MB-01 reactor. In: PHYSOR 2008, September 14-19, 2008b, Interlaken, Switzerland. ***Proceedings International Conference on Physics of Reactors "Nuclear Power: A Sustainable Resource"***.

DOS SANTOS, A.; KURAMOTO, R. Y. R.; DINIZ, R.; JEREZ, R.; ANDRADE E SILVA, G. S.; YAMAGUCHI, M. Benchmarks on effective delayed neutron parameters and reactivity: a Brazilian IPEN/MB-01 contribution to the IRPhE project. In: PHYSOR 2008, September 14-19, 2008c, Interlaken, Switzerland. ***Proceedings International Conference on Reactors Physics, Nuclear Power: A Sustainable Resource***.

DOS SANTOS, A.; ANDRADE E SILVA, G. S.; FANARO, L. C. C. B.; YAMAGUCHI, M.; JEREZ, R.; DINIZ, R.; KURAMOTO, R.; YOICHI R. LWR-COEF-KIN-RESR-001. Reactor Physics Experiments in the IPEN/MB-01 Research Reactor Facility. J. Blair Briggs, Ed., International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, Ed. Paris: Nuclear Energy Agency (NEA DATA BANK), pp. 1-142, 2009.

DOS SANTOS, A.; ANDRADE E SILVA, G. S.; FANARO, L. C. C. B.; YAMAGUCHI, M.; JEREZ, R.; JEREZ, R.; DINIZ, R.; CARNEIRO, A. L. G.; KURAMOTO, R.; YOICHI R.; MENDONÇA, A. G.; FUGA, R.; MAEDA, R. M. ; MURA, L. F. L. LWR-RESR-001. CRIT-BUCK-SPEC-REAC-COEF-KIN-RRATE_POWDIS Reactor Physics Experiments in the IPEN/MB-01 Research Reactor Facility. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, Ed. Paris: Nuclear Energy Agency (NEA DATA BANK), pp. 1-517, 2013.

DOS SANTOS, A.; ANDRADE E SILVA, G. S.; MURA, L. F.; FUGA, R.; JEREZ, R.; MENDONÇA, A. G. Three Heavy Reflector Experiments in the IPEN/MB-01 Reactor: Stainless Steel, Carbon Steel, and Nickel. *Nuclear Data Sheet*, v. 118, p. 568-570, 2014.

DOS SANTOS, A.; ANDRADE E SILVA, G. S.. The Impact of the New Nuclear Data Libraries on the Isothermal Reactivity Coefficient Determination. In: M&C 2017, April 16-20, 2017, Jeju, Korea. *Proceedings International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering*.

EICH, W. J.; WILLIAMS, M. L.; PENG, C-M. Determination of Effective Reflector and Baffle/Reflector Constants for Few-Group Diffusion Calculations. *Nuclear Science and Engineering*, v. 90, p. 127-139, 1985.

FOWLER, T. B.; VONDY, D. R.; CUNNINGHAM, D. G. W. Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION. ORNL-2496, Version 2, 1971.

KIM, H. I.; PARADELA, C.; SIRAKOV, I.; BECKER, B.; CAPOTE, R.; GUNSING, F.; KIM, G. N.; KOPECKY, S.; LAMPOUDIS, C.; LEE, Y. O.; MASSARCZK, R.; MOENS, A.; MOXON, M.; PRONYAEV, V. G., SCHILLEBEECKX, P.; WYNANTS, R. Neutron capture cross section measurements for ^{238}U in resonance region at GELINA. *European. Physical Journal A*, 52:170, 2016.

LEAL, L.; Ivanov, E. A New R-Matrix Evaluation for ^{16}O from Thermal to 6 MeV. In: PHYSOR 2016, Sun Valley, Idaho, USA, May 1-5, 2016. *Proceedings International Conference on Reactors Physics, Nuclear Power: Unifying Theory and Experiments in the 21st Century*.

LEAL, L.; NOGUERE, G.; PARADELA, C.; DURAN, I.; TASSAN-GOT, L.; DANON, Y.; JANDEL, M. Evaluation of the ^{235}U resonance parameters to fit the standard recommended values. In: ND2016, September 11-16, Bruges, Belgium, 2016. *Proceedings International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*.

MURAKAMI, K.; SUZAKI, T.; HIROSE, H. Measurement of reactivity effect for iron plate reflector in light-water moderated low enriched UO_2 lattices. JAERI-M 83-100, 1983.

SANTAMARINA, A.; VAGLIO, C.; BLAISE, P.; KLEIN, J.; HUOT, N.; LITAIZE, O.; THIOLLAT, N.; VIDAL, J. The PERLE experiment for the qualification of PWR heavy reflectors. In: PHYSOR 2008, September 14-19, 2008, Interlaken, Switzerland. *Proceedings International Conference on Reactors Physics "Nuclear Power: A Sustainable Resource"*.

SARGENI, A.; BURN, K. W.; BRUNA, G. B. The impact of heavy reflectors on Power distributions in large PWR reactor cores. *Annals of Nuclear Energy*. v. 94, p. 566-575, 2016.

SCHILLEBEEKX, P.; ARCHIER, P.; BECHER, B.; CABELLOS, R.; CAPOTE, R.; DE SAINT JEAN, C.; HEYSE, J.; KIM, H. I.; KIN DO, H.; KOPECKY, S.; LEE, Y.-O.; NOGUERE, G.; PARADELA, C.; SIRAKOV, I.; PRONYAEV, V.; TRKOV, A.; ZEROVNIK, G. Evaluation of neutron induced reactions for U238 in the resonance region. In: ND2016, September 11-16, Bruges, Belgium, 2016. *Proceedings International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*.

TAHARA, Y.; SEKIMOTO, H. Verification of Cross-sections based on Reactivity Effect of Iron Reflector in LWR Cores. *Journal of Nuclear Science and Technology*, p. 967-970, 2002. Supplement 2.

TAHARA, Y.; SEKIMOTO, H.; MIYOSHI, Y. Reactivity Effect of Iron Reflector in LWR Cores. *Journal of Nuclear Science and Technology*, v. 38, n. 2, p. 102-111, 2001.

VAGLIO-GAUDARD, C.; SANTAMARINA, A.; BLAISE, P.; LITAIZE, O.; LYOUSSE, A.; NOGUÈRE, G.; RUGGIERI, J. M.; VIDAL, J. F. Interpretation of PERLE Experiment for the Validation of Iron Nuclear Data Using Monte Carlo Calculations. *Nuclear Science and Engineering*, v. 166, p. 89-106, 2010.

X-5 Monte Carlo Team, 2003. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. In: LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory, USA.

ANEXO A - O reator IPEN/MB-01

A.1 Introdução

O reator de pesquisa IPEN/MB-01 é uma instalação nuclear de potência zero, genuinamente brasileiro, concebido por pesquisadores e engenheiros do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) e da antiga COPESP (Coordenadoria para Projetos Especiais), atual CTMSP (Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo), financiado e construído pela Marinha do Brasil. Na Figura A.1 é mostrada uma vista aérea do reator IPEN/MB-01.

Figura A.1 - Vista aérea do reator nuclear IPEN/MB-01

Fonte: Disponível em: <http://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.phd?secao_id=723>. Acesso em: 1 set. 2017.

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 sua operação inicial.

O reator IPEN/MB-01 atingiu a 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; desde então é utilizado em pesquisa básica de física de reatores e na formação de pesquisadores experimentais. Foi especialmente projetado para a medida de uma grande variedade de parâmetros de física de reatores. Estes parâmetros são utilizados como dados experimentais padrões (*benchmarks*) para se verificar metodologias de cálculos e bibliotecas de dados nucleares comumente utilizadas na área de física de reatores.

O reator IPEN/MB-01 é uma instalação nuclear que permite a simulação de todas as características nucleares de um reator de grande porte, sem que haja a necessidade da construção de um complexo sistema de remoção de calor. Esse tipo de reator é conhecido mundialmente como reator de potência zero ou unidade crítica, sendo no caso do IPEN/MB-01, projetado para operar a uma potência máxima de 100 W. Esses reatores representam uma ferramenta básica, que permite aos pesquisadores estudarem 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 da instalação.

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

Na Figura A.2 são mostrados detalhes do núcleo do reator. A configuração padrão do conjunto crítico tem a forma de paralelepípedo com dimensões ativas de 39 x 42 x 54,84 cm, sendo constituído de um arranjo de 28x26 varetas revestidas de aço inoxidável (SS-304); das quais 680 são varetas combustíveis de UO_2 com enriquecimento de 4,3486%, e 48 são tubos guias destinados à inserção das varetas de controle/segurança, responsáveis pelo controle da reação em cadeia e desligamento do reator. Esta configuração possui um excesso de reatividade de aproximadamente 2.415 pcm e todo este conjunto está dentro de um tanque de água leve.

Figura A.2 - Alguns detalhes do núcleo do reator IPEN/MB-01

Fonte: DOS SANTOS et al., 2013.

A potência máxima de operação é 100 W e o controle do reator é feito mediante duas barras de controle diagonalmente distribuídas, sendo que cada barra de controle consiste de 12 varetas de Ag-In-Cd. As barras de segurança, que são compostas por 12 varetas de B_4C , também estão distribuídas diagonalmente, entretanto, estas ficam totalmente retiradas durante a operação do reator. O espaçamento de 15 mm entre as varetas combustíveis (*pitch*) do reator IPEN/MB-01 foi definido para a condição de moderação ótima, ou seja, k_∞ máximo.

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

A.2.1 O tanque moderador e periféricos

O tanque moderador (Figura A.3) é um cilindro de aço inoxidável (SS-304) com espessura de 8,5 mm, aberto no topo, medindo 1.830 mm de diâmetro externo e 2.750

mm de altura. Este tanque possui duas válvulas que permitem a remoção rápida da água de seu interior (~ 5 s). Utiliza-se água leve desmineralizada 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.

Figura A.3 - Diagrama esquemático do tanque moderador do reator IPEN/MB-01 (axial)

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

A.2.2 Placas espaçadoras

O reator IPEN/MB-01 possui 3 placas espaçadoras (Figura A.4), 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 medindo $588 \pm 0,5$ mm. A placa matriz tem $22 \pm 0,1$ mm de espessura e consiste de um arranjo quadrado de 30×30 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 Figura A.5 são mostrados 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 30x30 refere-se ao número máximo de varetas de combustível e de controle/segurança que podem ser acomodadas no núcleo. Outra designação, tal como arranjo 28x26, encontrada neste anexo refere-se à distribuição de varetas no núcleo utilizadas nos experimentos do presente trabalho.

As placas espaçadoras intermediária e superior têm espessuras de $10,5 \pm 0,1$ mm (valor medido) e $20,0 \pm 0,1$ mm, respectivamente. 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 A.4 - Diagrama esquemático das placas matriz e espaçadoras e as cotas das varetas combustíveis e de controle/segurança do reator IPEN/MB-01

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

Figura A.5 - Diagrama esquemático das cavidades e furos da placa matriz do reator IPEN/MB-01

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. Todas estas medições foram efetuadas com uma máquina do tipo mesa de medida tridimensional. 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).

Tabela A.1 - Dados geométricos médios das placas espaçadoras do reator IPEN/MB-01, baseados nos dados de fabricação

Quantidade	Placa espaçadora	Valor médio (mm)	Desvio padrão [*] (mm)
Distância entre posições (<i>pitch</i>)	Superior	15,000	0,018
	Intermediária	14,999	0,011
	Matriz	14,999	0,023
Diâmetro do furo para 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 (mm)	Matriz	-0,057	0,046

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

(*) $\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \left(X_k - \bar{X} \right)^2}$, onde n é o número de medidas, X_k é o valor da k -ésima medida e $\bar{X}$ é o valor médio.

A.2.3 Vareta combustível

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, superior e inferior (SS-304). O número total de 705 varetas combustíveis foi fabricado para o reator IPEN/MB-01. Na Figura A.6 são mostradas 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 por meio delas foram realizadas análises.

Mediante a 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 (Tabela A.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.

Figura A.6 - Diagrama esquemático das especificações da vareta combustível do reator IPEN/MB-01

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

Tabela A.2 - Dados geométricos médios das varetas combustíveis do reator IPEN/MB-01 e respectivos desvios padrões baseados nos dados de fabricação

Quantidade	Valor médio	Desvio padrão
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	0,0048
Altura ativa do combustível (mm)	548,400	3,544
Massa de UO_2 por vareta combustível (g)	315,912	2,386
Altura espaçadora (mm)	38,60	0,05
Diâmetro da pastilha de Al_2O_3 (mm)	0,8470	0,0037
Altura da alumina inferior (mm)	90,28	0,09

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

A.2.4 Varetas de controle, segurança e tubo guia

Cada uma das barras de controle e de segurança é composta por 12 varetas agrupadas e sustentadas por um mecanismo de controle acima do tanque, conforme ilustrado na Figura A.7. As barras 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 as barras de segurança são completamente retiradas do núcleo ativo.

As dimensões da vareta absorvedora são apresentadas na Figura A.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. 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 e saída da água durante o enchimento e esvaziamento do tanque; respectivamente.

Figura A.7 – Mecanismo de controle do reator IPEN/MB-01

Fonte: DOS SANTOS et al., 2004b.

Figura A.8 - Diagrama esquemático das varetas absorvedoras do reator IPEN/MB-01

Desenho fora de escala
Dimensões em mm

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

O sistema de controle do reator IPEN/MB-01 é definido de modo que os posicionamentos das barras de controle no núcleo são dados com base na 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 absorvedora das varetas de controle. Por exemplo, se as varetas de controle estão totalmente inseridas a porcentagem de retirada é zero; isto ocorre quando a parte inferior das varetas de controle (excluindo os tampões de fundo) está alinhada com a parte inferior da região do combustível. 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 absorvedora permaneça dentro do núcleo ativo; ou seja, está localizada a 54,6 cm da extremidade inferior do comprimento ativo do combustível.

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

As barras de segurança basicamente seguem o mesmo padrão, neste caso, por critério de projeto, estas barras são mantidas retiradas 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.

A.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 Tabela A.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.

Tabela A.3 - Composição do aço inoxidável do encamisamento do reator IPEN/MB-01 (% massa)

Elemento	Fabricação	OFICON IPEN		Valor
	PROSIT	Amostra (1)	Amostra (2)	Recomendado
C	0,020	0,0323	0,0326	$0,0280 \pm 0,0070$
Mn	1,80	1,58	1,68	$1,6900 \pm 0,1100$
P	0,04	0,018	0,020	$0,0260 \pm 0,0120$
S	0,007	0,0135	0,0111	$0,0105 \pm 0,0033$
Si	0,390	0,350	0,460	$0,4000 \pm 0,0560$
Ni	10,13	9,90	10,10	$10,0400 \pm 0,1300$
Cr	18,52	18,10	18,40	$18,3400 \pm 0,2200$
Co	-	0,21	0,22	$0,2150 \pm 0,0070$
Mo	-	0,16	0,18	$0,1700 \pm 0,0100$
Fe ^(a)	69,093	69,6362	68,8963	$69,0805 \pm 0,2844$

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

(a) O Fe é obtido do balanço de massa e sua incerteza é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados da incerteza de cada componente.

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

Tabela A.4 - Características dos combustíveis do reator IPEN/MB-01, por lote

Lote	Varetas no núcleo	Massa de U (g)	Massa de ²³⁵ U (g)	Enriquecimento (massa %)
1	90	25.083,62	1.091,11	$4,350 \pm 0,003$
2	88	24.525,88	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	$4,353 \pm 0,013$
7	85	23.633,95	1.030,20	$4,359 \pm 0,001$
8	60	16.617,60	721,20	$4,340 \pm 0,004$

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2008a

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:

$$\bar{\varepsilon} = f_1\varepsilon_1 + f_2\varepsilon_2 + f_3\varepsilon_3 + \dots + f_8\varepsilon_8$$

na qual 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 de acordo com a equação:

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

na qual somente é considerada a incerteza no enriquecimento do ^{235}U no lote (Tabela A.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 Tabela A.5. Todas as composições, exceto a quantidade de ^{234}U no combustível, advêm da análise química detalhada realizada pelo IPEN. As incertezas são os 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 ± 2.386 g por vareta combustível (Tabela A.2). A densidade média de UO_2 foi calculada por meio da equação:

$$\rho_{\text{UO}_2} = \frac{4M}{\pi D^2 L},$$

na qual 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:

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

De acordo com a Tabela A.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, $\rho_{UO_2} = 10.1771 \pm 0.1013$ 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). Não foram medidas as densidades para as placas espaçadoras.

Tabela A.5 - Composição dos materiais do reator IPEN/MB-01 Densidade

(Continua)

Material	Densidade (g/cm ³)	Nuclídeos	Fração em massa (1 σ) ^(c)
Combustível UO₂ ^(a)		²³⁴ U	0,000361 $\pm$ 0,000036
Enriquecimento: 4,3486 %		²³⁵ U	0,038319 $\pm$ 0,000019
Fração total de urânio:		²³⁸ U	0,842565 $\pm$ 0,000019
88,125 $\pm$ 0,023 %		O	0,118740 $\pm$ 0,00003
Composição Isotópica do urânio	10,1771 ^(b) $\pm$ 0,1013	Al	0,000024
(peso%):		Mg	0,000017
²³⁴ U = 0,041 $\pm$ 0,004		Fe	0,000037
²³⁵ U = 4,3486 $\pm$ 0,0021		B	0,0000002
²³⁸ U = 95,6104 $\pm$ 0,0021		Mo	0,000002
		C	0,00028 $\pm$ 0,00007
		Mn	0,0169 $\pm$ 0,0011
		P	0,00026 $\pm$ 0,00012
		S	0,000105 $\pm$ 0,000033
Encamisamento do combustível	7,9207 $\pm$ 0,0005	Si	0,00400 $\pm$ 0,00056
SS-304		Ni	0,1004 $\pm$ 0,0013
		Cr	0,1834 $\pm$ 0,0022
		Co	0,00215 $\pm$ 0,00007
		Mo	0,0017 $\pm$ 0,0001
		Fe	0,690805 $\pm$ 0,002844

Tabela A.5 - Composição dos materiais do reator IPEN/MB-01

(Continuação)			
Material	Densidade (g/cm ³)	Nuclídeos	Fração em massa (1 σ) ^(c)
Alumina (Al₂O₃) Balanço é Al₂O₃ (0.9989)	3,792 $\pm$ 0,007	B	<0,0000002
		Fe	0,0007
		Cr	0,0003
		Ni	0,0001
Absorvedor da vareta de controle Liga de Ag-In-Cd	10,007 $\pm$ 0,004	Ag	0,7934 $\pm$ 0,0015
		In	0,1496 $\pm$ 0,0014
		Cd	0,0483 $\pm$ 0,001
		C	0,003
		S	0,001
		O	0,0047
Absorvedor da vareta de segurança Carbeto de boro (B₄C)	1,45 $\pm$ 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	0,00510
		Ni	0,09430
		Cr	0,18210
		Mo	0,00060
		Fe	0,70291
Tubo espaçador da vareta combustível SS-304	8,0040 $\pm$ 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 de segurança SS-304	7,7150 $\pm$ 0,0005	Fe	0,68447
		C	0,00023
		Cr	0,18240
		Ni	0,11500
		Mn	0,0136
		P	0,0003
		Si	0,0040

Tabela A.5 - Composição dos materiais do reator IPEN/MB-01

(Conclusão)			
Material	Densidade (g/cm ³)	Nuclídeos	Fração em massa (1 σ) ^(c)
Moderador Água (H₂O)	0,99820 $\pm$ 0,00002 ^(d)	H	0,1118944
		O	0,8881056
Mola das varetas combustível, controle e de segurança Inconel-600 (massa medida da mola: 11.476 g)	8,1480 $\pm$ 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 $\pm$ 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

Fonte: Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

(a) Valor médio de todos os lotes.

(b) Valor calculado a partir da massa e do volume.

(c) Todas as impurezas dadas nesta tabela têm uma incerteza de aproximadamente 50%.

(d) R.C. Weast (editor), *Handbook of Chemistry and Physics*, 70th Edition, CRC Press ISBN-O-8493-0470-9 (1989).

As impurezas da água do moderador foram medidas e estão apresentadas na Tabela A.6.

Tabela A.6 - Análise do moderador do reator IPEN/MB-01

Característica		Concentração
Nuclídeos	K	2,5 a 12 mg/kg
	Cl	0,1 mg/kg
	F	0,1 mg/kg
	Na	0,1 mg/kg
	Si	1,0 mg/L
	Fe	7,0 µg/kg
	Ca	0,1 mg/L
	Mg	0,1 mg/L
pH		6,5 a 7,5
Condutividade elétrica		1,0 µmhos/cm

Fonte: adaptado de DOS SANTOS et al., 2004b.

Na Tabela A.7 são apresentadas as densidades atômicas para todos os nuclídeos de cada material. A densidade atômica do combustível é obtida segundo a equação:

$$N_i = \rho_{UO_2} f_i \frac{0.60221}{M_i} \text{ átomos/barn-cm},$$

na qual ρ_{UO_2} é a densidade do UO_2 , f_i é a fração em massa do nuclídeo i e M_i é a massa atômica do nuclídeo i .

Tabela A.7 – Composição isotópica dos materiais do reator IPEN/MB-01
(Continua)

Componentes	Concentração (átomos/barn-cm)
Combustível UO₂	
²³⁴ U	9.4528E-06
²³⁵ U	9.9910E-04
²³⁸ U	2.1691E-02
¹⁶ O	4.5464E-02
¹⁷ O	1.7283E-05
Al	5.4512E-06
Mg	4.2864E-06
Fe	4.0602E-06
B	1.1337E-07
Mo	1.2775E-07
Encamisamento e Plug Inferior do Tubo	
Fe	5.9002E-02
Ni	8.1625E-03
Cr	1.6824E-02
Mn	1.4645E-03
Si	6.7934E-04
P	4.0040E-05
C	1.1239E-04
S	1.5617E-05
Co	1.7402E-04
Mo	8.4520E-05
H₂O	
H	6.6736E-02
¹⁶ O	3.3355E-02
¹⁷ O	1.2680E-05
Alumina	
Al	4.4744E-02
¹⁶ O	6.7091E-02
¹⁷ O	2.5504E-05
Absorvedor da Vareta de Controle	
Ag	4.4325E-02
In	7.8517E-03
Cd	2.5894E-03
C	1.5052E-03
S	1.8791E-04
¹⁶ O	1.7696E-03
¹⁷ O	6.7271E-07

Tabela A.7 – Composição isotópica dos materiais do reator IPEN/MB-01
(Conclusão)

Componentes	Concentração (átomos/barn-cm)
Tubo Espaçador	
Mn	1.1581E-03
Si	1.1155E-03
Ni	6.5702E-03
Cr	1.6779E-02
Fe	6.1892E-02
C	2.4078E-04
P	3.1124E-05
Co	1.1450E-04
Tubo Guia	
Fe	5.6943E-02
C	8.8968E-05
Cr	1.6298E-02
Ni	9.1037E-03
Mn	1.1501E-03
P	4.5000E-06
Si	6.6170E-04
Placa Matriz	
C	7.9426E-05
Mn	1.2503E-03
P	5.5440E-05
S	4.4620E-06
Si	8.6616E-04
Ni	7.6641E-03
Cr	1.6705E-02
Mo	2.9831E-05
Fe	6.0036E-02

Fonte: autor da tese.

ANEXO B - O método da cinética inversa

O método mais utilizado para a determinação da reatividade é o Método da Cinética Inversa o qual se baseia na solução das equações da cinética pontual, dadas por:

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

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} N(t) - \lambda_i C_i(t), \quad (\text{B.2})$$

nas quais: $N(t)$ 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 nêutrons atrasados; e

Λ representa o tempo de geração de nêutrons prontos.

Integrando-se a equação (B.2) entre $t' = 0$ e $t' = t$, tem-se:

$$C_i(t) = C_i(0)e^{-\lambda_i t} + \frac{\beta_i}{\Lambda} e^{-\lambda_i t} \int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt'. \quad (\text{B.3})$$

Substituindo a equação (B.3) em (B.1), a seguinte equação para $\rho(t)$ pode ser obtida:

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} + \beta_{eff} - \frac{\Lambda}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t} - \frac{\Lambda}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt' \quad (\text{B.4})$$

Considerando que o reator esteja inicialmente crítico em $t = 0$, obtém-se, para cada grupo i , equação:

$$C_i(0) = \frac{\beta_i}{\lambda_i \Lambda} N(0). \quad (\text{B.5})$$

A integral na equação (B.4) 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 são feitas empregando-se detectores de nêutrons; os quais fornecem uma resposta dependente do tempo para uma reatividade diferente de zero.

Para simplificar a notação, define-se no instante t_k :

$$X_k = \frac{\Lambda}{n_k} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{t_k} + \beta_{\text{eff}}, \quad (\text{B.6})$$

$$Y_{ik} = \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t_k}, \quad (\text{B.7})$$

na qual $C_i(0)$ é dado pela equação (B.5),

$$Z_{ik} = \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t_k} \int_0^{t_k} n(t') e^{\lambda_i t'} dt'. \quad (\text{B.8})$$

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

$$\rho_k = X_k - \frac{\Lambda}{n_k} \sum_{i=1}^6 Y_{ik} - \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^6 Z_{ik}. \quad (\text{B.9})$$

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

$$\rho_{k+1} = X_{k+1} - \frac{\Lambda}{n_{k+1}} \sum_{i=1}^6 Y_{ik+1} - \frac{1}{n_{k+1}} \sum_{i=1}^6 Z_{ik+1}, \quad (\text{B.10})$$

na qual, agora:

$$X_{k+1} = \frac{\Lambda}{n_{k+1}} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{t_{k+1}} + \beta_{eff}, \quad (\text{B.11})$$

$$Y_{ik+1} = Y_{ik} e^{-\lambda_i \Delta t}, \quad (\text{B.12})$$

e

$$Z_{ik+1} = Z_{ik} e^{-\lambda_i \Delta t} + \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t_{k+1}} \int_{t_k}^{t_{k+1}} n(t') e^{\lambda_i t'} dt'; \quad (\text{B.13})$$

com $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ (intervalo de tempo utilizado pelo algoritmo do reatímetro para o cálculo da reatividade).

Os termos das derivadas da equação (B.4) podem ser escritos como:

$$\left. \frac{dN(t)}{dt} \right|_{t_{k+1}} = \frac{N_{k+1} - N_k}{\Delta t}. \quad (\text{B.14})$$

Assumindo também que N pode ser aproximada por uma linha reta, no intervalo Δt com $N(t) = a + bt$, a integral na equação (B.4) resulta:

$$\int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt' \cong \int_{t_k}^{t_{k+1}} (a + bt') e^{\lambda_i t'} dt' = \frac{e^{\lambda_i t_{k+1}}}{\lambda_i} (N_{k+1} - \frac{b}{\lambda_i}) - \frac{e^{\lambda_i t_k}}{\lambda_i} (N_k - \frac{b}{\lambda_i}), \quad (\text{B.15})$$

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

Assim, a equação (B.10), juntamente com as equações (B.11), (B.12) e (B.13) e com os parâmetros cinéticos efetivos dados na Tabela 2.12, constituem um algoritmo tipo passo, onde a reatividade no instante t_{k+1} é obtida utilizando os parâmetros conhecidos no instante imediatamente anterior, t_k .

Este é o algoritmo para a obtenção da reatividade pelo método da cinética inversa. A equação (B.10) para ρ_{k+1} é a equação final.

O início do algoritmo é feito considerando:

$$X_0 = \beta_{eff}, \quad (\text{B.16})$$

$$Y_{i,0} = (\beta_i / \Lambda) N(0), \quad (\text{B.17})$$

$$Z_{i,0} = 0. \quad (\text{B.18})$$

$N(0)$ 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.

ANEXO C –Input do MCNP-5: posição crítica de barra para 32 chapas de níquel - metodologia de cálculo explícita 1

A seguir é apresentado, como exemplo, os dados de entrada utilizados para o cálculo do k_{eff} considerando a posição crítica de barra para o arranjo experimental com 32 chapas de níquel, empregando a metodologia de cálculo explícita 1.

Critical Facility 4.3 w/o u-235 enrichment - ENDF/B-VII.0

```

c
c
c   Ni REFLECTOR ==> 32 PLATES EXPLICITO 1==> PC=55,05%
c
c   BC#1 and BC#2 ARE IN THE SAME POSITION
c
c
c c   array 28x26 with baffle
c   fuel rod definition (material density and geometry)
c   bottom part of fuel rod ----> -9.10 up to 0.00 cm
10    5 1.1186e-01    -1    -8    u=2    $ aluminum (bottom)
20    2 -0.0001      1 -2    -8    u=2    $ gap (bottom)
30    3 8.6572e-02    2 -3    -8    u=2    $ clad (bottom)
c   active fuel rod -----> 0.0 up to 54.84 cm
40    1 6.819487E-02  -1      8 -9    u=2    $ uo2 (pellet)
50    2 -.0001        1 -2     8 -9    u=2    $ gap
60    3 8.6572e-02    2 -3     8 -9    u=2    $ clad (SS)
c   upper part of fuel rod ----> 54.84 up to 60.24 cm
70    5 1.1186e-01    -1      9 -23   u=2    $ aluminum (top)
80    2 -0.0001        1 -2     9 -23   u=2    $ gap (top)
90    3 8.6572e-02    2 -3     9 -23   u=2    $ clad (top)
c   spacer tube - upper part ---> 60.24 up to 98.84 cm
100   0               -28     23 -24   u=2    $ void (tube espac.)
110   7 8.7914E-02    28 -1    23 -24   u=2    $ ss (tube espac.)
120   3 8.6572e-02    2 -3     23 -24   u=2    $ clad (tube espac.)
130   2 -0.0001        1 -2     23 -24   u=2    $ gap (tube espac.)
c   water outside of fuel rod --> moderator
140   4 1.001037E-01    3                u=2
c   guide tube definition
150   4 1.001037E-01    -18     -24    u=3    $ guide tube (inside water)
160   9 8.4303E-02    18 -17    -24    u=3    $ guide tube (tube)
170   4 1.001037E-01    17                u=3    $ guide tube (outside water)

```

```

c      SS control rod #1 definition --> surface 31 define active length
180    6 5.6911e-02      -29      31 -24    u=5    $ control rod BC#1
190    2 -0.0001         29 -2      31 -24    u=5    $ gap
200    3 8.6572e-02      2  -3      31 -24    u=5    $ clad
210    4 1.001037E-01    3  -18      -24    u=5    $ water inside
220    9 8.4303E-02      18 -17      -24    u=5    $ guide tube (SS)
230    4 1.001037E-01    17          -24    u=5    $ water outside
c      plug of control rod#1
240    3 8.6572e-02      -3          30 -31    u=5    $ control rod plug
250    4 1.001037E-01    -3          -30    u=5    $ water below control rod
c      SS control rod #2 definition --> surface 41 define active length
260    6 5.6911e-02      -29      41 -24    u=6    $ control rod BC#2
270    2 -0.0001         29 -2      41 -24    u=6    $ gap
280    3 8.6572e-02      2  -3      41 -24    u=6    $ clad
290    4 1.001037E-01    3  -18      -24    u=6    $ water inside
300    9 8.4303E-02      18 -17      -24    u=6    $ guide tube (SS)
310    4 1.001037E-01    17          -24    u=6    $ water outside
c      plug of control rod#2
320    3 8.6572e-02      -3          40 -41    u=6    $ control rod plug
340    4 1.001037E-01    -3          -40    u=6    $ water below control rod
c      single water cell
360    4 1.001037E-01          -24    u=7    $ water
c
c      burnable poison rod
c      void + acrylic tube + gap + SS clad
400    0          -19      -8      u=4    $ void      (bottom)
401    11 1.06657e-01    19 -20    -8      u=4    $ acrylic   (bottom)
402    2 -0.0001         20 -2     -8      u=4    $ gap
403    3 8.6572e-02      2  -3     -8      u=4    $ clad      (bottom)
c      active AL2O3-B4C rod -----> 0.0 up to 54.84 cm
404    10 9.853889e-02   -1      8  -9      u=4    $ Al2O3-B4C (pellet)
405    2 -0.0001         1  -2      8  -9      u=4    $ gap
406    3 8.6572e-02      2  -3      8  -9      u=4    $ clad      (SS)
c      upper part of burnable poison rod ----> 54.84 up to 60.24 cm
407    0          -2          9  -23    u=4    $ void      (top)
408    3 8.6572e-02      2  -3      9  -23    u=4    $ clad      (top)
c      upper part of burnable poison ---> 60.24 up to 98.84 cm
409    0          -2          23 -24    u=4    $ void
410    3 8.6572e-02      2  -3      23 -24    u=4    $ clad (SS)
c      water outside of burnable poison rod --> moderator
440    4 1.001037e-01    3          u=4
c      fuel rods array 28x26 configuration
c      Universe u=2 means entire fuel rods
c      Universe u=3 means guide tube
c      Universe u=5 means control rod #1 (BC#1)
c      Universe u=6 means control rod #2 (BC#2)
c      Universe u=7 means cell water
c
c

```

```

500      0   -4  5  -6  7              u=15  lat=1  fill=-14:13 -13:12 0:0
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 3 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 5 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
      2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
c      boundary of 28x26 fuel rod array - windows must fit tightly
560      0   -13 14 -15 16   25 -24   fill=15
c      bottom plate (2.20 cm)
570     12 8.670323e-02   -34 35 -36 37   -25   32
c
572      4 1.001037E-01   120 -130 150 -170   25 -24   $ baffle
573      4 1.001037E-01   200 -120 150 -140   25 -24   $ baffle
574      4 1.001037E-01   200 -120 160 -170   25 -24   $ baffle
c ni - 01
700      8 9.12768e-02   201 -200 150 -170   25 -24   $ baffle
701      4 1.001037E-01  202 -201 150 -170   25 -24   $ baffle
c ni - 02
702      8 9.12768e-02   203 -202 150 -170   25 -24   $ baffle
703      4 1.001037E-01  204 -203 150 -170   25 -24   $ baffle
c ni - 03
704      8 9.12768e-02   205 -204 150 -170   25 -24   $ baffle
705      4 1.001037E-01  206 -205 150 -170   25 -24   $ baffle
c ni - 04
706      8 9.12768e-02   207 -206 150 -170   25 -24   $ baffle
707      4 1.001037E-01  208 -207 150 -170   25 -24   $ baffle
c ni - 05
708      8 9.12768e-02   209 -208 150 -170   25 -24   $ baffle
709      4 1.001037E-01  210 -209 150 -170   25 -24   $ baffle

```

c ni - 06

710 8 9.12768e-02 211 -210 150 -170 25 -24 \$ baffle

711 4 1.001037E-01 212 -211 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 07

712 8 9.12768e-02 213 -212 150 -170 25 -24 \$ baffle

713 4 1.001037E-01 214 -213 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 08

714 8 9.12768e-02 215 -214 150 -170 25 -24 \$ baffle

715 4 1.001037E-01 216 -215 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 09

716 8 9.12768e-02 217 -216 150 -170 25 -24 \$ baffle

717 4 1.001037E-01 218 -217 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 10

718 8 9.12768e-02 219 -218 150 -170 25 -24 \$ baffle

719 4 1.001037E-01 220 -219 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 11

720 8 9.12768e-02 221 -220 150 -170 25 -24 \$ baffle

721 4 1.001037E-01 222 -221 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 12

722 8 9.12768e-02 223 -222 150 -170 25 -24 \$ baffle

723 4 1.001037E-01 224 -223 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 13

724 8 9.12768e-02 225 -224 150 -170 25 -24 \$ baffle

725 4 1.001037E-01 226 -225 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 14

726 8 9.12768e-02 227 -226 150 -170 25 -24 \$ baffle

727 4 1.001037E-01 228 -227 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 15

728 8 9.12768e-02 229 -228 150 -170 25 -24 \$ baffle

729 4 1.001037E-01 230 -229 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 16

730 8 9.12768e-02 231 -230 150 -170 25 -24 \$ baffle

731 4 1.001037E-01 232 -231 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 17

732 8 9.12768e-02 233 -232 150 -170 25 -24 \$ baffle

733 4 1.001037E-01 234 -233 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 18

734 8 9.12768e-02 235 -234 150 -170 25 -24 \$ baffle

735 4 1.001037E-01 236 -235 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 19

736 8 9.12768e-02 237 -236 150 -170 25 -24 \$ baffle

737 4 1.001037E-01 238 -237 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 20

738 8 9.12768e-02 239 -238 150 -170 25 -24 \$ baffle

739 4 1.001037E-01 240 -239 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 21

740 8 9.12768e-02 241 -240 150 -170 25 -24 \$ baffle

741 4 1.001037E-01 242 -241 150 -170 25 -24 \$ baffle

c ni - 22
 742 8 9.12768e-02 243 -242 150 -170 25 -24 \$ baffle
 743 4 1.001037E-01 244 -243 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 23
 744 8 9.12768e-02 245 -244 150 -170 25 -24 \$ baffle
 745 4 1.001037E-01 246 -245 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 24
 746 8 9.12768e-02 247 -246 150 -170 25 -24 \$ baffle
 747 4 1.001037E-01 248 -247 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 25
 748 8 9.12768e-02 249 -248 150 -170 25 -24 \$ baffle
 749 4 1.001037E-01 250 -249 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 26
 750 8 9.12768e-02 251 -250 150 -170 25 -24 \$ baffle
 751 4 1.001037E-01 252 -251 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 27
 752 8 9.12768e-02 253 -252 150 -170 25 -24 \$ baffle
 753 4 1.001037E-01 254 -253 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 28
 754 8 9.12768e-02 255 -254 150 -170 25 -24 \$ baffle
 755 4 1.001037E-01 256 -255 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 29
 756 8 9.12768e-02 257 -256 150 -170 25 -24 \$ baffle
 757 4 1.001037E-01 258 -257 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 30
 758 8 9.12768e-02 259 -258 150 -170 25 -24 \$ baffle
 759 4 1.001037E-01 260 -259 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 31
 760 8 9.12768e-02 261 -260 150 -170 25 -24 \$ baffle
 761 4 1.001037E-01 262 -261 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c ni - 32
 762 8 9.12768e-02 263 -262 150 -170 25 -24 \$ baffle
 c
 c water around of 28x26 fuel rod array
 c water around world
 580 4 1.00104E-01 -12 33 -50 #560 #570 #572 #573 #574
 #700 #701 #702 #703 #704 #705 #706 #707 #708 #709
 #710 #711 #712 #713 #714 #715 #716 #717 #718 #719
 #720 #721 #722 #723 #724 #725 #726 #727 #728 #729
 #730 #731 #732 #733 #734 #735 #736 #737 #738 #739
 #740 #741 #742 #743 #744 #745 #746 #747 #748 #749
 #750 #751 #752 #753 #754 #755 #756 #757 #758 #759
 #760 #761 #762
 c outside of reactor tank
 999 0 12:50:-33 \$ outside of world

 c SURFACE DEFINITIONS - SIZE in Centimeters
 c
 c Surface cards -----> cz cylinder
 c px,py and pz planes

```

c
1  cz  .42447      $ uo2 pellet radius
2  cz  .42873      $ clad inner radius
3  cz  .49037      $ clad outer radius
4  px  0.75000     $ half pitch
5  px -0.75000     $ half pitch
6  py  0.75000     $ half pitch
7  py -0.75000     $ half pitch
8  pz  .0000       $ axial origin
9  pz  54.840      $ fuel rod length
12 cz  100.00      $ reactor tank radius
13 px  20.25000    $ window boundary ( 20.25/1.50=13.5 )
14 px -21.75000    $ window boundary ( 21.75/1.50=14.5 )
15 py  18.75000    $ window boundary ( 18.75/1.50=12.5 )
16 py -20.25000    $ window boundary ( 20.25/1.50=13.5 )
17 cz  0.6000      $ guide tube outer radius
18 cz  0.565       $ guide tube inner radius
19 cz  0.2350      $ acrylic tube inner radius
20 cz  0.4000      $ acrylic tube outer radius
23 pz  60.24       $ top aluminum height
24 pz  98.84       $ spacer tube heigth
25 pz  -9.10       $ bottom aluminum height
28 cz  0.365       $ spacer tube inner radius
29 cz  0.416       $ control rod inner radius
30 pz  28.38730    $ end of plug ( 2/3 of 2.50 cm - cone shaped)
31 pz  30.05730    $ active length of control rod (54.84 - 20.00)
32 pz  -11.30      $ bottom SS grid plate
33 pz  -50.00      $ bottom of reactor tank
34 px  29.400      $ bottom grid plate +X
35 px -29.400      $ bottom grid plate -X
36 py  29.400      $ bottom grid plate +Y
37 py -29.400      $ bottom grid plate -Y
40 pz  28.38730    $ end of plug
41 pz  30.05730    $ active length of control rod (54.84 - 20.00)
50 pz  150.00      $ top of reactor tank
120 px 20.849950   $
130 px 21.17995    $
140 py -20.988470   $
150 py -26.151850   $
160 py 24.648150    $
170 py 21.434770    $
c
200 px -22.04037 $ Ni REFLECTOR - START - $ n.01
201 px -22.36362 $ Ni REFLECTOR - END / GAP START - $ n.01
202 px -22.37858 $ n.02
203 px -22.70133 $ n.02
204 px -22.71629 $ n.03
205 px -23.03929 $ n.03
206 px -23.05425 $ n.04
207 px -23.37850 $ n.04

```

208 px -23.39346 \$ n.05
209 px -23.71696 \$ n.05
210 px -23.73192 \$ n.06
211 px -24.05292 \$ n.06
212 px -24.06788 \$ n.07
213 px -24.39063 \$ n.07
214 px -24.40559 \$ n.08
215 px -24.72884 \$ n.08
216 px -24.74380 \$ n.09
217 px -25.06780 \$ n.09
218 px -25.08276 \$ n.10
219 px -25.40676 \$ n.10
220 px -25.42172 \$ n.11
221 px -25.74622 \$ n.11
222 px -25.76118 \$ n.12
223 px -26.08318 \$ n.12
224 px -26.09814 \$ n.13
225 px -26.42014 \$ n.13
226 px -26.43510 \$ n.14
227 px -26.75685 \$ n.14
228 px -26.77181 \$ n.15
229 px -27.09506 \$ n.15
230 px -27.11002 \$ n.16
231 px -27.43152 \$ n.16
232 px -27.44648 \$ n.17
233 px -27.76673 \$ n.17
234 px -27.78169 \$ n.18
235 px -28.10619 \$ n.18
236 px -28.12115 \$ n.19
237 px -28.44565 \$ n.19
238 px -28.46061 \$ n.20
239 px -28.78486 \$ n.20
240 px -28.79982 \$ n.21
241 px -29.12107 \$ n.21
242 px -29.13603 \$ n.22
243 px -29.45603 \$ n.22
244 px -29.47099 \$ n.23
245 px -29.79024 \$ n.23
246 px -29.80520 \$ n.24
247 px -30.12445 \$ n.24
248 px -30.13941 \$ n.25
249 px -30.45966 \$ n.25
250 px -30.47462 \$ n.26
251 px -30.79587 \$ n.26
252 px -30.81083 \$ n.27
253 px -31.13108 \$ n.27
254 px -31.14604 \$ n.28
255 px -31.46629 \$ n.28
256 px -31.48125 \$ n.29
257 px -31.80200 \$ n.29

258 px -31.81696 \$ n.30
 259 px -32.13746 \$ n.30
 260 px -32.15242 \$ n.31
 261 px -32.47642 \$ n.31
 262 px -32.49138 \$ n.32
 263 px -32.81388 \$ n.32
 c

c Cell importance definitions - Default values must be ONE

c
 imp:n 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0

c
 c criticality calculation setup - number of generation and particles
 c Number of particle per generation -----> 5000
 c Number of generation to be considered ---> 425
 c Number of generation to be skipped -----> 25

kcode 800000 1.02 50 4050 4500 0
 ksrc 0.0 0.0 25.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 2.0
 0.0 0.0 10.0 0.0 0.0 4.0 0.0 0.0 5.0
 0.0 0.0 20.0 0.0 0.0 7.0 0.0 0.0 8.0
 0.0 0.0 22.0 0.0 0.0 30.0 0.0 0.0 28.0
 0.0 0.0 35.0 0.0 0.0 38.0 0.0 0.0 40.0
 0.0 0.0 45.0 0.0 0.0 47.0 0.0 0.0 50.0
 3.0 3.0 22.0 3.0 3.0 30.0 3.0 3.0 28.0
 3.0 3.0 35.0 3.0 3.0 38.0 3.0 3.0 40.0
 3.0 3.0 45.0 3.0 3.0 47.0 3.0 3.0 50.0
 -3.0 3.0 22.0 -3.0 3.0 30.0 -3.0 3.0 28.0
 -3.0 3.0 35.0 -3.0 3.0 38.0 -3.0 3.0 40.0
 -3.0 3.0 45.0 -3.0 3.0 47.0 -3.0 3.0 50.0
 6.0 9.0 22.0 3.0 9.0 30.0 9.0 3.0 28.0
 6.0 9.0 35.0 3.0 9.0 38.0 9.0 3.0 40.0
 6.0 9.0 45.0 3.0 9.0 47.0 9.0 3.0 50.0
 -6.0 9.0 22.0 -3.0 9.0 30.0 -9.0 3.0 28.0
 -6.0 9.0 35.0 -3.0 9.0 38.0 -9.0 3.0 40.0
 -6.0 9.0 45.0 -3.0 9.0 47.0 -9.0 3.0 50.0
 9.0 9.0 22.0 3.0 -9.0 30.0 9.0 -3.0 28.0
 9.0 9.0 35.0 3.0 -9.0 38.0 9.0 -3.0 40.0
 9.0 9.0 45.0 3.0 -9.0 47.0 9.0 -3.0 50.0
 -9.0 9.0 22.0 -3.0 -9.0 30.0 -9.0 -3.0 28.0
 -9.0 9.0 35.0 -3.0 -9.0 38.0 -9.0 -3.0 40.0
 -9.0 9.0 45.0 -3.0 -9.0 47.0 -9.0 -3.0 50.0
 12.0 0.0 25.0 -12.0 0.0 25.0 12.0 12.0 25.0
 -12.0 -12.0 25.0 18.0 18.0 25.0 18.0 0.0 25.0
 21.0 0.0 25.0 -21.0 0.0 25.0 -21.0 -21.0 25.0
 15.0 0.0 25.0 -15.0 0.0 25.0 12.0 15.0 25.0

```

-15.0 -15.0 25.0 15.0 15.0 25.0 18.0 0.0 25.0
21.0 0.0 25.0 -21.0 0.0 25.0 -21.0 -21.0 25.0
12.0 0.0 15.0 -12.0 0.0 15.0 12.0 12.0 15.0
-12.0 -12.0 15.0 18.0 18.0 15.0 18.0 0.0 15.0
21.0 0.0 15.0 -21.0 0.0 15.0 -21.0 -21.0 15.0
15.0 0.0 15.0 -15.0 0.0 15.0 12.0 15.0 15.0
-15.0 -15.0 15.0 15.0 15.0 15.0 18.0 0.0 15.0
21.0 0.0 15.0 -21.0 0.0 15.0 -21.0 -21.0 15.0
12.0 0.0 45.0 -12.0 0.0 45.0 12.0 12.0 45.0
-12.0 -12.0 45.0 18.0 18.0 45.0 18.0 0.0 45.0
21.0 0.0 45.0 -21.0 0.0 45.0 -21.0 -21.0 45.0
15.0 0.0 45.0 -15.0 0.0 45.0 12.0 15.0 45.0
-15.0 -15.0 45.0 15.0 15.0 45.0 18.0 0.0 45.0
21.0 0.0 45.0 -21.0 0.0 45.0 -21.0 -21.0 45.0
-15.0 -15.0 50.0 15.0 15.0 50.0 18.0 0.0 50.0
21.0 0.0 50.0 -21.0 0.0 50.0 -21.0 -21.0 50.0
-15.0 -15.0 1.00 15.0 15.0 1.00 18.0 0.0 1.00
21.0 0.0 1.00 -21.0 0.0 1.00 -21.0 -21.0 1.00
-15.0 10.0 26.0 15.0 15.0 26.0 18.0 10.0 26.0
21.0 10.0 26.0 -21.0 10.0 26.0 -21.0 -21.0 26.0
-30.0 -15.0 1.00 30.0 15.0 1.00 30.0 0.0 1.00
30.0 0.0 1.00 -30.0 0.0 1.00 -30.0 -21.0 1.00
-30.0 10.0 26.0 30.0 15.0 26.0 30.0 10.0 26.0
30.0 10.0 26.0 -30.0 10.0 26.0 -30.0 -21.0 26.0
-30.0 10.0 54.0 30.0 15.0 54.0 30.0 10.0 54.0
30.0 10.0 54.0 -30.0 10.0 54.0 -30.0 -21.0 54.0
-30.0 -30.0 1.00 30.0 30.0 1.00 30.0 30.0 1.00
30.0 30.0 1.00 -30.0 30.0 1.00 -30.0 30.0 1.00
-30.0 30.0 26.0 30.0 30.0 26.0 30.0 30.0 26.0
30.0 30.0 26.0 -30.0 30.0 26.0 -30.0 30.0 26.0
-30.0 30.0 46.0 30.0 30.0 46.0 30.0 30.0 46.0
30.0 30.0 46.0 -30.0 30.0 46.0 -30.0 30.0 46.0
c ----> NNNNN.70c nuclide NNNNN from ENDF/B-VII.0 cross section library
c ----> density can be atom/barn.cm
c pastilha - uo2
m1 92235.70c 9.9910e-04 92238.70c 2.1691e-02 8016.70c 4.5464e-02
92234.70c 9.4528e-06 8017.70c 1.7283e-05 13027.70c 5.4512e-06
12024.70c 3.3858e-06 12025.70c 4.2864e-07 12026.70c 4.7193e-07
26054.70c 2.3549e-07 26056.70c 3.7240e-06 26057.70c 8.9324e-08
26058.70c 1.1369e-08 5010.70c 2.2561e-08 5011.70c 9.0809e-08
42092.70c 1.8958e-08 42094.70c 1.1817e-08 42095.70c 2.0338e-08
42096.70c 2.1309e-08 42097.70c 1.2200e-08 42098.70c 3.0826e-08
42100.70c 1.2302e-08
c vazio (gap)
m2 8016.70c 0.0001
c encamisamento da vareta combustivel - SS304 - (clad)
m3 26054.70c 3.5737e-03 26056.70c 5.4049e-02 26057.70c 1.2269e-03
26058.70c 1.5926e-04
24050.70c 7.6190e-04 24052.70c 1.4112e-02 24053.70c 1.5698e-03
24054.70c 3.8276e-04

```

		28058.70c	5.6294e-03	28060.70c	2.0959e-03	28061.70c	8.9630e-05		
		28062.70c	2.8081e-04	28064.70c	6.9692e-05				
		14028.70c	6.2899e-04	14029.70c	3.0750e-05	14030.70c	1.9732e-05		
		16032.70c	1.4885e-05	16033.70c	1.1393e-07	16034.70c	6.2075e-07		
		16036.70c	2.7850e-09						
		42092.70c	1.3093e-05	42094.70c	7.9875e-06	42095.70c	1.3602e-05		
		42096.70c	1.4103e-05	42097.70c	7.9912e-06	42098.70c	1.9985e-05		
		42100.70c	7.8161e-06						
		25055.70c	1.4645e-03	15031.70c	4.0040e-05	6000.70c	1.1239e-04		
		27059.70c	1.7402e-04						
c	água								
m4		1001.70c	6.6736e-02	8016.70c	3.3355e-02	8017.70c	1.2680e-05		
mt4	lwtr.01t								
c	alumina - al2o3								
m5		13027.70c	4.4744e-02	8016.70c	6.7091e-02	8017.70c	2.5504e-05		
c	barra de controle - AG-IN-CD								
m6		47107.70c	2.2969e-02	47109.70c	2.0026e-02				
		49113.70c	3.3606e-04	49115.70c	7.5157e-03				
		48106.70c	3.1590e-05	48108.70c	2.2787e-05	48110.70c	3.3208e-04		
		48111.70c	3.3015e-04	48112.70c	6.2326e-04	48113.70c	3.1746e-04		
		48114.70c	7.4730e-04	48116.70c	1.9628e-04				
		16032.70c	1.7839e-04	16033.70c	1.4271e-06	16034.70c	7.9243e-06		
		16036.70c	2.2629e-08						
		6000.70c	1.5052e-03	8016.70c	1.7696e-03	8017.70c	6.7271e-07		
c	tubo espaçador - SS								
m7		26054.70c	3.7487e-03	26056.70c	5.6697e-02	26057.70c	1.2870e-03		
		26058.70c	1.6706e-04						
		24050.70c	7.5984e-04	24052.70c	1.4074e-02	24053.70c	1.5656e-03		
		24054.70c	3.8172e-04						
		28058.70c	4.5313e-03	28060.70c	1.6871e-03	28061.70c	7.2146e-05		
		28062.70c	2.2603e-04	28064.70c	5.6097e-05				
		25055.70c	1.1581e-03						
		14028.70c	1.0329e-03	14029.70c	5.0494e-05	14030.70c	3.2403e-05		
		15031.70c	3.1124e-05	6000.70c	2.4078e-04	27059.70c	1.1450e-04		
c	refletor de níquel								
m8		28058.70c	6.2016e-02	28060.70c	2.3885e-02	28061.70c	1.0385e-03		
		28062.70c	3.3067e-03	28064.70c	8.4717e-04				
		25055.70c	6.5283e-05						
		6000.70c	7.1308e-05						
		29063.70c	1.7480e-06	29065.70c	7.7912e-07				
		14028.70c	2.2852e-05	14029.70c	1.1571e-06	14030.70c	7.6810e-07		
		16032.70c	1.5860e-06	16033.70c	1.2519e-08	16034.70c	7.0272e-08		
		16036.70c	3.3383e-10						
		26054.70c	1.0654e-06	26056.70c	1.6709e-05	26057.70c	3.8609e-07		
		26058.70c	5.0992e-08						
c	tubo guia - SS								
m9		26054.70c	3.4489e-03	26056.70c	5.2163e-02	26057.70c	1.1841e-03		
		26058.70c	1.5370e-04						
		24050.70c	7.3807e-04	24052.70c	1.3671e-02	24053.70c	1.5207e-03		
		24054.70c	3.7078e-04						

```

28058.70c 6.2785e-03 28060.70c 2.3376e-03 28061.70c 9.9965e-05
28062.70c 3.1318e-04 28064.70c 7.7727e-05
25055.70c 1.1501e-03
14028.70c 6.1266e-04 14029.70c 2.9952e-05 14030.70c 1.9221e-05
15031.70c 4.5000e-05 6000.70c 8.8968e-05
c      BP rod
m10    5010.70c 2.9974e-04 5011.70c 1.2065e-03 6000.70c 3.7656e-04
c      acrylic tube
m11    1001.70c 5.6884e-02 8016.70c 1.4221e-02 6000.70c 3.5552e-02
c      placa matriz - SS
m12    26054.70c 3.63630e-03 26056.70c 5.49964e-02 26057.70c 1.24843e-03
26058.70c 1.62047e-04
24050.70c 7.56501e-04 24052.70c 1.40122e-02 24053.70c 1.55868e-03
24054.70c 3.80042e-04
28058.70c 5.28566e-03 28060.70c 1.96791e-03 28061.70c 8.41568e-05
28062.70c 2.63658e-04 28064.70c 6.54358e-05
14028.70c 8.01962e-04 14029.70c 3.92060e-05 14030.70c 2.51595e-05
16032.70c 4.25282e-06 16033.70c 3.25504e-08 16034.70c 1.77356e-07
16036.70c 7.95715e-10
42092.70c 4.62114e-06 42094.70c 2.81913e-06 42095.70c 4.80079e-06
42096.70c 4.97759e-06 42097.70c 2.82043e-06 42098.70c 7.05364e-06
42100.70c 2.75861e-06
25055.70c 1.25030e-03 15031.70c 5.54400e-05 6000.70c 7.94260e-05
prdmpr 1j 500 -1
print

```

ANEXO D – Análise de incertezas do método da cinética inversa

Ao manipularmos um conjunto de dados objetivando obter outras grandezas dependentes é necessário propagar os erros associados aos dados obtidos via cálculo ou experimentalmente. Essa propagação visa obter o desvio padrão associado a essa grandeza e consequentemente determinar a precisão do processo de medida como um todo. Para estimar o desvio padrão é utilizada a lei geral de propagação de erros.

Sendo x_i é um conjunto de variáveis independente ou correlacionado, as quais possuem desvios $\sigma_x(i)$, e $w(x_i)$ sendo uma função dependente desse conjunto de variáveis, o desvio padrão associado de $w(x_i)$ é dado por:

$$\sigma_w^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial w}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i>j} \frac{\partial w}{\partial x_i} \frac{\partial w}{\partial x_j} \text{cov}(x_i, x_j), \quad (\text{D.1})$$

na qual $\text{cov}(x_i, x_j)$ é a covariância entre as duas variáveis correlacionadas.

No método da cinética inversa, o qual se baseia na solução das equações da cinética pontual, a reatividade é dada pela equação (Anexo B):

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} + \beta_{\text{eff}} - \frac{\Lambda}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t} - \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt'. \quad (\text{D.2})$$

Supondo que o reator está crítico em $t = 0$, pode ser mostrado, para cada família i que:

$$C_i(0) = \frac{\beta_i}{\lambda_i \Lambda} N(0). \quad (\text{D.3})$$

Substituindo a equação (D.3) em (D.2), tem-se:

$$\begin{aligned} \rho(t) = & \frac{\Lambda}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} + \beta_{eff} - \frac{\Lambda}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \frac{\beta_i}{\lambda_i \Lambda} N(0) e^{-\lambda_i t} \\ & - \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt'. \end{aligned} \quad (D.4)$$

Deste modo, a análise de incerteza para o método cinético inverso pode ser realizada aplicando a equação (D.4) à equação (D.1). Assumindo que todas as variáveis independentes são não correlacionadas, o resultado final pode ser escrito como:

$$\sigma_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial \Lambda}\right)^2 (\sigma_\Lambda)^2 + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \beta_i}\right)^2 (\sigma_{\beta_i})^2 + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \lambda_i}\right)^2 (\sigma_{\lambda_i})^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)^2 (\sigma_N)^2}, \quad (D.5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \Lambda} = \frac{1}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt}, \quad (D.6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \beta_i} = 1 - \frac{\lambda_i e^{\lambda_i t}}{N(t)} \int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt' - \frac{N(0)}{N(t)} e^{-\lambda_i t}, \quad (D.7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \lambda_i} = \frac{1}{N(t)} \left[-\beta_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t N(t') e^{\lambda_i t'} dt' + \beta_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} \int_0^t N(t') (t - t') e^{\lambda_i t'} dt' \right], \quad (D.8)$$

$$\frac{\partial \rho(t)}{\partial N(t)} = -\frac{\rho(t)}{N(t)}. \quad (D.9)$$